

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»
Кафедра прикладных информационных технологий и программирования

*Посвящается 35-летию
кафедры прикладных
информационных технологий
и программирования*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И НАУКОЕМКИЕ
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНО-
ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

*Труды IV Всероссийской научно-практической конференции
с международным участием*

12–15 апреля 2016 г.

Часть 1

**Новокузнецк
2016**

УДК 004. 942
М 744

М 744 Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах : труды IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. В 2 ч. Ч1 / Сиб. гос. индустр. ун-т ; под общей редакцией В.П. Цымбала, Т.В. Киселевой. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2016. – 432 с.

Представлены результаты научных исследований и практических работ по созданию математических моделей, теоретических основ наукоемких и ресурсосберегающих технологий, разработке прикладного программного обеспечения, инструментальных программных средств и комплексов, внедрению автоматизированных информационных и управляющих систем.

Ориентирован на инженерно-технических работников предприятий, научных работников, преподавателей вузов, аспирантов и студентов.

Редакционная коллегия:

Протопопов Е.В., Темлянцев М.В., Цымбал В.П.,
Киселева Т.В., Кожемяченко В.И.

УДК 004. 942

© Сибирский государственный
индустриальный университет, 2016

Пленарное заседание

ЕДИНСТВО НАУЧНОГО И ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССОВ. К 35-ЛЕТИЮ ОБРАЗОВАНИЯ КАФЕДРЫ «ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ»

Цымбал В.П.

*Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк, Россия, tsymbal33@mail.ru*

Аннотация. *Представлена ретроспектива научной и учебной деятельности творческого коллектива кафедры, в том числе по созданию математических моделей, тренажеров, автоматизированных обучающих систем, также нового самоорганизующегося струйно-эмульсионного металлургического процесса и агрегата.*

Ключевые слова: *научная, учебная деятельность, математические модели, тренажеры, обучающие системы, новый металлургический процесс.*

Abstract. *A retrospective review of scientific and educational activities of the creative team of the department, including the creation of mathematical models, simulators, automated training systems, and self-organizing of the new jet-emulsion process and metallurgical unit.*

Keywords: *scientific, educational activity, mathematical models, simulators, training systems, a new metallurgical process.*

Научный коллектив образовавшейся в 1981 году кафедры «Математическое обеспечение и применение ЭВМ в металлургии» (с 1997 года кафедры «Информационные технологии в металлургии»), поставил задачу: создать специалистов нового плана (проблемных программистов), одновременно владеющих методами исследования и математического описания объектов и программирования для ЭВМ, и с самого начала своего формирования исповедовал принцип тесного единства науки и учебного процесса.

Начало 80-х годов совпало с ускорением процесса смены поколений ЭВМ на микросхемах Intel (каждые два года). Стали появляться достаточно надежные управляющие ЭВМ, но для их эффективного применения необходимо было создавать прикладное математическое и программное обеспечение, а также специалистов, владеющих этими вопросами. Особенно большой разрыв между возросшими возможностями ЭВМ и недостаточной эффективностью их использования наблюдался в металлургии.

В результате по согласованию с Министерством черной металлургии СССР по специальному приказу Министерства высшего образования РСФСР была в опытном порядке создана новая специализация: «Математическое обеспечение и ЭВМ в металлургии», которая после 20-летнего педагогического эксперимента переросла в специальность «Информационные системы и технологии (по отраслям)».

Кафедра начала первой выпускать таких специалистов не только в регионе, но и в стране, наш опыт затем был воспринят другими вузами (МИСиС, УрФУ, Липецкий политехнический). Первой в университете кафедра ИТМ еще в 1999 году лицензировала и 10 лет выпускала магистров по направлению «Металлургия», а с 2012 года также первой начала выпускать магистров по направлению «Информационные системы и технологии». Вследствие этого в период с 1986 по 2005 годы выпускники кафедры ИТМ заняли преимущественные позиции в подразделениях многих предприятий так или иначе связанных с информационными технологиями. В настоящее время в Новокузнецке и регионе многие наши выпускники стали руководителями предприятий и подразделений по информационным технологиям и частных фирм, а также бизнесменами.

Крупными подразделениями по информационным технологиям ООО «ЕвразТехника» руководят Чикин Я.А., Кукуев О.Ю., Шарапов Б.Н.; директор по развитию ОАО «Сибсвязь» – Иванов В.С.; крупный бизнесмен, директор по развитию группы компаний «Техносистема» – Ратников Е.А.; начальники информационных управлений крупных

банков – Шарапов А.П. и Шипилов А.С.; главный инженер проектов ЗАО «АйСиТи. Автоматизация» – Штайгер А.Ф.; главный конструктор АСУ фирмы СЭТ – АСК, г. Новосибирск – Огнев А.М. и др.

Следует отметить, что в развитии процесса информатизации в нашем Университете коллектив нашей кафедры все эти годы играл и продолжает ведущую роль. Большинство сотрудников управления информатизации и ряда других подразделений, связанных с информатизацией университета, являются выпускниками кафедры ИТМ: Шендриков А.Е., Шуварики Д.П., Куксов И.А., Малинов М.Б., Загребин С.А., Порядина З.И., Лысков А.В., Имнадзе А.И., Середя С.В., Коваленко Н.В., Ермакова Л.А., Милованов М.М.

В последние годы география распространения наших выпускников расширилась, многие из них работают в различных городах России (Новосибирск, Москва, Санкт-Петербург, Воронеж и др.), а также других странах: США, Канада, Австралия, Германия, продолжают обучение в магистратуре в США, Канаде, Германии.

Например, Александр Волынкин, закончил магистратуру, аспирантуру и защитил в Бингхамтонском университете докторскую диссертацию, получил звание доктора философии, специальность «Электроинжиниринг» и большой грант на организацию лаборатории. Михаил Тучков работает в известной компьютерной корпорации «Майкрософт» в г. Сिएтле.

Отметив, таким образом, образовательное направление деятельности творческого коллектива, остановимся на основных результатах его научной деятельности.

Ядро научного коллектива, зародившееся еще в рамках кафедры автоматизации В.П. Цымбал, В.Н. Буинцев, А.Ф. Сакун, А.Г. Падалко, Н.А. Калиногорский, несколько позже С.П. Мочалов, одним из первых в стране начало создавать математические модели металлургических процессов, а затем тренажеры и обучающие системы на их основе. Только для Минчермета Украины в 1981-86 годах было создано 15 тренажеров для операторов различных металлургических агрегатов. Были также разработаны тренажеры для Магнитогорского и Карагандинского металлургических комбинатов. В период с 1986 по 1992 годы был создан ряд тренажерно-обучающих систем, теперь уже на основе появившихся в то время персональных компьютеров, для системы профессионального образования в Санкт-Петербурге. По этим направлениям творческий коллектив занял ведущие позиции в стране, что было, кстати, отмечено руководителем экспертной группы по итогам одной из аттестаций Университета.

По этому направлению защитили кандидатские диссертации: В.Н. Буинцев, А.Ф. Сакун, А.Г. Падалко, С.П. Мочалов, Н.А. Калиногорский, С.А. Шипилов, Н.И. Ливерц, Е.И. Ливерц, С.Н. Калашников.

В 1985-86 годах профессором В.П. Цымбалом впервые в мировой металлургии было создано новое научное направление «Математические модели и новые технологические процессы на основе механизмов самоорганизации», которое позднее в содружестве с С.П. Мочаловым превратилось в более широкое направление: «Математическое моделирование, создание прикладных инструментальных систем и новых металлургических процессов на принципах самоорганизации».

По этому научному направлению защитили докторские диссертации С.П. Мочалов и С.Н. Калашников, кандидатские диссертации В.И. Кожемяченко, И.А. Рыбенко, С.Н. Красноперов, Л.А. Ермакова, А.М. Огнев, А.А. Оленников.

Результаты 25-летней деятельности авторского коллектива ученых, проектировщиков и производственников по созданию и реализации на Запсибметкомбинате крупномасштабной опытной установки нового непрерывного металлургического процесса для прямого восстановления пылевидных руд и отходов (без стадии агломерации) были обобщены в коллективной монографии:

Процесс СЭР – металлургический струйно-эмульсионный реактор /Под ред. В.П. Цымбала. – М: «Металлургиздат», 2014.- 478 с.

Коллектив авторов: Цымбал В.П., Мочалов С.П., Рыбенко И.А., Айзатулов Р.С., Соколов В.В., Падалко А.Г., Кожемяченко В.И., Красноперов С.Ю., Шакиров К.М., Ка-

лашников С.Н., Ермакова Л.А., Оленников А.А., Огнев А.М., Щипанов С.В., Рыбушкин А.А., Суздальцев Е.В.

В заключение следует коротко отметить наиболее важные педагогические и научные результаты деятельности творческого коллектива.

1) Создана новая для металлургии и других технологий специальность проблемных программистов, а на ее основе образовательная технология замкнутых автоматизированных систем с самообучением, отличающаяся широким использованием математического моделирования и ЭВМ в учебном процессе.

2) Впервые в металлургии созданы тренажеры «Сталевар», «Конверторщик» и др., а затем на их основе программы автоматизированных обучающих систем для ЭВМ. В последние годы коллективом создан ряд электронных учебников с тренажерными практикумами для интерактивного обучения, на что сейчас обращено особое внимание Министерства образования и науки.

Коллектив кафедры является лидером по вопросам разработки тренажерно-обучающих систем, электронных учебников и объектно-ориентированных систем программирования.

Разработан целый ряд программно-инструментальных систем для моделирования и инженерных расчетов.

3) Разработаны математические модели для ряда существующих металлургических процессов, а также для принципиально нового металлургического процесса.

4) Впервые в мировой металлургии создана концепция и комплекс моделей принципиально нового металлургического процесса и агрегата с элементами самоорганизации, отличающегося на порядок меньшим удельным объемом и в полтора раза меньшими энергозатратами.

Совместно с проектировщиками и специалистами Запсибметкомбината создана крупномасштабная опытная установка процесса и агрегата СЭР, на которой подтверждена в целом правильность выдвинутой концепции, отработаны основные конструктивные моменты, показана практическая реализуемость новых разработанных технологий.

5) На основе нового агрегата предложена структура мини-заводов полного металлургического цикла: руда (отходы) – сталь, в том числе в мобильном исполнении, что позволит ускорить освоение новых рудных месторождений в Восточных районах страны.

6) В апреле 2014 года на экспертном совете по инновациям при главе города Новокузнецка было принято решение рекомендовать рассмотренный проект пилотного мини-модуля СЭР для инвесторов с поддержкой руководства города, реализация которого позволит снизить негативные последствия деградации традиционной металлургии в Новокузнецке.

7) На кафедре существует с 1986 года и поддерживается в течение многих лет замечательная традиция ежегодных встреч выпускников всех лет с обучающимися студентами. Причем эти встречи самостоятельно организуют и передают эстафету из года в год студенты старших курсов. Это позволяет кафедре, с одной стороны, иметь неформальную обратную связь по вопросам качества обучения, с другой стороны облегчает решение вопросов трудоустройства выпускников, через помощь старших товарищей – младшим. Благодаря этому за все время существования кафедры в управление занятости обратилось всего два наших выпускника.

Хочется надеяться, что столь большой научный и педагогический потенциал коллектива, теперь уже объединенной кафедры «Прикладных информационных технологий и программирования», и в дальнейшем будет востребован в университете.

SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND THE ROLE OF MODELING AND INFORMATION TECHNOLOGY IN TECHNICAL, SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS

Kongoli F.^{1,2,3}

¹CEO, LOGEN Technologies Inc. Montreal, QC, Canada, H3P 2T1

²Chairman, FLOGEN STARS OUTREACH, Montreal, QC, Canada, H3P 2T1

³CEO, FLOGEN Technologies Inc., Wilmington, De, 19808, USA

fkongoli@flogen.com

Abstract. Sustainability is and should be a frequent prerequisite for any project in social, economic and technical systems. Any major development project has or should include sustainability as criteria in evaluating its objectives and outcome. However sustainability is perceived differently in different fields of life and it is much more popular in social and economic systems but anonymous and without a clear profile in technical sciences. Furthermore confusion exists in the society at large on the role of its modeling and high information technologies in the 3 above fields but especially in technical fields.

In this plenary lecture a comparative analysis of the distinctive role of social, economic and technical sciences on sustainability will be carried out. The particularities of each field will be identified and a comparison of the results of the modeling and simulation in each of these three fields will be highlighted. The important role that the technical professionals such as engineers and scientists play in the environmentally balanced development of the world will be emphasized along with a need for better and broader recognitions at the level of the society of scientists and engineers. It will be concluded that the best way to achieve sustainability is a strong cooperation of technical, economic, social and political sciences as fully equal partners in the world.

Keywords: sustainability, economics, society, politics, technology, science, modeling, simulation, engineering.

УДК 669.162.263

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ МЕТАЛЛУРГИИ*

Спирин Н.А., Швыдкий В.С., Лавров В.В.

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
г. Екатеринбург, Россия, n.a.spirin@urfu.ru

Аннотация. В докладе представлен обзор подходов к использованию математического моделирования на примерах исследования теплофизических процессов применительно к слоевым металлургическим печам. Отражены основные проблемы и пути их решения при создании и практическом использовании математических моделей в системах управления технологических процессов. Отмечено, что основой таких моделей должны стать фундаментальные закономерности, отражающие физику технологических процессов в металлургии.

Ключевые слова: математическое моделирование, теплофизика, тепломассообмен, промышленные печи с плотным слоем, доменная печь.

Abstract. The report provides an overview of approaches to the use of mathematical modeling to research the examples of thermal processes by the layer applied to the metallurgical furnaces. It reflected the main problems and their solutions in the creation and practical use of mathematical models in the process control system. It is noted that the basis of such models should be the fundamental laws that reflect the physics of technological processes in industry.

Keywords: mathematical modeling, thermal physics, heat and mass transfer, industrial furnaces with a dense layer, blast furnace.

* Работа выполнена при финансовой поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.A03.21.0006.

The work was supported by Act 211 Government of the Russian Federation, contract № 02.A03.21.0006

Конечная цель разработок систем управления технологическими процессами в металлургии – создание системы, обеспечивающей нормальную работу производства в целом при минимальной себестоимости продукции с учетом ограничений, обусловленных требованиями к качеству продукции, технологии и возможностям оборудования. В области управления технологическими процессами в металлургии сегодня необходимо на основе разработки средств получения объективной информации о параметрах технологического процесса и имеющихся возможностей использования средств интеллектуального обеспечения максимально приблизить управление производством к автоматизированному.

Следует отметить особую роль математических моделей. Известный русский академик А.Н.Крылов в 1937 г. еще в период зарождения вычислительной техники и информатики предупреждал, «что если в вычислительное устройство загрузить информационный мусор, то на выходе вычислителя получим также мусор». Последующий опыт показывает, что только использование адекватных моделей разного класса (математических моделей технологических процессов, моделей знаний, моделей распознавания образов, моделей данных и т. п.) может обеспечить успешность и эффективность функционирования информационных систем. Интеллектуальным ядром такой переработки информации являются математические модели технологических процессов.

Итак, использование математических моделей объектов в процессе их функционирования – одна из основных характерных черт современной теории управления. Заметим, что математическое содержание проблемы управления в трудах крупных математиков получило существенное развитие [1–3]. В то же время академик РАН А.А.Красовский совершенно справедливо отмечал, что «... в развитии современной теории управления с точки зрения практики далеко не все обстоит благополучно. Классическую теорию автоматического управления в основном создавали инженеры для инженеров. Современную теорию управления создают в основном математики для инженеров и во все большей мере математики для математиков» [1]. Последнее с точки зрения практики вызывает определенное беспокойство. Главное негативное влияние на практическое внедрение методов современной теории управления оказывает масса оторванных от практических потребностей и возможностей работ интересных в математическом отношении, но пока бесплодных в отношении современных приложений. Нельзя отрицать право на существование математической современной теории управления как раздела математики, развивающегося по собственным законам и находящего применение по мере возникновения соответствующих потребностей. Однако такая математическая сторона современной теории управления должна быть достаточно четко выделена по отношению к прикладной ее стороне. Главная проблема заключается в принципиальном игнорировании многими математиками такого фундаментального понятия, как физическая сущность и индивидуальные особенности управляемого объекта [2]. Если на начальном этапе развития классической теории автоматического управления, а в последующем в математической теории оптимального управления, такое абстрагирование от физического содержания, несомненно, было полезным с точки зрения разработки основ теории, то сегодня развитие теории управления требует возврата и учета основополагающих свойств объекта управления, но уже на новом качественном уровне развития современной прикладной теории управления. В современной теории математическое содержание во многом подавляет физическое начало, формальный вычислительный подход не может быть перспективным направлением в развитии прикладной теории управления, несмотря на мощь современной вычислительной техники [2; 3]. Следует особо подчеркнуть, что начавшаяся еще в конце 1960-х годов «компьютерная эйфория», сводящая сложную проблему математического моделирования технологических процессов и синтеза систем управления лишь к вычислительной мощности ЭВМ, полностью себя исчерпала. Этим, вообще говоря, во многом и завершается формально-математический этап развития теории моделирования и управле-

ния в XX в. и начинается этап развития физической теории моделирования и управления [2; 3].

Несмотря на информатизацию, развитие вычислительной математики и алгоритмов идентификации, банки сертифицированных (верифицированных) математических моделей остаются слабо заполненными. Это связано с большими интеллектуальными и временными затратами на создание адекватных математических моделей сложных процессов и систем [4]. Для новых процессов и систем высокой сложности это создает большие трудности, так как эти процессы и системы, как правило, не могут функционировать без управления, а математическая модель часто не может быть идентифицирована и сертифицирована без реально функционирующей системы. Методологической основой создания моделей технологических процессов являются общая теория систем и системный анализ [5; 6]. При использовании этой методологии модель технологических процессов состоит из математических моделей не только отдельных элементов, но и взаимодействия между элементами и внешней средой, описываемых оператором взаимодействия (взаимосвязи). Каждый элемент математической модели может иметь различную степень детализации математического описания. Важно лишь, чтобы входные и выходные параметры всех элементов модели находились во взаимном соответствии, что обеспечит получение замкнутой системы уравнений математической модели процесса в целом. В идеале математическое описание каждого элемента должно включать уравнения, параметрами которых являются только физико-химические свойства веществ. Однако получить такое фундаментальное описание свойств всех элементов, их взаимосвязей и при существующем уровне знаний и исследований некоторых явлений металлургических процессов в настоящее время не всегда представляется возможным. Это связано еще и с тем чрезвычайным усложнением математического описания свойств элементов, что оно само по себе приводит к резкому усложнению математической модели процесса в целом и, кроме того, вызывает существенные вычислительные трудности при ее реализации. В связи с этим при практическом использовании описанного алгоритма на том или ином уровне детализации приходится применять и эмпирические соотношения.

Проиллюстрируем эти положения на примерах математического моделирования (в силу профессиональных пристрастий авторов) преимущественно на примерах исследования теплофизики слоевых металлургических процессов.

До начала шестидесятых годов работы кафедры с элементами математического моделирования носили эпизодический характер. Широкое внедрение математических методов в научные исследования обязано сотрудничеству с лабораторией тепломассообмена ВНИИМТ, возглавляемой В.Н.Тимофеевым, а впоследствии – Ф.Р.Шкляром. В этот период было решено множество задач теплофизики слоевых металлургических процессов, обобщенных в фундаментальной научной монографии ВНИИМТ [7]. Заметим, однако, что хотя в этих работах и использовались ЭЦВМ, их нельзя в полной мере отнести к примерам математического моделирования. И это объясняется не слабостью или недостатками упомянутого фундаментального труда, а тем простым обстоятельством, что в то время сами методологии математического моделирования (вычислительного эксперимента) и разработки программного обеспечения еще не были разработаны.

Следует особо подчеркнуть, что хотя материалы данной монографии полностью оригинальны и содержит большое количество впервые (по тому времени) установленных закономерностей, ни один из полученных результатов не вступает в противоречие с физикой сущности процессов тепломассопереноса в плотном слое, установленных проф. Б.И.Китаевым [8; 9], который учил нас избегать «математических красот» и уделять главное внимание физической сущности процесса. По сути дела, если использовать современную терминологию, речь идет о том, что следующий этап совершенствования математической модели процессов тепломассообмена в плотном слое, когда после учета главенствующих факторов, определяющих процесс, приступают к дополнительному включению в модель факторов другого порядка, пусть и очень важных, но влияющих лишь на

количественные характеристики ранее установленной физической картины. Мы здесь не имеем возможности подробно останавливаться на рассмотрении отдельных этапов организации и проведении вычислительного эксперимента, отсылая читателя к первоисточникам. Заметим только, что по мере выработки методологии сотрудники кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» оказались готовы не только к ее восприятию, но и развитию применительно к теплофизическим процессам в металлургии [5; 6].

В полной мере использование методологии системного анализа и вычислительного эксперимента в области теплофизики слоевых металлургических процессов связано с разработкой математических моделей газомеханики слоя. Наличие адекватной модели движения газов в плотном слое позволило связать воедино процессы переноса теплоты, массы, физико-химических превращений и на базе системного подхода перейти к анализу шахтного процесса в целом. Конечно, не все звенья математической модели оказались одинаковой степени полноты и строгости, но основное требование было выполнено: модель учитывала все основные явления и факторы. Варьируя краевые условия процесса, удалось проанализировать процессы в слоевых агрегатах различного типа и найти оптимальные (рациональные) процессы в слоевых агрегатах различного типа. В связи с этим следует отметить два обстоятельства.

Во-первых, если математическое моделирование шахтных печей, работающих без образования фурменного очага и с «сухим» слоем (т.е. без появления расплава в объеме агрегата), позволив решить множество задач, в общем-то, не выявило ранее неизвестных явлений [9–11], то в отношении исследования фурменного очага зоны доменной печи положение существенно изменилось: установлены новые закономерности, которые не могли быть обнаружены экспериментально. Оказалось, что в области горна имеет место существенно циркуляционное движение газа, причем степень циркуляции изменяется в пределах 1,5–2,11. Вычислительный экспериментом установлено, что наибольший эффект дает вдувание в доменную печь малозольных углей с высоким содержанием летучих [5; 12].

Во-вторых, при анализе процессов в агрегатах шахтного типа наиболее узким звеном триады «модель – алгоритм – программа» является не разработка самой структуры математической модели (она относительно проста), а выбор эффективного вычислительного алгоритма и параметрическая идентификация модели [5; 6].

Накопленный к настоящему времени опыт математического моделирования теплофизических процессов и, в частности, слоевых металлургических печей наглядно показывает, что достоверность результатов моделирования и их точность в значительной степени определяется полнотой модели, т.е. степенью учета главных (или определяющих) явлений или процессов, протекающих в агрегате.

Характерным примером являются кинетические модели доменного процесса, позволяющие решать определенный круг практических задач: получать температурные и концентрационные поля доменной печи при плавке специальных чугунов, вдувании горячих восстановительных газов; оценивать влияние на показатели работы печи таких параметров плавки, как восстановимость, степень металлизации железорудных материалов, реакционная способность кокса; определять общие закономерности динамических характеристик печи по различным каналам [13–15]. В ряде случаев кинетические модели обогащаются моделями газодинамики, что расширяет область их применимости [13; 15]. При условиях значительного расширения методов численного моделирования и дальнейшего исследования доменного процесса в перспективе появятся реальные предпосылки для использования полных аналитических кинетико-математических моделей доменного процесса с большими возможностями.

В то же время сегодня существуют серьезные проблемы при создании и использовании кинетических моделей этого класса, которые сводятся к следующим [16; 17]:

– все они не учитывают закономерностей движения материалов в рабочем пространстве печей, вследствие недостаточной изученности и сложности описания движения шихтовых материалов, расплава в доменной печи;

– отсутствие достаточных данных для достоверного описания процессов, протекающих в нижней части печи. Так, нет надежных данных о зависимости скоростей восстановления железа и кремния от температуры, состава шлака и кокса, о коэффициентах теплоотдачи между газом, коксом и жидкими продуктами плавки, не поддается полному математическому описанию продолжительность пребывания чугуна и шлака между горизонтами перехода в жидкое состояние и уровнем фурм;

– проблематичность учета влияния неравномерности распределения компонентов шихты и газа, фракционного состава шихты на ход процессов теплообмена, восстановления окислов, газификации углерода и др.;

– обязательность введения существенных допущений, положенных в основу моделей этого класса, обусловленных необходимостью предварительного определения кинетических характеристик железорудного сырья и соответствующей параметрической настройки модели для конкретных условий доменной плавки ограничивают их практическую применимость для решения задач текущего анализа, прогноза и управления ходом плавки.

Математическое описание закономерностей движения материалов в слоевых агрегатах различного типа – это одна из наиболее сложных проблем, до сих пор не получившая сколь-нибудь достоверного, хотя бы полуколичественного, разрешения. К настоящему времени в литературе предложено множество различных подходов к решению этой проблемы, однако всем им присущ общий недостаток: адекватность математических моделей не доказана.

Данные обстоятельства не позволяют устранить основное противоречие этого подхода, а именно: увеличение сложности модели и числа учитываемых факторов не приводит к повышению надежности результатов моделирования. В силу изложенного можно согласиться с выводом И.Г.Товаровского [18], что «...для прогноза выходных параметров плавки на данном этапе развития целесообразно использовать относительно простые зависимости для тепломассообмена, газомеханики и других процессов, совмещенные с балансовыми уравнениями, результаты которых легко контролировать данными практики». При этом найдет применение натурная информация о работе доменной печи, появится возможность адаптации модели в темпе с процессом, а результаты моделирования можно будет легко контролировать по фактическим (натурным) данным. Подчеркнем дополнительно, что одна из главных проблем математического моделирования доменного процесса связана с разрешением противоречий между сложностью моделируемого процесса и необходимостью решения технологических задач в одном темпе с процессом за заданный интервал времени с использованием реально имеющейся информации. Как показывает практика, с помощью полных моделей доменного процесса решить эту проблему не удастся. Определение конечных результатов доменной плавки с использованием прогнозных моделей этого класса дает не бóльшую достоверность, чем некоторые балансовые модели.

В основу модели теплового состояния современной доменной плавки положены закономерности теплообмена, разработанные Б.И.Китаевым и развитые его учениками [8; 9; 12; 16; 17]. Перспективным для решения рассматриваемых задач оказался натурно-математический подход, разработанный в Сибирском индустриальном университете [19; 20]. Применительно к доменному процессу этот подход использован Б.И.Китаевым и его учениками [9; 21]. Выполненными ими исследованиями установлено, что модель теплового состояния доменной печи в целом пригодна для решения задач контроля и анализа теплового режима этого агрегата. Однако были выявлены и недостатки: особенности дутьевого, газодинамического и шлакового режимов, неравномерность распределения мате-

риалов и газов не находили должного отражения в этой модели, что ограничивало область ее практического применения. Используя методологию системных исследований, последующее совершенствование модели доменного процесса путем учета особенностей газодинамического, дутьевого и шлакового режимов, реально доступной информации о работе доменной печи, неравномерности распределения материалов и газов значительно расширили возможности этой модели [21–23]. Следует особо отметить, что при разработке моделей этих подсистем, параметрической идентификации широко использовались достижения других ведущих отечественных научных школ в области исследования и математического моделирования доменного процесса, а также хорошо проверенные практикой эмпирические уравнения. Однако основой моделей этих подсистем остаются фундаментальные, физические представления о процессах доменной плавки.

Несмотря на многообразие математических моделей доменного процесса, большинство их расчетное, т. е. позволяют исследовать методом перебора один или несколько заранее выбранных вариантов работы печи, но не дают возможности аналитически рассчитывать область оптимальных параметров доменного процесса. Выбор таких параметров зачастую проводится на основании практических данных, интуитивных соображений. Оценивая в целом состояние реально функционирующих систем оптимального управления технологическими процессами и их комплексами в металлургии, следует констатировать, что и здесь имеется внутренняя причина слабого внедрения такого класса систем, особенно для сложных систем [22–24]. Необходимо объединение современной теории оптимального управления с математическими моделями технологических процессов, основу которых составляют фундаментальные закономерности, отражающие физику технологических процессов в металлургии. Такой подход возвращает теорию управления к естественным источникам ее возникновения, но на новом, естественно-математическом витке ее развития [2].

Именно примером физического подхода в использовании теории оптимального управления является решение задач управления выбором состава доменной шихты, распределением топливно-энергетических ресурсов в доменном производстве [23–24]. Наибольшие сложности связаны с разработкой методов количественной оценки влияния того или иного ресурса на показатели плавки в конкретной технологической ситуации.

При постановке и решении требуется не только изучение характеристик, описывающих влияние изменений условий плавки на технико-экономические показатели работы отдельных печей, но и выполнение детального анализа для математического описания как внешних, так и внутренних ограничений, учета различных функций кокса в доменной плавке. При выборе основных ограничений при решении задач оптимизации распределения топливно-энергетических ресурсов применены физическое обоснование и классификация лимитирующих факторов при использовании комбинированного дутья в доменные печи, представленные в работах [8; 9; 12]. Разработанная с учетом этих положений модель позволяет решать задачи оптимального распределения расхода природного газа и технологического кислорода в различных технологических ситуациях.

Математически решение этой задачи выбора оптимального состава доменной шихты сводится к нелинейному математическому программированию. В общем случае, рациональный режим доменной плавки при изменении поставок железорудного сырья для доменных печей, железорудных компонентов аглошихты, а также при изменении свойств кокса обеспечивается многовариантной корректировкой: составом железорудной части агломерационной шихты; расходами флюсов в агломерационную шихту; расходами флюсов в доменную шихту; соотношением компонентов железорудной части доменной шихты; дутьевыми параметрами и параметрами комбинированного дутья; любой комбинацией указанных вариантов [22; 23].

Библиографический список

1. Справочник про теории автоматического управления: под ред. А. А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
2. Колесников А. А. Современная прикладная теория управления; под ред. А. А. Колесникова. – Таганрог: изд. ТРТУ, 2000. Ч. 1 – 400 с., Ч. 2 – 559 с., Ч. 3 – 656 с.
3. Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. – М.: Наука, Физматлит. 1997. – 320 с.
4. Цымбал В.П. Математическое моделирование сложных систем в металлургии. Кемерово; М.: Издательское объединение «Российские университеты»: Кузбассвуиздат – АСТШ, 2006. – 431 с.
5. Введение в системный анализ теплофизических процессов металлургии / Н. А. Спирин, В. С. Швыдкий, В. И. Лобанов, В. В. Лавров. – Екатеринбург: УГТУ, 1999. – 205 с.
6. Элементы теории систем и численные методы моделирования процессов тепломассопереноса / В. С. Швыдкий, Н. А. Спирин, М. Г. Ладыгичев и др. – М.: Интермет-Инжиниринг, 1999. – 520 с.
7. Тепло- и массообмен в плотном слое / Б.И. Китаев, В.Н. Тимофеев, Б.А. Боковиков, В.М. Малкин, В.С. Швыдкий, Ф.Р. Шкляр, Ю.Г. Ярошенко. – М.: Металлургия, 1972. – 432 с.
8. Китаев Б. И., Ярошенко Ю. Г., Лазарев Б. Д. Теплообмен в доменной печи. – М.: Металлургия, 1966. – 355 с.
9. Теплотехника доменного процесса / Б. И. Китаев, Ю. Г. Ярошенко, Е. Л. Суханов и др. – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
10. Тепловая работа шахтных печей и агрегатов с плотным слоем / Гордон Я.М., Боковиков Б.А., Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г. М.: Металлургия, 1989. – 120 с.
11. Математические методы теплофизики. Учебное пособие / В.С. Швыдкий, М.Г.Ладыгичев, В.С. Шаврин и др. – М.: Машиностроение. 1-е изд., 2001. – 232 с., 2-е изд., 2005. – 231 с.
12. Теплообмен и повышение эффективности доменной плавки / Н.А.Спирин, Ю.Н.Овчинников, В. С. Швыдкий, Ю. Г. Ярошенко. – Екатеринбург: УГТУ, 1995. – 243 с.
13. Доброскок В. А., Кузнецов Н. А., Туманов А. И. Математические модели процессов газодинамики и восстановления в доменной печи // Изв. вузов. Черная металлургия. 1985. № 3. С. 145–146.
14. Мойкин В. И., Бабушки Н. М., Боковиков Б. А. Анализ работы доменной печи на комбинированном дутье с применением метода математического моделирования/ Сталь. 1984. № 4. С. 9–14.
15. Дмитриев А. Н. Математическое моделирование доменного процесса. – Екатеринбург: УрО РАН, 2011. – 162 с.
16. Информационные системы в металлургии. / Н. А. Спирин, Ю. В. Ипатов, В. И. Лобанов и др. – Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2001. – 617 с.
17. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О.П. Онорин, Н.А.Спирин, В.Л.Терентьев и др. – Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2005. – 301 с.
18. Товаровский И.Г. Доменная правка. Монография. Днепропетровск, ПОРОГИ, 2009. – 768 с.
19. Теория и практика прогнозирования в системах управления / С.В.Емельянов, С.К.Коровин, Л.П.Мышляев и др. М.: Издат. объединение «Российские университеты», 2008. – 487 с.
20. Прогнозирование в системах управления / Л.П.Мышляев, В.Ф.Евтушенко. СибГИУ. – Новокузнецк: 2002. – 358 с.

21. Загайнов С. А., Онорин О. П., Гилева Л. Ю. Разработка и внедрение математического и программного обеспечения для гибких технологических режимов работы доменных печей // Сталь. 2000. № 9. С. 12–15.

22. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки / Н.А.Спирин, В.В.Лавров, В.Ю.Рыболовлев [и др.]. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 456 с.

23. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н.А.Спирин, В.В.Лавров, В.Ю.Рыболовлев [и др.]. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – 558 с.

24. Оптимизация и идентификация технологических процессов в металлургии / Н. А. Спирин, В. В. Лавров [и др.]. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2006. – 307 с.

УДК 621.745.3

КОНЦЕПЦИЯ ЭНЕРГОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ORIEN

Дорофеев Г.А., Янтовский П.Р., Степанов Я.М. Синельников В.А.

Группа компаний «Ферро-Технолоджи»
г. Тула, Россия, sintikom@mail.ru

Аннотация. В основу технологии положена концепция комплексного производства железа прямого восстановления (ЖПВ), искусственного газообразного топлива (ИГТ) и энергии-электрической и тепловой из неокискованного железорудного сырья и угля с использованием жидкофазного одностадийного процесса нового поколения, получившего название ORIEN.

Ключевые слова: энергометаллургический комплекс, комбинированная технология получения ЖПВ, процесс ORIEN, получение электроэнергии, одностадийный процесс.

Abstract. The base of the technology is the conception of combined production of direct reduced iron (DRI), synthetic fuel gas (IHT) and electric and thermal energy from iron ore raw materials and coal with using of liquid-phase one-stage process known as ORIEN.

Keywords: energy-metallurgical complex, combined technology for producing DRI, ORIEN process, energy production, one-stage process.

В Российской Федерации разработана высокоэффективная комбинированная технология получения железа прямого восстановления, искусственного газообразного топлива и электрической тепловой энергии на основе угля, не имеющая аналогов[1-2].

В основу технологии положена концепция комплексного производства железа прямого восстановления (ЖПВ), искусственного газообразного топлива (ИГТ) и энергии-электрической и тепловой из неокискованного железорудного сырья и угля с использованием жидкофазного одностадийного процесса нового поколения, получившего название ORIEN.

Данный процесс отличается малой капиталоемкостью, ускоренная отдача средств и низкие эксплуатационные затраты, а также высокий уровень экологической эффективности и безопасности, обусловленные энергометаллургическим характером технологии ORIEN. Процесс запатентован в РФ и превосходит аналогичные процессы, появившиеся ранее[3]. Патентование технических решений процесса ORIEN продолжается.

Принципиальной основой технологического процесса ORIEN является восстановление оксидов железа, подаваемых внутрь объема железоуглеродного расплава, углеродом, растворённым в железе и присутствующем в нём в атомнодисперсном состоянии. В результате перехода из твердого в расплавленное состояние восстановление железа приобретает жидкофазный характер, который протекает с исключительно большими скоростями. Удельная скорость при этом составляет значительную величину – 5 кг/(м³.с) и более, что на два порядка превышает аналогичный показатель в доменных и шахтных печах, равный 0,04-0,05 кг/(м³*с). Аналогичную скорость имеет процесс восстановления ок-

сидов железа, образующихся в зоне вдувания кислорода в металлическую ванну кислородного конвертера.

Отличительной чертой технологии ORIEN является недоступная в других способах возможность использования некоксуемых углей и неокискованного железорудного сырья в дефицитные и ценные товарные продукты с повышенной добавленной стоимостью. Новая технология может найти в частности применение в условиях Крымского региона и Юга России с использованием в качестве исходного сырья руд Керченского месторождения и угля Ростовского региона.

Одновременно процесс решает задачу использования природно-легированных руд, содержащих оксиды хрома, титана, ванадия, марганца, позволяя на основе пирометаллургического принципа обогащения руд разделить исходное сырьё на железо и кондиционный самородный шлак, содержащий в повышенных количествах оксиды легирующих элементов и пригодный в качестве исходного сырья для получения ферросплавов соответствующего состава. Фосфористый шлак, учитывая высокое содержание фосфора в рудах Керченского месторождения, может найти применение в качестве удобрения (опыт «Азовстали»).

Другой отличительной особенностью данной технологии является выработка собственной товарной электрической и тепловой энергии, получаемой соответственно от утилизации вторичных энергоресурсов (ВЭР) в виде физического и химического тепла отходящих газов, а также в результате неполного сжигания (окисления) углерода металла, поступающего из угля, газообразным кислородом. Тем самым решается задача энергообеспечения предприятий региона на основе развития малой генерации.

Кардинальным отличием разработанной технологии от существующих способов служит особый характер энергетики процесса, заключающийся в получении из угля методом синтеза искусственного газообразного топлива непосредственно в технологическом цикле и отводе образующихся газов без их дожигания за пределы печи с целью последующего преобразования энерго- и химического потенциала этих газов в электрическую и тепловую энергию на принципе паротурбинной или парогазовой схем, аналогичного процессу Ромелт [3].

Отмеченные выше особенности придают процессу ORIEN энергометаллургический характер и принципиально отличают его от чисто металлургических процессов прямого получения железа, базирующихся на использовании товарной энергии, поступающей извне. Это позволяет не только обеспечить собственные потребности, но и снабдить электроэнергией других потребителей.

В качестве восстановительного агрегата в процессе ORIEN служит электродуговая печь сталеплавильного типа, а исходными материалами являются железорудное сырьё в виде концентрата и /или порошкообразной руды, уголь, а также газообразный кислород и воздух. Схема процесса ORIEN в дуговой печи представлена на рисунке 1.

Получаемыми продуктами являются жидкое железо прямого восстановления с широкими пределами содержания углерода – от 0,05 до 4, 5%, шлак самородного типа, искусственное газообразное топливо энергетического назначения, электрическая и тепловая энергия. Первое из значений углерода отвечает черновому железу, а второе – переловому чугуна.

В отличие от классического доменного процесса и существующих процессов получения ЖПВ новый процесс ориентирован на выплавку металлического сырья с минимальной концентрацией углерода, вплоть до уровня 0,05%. Вместе с тем процесс ORIEN сохраняет все возможности для получения высокоуглеродистых сплавов типа чугуна с содержанием углерода на уровне 4,5%.

Возможность получения железоуглеродистых сплавов с регулируемым широким диапазоном концентрации углерода в конечном металле является существенным преимуществом процесса ORIEN над доменными печами и другими агрегатами восстановительной плавки. В частности, более низкое исходное содержание углерода в железе пря-

мого восстановления по сравнению с чугуном резко уменьшает объём парниковых газов, образующихся при выплавке стали, открывая возможность практического решения давно назревшей проблемы экологии.

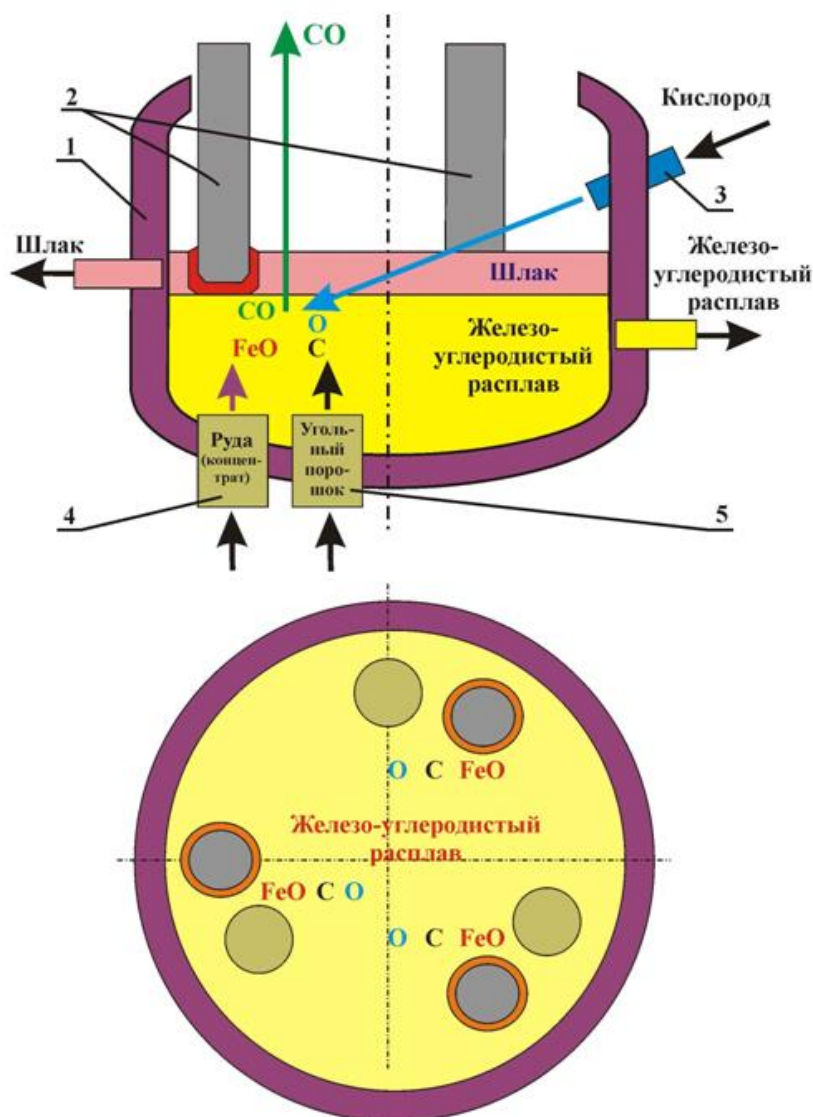


Рисунок 1 – Схема процесса ORIRN в ДСП

Искусственный технологический газ, образующийся в процессе ORIEN, состоит из смеси синтез-газа (CO ; H_2), получаемого в результате газификации угля оксидами железа и монооксида углерода (CO), образующегося в процессе окисления углерода, растворённого в железе, вдуваемым кислородным дутьём. Данные газы в виде их смеси отводятся из печи в энергоблок и далее сжигаются в газовой турбине или паровом котле для получения электрической и тепловой энергии. Общая схема процесса представлена на рисунке 2.

Вырабатываемая электроэнергия частично возвращается в технологический процесс, обеспечивая энергопотребность в тепле, а частично поступает в сеть в качестве товарного продукта для реализации электроэнергии внешним потребителям. Отходящий газ может также применяться в качестве топлива или сырья в других отраслях промышленности. Тем самым решается задача преобразования твердого топлива – угля в газифицированное топливо, которая до сих пор не нашла эффективного решения.

Одновременно с этим предполагается начать работы по созданию первого промышленного энергометаллургического комплекса. Россия располагает соответствующим научно-техническим потенциалом для реализации данной прорывной технологии. Возможной схемой консолидации интеллектуальных, научных, технических и финансовых ресурсов при решении данной проблемы является создание акционерной компании на основе принципов государственно-частного партнерства.

Новые технические решения обладают высокой конкурентоспособностью и могут в ближайшей перспективе стать предметом экспорта и международного сотрудничества в области новых инновационных технологий.

Библиографический список

1. Патент РФ №2511419 «Способ жидкофазного получения железа прямого восстановления». Дорофеев Г.А., Мурат, С.Г. Одородько Т.Н. и др. Опубликовано 10.04.2014. Бюл. №10
2. Dorofeev G.A., Yantovski P.R., Odorodko T.N., Kharitonova J.V., Protopopov A.A., Erofeev V.A., Arsenieva A.A., Murat S.G. New energy - metallurgical production process of direct reduced iron and electrical energy. Proceedings of International scientific and technical Conference named after Leonardo da Vinci. №1, Wissenschaftliche Welt, e.V., 2013, p.54-58
3. Роменец В.А., Валавин В.С., Усачев А.Б. Процесс Ромелт; под ред. В.А. Роменца.-М.: ИД «Руда и металлы», 2005.-400с.

УДК 669.162.263

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РАЗРАБОТКЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ

Дмитриев А.Н.

*Институт металлургии УрО РАН
Екатеринбург, Россия, andrey.dmitriev@mail.ru*

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы экспериментального исследования качественных характеристик железорудного сырья (прочность, восстановимость, температуры размягчения и плавления) и кокса (прочность и реакционная способность) и их влияния на показатели доменной плавки: расход кокса и производительность.

Ключевые слова: доменная плавка, железорудное сырье, кокс, качество сырья, производительность, расход кокса.

Abstract. In work questions of a experimental study of qualitative characteristics of iron ore raw materials (durability, reducibility, softening and melting temperatures) and coke (durability and reactionary ability) and their influences on indicators of blast furnace smelting (coke consumption and productivity) are considered.

Keywords: blast furnace smelting, iron ore raw materials, coke, quality of raw materials, productivity, coke consumption.

Доменное производство является одним из основных звеньев металлургического передела. Эффективность доменной плавки существенно зависит от качества железорудного сырья и кокса, требования к которым становятся все более жесткими. Тенденция изменения сырьевой базы России такова, что запасы коксующихся углей и богатых руд ограничены, и в шихту вводят менее качественное сырье. Это отражается на качестве получаемого кокса и агломерата (окатышей), их физико-химических свойствах, что, в свою очередь, ухудшает технико-экономические показатели работы доменных печей.

Расход кокса в доменной плавке как энергоносителя (источника теплоты и восстановителя) может снижаться, в основном, двумя путями [1].

Во-первых, за счет использования экстенсивных факторов – повышение содержания железа в шихте, использование прямых заменителей кокса (природного газа, уголь-

ной пыли, восстановительного газа), увеличение температуры дутья, высокопотенциальной теплоты (использование плазмотронов) и т.д.

Во-вторых, за счет использования интенсивных факторов – повышение степени использования теплового и восстановительного потенциала газа в результате улучшения качества железорудного сырья и кокса, характеризующегося восстановимостью, прочностью, температурами размягчения и плавления для железорудного сырья, реакционной способностью и прочностью для кокса.

Резервы первого пути в значительной степени исчерпаны. Таким образом, главным резервом снижения расхода кокса и улучшения технико-экономических показателей плавки является повышение качества железорудного сырья и кокса.

В Институте металлургии УрО РАН (ИМЕТ УрО РАН) разработана методика анализа влияния качественных характеристик железорудного сырья и кокса на технико-экономические показатели доменной плавки, позволяющая определять металлургическую ценность новых видов сырья на основании анализа представительных проб минерального сырья [2].

Дефицит на Урале железорудного сырья и коксующихся углей вынуждает вовлекать в разработку новые месторождения рудных ископаемых. Предварительная оценка технико-экономических показателей пирометаллургических процессов переработки таких руд по результатам опытно-промышленных испытаний, как это принято на практике в настоящее время, затруднена по техническим и экономическим причинам, так возможен отрицательный результат или даже аварийная ситуация в доменной печи. Методика заключается в следующем.

1) Получение в лабораторных условиях агломерата или окатышей, определение их металлургических свойств (прочность, восстановимость, температуры размягчения и плавления). Восстановимость сырья определяется в соответствии с ГОСТ 17212–84, прочность – ГОСТ 15137–84, температуры начала размягчения и плавления железорудного материала – ГОСТ 26517–85.

2) а. Расчетное прогнозирование свойств кокса (прочность, реакционная способность) на основе свойств составляющих шихты для коксования.

б. Реакционная способность кокса (CRI, %) и горячая прочность (CSR, %) определяются согласно ГОСТ Р 50921–2005.

3) Определение с помощью математических моделей технико-экономических показателей доменной плавки. Математические модели доменной плавки включают в себя балансовую логико-статистическую модель [3] и комплекс двумерных моделей: газодинамики, теплообмена, восстановления, зоны когезии (вязко-пластичного состояния) [4]. Эти математические модели в числе немногих позволяют использовать в качестве исходных данных металлургические характеристики железорудного сырья и кокса, в том числе и в двумерном варианте. Математический анализ позволяет реально оценить возможность использования железорудного сырья и кокса в качестве шихты доменной плавки.

4) Проведение опытно-промышленных испытаний с гарантированным получением положительного результата.

Использование математических моделей позволяет определить количественное влияние показателей качества железорудного сырья на основные технико-экономические показатели доменной плавки.

Изучены три различные пробы окатышей, полученных в лабораторных условиях из железорудных концентратов одного месторождения с различным содержанием диоксида титана. Их химический состав представлен в таблице 1.

Определение восстановимости окатышей было проведено на установке, соответствующей требованиям ГОСТ 17212–84. Сущность метода заключается в восстановлении пробы оксидом углерода при заданных температурных условиях и определении степени восстановления по результатам химического анализа исходной и восстановленной пробы либо потере массы кислорода при восстановлении.

Таблица 1 – Химический состав исследуемых окатышей, %

Номер пробы	TiO_2	V_2O_5	CaO	SiO_2	Fe	MnO	MgO	Al_2O_3
1	3,25	0,75	1,21	3,72	62,0	0,21	2,51	2,83
2	2,13	0,76	0,83	2,63	65,0	0,159	1,35	2,58
3	2,56	0,55	1,23	4,12	61,1	0,24	2,48	2,50

Расчетные степени восстановимости представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные степени восстановимости окатышей

№ пробы	Степень восстановления			
	Абсолютная (max степень окисленности), %	Абсолютная (потеря массы), %	Фактическая, %	Абсолютная степень восстановления исходной пробы
1	79,86	55,46	79,70	0,75
2	67,64	47,67	67,32	0,98
3	82,78	56,37	82,66	0,70

Результаты исследования прочности окатышей при низкотемпературном восстановлении по ISO 13930 приведены в таблице 3, температурного интервала размягчения в таблице 4.

Таблица 3 – Результаты исследования прочности окатышей при низкотемпературном восстановлении, %

Показатель\ № пробы	1	2	3
LTD _{+6,3}	65,71	69,92	78,58
LTD _{-3,15}	12,87	11,39	9,19
LTD _{-0,5}	2,17	1,67	6,43

Таблица 4 – Результаты исследования температурного интервала размягчения окатышей

Показатель\ № пробы	1	2	3
Температура начала размягчения, °C	1210	1180	1130
Температура конца размягчения, °C	1300	1310	1340
Температурный интервал размягчения, град.	90	130	210

Таким образом, лабораторными исследованиями трех проб лабораторных железорудных окатышей с различным содержанием диоксида титана установлено, что лучшей восстановимостью обладают окатыши (проба 2) с наименьшим содержанием TiO_2 . Наибольшей прочностью при восстановлении обладают окатыши (проба 3) со средним содержанием диоксида титана. Наибольшей температурой начала размягчения и наименьшим температурным интервалом размягчения обладают окатыши (проба 1) с наиболее высоким содержанием TiO_2 .

Используя химический состав железорудных окатышей, показатели их восстановимости и прочности с помощью балансовой логико-статистической модели [3] рассчитали основные показатели доменной плавки (таблица 5). Результаты расчета показателей доменной плавки для проб лабораторных окатышей № 2 и 3 близки между собой, поэтому в таблице приведены только результаты для пробы 3. Обращает на себя внимание вы-

сокое содержание диоксида титана в доменном шлаке и низкий выход шлака. Поэтому промышленная реализация доменной плавки железорудных окатышей с подобным содержанием TiO_2 потребует изменения технологии.

Таблица 5 – Расчетные технико-экономические показатели в условиях доменной печи объемом 2200 м³

Показатели	Ед. изм.	Вариант 1 (проба 3)	Вариант 2 (Проба 1)
Производительность	т/сутки	7264	7210
Расход руды	кг/т чугуна	1724	16934
Расход кокса	кг/т чугуна	320,8	322,5
Расход газообразного топлива	м ³ /т чугуна	74,6	74,6
Дутье: температура	°С	1145	1145
влажность	г/м ³	26	26
кислород	%	31,5	31,5
Колошниковый газ:			
температура	°С	154	155
количество	м ³ /т чугуна	1459	1424
состав: CO	%	24,1	23,9
CO_2	%	22,3	22,4
H_2	%	12,8	13,0
Состав чугуна: Si	%	0,07	0,07
Ti	%	0,14	0,15
Mn	%	0,29	0,128
V	%	0,454	0,541
Количество шлака	кг/т чугуна	358,0	315,0
Состав шлака: CaO	%	32,55	28,91
MgO	%	12,97	13,49
SiO_2	%	26,68	23,69
Al_2O_3	%	15,15	17,05
TiO_2	%	10,53	14,82
MnO	%	0,36	0,16
V_2O_5	%	0,28	0,33

Таким образом, показана возможность реализации предложенной методики [2] анализа влияния качественных характеристик железорудного сырья и кокса на технико-экономические показатели доменной плавки.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 16-08-00062.

Библиографический список

1. Аржадеева Г.Ю., Дмитриев А.Н., Пастухова З.Н., Чесноков Ю.А. Качество железорудного сырья и кокса – резерв совершенствования технологии доменной плавки / Сборник трудов Седьмой международной научно-практической конференции «Исследо-

вание, разработка и применение высоких технологий в промышленности». Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. 28-30.04.2009, Санкт-Петербург, Россия. Санкт-Петербург, Издательство Политехнического университета, 2009. С. 301-302.

2. Dmitriev A.N., Vitkina G.Yu., Chesnokov Yu.A. Methodical Basis of Investigation of Influence of the Iron Ore Materials and Coke Metallurgical Characteristics on the Blast Furnace Smelting Efficiency / Advanced Materials Research, Vols. 602-604 (2013). P. 365-375.

3. Ченцов А.В., Чесноков Ю.А., Шаврин С.В. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 164 с.

4. Дмитриев А.Н. Математическое моделирование доменного процесса. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. – 163 с.

УДК 004.942:622.23

ОБОСНОВАНИЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК

Фрянов В.Н., Павлова Л.Д.

Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк, Россия, lara@rdtc.ru

Аннотация. Доказана адекватность результатов численного моделирования и аналитического решения. Обоснована возможность применения численного метода для решения практических задач геомеханики. Установлено, что при увеличении ширины выработки высота свода естественного равновесия и вертикальные смещения пород кровли возрастают по степенной зависимости, а наиболее устойчивой является выработка круглой формы поперечного сечения.

Ключевые слова: выработка, геомассив, коэффициент концентрации, метод конечных элементов, модель, напряжения, остаточная прочность, устойчивость, численное моделирование.

Abstract. Proved the adequacy of the results of numerical modeling and analytical solution. The possibility of the use of numerical methods for solving practical problems of geomechanics. It was found that increasing the width of the mine working height of ark of natural equipoise and vertical displacement of the roof rocks increases in power dependence, and the most stable is the development of circular cross-sectional shape.

Keywords: mine working, geomassiv, concentration ratio, finite element method, model, stresses, residual strength, stability, numerical modeling.

В настоящее время уровень развития техники и технологии проведения подземных выработок на угольных шахтах позволяет осуществлять их проходку любой формы и размеров. Однако возникает проблема обеспечения устойчивости пород в окрестности выработок большого поперечного сечения, в том числе при сложной форме контура выработки [1, 2]. Экспериментально в лабораторных и натурных условиях установлено, что форма и размеры выработок существенно влияют на эксплуатационные качества подземных сооружений. При ширине выработок 6-12 м (монтажные и демонтажные камеры, сопряжения и пересечения) смещения кровли превышают предельные, что приводит к разрушению элементов крепи и аварийному состоянию выработки. В выработках сложного поперечного сечения, выступающих и угловых участках контура возникают концентраторы напряжений, превышающих предел прочности пород, что способствует формированию зон отжима, пучения, вывалов и уменьшению площади поперечного сечения выработок по сравнению с проектной.

Таким образом, возникает актуальная научно-практическая задача выявления закономерностей формирования участков разрушения горных пород при изменении размеров и контура поперечного сечения выработок для обеспечения их устойчивости.

Наиболее надёжным методом решения поставленной задачи является шахтный эксперимент, однако его осуществление связано с большими материальными и трудовыми

ми затратами, а также сложностью обеспечения идентичности условий эксперимента при изменении пространственно-временного положения выработок на шахтах.

В настоящей работе предлагается решить поставленную задачу по результатам численного моделирования напряжённо-деформированного состояния (НДС) геомассива в окрестности горных выработок. Модель горного массива представлена в виде вертикального разреза, ослабленного горными выработками. Исходное НДС принято гидростатическим, то есть вне зоны влияния горных выработок вертикальные и горизонтальные напряжения равны, а коэффициент бокового давления $\lambda=1$. Длина по простиранию породной толщи принята 200 м, по высоте – 350 м, глубина расположения выработки 300 м. Неоднородная породная толща представлена угольным пластом мощностью 3 м и вмещающими пласт породами в виде аргиллитов, алевролитов и песчаника (фрагмент литологической колонки приведен на рисунке 1). Предел прочности угля в пласте 10 МПа, пород 30-60 МПа. Выбор размеров поперечного сечения выработок осуществлён в соответствии с требованиями действующих технологических схем [3].

Задачи численного эксперимента заключаются в установлении зависимости ширины выработки от параметров НДС; обосновании формы выработки с максимальной устойчивостью пород на контуре.

Численное моделирование осуществлялось методом конечных элементов с использованием авторского пакета компьютерных программ [4-6]. При численном решении поставленных задач определялись следующие параметры НДС: отношение остаточной прочности пород к исходной; вертикальные и горизонтальные смещения пород в окрестности выработки, вертикальные и горизонтальные напряжения в породах вблизи горной выработки.

На первом этапе проведена оценка адекватности результатов численного моделирования посредством сравнения с аналитическим решением для выработки круглого сечения диаметром 1, 7 м.

В таблице 1 приведены коэффициенты концентрации вертикальных и горизонтальных напряжений, полученные по результатам численного решения и вычисленные аналитически по формулам [7]:

$$K_r = \left[\frac{1+\lambda}{2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right) + \frac{1-\lambda}{2} \left(1 + 3 \frac{r_0^4}{r^4} - 4 \frac{r_0^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \right]; \quad (1)$$

$$K_\theta = \left[\frac{1+\lambda}{2} \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right) - \frac{1-\lambda}{2} \left(1 + 3 \frac{r_0^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right], \quad (2)$$

где σ_r , σ_θ – нормальные радиальное и тангенциальное напряжения в полярной системе координат;

r_0 – радиус выработки;

r , θ – полярные координаты.

Как следует из таблицы, среднеквадратические отклонения коэффициентов концентрации напряжений являются незначительными и объясняются различием структуры геомассива: в численном методе принят слоистый неоднородный геомассив, а при аналитическом решении – однородный изотропный. В целом результаты расчётов подтверждают соответствие результатов численного и аналитического решений, что позволяет использовать численное моделирование для решения поставленных задач.

Исследование влияния размеров выработок на параметры НДС.

В действующих нормативных документах, например [8], влияние размеров выработок на смещения их контура предлагается оценивать с помощью коэффициента $k_{ш}$, который вычисляется по формуле

$$k_{ш} = 0,25 (1 - 1) \quad (3)$$

где B – ширина выработки, м.

Таблица 1 – Результаты численного и аналитического решений в окрестности выработки круглого сечения

Радиальная координата	Коэффициент концентрации радиальных напряжений		Коэффициент концентрации тангенциальных напряжений		Разность коэффициентов концентрации радиальных напряжений	Разность коэффициентов концентрации тангенциальных напряжений
	аналитическое решение	численное решение	аналитическое решение	численное решение		
1,70	0,000	2,000	0,050	1,890	-0,050	0,110
1,80	0,108	1,892	0,120	1,800	-0,012	0,092
2,00	0,278	1,723	0,310	1,530	-0,032	0,193
2,20	0,403	1,597	0,380	1,490	0,023	0,107
2,50	0,538	1,462	0,530	1,440	0,008	0,022
3,00	0,679	1,321	0,680	1,350	-0,001	-0,029
4,00	0,819	1,181	0,840	1,200	-0,021	-0,019
5,00	0,884	1,116	0,900	1,130	-0,016	-0,014
6,00	0,920	1,080	0,910	1,070	0,010	0,010
8,00	0,955	1,045	0,960	1,050	-0,005	-0,005
10,00	0,971	1,029	0,980	1,030	-0,009	-0,001
Среднеквадратическое отклонение					0,004	0,051

В Инструкции [8] принята типовая ширина выработки 5 м. Поэтому при численном моделировании максимальная ширина выработки $B=5\text{м}$.

На рисунке 1 показаны изолинии распределения отношения остаточной прочности пород к исходной прочности.

В качестве критерия разрушения пород принято отношение энергии формоизменения энергии в породах конечного элемента в зоне влияния горной выработки и до начала её проведения. Критическое отношение прочности, при котором происходит разрушение пород, принято 0,7. Из графиков рисунка 1 следует, что высота зоны опасного разрушения пород кровли составляет 2,4 м.

Для примера на рисунке 2 показаны изолинии распределения коэффициента концентрации вертикальных напряжений в окрестности выработки шириной 3 м. Из рисунка следует, что наибольшие значения коэффициентов концентрации вертикальных напряжений выявлены в боках выработки, а в кровле и почве происходит разгрузка пород. Следовательно, вероятным является отжим с боков выработки, пучение пород почвы и снижение устойчивости непосредственной кровли выработки.

При одинаковой площади поперечного сечения круглой и квадратной выработок ($S=9\text{м}^2$) независимо от формы коэффициенты концентрации вертикальных напряжений близки по значениям: на расстоянии 1 м от бока выработки (рисунок 2) коэффициент концентрации равен 1,2, а в таблице 1 – 1,32.

Характер распределения коэффициента концентрации вертикальных напряжений качественно подтверждается при ширине выработки 2 и 5 м.

Для оценки характера изменения параметров НДС при разной ширине выработок построены графики (рисунок 3), из которых следует, что с уменьшением ширины выработки интенсивность влияния горного давления на устойчивость выработок существенно снижается. В качестве критерия изменения влияния параметра НДС на устойчивость выработки принято отношение соответствующего параметра к вычисленному при типовом сечении выработки $B=5\text{м}$.

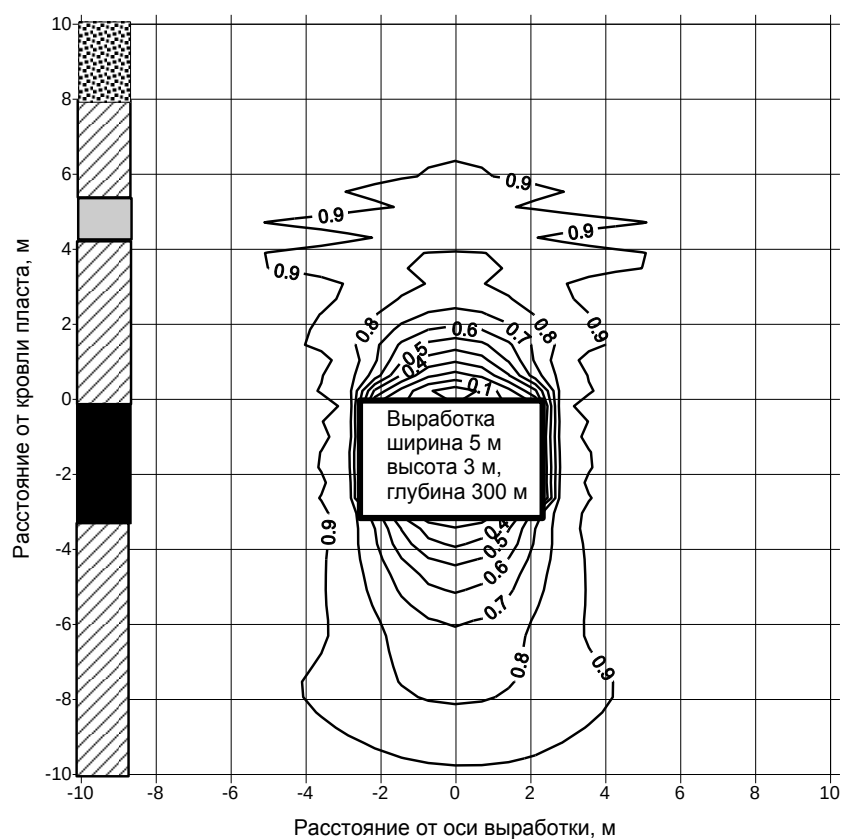


Рисунок 1 – Изолинии распределения отношения остаточной прочности пород к исходной для выработки прямоугольной формы

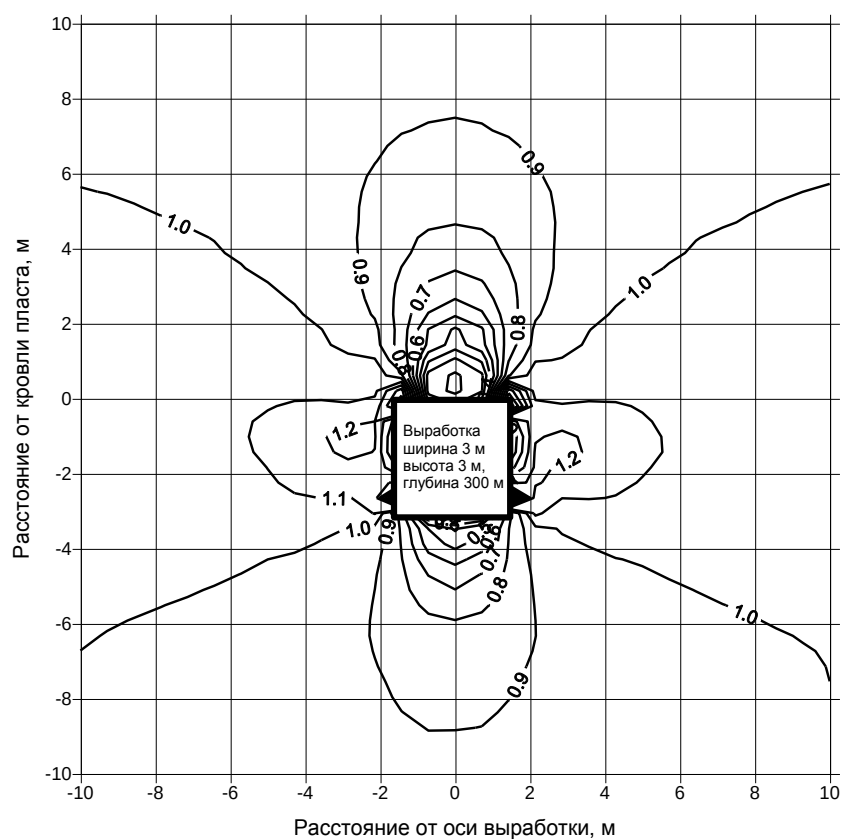


Рисунок 2 – Изолинии распределения коэффициента концентрации вертикальных напряжений в окрестности выработки квадратной формы

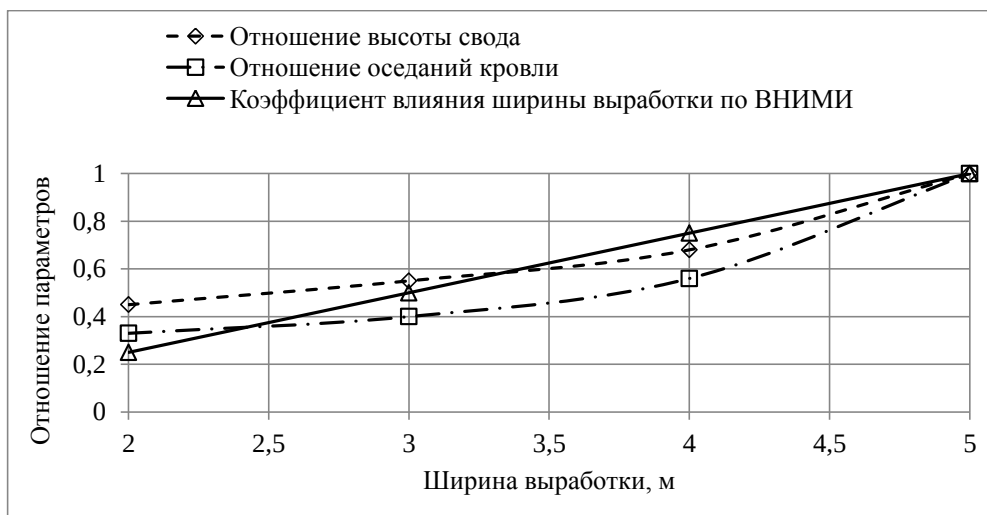


Рисунок 3 – Зависимость параметров НДС от ширины выработки

Как следует из графиков распределения высоты свода вертикальные смещения пород кровли существенно возрастают по степенной зависимости при увеличении ширины выработки. Регламентированная Инструкцией [8] линейная зависимость (3) занижает величины прогнозируемых смещений пород кровли и, соответственно, несущую способность крепи, принятой при малых сечениях горных выработок, и завышает при больших сечениях.

Исследование влияния формы выработок на параметры НДС.

Для исследования принята горная выработка в форме прямоугольника, круга и эллипса. Площадь поперечного сечения всех выработок $S=9 \text{ м}^2$. В качестве базового варианта принята выработка прямоугольной формы шириной 5м (см. рисунок 1).

На рисунке 4 приведено распределение отношения остаточной прочности пород к исходной для выработки эллиптической формы.

Из рисунка следует, что наиболее опасным участком является кровля выработки, где породы разрушены, а выработка без крепи не пригодна к эксплуатации. По сравнению с прямоугольной выработкой в боках эллипсообразной – породы устойчивы и установка крепи не требуется.

По результатам численного моделирования построена гистограмма, приведенная на рисунке 5. Из анализа графиков рисунка 5 можно сделать вывод, что наиболее устойчивой является выработка круглой формы, наименее неустойчивой – выработка эллипсообразной формы. Графики подтверждают, что рекомендованный инструкцией [8] коэффициент влияния ширины не соответствует результатам численного моделирования.

Выводы

1) Доказана адекватность аналитического решения и результатов численного моделирования и обоснована возможность их использования для решения практических задач геомеханики.

2) При исследовании влияния размеров выработок на параметры НДС установлено, что при увеличении ширины выработки высота свода естественного равновесия и вертикальные смещения пород кровли существенно возрастают по степенной зависимости.

3) При исследовании влияния формы выработок на параметры НДС установлено, что при прочих равных условиях, наиболее устойчивой является выработка круглой формы поперечного сечения.

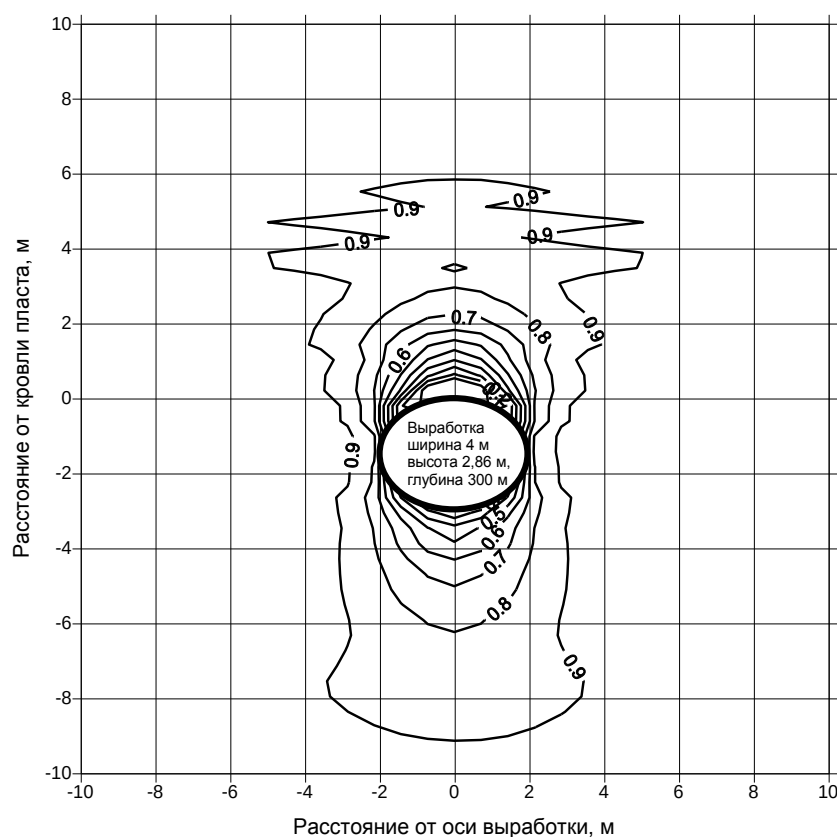


Рисунок 4 – Изолинии распределения отношения остаточной прочности пород к исходной для выработки эллипсообразной формы

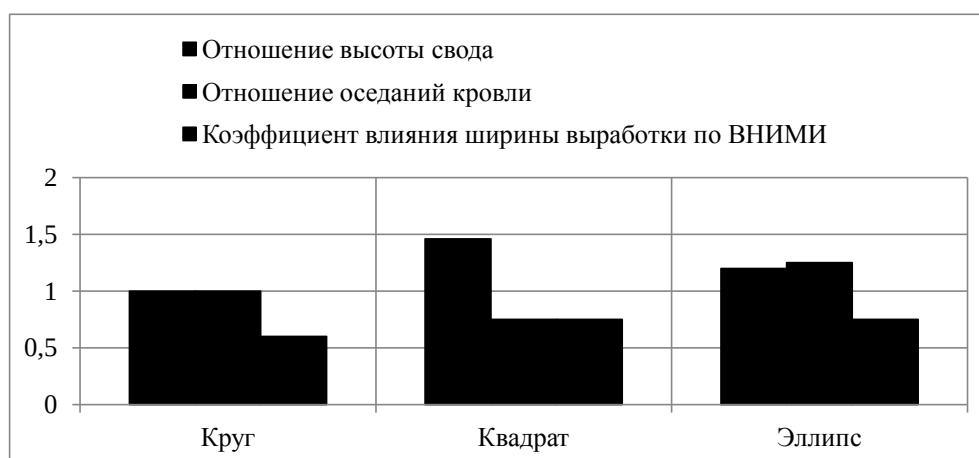


Рисунок 5 – Гистограмма распределения отношений геомеханических параметров при различных формах поперечного сечения выработок

Библиографический список

1. Ерофеев Л.М. Повышение надёжности крепи горных выработок [Текст]/ Л.М. Ерофеев, Л.А. Мирошникова.- М.: Недра, 1988. -245 с.
2. Каретников В.Н. Крепление капитальных и подготовительных горных выработок. Справочник/ В.Н. Каретников, В.Б. Клейменов, А.Г. Нуждихин.-М.: Недра, 1989. – 571 с.
3. Технологические схемы комплексного использования недр при подземной разработке угольных месторождений [Текст] / – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1994. - 394 с.

4. Павлова Л.Д. Геометрическая дискретизация на конечные элементы, конгруэнтные по форме и размерам структурным блокам разрушаемого угленосного массива / Л.Д. Павлова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – № 4. – С. 298-301.

5. Корнев Е.С. Разработка комплекса проблемно-ориентированных программ для моделирования геомеханических процессов методом конечных элементов / Е.С. Корнев, Л.Д. Павлова, В.Н. Фрянов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2013. – № 2. – С. 65–69.

6. Фрянов В.Н. Экспериментально-численный метод прогноза геомеханических параметров технологии подземной угледобычи // В.Н. Фрянов, Л.Д. Павлова // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сборник научных статей по материалам Междунар. научно-практ. конф., Новокузнецк, 2-5 июня, 2015г. – Новокузнецк, 2015. – С. 5 – 13.

7. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений [Текст]/Н.С. Булычев. М.: Недра, 1994. -382 с.

8. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах». Приказ Ростехнадзора от 17 декабря 2013 года № 610 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах» (Зарегистрировано в Минюсте России 19.02.2014 года, регистрационный № 31354). -Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/499066486?block=9>.

УДК 669.02.001

ПРЕДПОСЫЛКИ И ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ САМООРГАНИЗУЮЩЕГОСЯ СТРУЙНО-ЭМУЛЬСИОННОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО РЕАКТОРА

**Цымбал В.П., Кожемяченко В.И., Рыбенко И.А., Мочалов С.П., Падалко А.Г.,
Калашников С.Н., Красноперов С.Ю., Ермакова Л.А., Оленников А.А.**

*Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк, Россия, tsymbal33@mail.ru*

Аннотация. Рассмотрены основные принципы, которые были заложены в создание нового струйно-эмульсионного металлургического процесса и агрегата. Разработка самоорганизующегося реактора-осциллятора, нижняя подача подготовленной в нем рабочей смеси в колонный реактор, а также большое отклонение от термодинамического равновесия, позволяют создавать диссипативные структуры, и благодаря этому управлять соотношением восстановительных и окислительных процессов, а, следовательно, и содержанием углерода в металле.

Ключевые слова: самоорганизующийся, струйно-эмульсионный, реактор-осциллятор, диссипативные структуры, металлургический процесс.

Abstract. The basic principles that were laid in the creation of a new jet-emulsion process and metallurgical unit. Development of self-organizing oscillator reactor bottom feed prepared therein combustible mixture to the column reactor, and a large deviation from the thermodynamic equilibrium, can create dissipative structure, and thereby control the ratio of reducing and oxidizing processes, and therefore the carbon content in the metal.

Keywords: self-organizing, jet-emulsion, reactor-oscillator, dissipative structures, metallurgical process.

Введение и постановка задачи.

Авторы статьи поставили своей целью на основе обобщения своих многолетних исследований достаточно компактно и последовательно изложить основные принципы, которые были заложены в создание нового струйно-эмульсионного металлургического процесса и агрегата.

Замысел, развития которого в дальнейшем привело к созданию самоорганизующегося струйно-эмульсионного процесса, возник в 1983-85 годах, когда наша творческая

группа стала изучать и осмысливать только что появившиеся в русском переводе основополагающие труды по теории самоорганизации И. Пригожина [1] и Г.Хакена [2], а также небольшую, но очень хорошо и доступно написанную брошюру Курдюмова и Малинецкого [3], где были приведены уже имевшиеся в то время примеры практического применения идей и принципов синергетики.

Возникла мысль попытаться создать новый процесс и агрегат, в котором каким-то образом были бы реализованы, хотя бы некоторые из этих принципов. Тем более, что анализ развития и состояния традиционной металлургии показывал, что стремление к повышению единичной мощности агрегатов в сочетании с заложенным в основу производстве чугуна принципом окомкования шихтовых материалов привело к громоздкости и энергетической неэффективности многозвенной технологической схемы.

Идея окомкования шихты находится в противоречии с принципом глобальной экономии энергии (энтропии), поскольку огромная реакционная поверхность рудных материалов, раздробленных на стадии обогащения, затем ценой больших материальных и энергетических затрат агломерационного и коксохимического производства уменьшается, как минимум, в тысячу раз. Прогрев и расплавление агломерированных материалов требует большого времени пребывания, а, следовательно, и большого объема агрегатов. При этом процессы протекают вблизи от состояния термодинамического равновесия.

Устранение отмеченной выше нелогичности и сохранение большой исходной реакционной поверхности шихтовых агрегатов явилось первой задачей, которую предстояло реализовать в сочетании с идеей использования принципов самоорганизации, важнейшими из которых является большое отклонение от термодинамического равновесия, принцип наименьшего принуждения (Ле-Шателье-Брауна) и кругового подчинения. Эти принципы, как оказалось в последующем, нам удалось конструктивно и режимно реализовать.

Более подробно последовательность развития и реализации идеи создания нового процесса описана в нашей коллективной монографии [4]. Ниже поясним основные принципы функционирования процесса и агрегата.

Основные принципы.

Для реализации задачи создания большой реакционной поверхности был использован принцип диспергации шихты встречными струями газа с последующей организацией вынужденного движения образовавшейся газовой взвеси под давлением. Как выяснилось в результате контактов с учеными Института теплофизики СО РАН (г. Новосибирск), скорость вынужденного течения двухфазной среды в канале находится в существенно нелинейной зависимости от газосодержания [5], как видно на рисунке 1. Это явление было использовано для создания газодинамического запирающего выходного канала в разработанном на основе этой идеи реакторе-осцилляторе (рисунок 2), в котором реализована внутренняя обратная связь за счет критического истечения двухфазной среды [6] и влияния давления (по принципу Ле-Шателье-Брауна) на протекании химических реакций с газовой выделением. Это приводит к изменению в реакторе объемного газосодержания

$$\alpha_G = \frac{V_G}{V_G + V_{KF}},$$
 где V_G – объем газа, V_{KF} – объем конденсированной фазы, а затем к изменению

скорости истечения двухфазной среды в соединительном канале, что в свою очередь приводит к изменению давления в шарообразном реакторе. Процесс как бы «бегает» по правой ветви нелинейной зависимости скорости звука C от газосодержания α_G (рисунок 1), при этом скорость истечения двухфазной среды из соединительного канала 3 (рисунок 2) может изменяться в несколько раз.

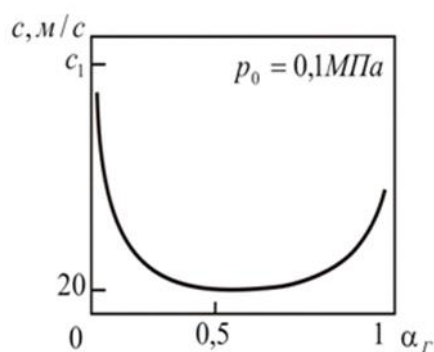


Рисунок 1 – Зависимость скорости звука в водовоздушной смеси от газосодержания

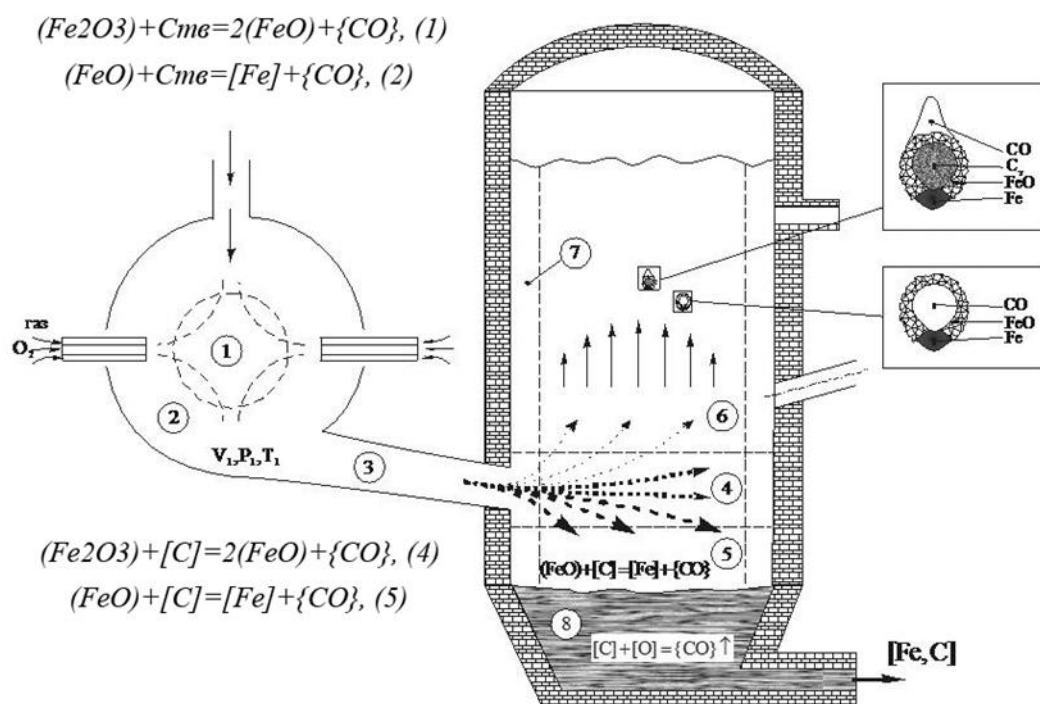


Рисунок 2 – Зонная модель струйно-эмульсионного агрегата

В результате получена возможность создания стационарного колебательного режима на любом заданном уровне давления. На рисунке 3 показан характер согласованных колебательных процессов давления P и объемного газосодержания α_r в реакторе-осцилляторе физической модели, а на рисунке 4 приведен пример регистрации в реальном времени давлений в двухпоршневом насосе подачи омазученной пластифицированной шихты и в шарообразном реакторе опытной установки. Здесь видно, что и в реальном высокотемпературном реакторе, с внутренним диаметром 2 метра, за счет описанного выше газодинамического эффекта запирания двухфазной струи создавалось давление до двух атмосфер. За счет изменения расходов потоков вещества на входе и выходе, а также изменения диаметра соединительного канала 3 (рисунок 2), можно задавать стационарный уровень поддержания давления в этом реакторе.

Таким образом, на основе реактора-осциллятора был создан побудитель расхода (своеобразный карбюратор-компрессор), с помощью которого (в сочетании с переводом процесса в область газовзвеси и эмульсии) оказалось возможным организовать внутренний транспорт рабочей смеси через все элементы агрегата, в том числе через теплоутилизирующие устройства (котел-утилизатор, газовая турбина, кипящий слой, реформатор дыма в синтез-газ). Это позволяет создать условия для глубокого использования энергии

исходного топлива (70-80%). Повышенное давление и изоляция процесса от атмосферы позволили полностью использовать также энергию расширения рабочей смеси (8,6 Дж/моль), то есть «джин загнан в бутылку», что позволило заставить работать реакционную смесь в нужном режиме и совершать самые различные технологические операции, благодаря чему агрегат обладает определенной степенью универсальности.

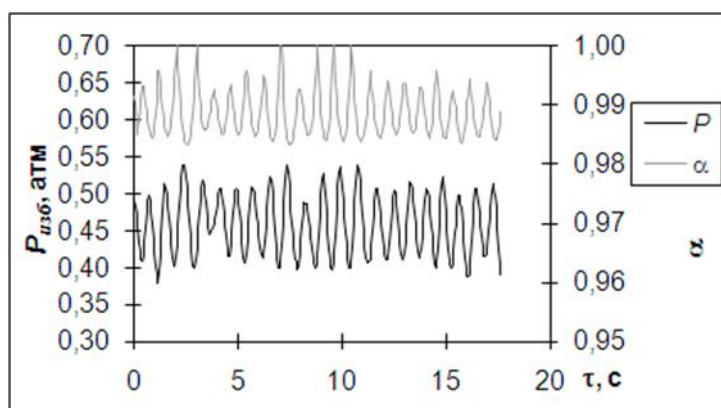
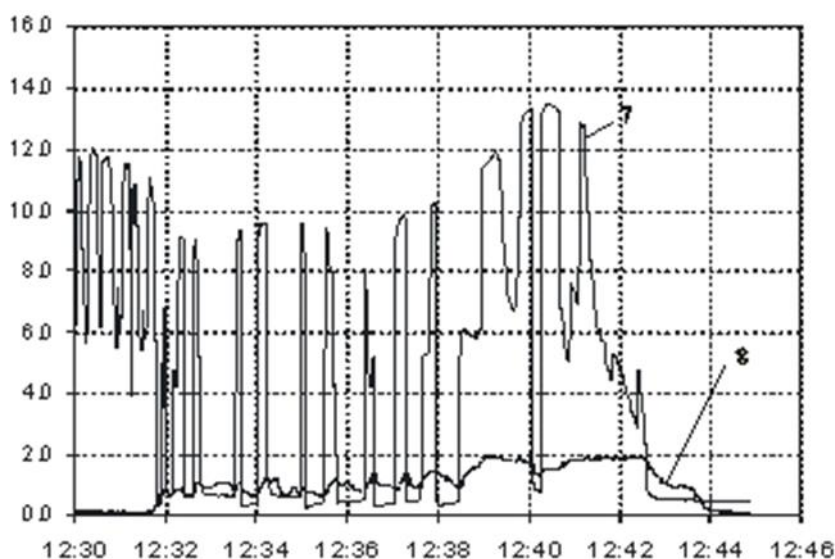


Рисунок 3 – Стационарные колебательные процессы в низкотемпературной физической модели реактора-осциллятора

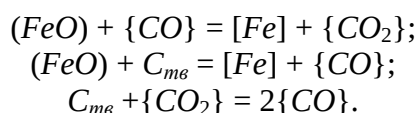


- 7 – давление в поршневом насосе подачи пластифицированной шихты;
8 – давление в шарообразном реакторе-осцилляторе, атм.

Рисунок 4 – Графики изменения давлений по ходу экспериментальной плавки на опытно-промышленной установке

Еще одним важным решением явилась нижняя подача приготовленной в реакторе-осцилляторе рабочей смеси в колонный реактор, на границу шлак-металл. При этом, кинетическая энергия вылетающей из соединительного канала 3 струи затрачивается на интенсивный барботаж газошлаковой эмульсии вместе с внедренными в нее частицами рудных материалов и, превращаясь в потенциальную энергию давления, образует «подушку», своеобразную провальную решетку, которая поддерживает высокий столб (порядка 2-3 метра) газо-шлако-металлической эмульсии и газозвеси (зоны 6 и 7 на рисунке 2). В зоне 6 имеют место преимущественно восстановительные процессы, протекающие на

очень сильно развитых поверхностях контакта на пленках оксида железа на пузырьках CO и на поверхностях оксидный шлак - твердый углерод, по реакциям:



На начальных этапах создания непрерывных сталеплавильных процессов подового и конвертерного типов [6, 7], важным и необходимым преимуществом такого процесса, наряду с отсутствием промежуточных потерь энергии и сырья, считалось наличие отдельных камер (зон) для реализации необходимых технологических операций (обезуглероживание, десульфурация, дефосфорация и др.). Однако, в то время, в связи протеканием процесса близко к состоянию равновесия и, как следствие, низкими скоростями химических реакций, эти камеры получались достаточно громоздкими, а агрегат в целом капиталоемким.

Благодаря переходу в область газозвеси и эмульсии, нижней подачи рабочей смеси, а также поддержанию большого отклонения от термодинамического равновесия, удалось создать (*вместо физически реализуемых камер*) определенные *зоны в виде динамических диссипативных структур*, которые существуют только при условии протекания процесса в определенном кинетическом режиме. При этом задача десульфурации решается за счет наличия огромной реакционной поверхности на газовых пузырьках, а задача дефосфорации может решаться за счет управления гранулометрическим составом шихтовых материалов, подаваемых на границу металл-шлак. На задаче управления содержанием углерода остановимся отдельно.

Одной из важнейших диссипативных структур, более подробно рассмотренных в [8, 9], является гравитационный сепаратор металла, шлака и газа, который образуется в верхней половине колонного реактора (зоны 6 и 7 на рисунке 2). Из-за влияния гравитационной составляющей и близкого к параболическому распределения вектора скорости движения эмульсии в поперечном сечении колонного реактора в нем имеет место сепарация частиц в зависимости от их плотности. Вследствие этого явления, частицы восстановленного железа, имеющие плотность в два-три раза большую, чем частицы оксидов железа, «скатываются» на периферию потока и образуют пристенный слой с отрицательной (обратной) скоростью (зона 7). Это явление визуально наблюдалось нами на физической модели.

Таким образом, с учетом противодействия гравитационных и аэродинамических сил в верхней половине колонного реактора (зона 6) происходит сепарация металла и шлака, а также образуется неравномерное (по плотности, газосодержанию и химсоставу) распределение параметров по высоте агрегата. Распределенность содержания оксидов железа по высоте, что играет важную роль в управлении соотношением восстановительных и окислительных процессов, обуславливается также термодинамически неравновесным характером процессов, в том числе интенсивными потоками вещества и энергии, поступающими снизу через соединительный канал 3 из реактора-осциллятора 2.

Учитывая важную, по существу, центральную роль отмеченной диссипативной структуры, связывающей все остальные зоны и обуславливающей круговорот веществ в агрегате, для ее изучения создана имитационная модель [10, 11], в которой в качестве «первых принципов» – элементов нижнего уровня иерархии, выступают дисперсные частицы шихты с реально заданным гранулометрическим распределением. Ядром этой модели является задача обтекания единичной частицы вертикальным потоком несущего реакционного газа. С помощью специально созданного алгоритма и программы на ЭВМ с использованием метода Монте-Карло проигрывается большое число упругих и неупругих столкновений частиц шихтовых материалов и продуктов реакций, с учетом протекающих в них процессов. Разработанная модель, тестируемая на основе результатов большого

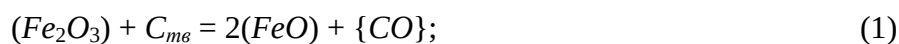
числа компьютерных статистических испытаний по совпадению с законами сохранения, оказалась достаточно адекватной «виртуальной реальностью» изучаемого процесса.

Она позволяет вскрывать внутренний механизм сложных взаимодействий, протекающих в колонном реакторе: оценивать время пребывания в агрегате исходных веществ и продуктов реакций, в том числе металла и шлака; распределение плотности взвешенных дисперсных материалов по высоте агрегата; влияние на ход процесса различных управляющих воздействий, в том числе гранулометрического состава металла, соотношения рудных материалов и топлива-восстановителя и др. Являясь заместителем объекта, эта модель позволяет численным методом проигрывать и разрабатывать проектируемые технологии.

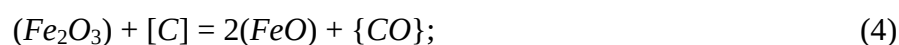
Управление химическим составом металла.

Теперь, после знакомства с основными принципами функционирования процесса и ролью диссипативных структур, можно остановиться на вопросе управления химическим составом металла, прежде всего содержанием углерода. Для этого снова обратимся к зонной модели (рисунок 2).

Подчеркнув, что химические реакции протекают в неравновесных условиях с отводом продуктов реакций, при этом отметим, что реакции восстановления оксидов железа твердым углеродом



имеют преимущественное развитие в зоне 6 (верх колонного реактора), а реакции с растворенным в металле углеродом



имеют место на границе зон 5 и 8 (турбулентный слой на границе металл-шлак) и скорость на порядок большую [12], чем реакции (1, 2).

При этом зоны 5 и 8 отделены динамической «подушкой» (зоной 4) от зоны 6.

Долю оксидов железа, перерабатываемых на границе шлак-металл (зоны 5 и 8) можно увеличивать за счет повышения доли более крупных рудных материалов и дополнительного индукционного подогрева копильника, а в зоне 6 повышать восстановительный потенциал за счет подачи коксика или угля в колонный реактор на верхний уровень газошлаковой эмульсии. Таким образом, возможность создания описанных выше динамических диссипативных структур при определенных газодинамических режимах позволяет раздельно управлять соотношением скоростей восстановительных и окислительных процессов, а, следовательно, и содержанием углерода в получаемом металле.

На большинстве экспериментальных плавов на опытной установке нового процесса на Запсибметкомбинате получалось содержание углерода в диапазоне 0,2-1,7% углерода, а на нескольких плавках было даже получено содержание углерода 0,04-0,10%, но это было связано либо с длительным открыванием летки, либо со значительным переокислением шлака, за счет излишней подачи кислорода. Необходимо отметить, что на опытной установке была возможность реализовать не непрерывный, а непрерывно-периодический режим, но и в реальной технологии, в связи с малой инерционностью процесса, реализация такого режима (с периодическим выпуском и оставлением «болота» в копильнике) возможна.

В приведенной таблице 1 показано два примера прямого получения металла с содержаниями углерода 0,44 и 1,72%, соответствующие этим значениям концентрации ок-

сидов железа в шлаке, а также значения основного управляющего воздействия: соотношения массы шихты к массе восстановителей.

Таблица 1 – Примеры прямого получения металла

Номер эксперимента	C	FeO	Fe ₂ O ₃	Отношение масс шихта/восстановитель	Примечания
20	0,44	37,84	8,36	2,89	Шлак на уровне соединительного канала
20		34,04	5,45	Шлак со стенки колонного реактора на высоте 2 метра от соединительного канала	
29	1,72	6,56	2,29	2,31	Шлак на выпуске металла

Кроме того приведены концентрации оксидов железа в двух пробах шлака, отобранных после эксперимента №20 (по случаю остановки агрегата на реконструкцию) на уровне верхнего среза копильника и на высоте 2 метра на внутренней стенке колонного реактора, что свидетельствует о распределенности содержания оксидов железа по высоте реактора.

Сравнение с известными процессами прямого восстановления.

В последние 20-25 лет разработке процессов прямого восстановления в мире уделяется достаточно много внимания (см. обзор в [4]). Построено или находится в стадии создания более 100 установок прямого восстановления. Среди твердофазных процессов прямого восстановления наиболее продвинутым является «Мидрекс», но, по существу, этот процесс вряд ли можно назвать прямым, так как здесь повторяется та же глобальная энергетическая нелогичность, связанная с окомкованием, что и в традиционной технологии. Более того, если в доменной печи чугун получается в жидком виде, то в этом процессе получается твердый полупродукт. Не следует забывать, что используемая для последующей плавки окатышей или брикетов энергия дуги поступает, в основном, с тепловых электростанций, где тепловой КПД около 37%, то есть лишь одна тонна угля доходит до дуги, в то время как расход кокса в доменной печи менее 400 кг/т. При твердофазном восстановлении экономия получается только за счет отсутствия коксохимического производства, но этим процессом можно перерабатывать только богатые руды.

В этом смысле разрабатываемые процессы жидкофазного восстановления: Ромелт [13], Hismelt, Ausmelt, DIAS и другие [4], обладают определенными преимуществами. В этих процессах, не требующих стадий агломерации, можно перерабатывать пылевидные, в том числе бедные руды, а также металлосодержащие отходы (шламы, окалину). В качестве восстановителя используется энергетический уголь, отработаны конструктивные решения по использованию энергии отходящих газов.

Но, ни в одном из известных процессов непосредственно прямым восстановлением сталь получить не удастся. Получают чугун с содержанием углерода от 2 до 4%. Это связано с тем, что процессы находятся близко к состоянию термодинамического равновесия, а металл и шлак длительное время находятся в контакте друг с другом. Независимое управление составом металла и шлака, а также временем пребывания их в этих агрегатах практически не возможно.

Среди комбинированных процессов прямого восстановления следует выделить процесс Корекс, который доведен до промышленного воплощения и получил определенное развитие. Но он также получился довольно громоздким, в нем тоже не удалось уйти от стадии окомкования. Для предварительного восстановления окисленных окатышей в этом агрегате используется шахтная печь объемом 1000 кубических метров и даже более,

установленная над агрегатом жидкофазного восстановления. Все вместе это сооружение высотой около 100 метров.

Здесь интересно провести аналогию с рассматриваемым в данной статье агрегатом СЭР, в котором, в связи с отказом от стадии агломерации, роль подготовительного агрегата играет шарообразный реактор-осциллятор объемом всего несколько кубических метров. Он же одновременно является компрессором, то есть побудителем расхода, который готовит и проталкивает рабочую смесь через все аппараты агрегата.

Конструктивные и технологические особенности агрегата СЭР.

После такого сравнения в заключение статьи остановимся на основных особенностях конструктивных и технологических решений в агрегате СЭР.

Основу технологической схемы агрегата (рисунок 5) составляют: система подачи шихты 1-5; реактор-осциллятор 6, соединительный канал с газодинамическим самозапираванием 7, рафинирующий отстойник 8, одновременно играющий роль первой ступени мокрой газоочистки, копильник 9, а также система гарнисажного охлаждения 10, канал для перетока газа 11, шлакоприемник 13 с гранулятором 14, система утилизации тепла в кипящем слое или реформации дымовых газов в синтез-газ 17 и система газоочистки 18.

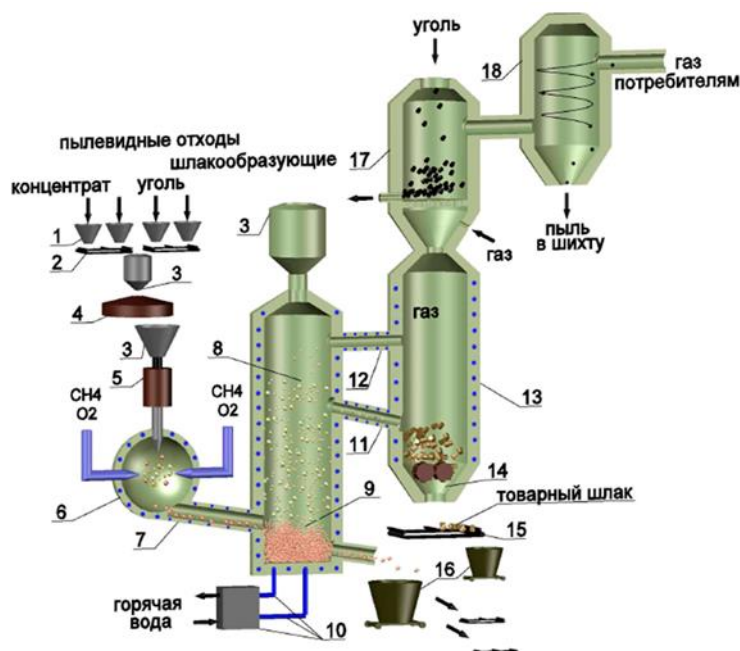


Рисунок 5 – Технологическая схема мини-модуля на основе процесса СЭР

Использование в качестве рафинирующего отстойника вертикального колонного реактора с нижней подачей реакционной газовой смеси в сочетании с существенным отклонением процессов от термодинамического равновесия является важнейшим фактором, который обуславливает возможность разделения потока железоуглеродистого металла, стекающего по периферии колонного реактора и оседающего в копильнике 9 (рисунок 5), и потока обедненного железом шлака, отводимого по наклонному каналу 11 в шлакоприемник 13.

Пылевидная шихта, состоящая из смеси оксидов металлов и твердых восстановителей, эффективно диспергируется в реакционной камере 6. Здесь создается газовая смесь с объемной долей газа порядка 0,99. Вследствие зависимости скорости истечения двухфазной среды от газосодержания (рисунок 1), в соединительном канале 7 образуется аэродинамически запираемый затвор (торможение струи), а в сочетании с обратной связью по газосодержанию (за счет изменения условий протекания химических реакций, а также условий подачи в реактор шихты и кислорода) имеется возможность создавать стацио-

нарный колебательный режим (самоорганизующийся реактор-осциллятор). Созданный в реакторе-осцилляторе 6 высокий потенциал давления, а также полная изоляция процесса от атмосферы, позволяет проталкивать продукты реакций через все находящиеся за основным технологическим агрегатом устройства утилизации энергии без использования высокотемпературных побудителей расхода.

На основе рассмотренного агрегата возможно создание мини-заводов новой структуры в виде независимых друг от друга и параллельно работающих технологических модулей, вместо последовательности крупных агрегатов многозвенного металлургического цикла. Реализация принципа непрерывности исключает необходимость в тяжелом сменном оборудовании (сталеразливочных ковшах, мостовых кранах большой грузоподъемности, тяжелых фундаментах и т.д.). Агрегаты могут быть размещены в относительно легких зданиях, что позволяет быстро окупить вложенные средства. Модули могут работать независимо друг от друга и останавливаться в течение нескольких минут. Предлагаемые разработки открывают возможность создания мини-металлургии «полного цикла», т.е. без использования лома, дефицит и цены на который неуклонно растут. При этом одновременно решаются задачи получения первородного металла, без не окисляемых примесей (меди и никеля), а также использования пылевидных металлосодержащих отходов (окалины, шламов, мелкой стружки и др.). Создание собственной мини металлургии очень важно также для машиностроительных заводов, на многих из которых металлургическое производство находится в очень устаревшем виде.

Заключение.

1) Рассмотрены основные принципы, которые были заложены в создание нового струйно-эмульсионного металлургического процесса и агрегата.

2) Показано, что благодаря нижней подаче, подготовленной в реакторе-осцилляторе рабочей смеси (газовзвеси) в колонный реактор, а также большому отклонению от термодинамического равновесия, в нем создаются диссипативные структуры, позволяющие управлять соотношением восстановительных и окислительных процессов, а, следовательно, и содержанием углерода в металле.

3) Рассмотрены особенности конструкции и функционирования агрегата СЭР, позволяющие реализовать заложенные принципы.

4) Благодаря возможности прямой переработки в этом агрегате пылевидных руд и отходов (без агломерации), создается основа для проектирования компактных мини-заводов с полным циклом производства, от руды до стали.

Библиографический список

1. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. – М.: Мир, 1979. – 512 с.
2. Хакен Г. Синергетика. – М.: Мир, 1980. – 406 с., ил.
3. Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Синергетика – наука о самоорганизации, – М.: Знание, 1983. – 48с – (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Математика, кибернетика», №6).
4. Процесс СЭР – металлургический струйно-эмульсионный реактор / Цымбал В.П, Мочалов С.П., Рыбенко И.А., Айзатулов Р.С., Соколов В.В., Падалко А.Г., Кожемяченко В.И., Красноперов С.Ю., Шакиров К.М., Калашников С.Н., Ермакова Л.А., Оленников А.А., Огнев А.М., Щепанов С.В., Рыбушкин А.А., Суздальцев Е.В. // Под ред. В.П. Цымбала. – М: Металлургиздат, 2014. – 488 с., ил.
5. Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р. Волоновая динамика газо- и парожидкостных сред. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 248 с.
6. Непрерывные процессы выплавки металлов // Сборник трудов совещания «Непрерывные процессы выплавки черных и цветных металлов». – М.: Наука, 1975. – с. 14-28, 55-64.160-167.

7. Бигеев А.М. Непрерывные сталеплавильные процессы. – М.: Металлургия, 1986. – 136с.
8. Использование принципов самоорганизации и диссипативных структур при создании нового струйно-эмульсионного металлургического процесса Цымбал В.П., Кожемяченко В.И., Рыбенко И.А., Падалко А.Г., Оленников А.А. Сб. тр. XIII Международного конгресса сталеплавыльщиков. – М.: Полевской, 2014. – С. 472-477.
9. Tsybmal V.P., Mochalov S.P., Shakirov K.M. Controlling the Composition of the Metal in the direct Reduction of dust-sized Materials and waste Products in a Jet-Emulsion Reactor. – Metallurgist. 2015. Т. 59. № 3, pp. 119-125.
10. Цымбал В. П., Сеченов П.А. Имитационное моделирование гравитационного сепаратора в колонном реакторе струйно-эмульсионного агрегата // Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР: труды научно-практической конференции с международным участием и элементами школы молодых ученых, 3-5 июня 2015 г. – Екатеринбург, 2015. – С. 464-468.
11. Имитационное моделирование гетерогенного сепаратора в агрегате СЭР и проблема применения уравнения Навье-Стокса / В. П. Цымбал, П. А. Сеченов, А. А. Оленников, А. Г. Падалко // Металлургия: технологии, инновации, качество: труды XIX Международной научно-практической конференции, 15-16 декабря 2015 г. – Новокузнецк: СибГИУ, 2015. – Ч. 1. – С. 73-80.
12. Экспериментальные исследования кинетики совместно протекающих реакций в системе железоуглеродистый расплав-шлак-газ / И.А. Телегин, К.М. Шакиров, С.П. Мочалов и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1993. №6. – С. 10-14.
13. Процесс Ромелт / Под ред. В.А. Роменца. – М.: МИСиС, Издательский дом «Руда и металлы», 2005. – 400 с.

УДК 51-74

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ НЕРАВНОВЕСНОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Рыбенко И.А.

*ФГОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет»
г. Новокузнецк, Россия, rybenkoi@rambler.ru*

Аннотация. В работе представлены результаты термодинамического моделирования процесса восстановления железа в элементарной системе Fe-C-O с использованием программного комплекса «Терра». Предложены показатели, характеризующие окислительно-восстановительный потенциал системы, определен перечень задач исследования. Рассчитаны расходы углерода и кислорода для равновесных условий, обеспечивающие реализацию восстановительного процесса. Показана принципиальная возможность снижения расходных показателей за счет вывода системы из равновесного состояния.

Ключевые слова: Термодинамическое моделирование, элементарная система, процесс восстановления, равновесные условия, неравновесные условия, расходные показатели.

Abstract. The results of thermodynamic modeling of iron reduction process in the elementary system Fe-C-O using the software package «Terra». Proposed indicators characterizing the redox potential of the system *vosstanovitelny*, a list of research tasks. Calculated the cost of carbon and oxygen for equilibrium conditions to ensure the implementation of the recovery process. The principal possibility of reducing the expenditure figures by system from equilibrium.

Keywords: Thermodynamic simulation, elementary system, the reduction process, equilibrium conditions, nonequilibrium conditions, expense indices.

В работе рассмотрены возможности термодинамического моделирования и использования принципов неравновесной термодинамики при расчетах, исследовании и оп-

тимизации процессов восстановления металлов (на примере железа) с целью повышения их эффективности.

Расчеты проводились в элементарной системе $Fe-C-O$, представленной набором веществ $pFe_2O_3 + nC + mO_2$, содержание оксида железа p задано 1 молю, количество углерода, кислорода варьировалось соответственно параметрами n и m . Перечень возможных веществ определили в результате численного моделирования на основе программного комплекса «Терра» [1] для диапазона температур $298 \div 1973$ К и различных возможных термодинамических состояний, которые в данной программе задаются путем фиксации значений переменных.

Для задания окислительно-восстановительного состава системы по входным параметрам использовались следующие показатели [2, 3]:

- окислительный потенциал системы как отношение количества молей газообразного кислорода к количеству молей углерода, подаваемого в систему $\alpha^* = m/n$;

- восстановительный потенциал газовой фазы равный отношению суммы концентраций CO и H_2 к суммарному содержанию всех компонентов газовой фазы

$$Z = \frac{\{CO\} + \{H_2\}}{\{CO\} + \{H_2\} + \{CO_2\} + \{H_2O\}};$$

- показатель $\gamma = (m + 1,5p)/n$, также отражающий окислительно-восстановительный потенциал системы и учитывающий количество кислорода из оксида железа Fe_2O_3 .

При исследовании процессов в элементарной системе осуществлялось решение следующих задач [4 – 6]:

- определение температуры и количества углерода, обеспечивающих полное восстановление железа;

- нахождение параметров m и n , обеспечивающих достижение заданной температуры, параметров металла и степени восстановления в равновесных условиях;

- исследование влияния состава газовой фазы системы на условия восстановления железа;

- определение оптимальных значений параметров m и n , при которых достигается заданное конечное состояние системы в неравновесных условиях.

Определение температуры, необходимой для реализации процесса восстановления в системе $Fe-C-O$ осуществлялось путем расчетов равновесных составов в диапазоне температур $573 \div 1973$ К при значении расхода углерода 3 моля, необходимого по стехиометрии для полного восстановления железа. Расчеты показали, что процессы восстановления протекают при $T \geq 1073$ К, в системе полностью отсутствуют оксиды железа. При реализации расчетов параметров равновесного состава системы $1Fe_2O_3 + nC$ при количестве углерода $n = 5$, которое превышает необходимое по стехиометрии количество углерода для полного восстановления железа, было выяснено, что восстановительная зона смещается в область более низких температур [4], что позволяет сделать вывод о необходимости присутствия в системе избытка углерода. Однако, для достижения температур, при которых возможна реализация восстановительного процесса, необходимы дополнительные энергетические затраты, например, осуществление экзотермических реакций горения углерода, что приведет к увеличению параметров m и n .

Определение параметров m и n , обеспечивающих достижение заданной температуры, параметров металла и степени восстановления осуществляли путем последовательных расчетов равновесных составов системы при пропорциональном увеличении количества молей углерода n и количества молей кислорода m . Для каждого состояния была определена равновесная температура. Из расчетов следует, что температура 1873 К достигается при значении показателей $\alpha^* = 0,35$, $n = 13,125$ и $m = 5,063$. Количество углерода на восстановление составило 3 моля, на нагрев до 1873 К – 10,125 молей. Этим показателям соответствует степень восстановления железа равная 100%, содержание углерода в металле 0,43%, и содержание оксида углерода в газовой фазе 99,59%. Дальнейшее увели-

чение параметра α^* приводит к появлению в конденсированной фазе оксидов железа, увеличению содержания CO_2 в газовой фазе и резкому росту температуры, что объясняется переходом системы в окислительную область.

Таким образом, для обеспечения процесса восстановления и достижения температуры 1873 К в систему, состоящую из 1 моля Fe_2O_3 , следует добавить 13,125 молей углерода и 5,063 молей кислорода. Рассмотрим возможность снижения показателей n и m за счет вывода системы из состояния равновесия.

Исследование влияния состава газовой фазы системы на условия восстановления железа осуществлялось путем последовательных расчетов составов системы при различных значениях параметра Z , которые могут быть достигнуты за счет фиксации содержания CO в газовой фазе. Такая процедура предусмотрена в программе «Терра». Практически такое состояние может быть достигнуто, например, путем дожигания CO до CO_2 .

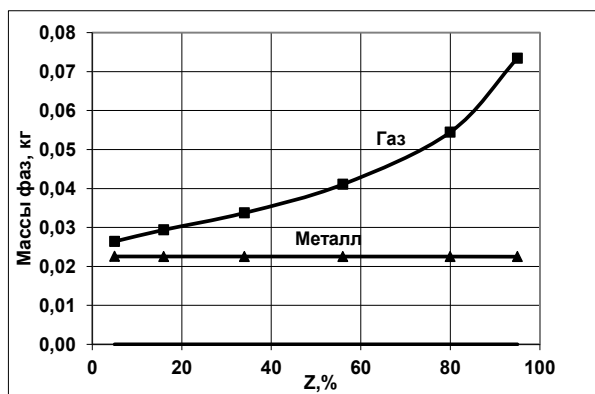
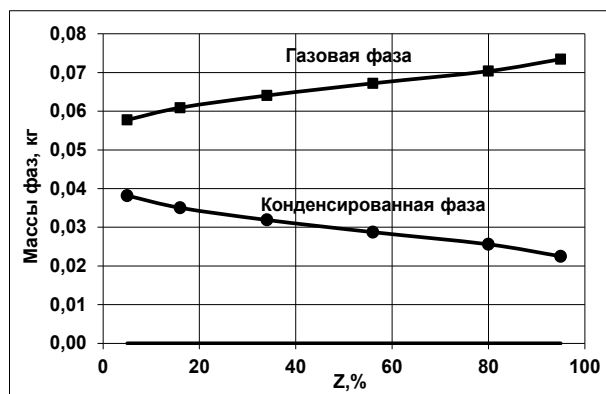
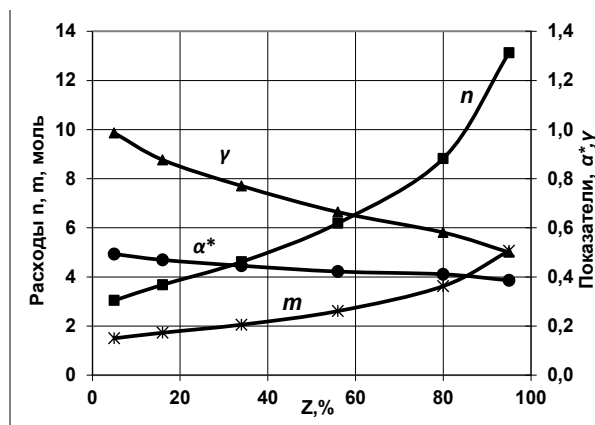
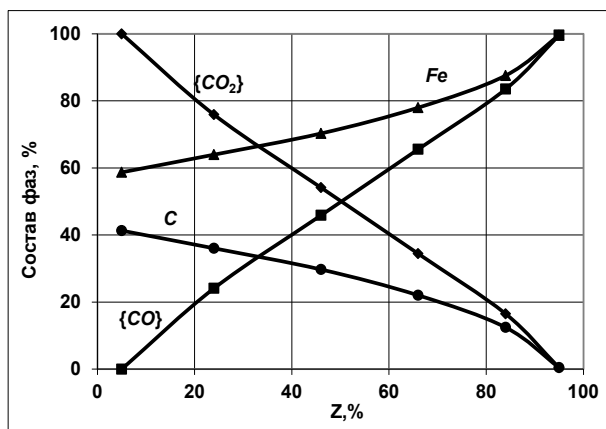
На рисунке 1 а) представлены зависимости количества и состава фаз при $T = 1873$ К от показателя Z . Из рисунка видно, что на всем диапазоне изменения концентрации CO степень восстановления железа равна 100 %. По мере уменьшения концентрации CO возрастает количество свободного углерода в системе. Таким образом, возникает возможность при достижении требуемых параметров процесса получить экономию восстановителя путем снижения концентрации CO в газовой фазе. Для различных значений показателя Z были подобраны параметры m и n , обеспечивающие полное восстановление железа, значение содержания углерода в металле 0,5% и достижение температуры 1873 К. Задачу решали путем последовательных расчетов конечных состояний системы при пропорциональном уменьшении количества углерода и кислорода и достижении заданных параметров металла и температура. На рисунке 1 б) приведены зависимости параметров m , n , показателей α^* и γ , а также массы фаз от параметра Z . Состав металла и температура – постоянны. Из рисунка следует, что количество молей кислорода уменьшается с 5,0625 до 1,5, углерода – с 13,125 до 3,0417 молей, а значения показателей α^* и γ увеличиваются до 0,5 и 0,99 соответственно при изменении показателя Z в диапазоне от 95 до 5 %.

Таким образом, для системы $pFe_2O_3 + nC + mO_2$ определены расходные параметры и показатели, характеризующие окислительно-восстановительный потенциал системы, соответствующие равновесному состоянию, и оптимальные параметры, при которых достигаются наилучшие показатели процесса восстановления железа. Результаты расчетов показателей представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета процессов в элементарной термодинамической системе $Fe-C-O$ при температуре 1873 К

Показатель	n , моль	m , моль	Z , %	α^*	γ
Равновесные условия	13,1	5,1	99,5	0,4	0,5
Оптимальные условия	4,2 ÷ 5,0	1,9 ÷ 2,3	30 % ÷ 40	0,35 ÷ 0,45	0,7 ÷ 0,9

Вывод системы из равновесных условий позволяет значительно снизить расходные показатели по количеству окислителя и восстановителя. При отклонении условий протекания процесса от равновесия при обеспечении заданных параметров металла можно снизить расходы углерода в 2 – 2,5 раза. Таким образом, термодинамическое моделирование в элементарных системах позволило выделить оптимальные режимы протекания процессов и применить результаты исследований при расчетах конкретных металлургических процессов [7 – 10].



а) $n=13,125$; $m=5,063$ моля

б) подбор параметров n и m

Рисунок 1 – Зависимости параметров равновесного состояния системы $Fe_2O_3 + nC + mCO_2$ от показателя Z

Библиографический список

1. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах / Н.А. Ватолин, Б.Г. Трусов, Г.К. Моисеев. – М. : Металлургия, 1994. – 175 с.
2. Рыбенко И. А. Разработка методики и системы расчета вариантов технологий непрерывного получения металла в агрегатах струйно-эмульсионного типа / И. А. Рыбенко // Моделирование, программное обеспечение и наукоемкие технологии в металлургии : труды Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 20-летию кафедры «Информационные технологии в металлургии» под общей редакцией С.П. Мочалова. – Новокузнецк, 2001. – С. 193 – 199.
3. Моделирование и оптимизация стационарных режимов металлургических процессов : монография / И. А. Рыбенко, С. П. Мочалов ; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2015. – 170 с.
4. Моделирование условий и режимов восстановления железа в элементарной системе Fe-C-O / И. А. Рыбенко, В. И. Кожемяченко, С. Ю. Красноперов // Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики : мат. 3-ей науч.-практ. конф. – Ульяновск : SIMJET, 2014. – С. 339 – 343.
5. Методика математического моделирования и расчета равновесных условий сложных сталеплавильных систем / С. П. Мочалов, И. А. Рыбенко, К. М. Шакиров, В. И. Кожемяченко // Моделирование физико-химических систем и технологических процессов в металлургии : тез. докл. всесоюз. совещ., Новокузнецк, 14 – 19 октября 1991 г. – Новокузнецк, 1991. – С. 132.
6. Моделирование условий и режимов процессов жидкофазного восстановления металлов / С. П. Мочалов, И. А. Рыбенко, Л. А. Ермакова, В. П. Цымбал // Моделирова-

ние, программное обеспечение и наукоемкие технологии в металлургии : тр. всеросс. науч.-практ. конф., посвященной 20-летию кафедры «Информационные технологии в металлургии», 2 – 5 апреля 2001 г. – Новокузнецк, 2001. – С. 330 – 335.

7. Процесс СЭР – металлургический струйно-эмульсионный реактор : монография / В. П. Цымбал, С. П. Мочалов, И. А. Рыбенко [и др.]. – М. : Metallurgizdat, 2014. – 488 с. : ил.

8. Процесс и агрегат типа самоорганизующийся струйно-эмульсионный реактор, как пример наукоемкой технологии в металлургии. / В. П. Цымбал, С. П. Мочалов, В. И. Кожемяченко, И. А. Рыбенко // Известия вузов. Черная металлургия. – 2005. -№ 6. – С. 60 – 65.

9. Процесс и агрегат типа самоорганизующийся струйно-эмульсионный реактор позволяет снизить требования к уровню обогащения руд / В.П. Цымбал, С.П. Мочалов, М.С. Паровинчак, И. А. Рыбенко, М. С. Кудояров // Известия вузов. Черная металлургия. – 2009. -№4. – С. 44 – 47.

10. Пат. 2371482 Россия. Способ прямого восстановления металлов с получением синтез-газа и агрегат для его осуществления / В.П. Цымбал, С.П. Мочалов, И.А. Рыбенко, Ю.В. Цымбал; Заявлено 6.5.2009. – 1 с.

Секция 1. Методы и программно-инструментальные системы математического, физического моделирования и идентификации

EFFICIENT UTILIZATION OF FUEL ENERGY IN THE STEEL INDUSTRY USING A SPRAY-EMULSION REACTOR WITHIN A NEW STRUCTURE OF ENERGY AND METALLURGICAL UNITS*

Tsymbal V.P.¹, Olennikov A.A.¹, Kozhemyachenko V.I.¹, Rybenko I.A.¹, Kongoli F.²

¹*Siberian State Industrial University
Novokuznetsk, Russia*

²*Flogen Technologies Inc.,
Canada/USA*

Keywords: *spray-emulsion metallurgical process, system of skull cooling, hot-water boiler, physical simulation, self-organization, mini-metallurgy, slag trap.*

ABSTRACT.

Metallurgical and power industries are the largest consumers of organic fuel. Fuel and energy resources make more than 30% of the total cost of the production. The energy efficiency of the entire cycle of a traditional metallurgical process in Russia is about 20%. Almost 40-50% of the produced energy is lost with the exhaust gas. As such, recuperating the exhaust gas energy in thermal/physical and chemical forms is an efficient way to maximize the utilization of fuel energy.

The recuperation of the thermal/physical energy is usually done through waste heat boilers, cooling systems and heating fuel installations in adjacent power plants.

An alternative to this method is the recuperation of exhaust energy of the gas by using its chemical potential to obtain another synthetic gas which can serve as fuel for other units or engines. This paper introduces a new spray-emulsion metallurgical technology (SER) that makes this possible.

This new technology has several advantages: It assures a high speed physical and chemical process flow, employs low specific volume units and has small capital and processing costs. It also has a good internal stimulus for the motion of the mixture in the reactor through a gasdynamic oscillator. The process is completely closed to the atmosphere and as such it makes metal direct reduction process completely smokeless. This paper will be concentrated on energy issues and other subsequent publications will deal with fundamentals of the process.

Based on this technology a mini-plant structure can be designed in a different way having new energy and metallurgical units independent of each other that operate independently or in parallel instead of a series of a sequential modules that are characteristics of large multilink metallurgical aggregates.

INTRODUCTION.

Almost 40-50% of the energy produced in metallurgical and power industries is lost with the exhaust gas. As such, recuperating the exhaust gas energy is an efficient way to maximize the utilization of fuel energy. This can be achieved in two ways: (1) Through physical/thermal energy generation and (2) chemical energy generation.

The first approach is based on recuperating and using the thermal energy in power plants units through waste heat boilers, cooling systems skulls and fuel-heating installations. Depending on the power units of metallurgical plants, the thermal energy obtained could be between 2

* 2015 SUSTAINABLE INDUSTRIAL PROCESSING SUMMIT.

Volume 2: Gudenau Intl. Symp. on Iron and Steel Making

Edited by F. Kongoli, G. Kleinschmidt, H. Pook, K. Ohno, K. Wu, FLOGEN 2015

and 15 MW and this can be used for heating of production halls. If a recovery boiler steam turbine is used, the electric power obtained can be between 50 and 420 kW. This approach will assure an energy utilization of waste gases at about 60-65%.

The second approach is based on using the chemical potential of the exhaust gas to obtain another synthetic gas which can serve as fuel for other units or engines. This process consists of 3 steps: the exhaust gas enters into the reformer, passes desulfurization process and then the catalytic synthesis is carried out, where the synthetic gas is produced.

This gas has a volumetric ratio of CO/H_2 close to 1/1 and may be used as power fuel and as a raw material for the production of synthetic fuels. This method makes possible to use the physical and chemical energy of the exhaust gas with an efficiency of up to 90% and virtually to have a smoke-free process.

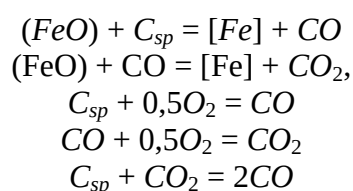
The new proposed spray-emulsion metallurgical process (SER) achieves the above goals since its physical and chemical processes have high speed flow, small specific volume units and small energy and capital costs [1,2].

SER REACTOR AND ITS ADVANTAGE.

The SER reactor is shown in Figure 1. The charge of a fine mixture of metal oxides and solid wastes is fed to the reaction chamber 6. This chamber creates a suspension gas having a gas volume fraction of 0.99. Subsequently a two-phase fluids is formed aerodynamically and passes through connecting channels 7. These fluids along with different gas quantities from various controlled conditions of chemical reactions, create a stationary oscillatory mode which is called self-organizing oscillating reaction.

The high potential pressure created in the oscillating reactor 6 pushes the reaction products outside of the reactor and the total isolation from the atmosphere achieves a high efficient energy utilization without smoke exhausts. The work of expansion of the reaction gases is also used and taken into consideration something that have not been yet implemented in any known metallurgical aggregates.

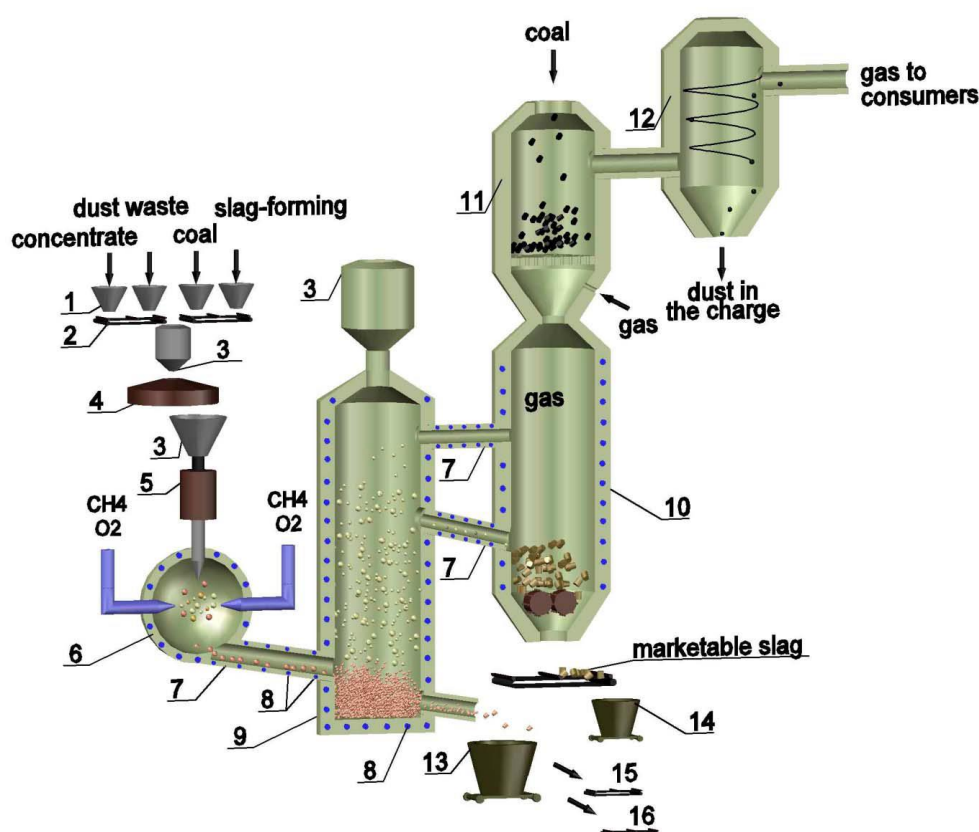
The working mixture prepared in SER (oscillating reactor) passes through a bottom channel to the refining column 9. In this column, the reduction reactions of iron and the combustion reactions of solid and gaseous fuels take place within a high-froth gas-slag-metal emulsion following the reactions described below.



SER aggregates create conditions for an efficient use of fuel energy because it burns the fuels in an enclosed space and. as a result of high potential pressure generated by the reactor-oscillator 6, all products are pushed out of the unit to other heat-utilizing devices.

SER unit is at the same time a boiler as well. A skull cooling system replaces the refractory and the unit actually rests on a frame of the refrigerated twisted tubes (Figure 2). Through them the recuperated heat energy is supplied to consumers in the form of mercantile water at 95 °C. The exhaust gas can be utilized in steam or gas turbines. Furthermore the units can be made mobile which opens the possibility to develop low populated areas.

The fact that the process happens in the gas suspension in reactor 6 and then emulsion in column 9 allows an effective use the large reaction surface of the powdered raw materials and opens the possibility of creating aggregates having a very low specific volume. The ability to process directly powdered materials with low energy consumption is another noted advantage.



1 – feed bin; 2 – feeders; 3 – dispensers; 4 – mixer; 5 – screw feeder; 6 – SER; 7 – connecting channels; 8 – cooling system scull; 9 – refining column; 10 – slag granulator; 11 – fluidized-bed apparatus; 12 – cyclone; 13 – receiving ladle or induction furnace; 14 – hopper for receiving commodity slag; 15 – special line for casting; 16 – bottler

Figure 1 – Self-organizing spray-emulsion reactor – SER

In view of the marked advantages, this process is the most appropriate for processing waste containing metal dust, because it makes possible to recover the metal directly, without intermediate stages, making it an environmentally friendly with low energy and material costs.

The SER process and its aggregate units were developed using the basic ideas of the theory of self-organization [3], the kinetic, thermodynamic and hydrodynamic laws of steelmaking reactions and processes [3], the theory of gas jets and properties of two-phase flows [4] and the mathematical modeling and optimization of the steelmaking process, supplemented by a number of original design and technology solutions. A special role in the development of the process were the ideas of I. Prigozhin and G. Haken [5, 6]. The units design and testing was carried out during 1992-2001 on a large-scale pilot plant that was built in the free areas of Zapsib converter shop.

A successful application of this technology has been also in waste-free processing of titanium-magnetite ores. Enormous resources of such ores exists in the Urals, Western and Eastern Siberia although at present time half of the raw materials for titanium industry is imported from the Ukraine to the Urals. Charging of these ores can be done only in a limited extent in the blast furnaces because of the risk of obtaining viscous heterogeneous slag. In 2001, the fundamental possibility of processing of a titanium-magnetite concentrate in the SER-type unit with separation of iron- and titanium-containing components was shown in the pilot plant scale[8]. This is achieved due to the fact that the process in SER-type unit occurs in the gas phase area, while slag is suspended in the upper part of refining settling tanks, and the tapping can be conducted from any level on the unit height, providing an optimal content of Fe and Ti oxides in terms of

slag flowing ability. This task is very important for both ferrous and non-ferrous metallurgy and deserves a separate studies [9].

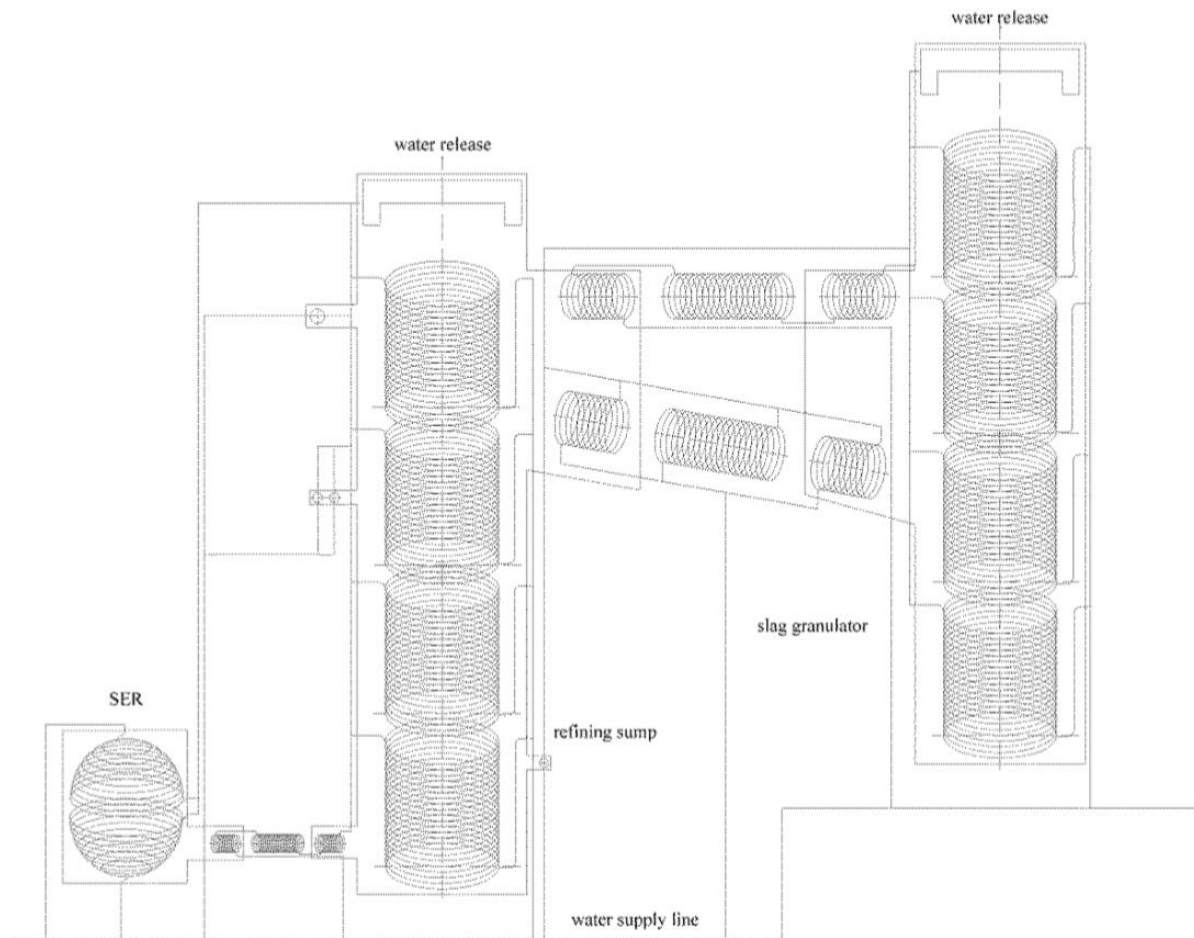


Figure 2 – Scull cooling system in SER reactor unit

This paper concentrates mainly on energy issues and other subsequent publications will deal with fundamentals of the process.

NEW STRUCTURED MINI PLANTS.

Based on the SER aggregate it is possible to create a new structure of mini-plants consisting of standard modules, independent of each other and working simultaneously in parallel instead of a sequence of large-scale units characteristics of existing multi-stage metallurgical production routes. The new proposed structure is shown on the Figure 3 along with a comparison with the structure of the traditional metallurgical plants.

The new proposed structure eliminates agglomeration/peletizing, coking process and blast furnace as well as the necessity of heavy equipment such a steel ladles, overhead heavy cranes as well as heavy, big or deep basements, etc. The new units can be placed in relatively light industrial buildings, allowing quick return of the investment. The modules can operate independently and be stopped within few minutes. The following three types of modules can be build:

Module 1 (Figure 3) includes a SER type unit aggregate consisting of two consecutive reactors, a slag trap with a slag granulator, a refining unit, a combined unit of casting and rolling or casting and continuous withdrawal of finished sections. The capacity of this module can reach 250–300 thousand tons of molten metal per year. As an example of the casting-withdrawal unit a new technology [10] can be used which employs the principle of vertical continuous casting (withdrawal) on the basis of heat-transfer agents of liquid metal, allowing to increase the rate of

crystallization by 15–20 times. The key factors of this technology is the choice and the rate of metal withdrawal which both take into account the rate of solidification and the amount of circulation of liquid-metal heat-transfer agents.

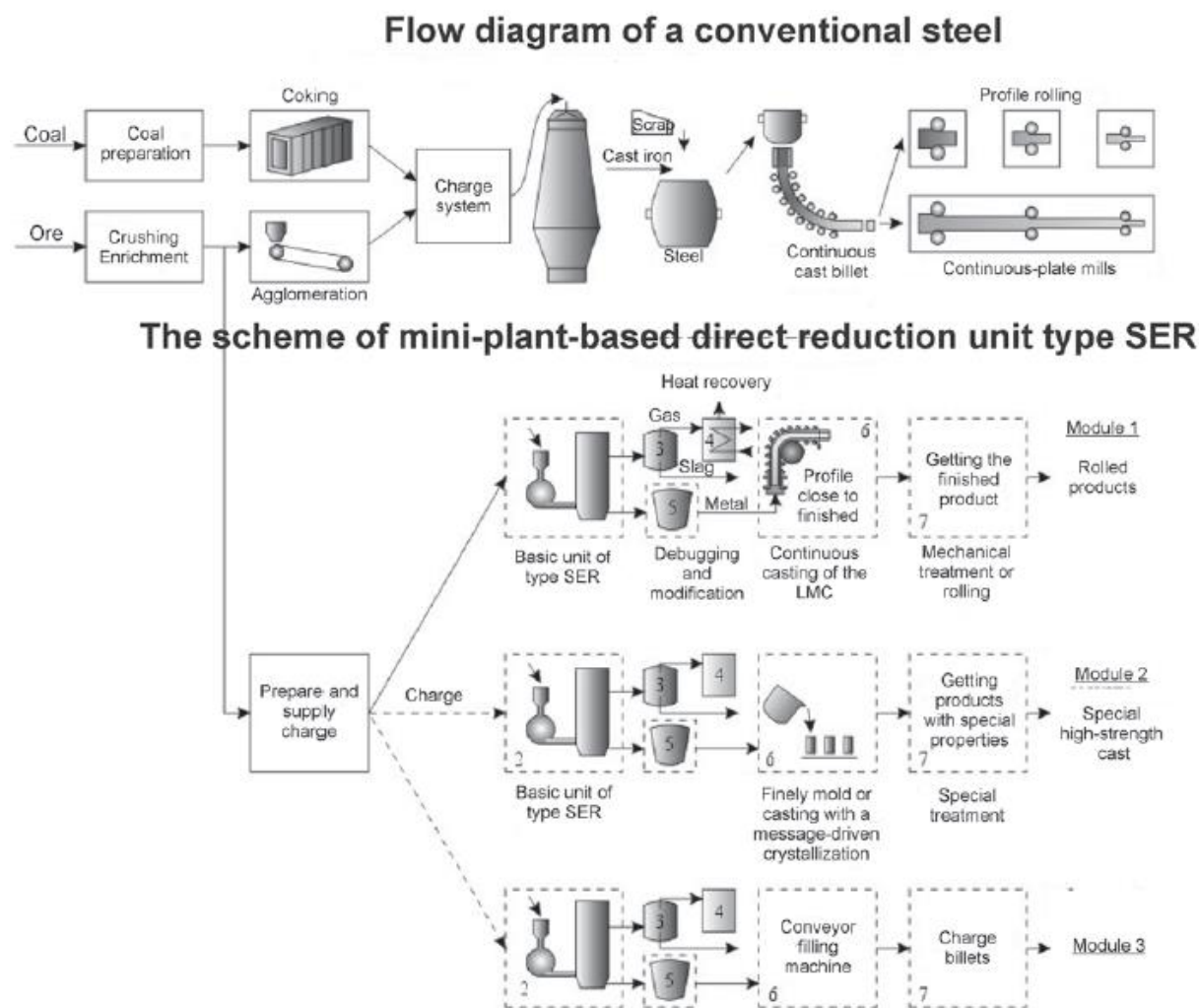


Figure 3 – Technology comparison of SER aggregate route and the classical route

Module 2 (Figure 3) consists of the same technological scheme of direct reduction of liquid metal, with an addition of a suspension casting and volumetric crystallization to produce fine shaped precision castings, as an example. Implementation of this technology can principally change the industrial practice of casting. Introduction of ultra-dispersed refractory modifiers in optimal amounts allows to control the amount of seeds and the crystal size within the framework of volumetric crystallization; it also allows to obtain mechanical properties of casted products on the same level as for similar properties of rolled metal products [7].

It should be noted that metal, obtained via direct reduction method on the pilot plant (still in small quantities) is characterized by interesting, yet poorly studied, properties. In particular, although it is hardly subjected to mechanical treatment, it is also hard to cut it with a cutting machine or a cutting burner. This can be explained by the fact that it was not subjected to oxidation processing stages; it is self-deoxidized and even modified by super-equilibrium carbon content. These hypotheses however require a detailed study. If all these properties are confirmed they will open interesting possibilities for obtaining products with new properties, especially in conjunction with the possibility of direct alloying.

Module 3 (Figure 3) consist of the same technological scheme followed by a completion of the cycle with arc or induction furnaces that do already exist in these plants. This is a possible and feasible option for existing metallurgical plants.

CONCLUSIONS.

The classical route of iron and steel production consist of crushing of raw materials, concentration, pelletizing, melting and it is not consistent with the principles of minimization of entropy as the global environmental condition. The energy efficiency of the entire cycle of a traditional metallurgical process in Russia is about 20%. Almost 40-50% of the produced energy is lost with the exhaust gas. Furthermore such installations requires large capital expenses. The proposed new SER type reactors are the most effective way is direct reduction of metal from collector dust without pelletizing, which considerably reduces dimensions of units, capital and energy costs. Furthermore it assures a high speed physical and chemical process flowa and employs low specific volume units. The process is completely closed to the atmosphere and as such it makes metal direct reduction process completely smokeless. This paper is concentrated on energy issues of this technology and other subsequent publications will deal with fundamentals of the process.

The proposed new SER type reactors offer the possibility to use «full self-relying cycle» of minimetallurgy without high costs. At the same time it solves the problems of production of highpurity metal without non-oxidizable impurities (copper and nickel) as well as without usage of metal-rich containing wastes (scale, sludge, chip, etc.).

REFERENCES

1. V.P. Tsymbal, S.P. Mochalov, A.A. Olennikov, A.M. Ognev. Energy-metallurgical complex based on the spray–emulsion reactor / CIS Iron and Steel Review. 2012. №1. P. 13-15.
2. Tsymbal V. P., Mochalov S. P. Development of new metallurgical processes and management principles on the basis of synergetic approach. Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya – Proceedings of the universities. Ferrous metallurgy. 2012. № 2. P. 64-69.
3. Tsymbal V. P., Mochalov S. P., Kalashnikov S. N. Models and mechanisms of selforganization in equipment and technologies. Part 3. Examples of implementation of the ideas and principles of synergetics. Textbook. Edited by Tsymbal V.P. SibGIU. Novokuznetsk, 2005. 264 p.
4. Nakoryakov V. E., Pokusaev B. G., Shreiber I. R. Wave dynamics of gas and psteam-liquid media. Moscow: Energoizdat, 1990. 248 p.
5. Nikolis G., Prigozhin I. Self-organization in nonequilibrium systems. Textbook. Moscow: Mir, 1979. 512 p.
6. Khaken G. Synergetics. Moscow: Mir, 1980. 406 p.
7. Saburov V. P. Modification of steels and alloys by dispersed inoculators. Omsk: OmGTU, 2002. 212 p.
8. Pat. 2272849 Rossiya C1. A method for producing of metals from ore materials and assembly for its implementation). V. P. Tsymbal, S. P. Mochalov. 2004122183/02. Reported 19.7.2004; Published 27.3.2006, Bulletin RST. Bul 9. Priority 19.7.2004.12 p.
9. Tsymbal V. P., Mochalov S. P. In the separated streams. A new method and unit for processing of natural alloy ores and metal production). Metally Evrazii – Eurasian Metals. 2006. № 6. P. 78–80.
10. Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk) – private communication

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ВСПЕНИВАНИЯ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ШЛАКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ ФРАКТАЛОВ И ПЕРКОЛЯЦИИ

Кожухов А.А., Мельников Е.Н., Шаталов Н.Н., Парахин Я.О.

Старооскольский технологический институт (филиал) НИТУ МИСиС
г. Старый Оскол, Россия, kosuhov@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы вспенивания сталеплавильного шлака на примере дуговой сталеплавильной печи. В рамках теории протекания и фрактальной геометрии описан процесс перераспределения жидкости в объеме вспененного сталеплавильного шлака, получено выражение, с помощью которого представляется возможным оценить характер изменения высоты вспененного сталеплавильного шлака в дуговой сталеплавильной печи.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, вспененный шлак, фрактал, теория протекания.

Abstract. In article questions of foaming of steel-smelting slag on the example of the arc steel-smelting furnace are considered. Within the theory of course and fractal geometry process of redistribution of liquid in volume of the made foam steel-smelting slag is described, expression by means of which it is obviously possible to estimate nature of change of height of the made foam steel-smelting slag in the arc steel-smelting furnace is received.

Keywords: the arc steel-smelting furnace, the made foam slag, fractal, the theory of course.

Вспенивание сталеплавильного шлака и его устойчивость является сегодня объектом большого количества исследований, особенно, что касается обеспечения вопроса вспенивания шлаков в дуговых сталеплавильных печах. Причина этого заключается не только в том, что изучение этого процесса связано с решением весьма актуальной для электросталеплавильного производства задачи по снижению энергетических затрат на производство стали. Вспененный шлак является весьма сложным объектом капиллярной гидродинамики, исследование которого далеко от завершения. Об этом свидетельствуют, в частности, значительное число имеющихся в настоящее время эмпирических уравнений, описывающих процесс вспенивания сталеплавильного шлака и его синерезиса (разрушения). Однако, до настоящего времени нет математической модели, удовлетворительно описывающей процессы вспенивания сталеплавильного шлака и его разрушения.

Исходя из вышесказанного, следует, что для организации рационального энерго-технологического режима работы дуговой сталеплавильной печи, обеспечивающего эффективное ведение электроплавки, необходимо обеспечить эффективное вспенивание сталеплавильного шлака и поддержание его во вспененном состоянии в течении необходимого промежутка времени для полного экранирования электрических дуг.

В связи с этим, для оперативного определения уровня вспенивания сталеплавильного шлака в дуговой сталеплавильной печи необходимо иметь математическую модель, адекватно описывающую процесс вспенивания сталеплавильного шлака и позволяющую прогнозировать с достаточной точностью его толщину.

Известно, что устойчивость вспененного шлака зависит:

- от физико-химических свойств шлака (вязкость, температура);
- от объемной плотности шлака;
- распределения газовых пузырей по размерам.

Рассмотрим приемы и методы по изучению неупорядоченных дисперсных систем, а именно гидродинамику двухфазных потоков и исследования связанные с изучением взаимосвязи структуры и физико-химических связей дисперсных систем.

Наибольшее количество исследований в направлении разработки математической модели описывающей процесс вспенивания было проведено в химической промышленности.

Условно все имеющиеся модели можно разделить на две большие группы. К первой группе моделей, относятся модели, в которых распределение дисперсной фазы можно описать с помощью регулярных структур. Использование данных моделей позволяет связать в единое целое, свойства неупорядоченных систем. Преимуществом данных моделей является возможность достаточно точно путем изменения только свойств базовых элементов и геометрии, сформированных из них различных образований подобрать тип организации рассматриваемой структуры, наиболее полно отвечающей её физико-химическим свойствам. К недостаткам данных моделей следует отнести тот факт, что упорядоченное распределение частиц дисперсной фазы в дисперсной среде является исключением, чем правилом. Ко второй группе относят модели, в которых рассматриваются более адекватные методы описания неупорядоченных структур. Большой успех в этом направлении был получен в рамках совместного использования геометрии фракталов и теории перколяции (протекания) [1-6].

Принципиальным отличием вспененного шлака от других газожидкостных систем является наличие у него сложной пористой разветвлённой структуры, которая обладает определённой стабильностью, поэтому во вспененном шлаке, видимо можно обнаружить эффекты, которые другим газожидкостным системам несвойственны. Поэтому наиболее перспективным направлением по созданию математической модели вспененного сталеплавильного шлака, которая бы адекватно описывала процессы его разрушения, является применение понятий и методов фрактальной геометрии совместно с теорией перколяции (протекания).

Для рассмотрения процесса вспенивания сталеплавильного шлака в дуговой сталеплавильной печи с точки зрения теории фракталов и перколяции, воспользуемся фрактально-перколяционной моделью, предложенной в работе [4] и выполним оценку её применимости. Согласно данной модели, рассмотрим вспененный шлак как систему, обладающую «остаточной памятью». Это можно объяснить тем, что в большинстве случаев при вспенивании шлака, протекают процессы, которые отвечают промежуточному положению, а именно очень устойчивый, либо мгновенно разрушающийся вспененный шлак. Это позволяет описать вспененный шлак с точки зрения модели временного поведения пенной структуры, согласно которой временный беспорядок процессов, протекающих в объеме вспененного шлака, моделируется множеством Кантора.

Учитывая большую разветвленность структуры вспененного шлака, неоднородность размеров пузырьков из которых он состоит, можно предположить о фрактальной природе его геометрического строения. Из работы [4] можно предположить, что наряду с фрактальными свойствами во вспененном шлаке при определённых условиях проявляются и перколяционные свойства.

Согласно фрактально-перколяционной модели вспененный шлак представляет собой дисперсную среду, которая характеризуется тремя чётко разделяющимися элементами, а именно плёнками на стыке 2 ячеек, каналами на стыке 3 плёнок, узлами на стыке 4 каналов. При моделировании пренебрежём объёмом жидкости в узлах и её стеканием по плёнкам. В этом случае, вспененный шлак будет представлять собой систему связанных и беспорядочно ориентированных каналов, имеющих поперечное сечение в форме треугольника. Неоднородность структуры вспененного шлака можно учесть при моделировании его внутреннего строения фрактальными деревьями. Системе разветвлённых каналов вспененного шлака сопоставим регулярное фрактальное дерево Кейли. Разрушение такого дерева согласно фрактально-перколяционной модели будет происходить иерархически. Это объясняется возникающей корреляцией между размером разрушенной области и размером примыкающей области, которая не затронута разрушением, но также находится под воздействием нагрузки. Из каждой вершины фрактального дерева выходят 2 ребра (стык плёнок). В результате построения дерева Кейли получим, что на n -м уровне будет существовать 2^n рёбер, которые будут соединять каждую вершину $(n-1)$ -го уровня с 2 вершинами n -го уровня (рисунок 1).

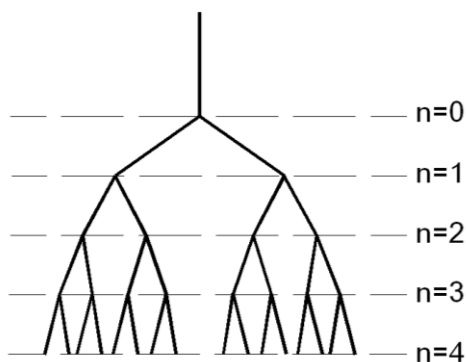


Рисунок 1 – Дерево Кейли

Высота такого дерева согласно теории фракталов, будет равна [7,8]:

$$\Delta H = \sum_{n=1}^{\infty} \Delta H_n = 2 \cdot H_1. \quad (1)$$

Рассмотрим вспененный шлак с точки зрения теории перколяции. Так как, вспененный шлак имеет очень развитую межфазную поверхность и соответственно избыток свободной энергии, то он термодинамически неустойчив. Из этого следует вывод, что вспененный шлак начинает разрушаться с момента своего получения.

Экспериментально доказано, что высота пены (ΔH) влияет на процессы её разрушения. Следует отметить, что при некоторой высоте пены ΔH , которая меньше некоторой высоты ΔH^0 , происходит резкое увеличение времени накопления газа в слое пены, а при $\Delta H = \Delta H^c$ стекание жидкости совсем прекращается. Наличие таких характерных высот говорит о том, что разрушение пены происходит по типу протекания, другими словами определяется процессами вытекания жидкости.

Причиной разрушения вспененного шлака является также стекание шлака из каналов под воздействием силы тяжести. При этом данный процесс является главным при разрушении вспененного шлака. Это говорит о аналогии процесса вспенивания шлака с другими жидкостями.

Поэтому можно с уверенностью сказать, что существует некоторая высота вспененного шлака ΔH^c , начиная с которой ($\Delta H < \Delta H^c$) стекание шлака отсутствует, так как во всех рёбрах устанавливается гидростатическое равновесие. По мере роста высоты вспененного шлака при $\Delta H^c < \Delta H < \Delta H^0$ увеличивается содержанием в нём газа, что приводит к нарушению гидростатического равновесия в части рёбер и началу вытекания шлака. Однако на этом этапе высоты вспененного шлака недостаточно для того, чтобы нарушить гидростатическое равновесие в наибольшей части рёбер. Начиная с определённой высоты вспененного шлака равной ΔH^0 , дополнительной нагрузки создаваемой его высотой вспененного шлака, оказывается, достаточно, чтобы нарушить гидростатическое равновесие в большей части ребер фрактального дерева. А при $\Delta H > \Delta H^0$ процессы стекания больше не зависят от высоты вспененного шлака, другими словами, достигается предельная высота вспенивания шлака или устанавливается равенство скоростей стекания шлака и выделения газовых пузырей из его объёма.

Для расчёта предельной высоты вспенивания сталеплавильного шлака (условие равенства скоростей вытекания шлака из столба пены и выделения газовых пузырей из объёма пены) в работе [9] используется следующая формула:

$$\Delta H \leq \Delta H^0 = \frac{\sigma_{жс}}{\rho_{жс} \cdot g \cdot r_0} \cdot \left(\frac{K_0}{K_{\min}} - 1 \right), \quad (2)$$

где K_0 – среднее значение кратности по всей высоте вспененного шлака;
 K_{min} – минимальная кратность в нижнем слое вспененного шлака ($z=0$);
 r_0 – средний радиус пузырьков образующих вспененный шлак, м;
 $\rho_{жс}$ – плотность шлака, кг/м³;
 $\sigma_{жс}$ – коэффициент поверхностного натяжения шлака, Н/м.

Смысл этой зависимости заключается в том, что для высоты столба пены существует некоторое ΔH^0 такое, что при условии $\Delta H \leq \Delta H^0$ скорость поступления газа извне превышает скорость выделения газовых пузырей из объема вспененного шлака, то есть скорость вытекания шлака будет происходить как угодно долго, что приведёт к росту высоты вспененного шлака. Однако, при $\Delta H > \Delta H^0$ скорость поступления газа извне уравнивается скоростью выделения газовых пузырей из объема вспененного шлака, что говорит о стабилизации его высоты.

В фрактально-перколяционной модели предложенной в работе [4] для определения высоты n -ого уровня, в котором произойдёт нарушение гидростатического равновесия (скорость поступления газа извне равна скорости его выделения) приводится формула:

$$\Delta H_n = \frac{k_1 \cdot \sigma_{жс}}{2,5 \cdot r_0 \cdot \rho_{жс} \cdot g} \cdot \sqrt{K} - \frac{2 \cdot \sigma_{жс}}{\rho_{жс} \cdot g \cdot r_0} \cdot \left[1 - \frac{\cos(\theta/2)}{0,48 \cdot 2^n} \right], \quad (3)$$

где k_1 – коэффициент пропорциональности, учитывающий структуру вспененного шлака;
 γ – объёмная плотность вспененного шлака;
 g – ускорение свободного падения, м/с²;
 n – уровень фрактального дерева.

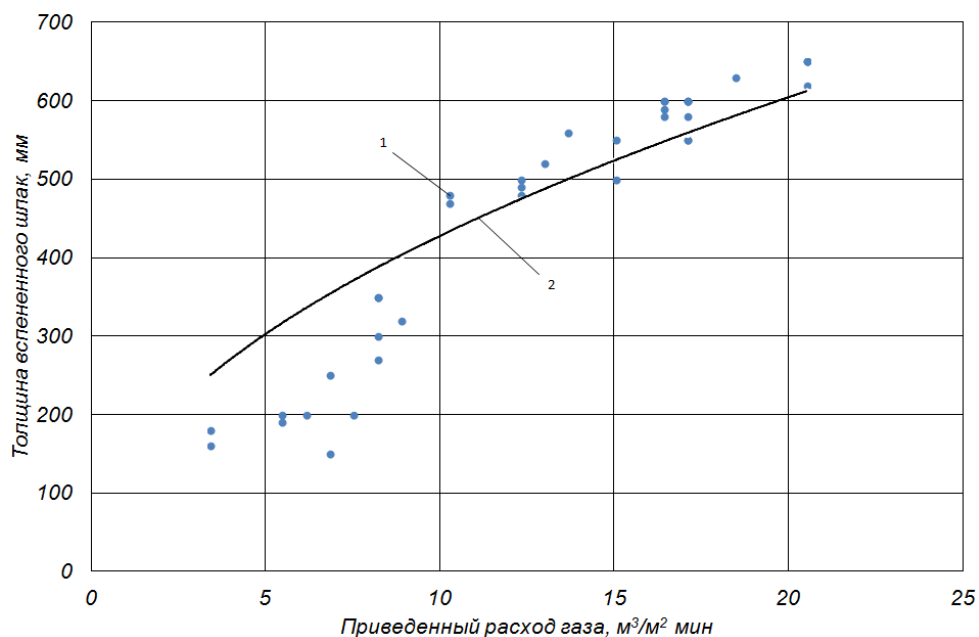
Используя полученную формулу можно рассчитать предельную высоту вспенивания шлака (ΔH^0) начиная с которой время вытекания не зависит от величины ΔH , то есть устанавливается равенство скоростей поступления газа в объем вспененного шлака и его выделения из него. Однако для использования данной формулы необходимо определить значение коэффициента k_1 для условий вспенивания шлака в дуговых сталеплавильных печах.

Для оценки величины вспенивания сталеплавильного шлака с помощью фрактальной-перколяционной модели в соответствии с формулой (3) необходимо определить значение коэффициента k_1 , а затем проверить адекватность получаемых по этой формуле результатов.

Для определения значения коэффициента k_1 воспользуемся экспериментальными данными о толщине вспененного шлака в зависимости от приведенного расхода газа полученными в промышленных условиях на дуговых сталеплавильных печах. Для расчета коэффициента k_1 воспользуемся формулой (3). В результате расчета установлено, что значение коэффициента k_1 для условий вспенивания шлака в дуговых сталеплавильных печах составляет 15,52.

Результаты расчета предельной высоты вспенивания шлака по формуле (3) для условий электроплавки стали представлены на рисунок 2.

Анализ полученных данных показывает хорошую сходимость полученных результатов (разброс не более 10%) с промышленными данными. Полученные с помощью фрактальной-перколяционной модели данные о толщине вспененного шлака подтверждают, что величина приведенного расхода играет одну из ключевых ролей в процессе вспенивания шлака. Данный факт, можно объяснить тем, что величина приведенного расхода определяет газосодержание и объемную плотность образующегося вспененного шлака. В свою очередь, эти параметры определяют толщину вспененного шлака.



1 – 150-т дуговая сталеплавильная печь; 2 – результаты расчета по формуле (3)

Рисунок 2 – Зависимость изменения уровня вспенивания сталеплавильного шлака в дуговой сталеплавильной печи от приведенного расхода газа

Таким образом, можно утверждать, что в рамках данной модели можно получить адекватное описание процесса перераспределения жидкости в объеме вспененного шлака и рассчитать предельную высоту его вспенивания шлака. Кроме того, с использованием данной модели, можно исследовать факторы, влияющие на устойчивость шлака к разрушению, так как поддержание шлака во вспененном состоянии в дуговой сталеплавильной печи на протяжении всей плавки определяет энергоемкость процесса в целом.

Библиографический список

1. Савицкая Е.М., Ребиндер П.А. Исследование устойчивости монодисперсных пен. //Коллоидный журнал. 1951. – т.13. - №3. – с.200-207
2. Дульнев Г.Н., Новиков В.В. Процессы переноса в неоднородных средах. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 247 с.
3. Пахаруков Ю.В., Шевнина Т.Е., Петраков Е.П. Фрактальная модель образования пены. // Тезисы докладов. Всероссийская научно-техническая конференция. – Тюмень, 2001. – с. 55-56.
4. Шевнина Т.Е. Фрактально - перколяционный механизм разрушения пены дис. ... канд. техн. наук: 02.00.04 / Шевнина Татьяна Евгеньевна. – Тюмень, 2004. – 132 с
5. Солла С. Разрушение нагруженных фрактальных деревьев. / В. кн.: Фракталы в физике. – М.: Мир, 1988. – 670 с.
6. Пахаруков Ю.В., Шевнина Т.Е. Стабилизация пены поверхностно-активными веществами во фрактально-перколяционной модели разрушения. // Письма в ЖТВ. – 2001. – т.27. – вып. 3. – с. 85-88.
7. Федер Е. Фракталы – М.: Мир, 1991. – 260 с.
8. Киркпатрик С. Теория и свойства неупорядоченных материалов. – М.: Мр, 1977. – 352 с.
9. Тихомиров В.К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. М: Химия, 1983.– 263с.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИССИПАТИВНЫХ СТРУКТУР В СТРУЙНО-ЭМУЛЬСИОННОМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ

Цымбал В.П., Сеченов П.А., Оленников А.А.

Сибирский государственный индустриальный университет

г. Новокузнецк, Россия, tsymbal33@mail.ru

Аннотация: В статье рассматриваются диссипативные структуры колонного струйно-эмульсионного реактора (СЭР) на примере зонной и функциональной модели. Основное внимание уделено процессам изменения состава содержания углерода в металле, происходящих в нижней (окислительные процессы) и верхней (восстановительные процессы) зонах колонного СЭР.

Ключевые слова: диссипативные структуры, струйно-эмульсионный реактор, имитационная модель.

Целью работы является математическое описание процессов изменения состава металла (прежде всего, содержания углерода), протекающих в колонном реакторе СЭР [1, 2]. Ранее [3] были рассмотрены проблемы управления химическим составом металла в струйно-эмульсионном процессе и агрегате СЭР, показано, что это достигается путём режимной организации динамических диссипативных структур, которые могут, существовать только при определенных, достаточно интенсивных, потоках вещества и энергии.

На рисунке 1 показаны зоны, в которых реализуются эти диссипативные структуры. Зона 1-3 в данной статье мы подробно не рассматриваем, это процессы в ректоре-осцилляторе, где осуществляется предварительное сжигание топлива и формируется рабочая смесь (газовзвесь) с газосодержанием порядка 0,99. Эта газовая взвесь через соединительный канал (зона 3) подаётся в зону 4, где кинетическая энергия двухфазного потока превращается в потенциальную энергию.

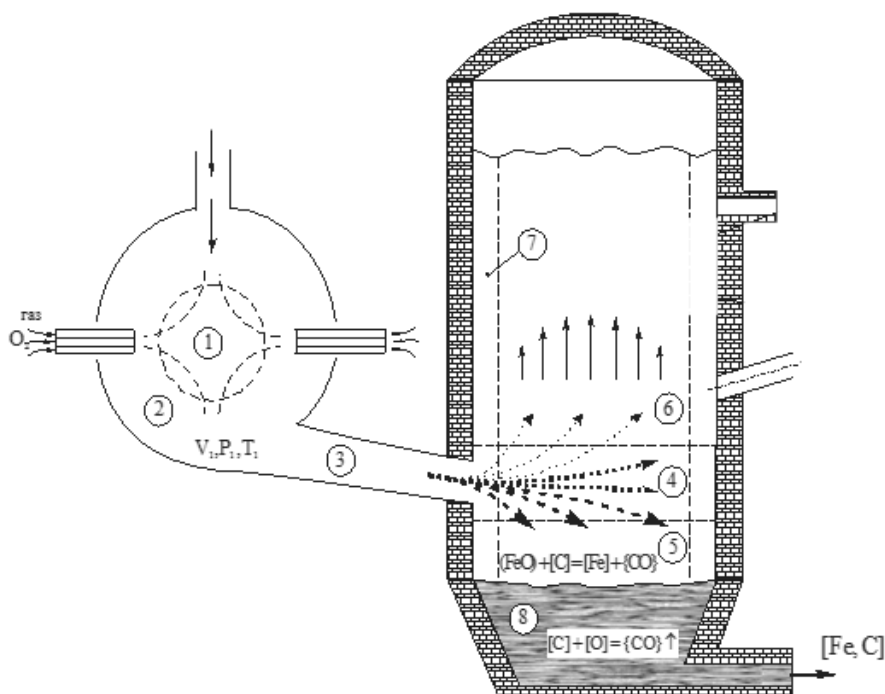


Рисунок 1 – Зонная модель струйно-эмульсионного реактора

В представленной статье выделяется задача описания процессов в зонах 4 – 8. Зона 4 играет роль провальной решётки, разделяющей верхнюю (зоны 6 и 7) и нижнюю часть (зоны 5 и 8) этого реактора.

На рисунке 2 представлена функциональная модель процессов в агрегате СЭР. Данная модель отличается от рассмотренной ранее зонной модели более подробным описанием функциональных зависимостей.

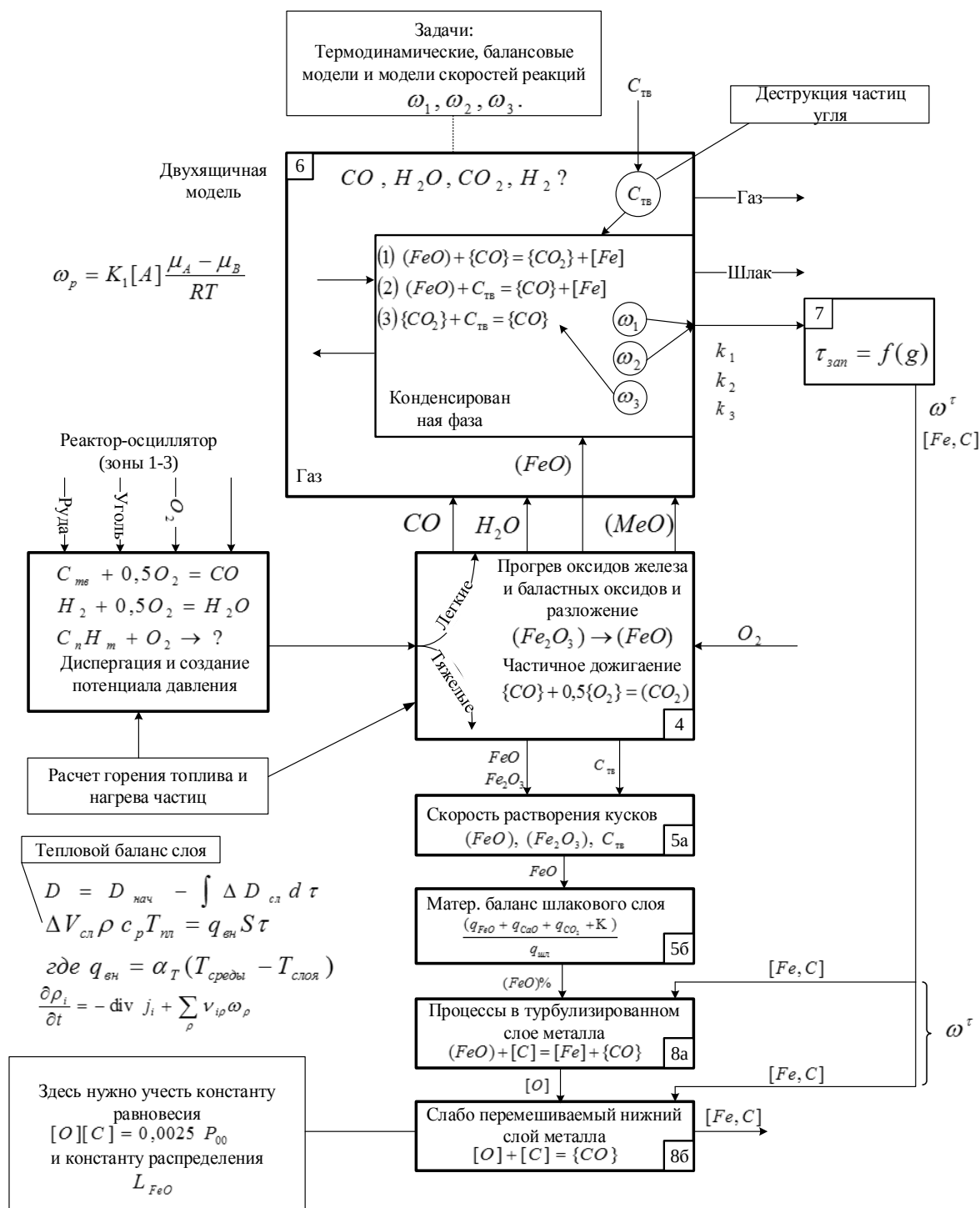


Рисунок 2 – Функциональная модель струйно-эмульсионного реактора

В зоне 4 (рисунок 2) в зависимости от крупности кусков руды происходит разделение: «тяжелые» куски попадают в зону 5, а «легкие» (предположительно менее 1-2 мм) в зону 6.

Первой задачей является описание динамики усвоения кусковых железорудных материалов. В основу растворения кусков принята следующая гипотеза: считается, что куски представляются в виде шара, а в шаре рассматриваются достаточно тонкие последовательно смываемые слои. В слоях рассматривается баланс энтальпии, необходимый для прогрева и усвоения (смыва) слоя, и поток тепла из окружающей среды, необходимый для обеспечения величины этой энтальпии. Для слоя шара объёмом dV за время $d\tau$ поступает количество теплоты [4]:

$$dQ = \Delta V \rho c_p T_{пл}, \quad (1)$$

где ρ – плотность;
 c_p – теплоёмкость;
 $T_{пл}$ – температура плавления.

С другой стороны, за время $d\tau$ через площадь поверхности S данного слоя шара поступает из окружающей среды с температурой $T_{среды}$ количество теплоты [4], в соответствии с соотношением (2):

$$dQ = \alpha_T (T_{среды} - T_{слоя}) S d\tau, \quad (2)$$

где α_T – коэффициент теплоотдачи;
 $T_{среды}$ – температура среды;
 $T_{слоя}$ – температура слоя.

Из (1) и (2) уравнений получаем:

$$\Delta V_{сл} \rho c_p T_{пл} = \alpha_T (T_{среды} - T_{слоя}) S \tau. \quad (3)$$

Данные по теплофизическим константам α_T , ρ , c_p , $T_{пл}$ взяты из источников [4, 5]. Отсюда находится время растворения слоя по формуле (4):

$$\tau = \frac{\Delta V_{сл} \rho c_p T_{пл}}{q_{вн} S}. \quad (4)$$

Тогда время растворения шара, вычисляется по формуле:

$$\tau_{шара} = \sum_{i=1}^n \tau_{слоя}, \text{ где } n = \frac{r_{шара}}{\Delta r}. \quad (5)$$

Передача тепла в шаре, происходит по следующей схеме: пока внешний слой расплавляется, следующий за ним слой нагревается, как показано на рисунке 3.

Для i -го слоя, время, за которое i -ый слой расплавится, рассчитывается по следующим формулам:

$$\tau_{распл,i} = \frac{\Delta V_{сл} \rho c_p T_{пл}}{\alpha (T_{среды}^i - T_{слоя}^i) S}, \text{ где } T_{слоя}^i = \frac{T_{среды}^i + T_{нагр,i-1}}{2}. \quad (6)$$

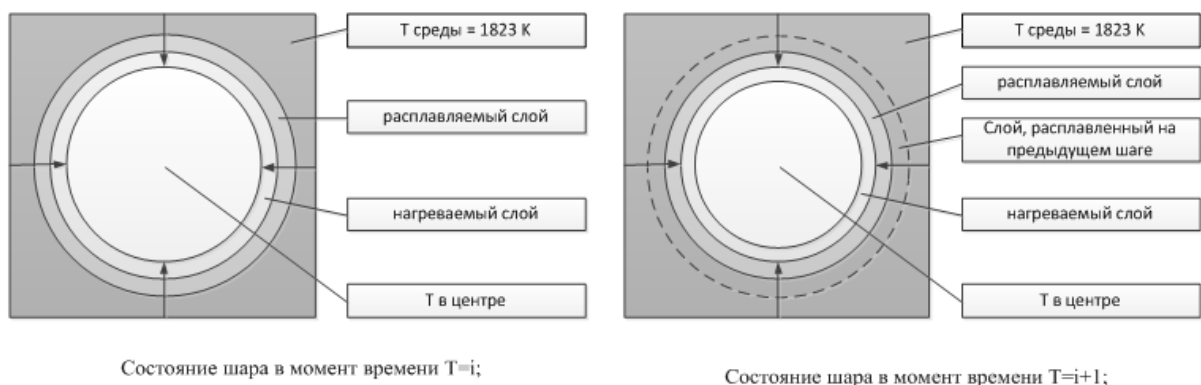


Рисунок 3 – Состояние куска на i и $i+1$ шаг

Температура нагреваемого слоя вычисляется по формуле:

$$T_{нагр,i} = \frac{\alpha(T_{слож}^i - T_{слож}^{i+1})S\tau_{распл,i}}{\Delta V \rho c_p}, \text{ где } T_{слож}^{i+1} = \frac{T_{слож}^i + T_{нагр,i-1}}{2}. \quad (7)$$

Совокупность растворяющихся кусков руды поступает в зону 5б, которую можно рассматривать в виде следующей модели (рисунок 4).

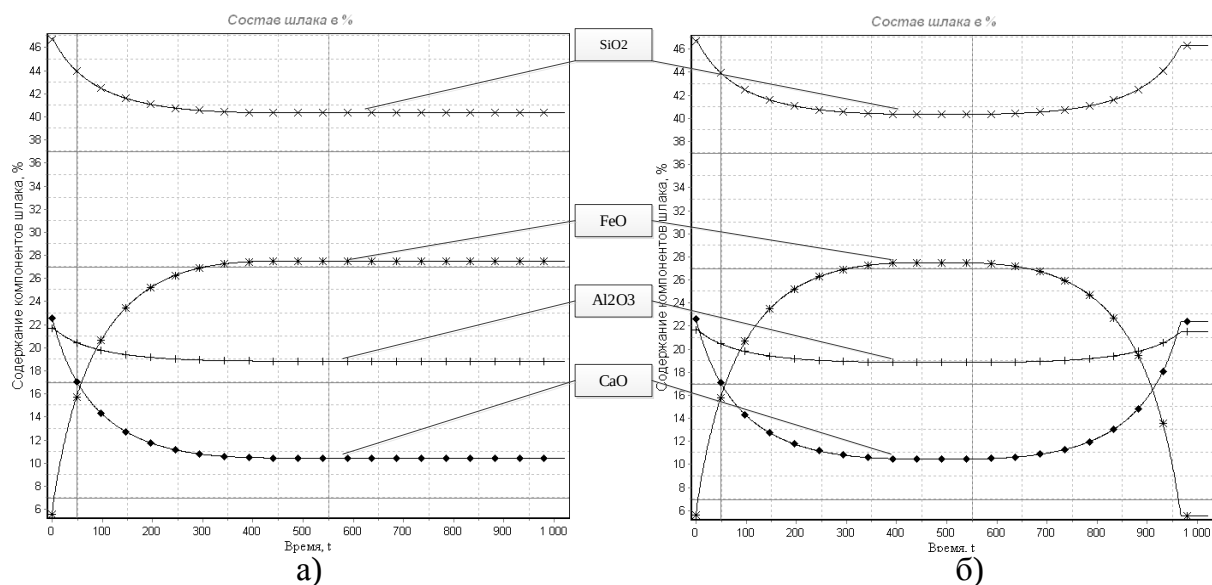


Рисунок 4 – Изменение процентного содержания основных компонентов шлака при постоянном ступенчатом изменении подачи железной руды (а) и прекращении подачи по достижении среднего времени расплавления кусков (б)

По формуле (8) находят процентный состав вещества в шлаке:

$$x_i = \frac{x_i + dx_i}{\sum_{i=1}^n (x_i + dx_i)}, \quad (8)$$

где x_i – масса вещества i в шлаке;
 dx_i – прирост массы вещества i из расплавленного слоя руды;

$\sum_{i=1}^n (x_i + dx_i)$ – общая масса шлака.

Прирост массы вещества i из расплавленного слоя руды, рассчитывается по формуле:

$$dx_i = \frac{4}{3} \pi \Delta R^3 \rho n, \quad (9)$$

где ρ – плотность руды;

n – количество шаров приходящихся на массу;

$\Delta R = R_{i-1} - R_i$ – изменение радиуса на предыдущем и текущем шаге.

Делается допущение, что интенсивность расходования кислорода из шлака в металл, вследствие увеличения градиента концентраций между шлаком $(FeO)_{III}$ и металлом $[O]_M$ определяется процессом турбулентной диффузии:

$$V_{O_2} = \beta_{MIII} [(FeO)_{III} - \frac{72}{16} [O]_M]. \quad (10)$$

В приведённых ниже результатах исследования сделано предположение, что половина поступающего кислорода расходуется на реакцию обезуглероживания в металле, а другая половина на дожигание CO до CO_2 в газовой фазе.

На рисунке 4 представлено изменение основных компонентов шлака: FeO , SiO_2 , CaO , Al_2O_3 при ступенчатом (20% от общей подачи) изменении подачи (рис. 4а) (при средней величине диаметра куска 0,05 м) и при импульсном (рис. 4б).

Изменение FeO в шлаке влияет на скорость массопереноса оксида железа FeO из шлака в металл, и «естественно» на скорость изменения содержания углерода в металле (зона 8, рисунок 1).

Процессы, происходящие в зонах 5-8, определяют динамику изменения состава шлака в нижней части зонной модели колонного СЭР [6] и являются преимущественно окислительными.

Процессы, происходящие в зоне 6, определяют динамику изменения состава конденсированных веществ в верхней части реактора, и являются преимущественно восстановительными из-за огромной поверхности взаимодействия.

Ниже рассматривается постановка задачи (зоны 6, 7) аналогичная подходу с использованием «первых принципов», в качестве которой рассматриваются: взаимодействие дисперсных частиц шихты (руда, уголь) и продуктов реакций (металл, шлак, газ). В качестве основной элементарной ячейки рассматривается процесс обтекания дисперсной частицы вертикальным потоком газа.

Для решения этой задачи разработан специальный алгоритм, реализующий подход, аналогичный методу Монте-Карло.

На рисунке 5 представлены силы, действующие на частицу: сила давления потока F_C , направленная снизу вверх, сила тяжести F_G и архимедова сила F_A .

В условиях динамического равновесия принцип Д'Аламбера для движущейся частицы приводит к уравнению [7]:

$$F_G - F_C - F_A = m \frac{d\omega_{me}}{dt}, \quad (11)$$

где ω_{me} – скорость движения сферической частицы.

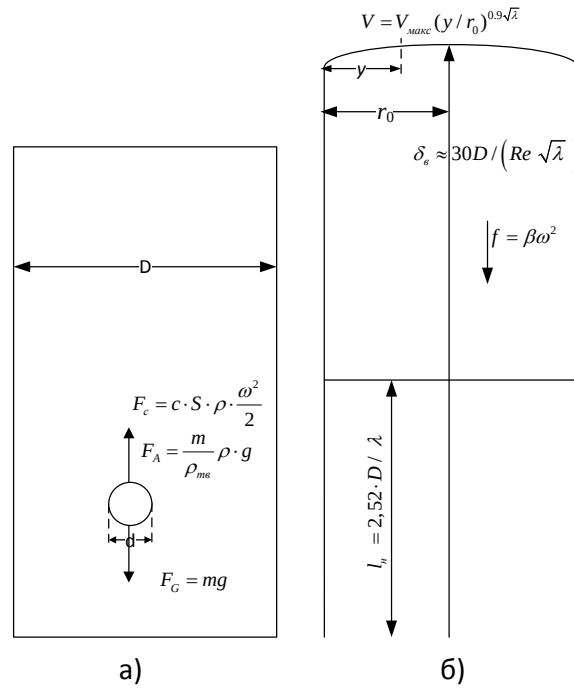


Рисунок 5 – Силы, действующие на частицу в гравитационном сепараторе а), эпюра скоростей для турбулентного течения б)

Сила тяжести выражается как:

$$F_G = mg, \quad (12)$$

где g – ускорение свободного падения.

Сила давления потока:

$$F_c = c \cdot S \cdot \rho \cdot \frac{\omega^2}{2}, \quad (13)$$

где S – площадь сечения обтекаемого тела по миделю (площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную векторам скорости набегающего потока);

ρ – плотность смеси;

ω – скорость потока смеси;

c – коэффициент лобового сопротивления, который зависит от формы обтекаемого тела и числа Рейнольдса. Для сферических частиц в турбулентном режиме, коэффициент $c = 0,44$.

Подъёмная или архимедова сила:

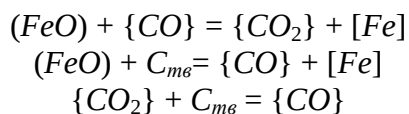
$$F_A = \frac{m}{\rho_{ms}} \rho \cdot g. \quad (14)$$

Из уравнений (12) – (14) получим:

$$\frac{d\omega_{ms}}{dt} = g \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{ms}} \right) - \frac{c \cdot \rho \cdot \omega^2}{2 \cdot m} \cdot S. \quad (15)$$

Процессы, происходящие в верхней части реактора определяют процесс изменения состава конденсированных веществ и являются преимущественно восстановительными.

Здесь возможны следующие основные реакции:



С учетом этих реакций, были выбраны следующие механизмы взаимодействия частиц.

Каждые две секунды в колонный реактор попадают частицы железной руды с диапазоном радиусов 0,1 – 2 мм, распределенные по нормальному закону. Состав железной руды и газов, поступающих в реактор, взят в соответствии с термодинамическими и балансовыми расчетами [2, 8]. Зависимость скорости растворения частицы от радиуса взята из работы [6], более подробное решение этой задачи заслуживает отдельного внимания [9].

Кроме того в реактор поступают твердые частицы углерода. При встрече двух частиц типа: железная руда – железная руда, углерод – углерод и железная руда – углерод удары считаются упругими. Как только частица железной руды расплавилась более чем на 50% при встрече железная руда – углерод, удар считается неупругим. При встрече двух частиц типа шлак-шлак и железо-железо, удары неупругие. После того как конкретная частица железной руды расплавилась, образуется две новые частицы: железо и шлак, средний состав и плотность которых принимается в соответствии с расчетами баланса и термодинамики, а затем разыгрывается по нормальному закону распределения.

Модели растворения кусков руды в зависимости от радиуса, изменения содержания основных компонентов в шлаке, гравитационного сепаратора позволяют более адекватно отразить механизмы круговорота веществ через зоны 6, 7, 8, 5, что в конечном итоге влияет на содержание C в металле.

Библиографический список

1. Цымбал В.П., Мочалов С.П., Калашников С.Н. Модели и механизмы самоорганизации в технике и технологиях. В 3-х.: Ч. III. Примеры реализации идей и принципов синергетики: Учеб. Пособие / Под редакцией В.П. Цымбала. СибГИУ. – Новокузнецк, 2005. 264 с.
2. Цымбал В.П. Мочалов С.П., Рыбенко И.А. и др. Процесс СЭР– металлургический струйно-эмульсионный реактор / Под ред. В.П. Цымбала. – М: «Металлургиздат», 2014. – 488 с.
3. Цымбал В.П., Кожемяченко В.И., Рыбенко И.А. и др. Использование принципов самоорганизации и диссипативных структур при создании нового струйно-эмульсионного металлургического процесса / Сборник трудов 13-го Международного конгресса сталеплавателей (г. Полевской, 12 – 18 октября 2014 г.), Москва – Полевской, 2014. С. 472-477.
4. Телегин А.С., Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г. Тепло-массоперенос: Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1995. – 400 с.
5. Процесс Ромелт / Под ред. В.А. Роменца – М.: МИСИС, Издательский дом «Руда и металл», 2005. – 400 с.
6. Сеченов П.А., Оленников А.А., Цымбал В.П. Исследование динамики изменения состава шлака в зонной модели колонного струйно-эмульсионного реактора // Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло: история, современное состояние, будущее. В 2 ч. Часть 2. Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве. УрФУ. Екатеринбург, 2014. – Ч. 2. – С. 105-110.

7. Сеченов П.А., Цымбал В.П. Постановка задачи создания имитационной модели гравитационного сепаратора в колонном реакторе агрегата СЭР. // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве (ТИМ-2015) Сборник докладов IV Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 95-летию кафедры и университета. 2015. С. 114-119.

8. OreEnrichmentRequiredforaSelf-OrganizingJet-EmulsionReactor / V.P. Tsymbal, S.P. Mochalov, M.S. Parovinchakidp. // SteelinTranslation. – 2009. – Vol. 39 No 4. – 310-312с.

9. Калашников С.Н., Ермакова Л.А., Мочалов С.П. Математическая модель и методика решения задачи нестационарного тепломассообмена совокупности частиц пылевидных железосодержащих материалов. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2001. – № 6. – С. 67-71.

УДК 669.02.001

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРАВИТАЦИОННОГО СЕПАРАТОРА В КОЛОННОМ РЕАКТОРЕ СТРУЙНО-ЭМУЛЬСИОННОГО АГРЕГАТА

Цымбал В.П., Сеченов П.А.

Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк, Россия, tsymbal33@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается имитационная модель гравитационного сепаратора в колонном струйно-эмульсионном реакторе. Основное внимание уделено рассмотрению сил действующих на частицу, схемам взаимодействия частиц при упругом и неупругом соударении, изменению скорости потока и плотности смеси по высоте колонного реактора при взаимодействии частиц.

Ключевые слова: имитационная модель, гравитационный сепаратор, струйно-эмульсионный реактор.

Целью работы является описание механизма и создание имитационной модели гравитационного сепаратора колонного струйно-эмульсионного реактора [1-3].

На рисунке 1 представлены силы, действующие на частицу: сила давления потока F_C , сила тяжести F_G и архимедова сила F_A . В зависимости от соотношения этих сил частица может подниматься, опускаться или оставаться неподвижной.

В условиях динамического равновесия принцип Д'Аламбера для движущейся частицы приводит к уравнению [4]:

$$F_G - F_C - F_A = m \frac{d\omega_{me}}{dt}, \quad (1)$$

где ω_{me} – скорость движения сферической частицы.

Сила тяжести выражается как:

$$F_G = mg. \quad (2)$$

Сила давления потока:

$$F_c = c \cdot S \cdot \rho \cdot \frac{\omega^2}{2}, \quad (3)$$

где c – коэффициент лобового сопротивления;

- S – площадь сечения обтекаемого тела;
 ρ – плотность смеси;
 ω – скорость потока смеси.

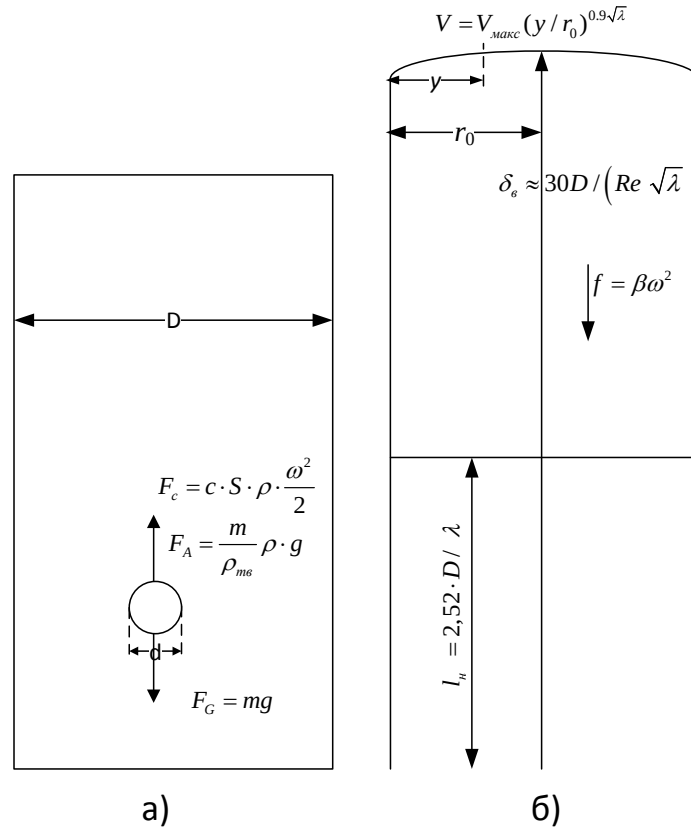


Рисунок 1 – Силы, действующие на частицу в гравитационном сепараторе а), эпюра скоростей для турбулентного течения б)

Подъёмная или архимедова сила:

$$F_A = \frac{m}{\rho_{ms}} \rho \cdot g . \quad (4)$$

Из уравнений (1) – (4) получим:

$$\frac{d\omega_{ms}}{dt} = g \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{ms}} \right) - \frac{c \cdot \rho \cdot \omega^2}{2 \cdot m} \cdot S . \quad (5)$$

Параболическое распределение скоростей при турбулентном движении в круглых трубах наступает на некотором расстоянии l_n от входного сечения, которое находят по формуле [5]:

$$l_n = 2,52 \cdot D / \lambda , \quad (6)$$

где D – диаметр канала;
 λ – коэффициент Дарси.

Для турбулентного движения определить коэффициент Дарси, можно по формуле Г. Блазиуса:

$$\lambda = 0,3164 / Re^{0,25}. \quad (7)$$

Эпюр скоростей рассчитываем по формуле Альтшуля [6]:

$$V = V_{\text{макс}} (y / r_0)^{0,9\sqrt{\lambda}}, \quad (8)$$

где y – расстояние от точки, в которой рассчитывается скорость до стенки трубы;
 r_0 – радиус колонного реактора.

Генерировать радиус подаваемых частиц железной руды будем с помощью метода Неймана. Сначала генерируем две случайные пары чисел x_1^n и x_2^n , из них формируются другие случайные числа по следующим правилам:

$$x_1^{n*} = a + (b - a)x_1^n, \quad (9)$$

$$x_2^{n*} = w_m x_2^n, \quad (10)$$

где a, b – границы интервала определения случайной величины (т.е. минимальное и максимальное значение радиусов подаваемой железной руды);

w_m – максимальное значение функции распределения.

Для функции нормального закона распределения:

$$W(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}, \text{ где } W(x)_{\text{max}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}. \quad (11)$$

В качестве реализации случайной величины берется число x_1^{n*} из тех пар чисел, для которых выполняется условие:

$$x_2^{n*} \leq w(x_1^{n*}) \quad (12)$$

пары, не удовлетворяющие этому неравенству, выбрасываются, и на шаге n происходит возврат к генерации новой пары чисел.

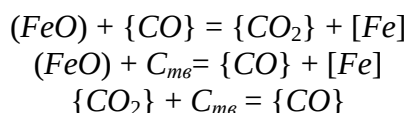
Перейдём к рассмотрению соударений частиц. В имитационной модели различают два типа ударений: упругие (для нерасплавленных частиц) и неупругие (для расплавленных частиц). Для неупругого соударения, скорость объединенной частицы:

$$\omega = \frac{m_1 \bar{\omega}_1 + m_2 \bar{\omega}_2}{m_1 + m_2}. \quad (13)$$

Для упругих ударов скорости после соударения:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \bar{\omega}_1 \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 + m_2)} + \bar{\omega}_2 \frac{2m_2}{(m_1 + m_2)} \\ \omega_2 &= \bar{\omega}_1 \frac{2m_1}{(m_1 + m_2)} + \bar{\omega}_2 \frac{(m_2 - m_1)}{(m_1 + m_2)} \end{aligned} \quad (14)$$

Процессы, происходящие в верхней части реактора [1, 2], определяют процесс изменения состава конденсированных веществ и являются преимущественно восстановительными. Здесь возможны следующие основные реакции:



На основе данных реакций, были выбраны следующие механизмы взаимодействия частиц. Каждые две секунды в колонный реактор попадают частицы железной руды с радиусами 0,1 – 2 мм согласно нормальному закону распределения. Состав железной руды, газов, поступающих в реактор, взят в соответствии с термодинамическими и балансовыми расчетами [7]. Зависимость скорости растворения частицы от радиуса возьмём из работы [3].

Кроме того в реактор поступают твердые частицы углерода. При встрече двух частиц типа: железная руда – железная руда, углерод – углерод и железная руда – углерод удары считаются упругими. Как только частица железной руды расплавилась более чем на 50% при встрече железная руда – углерод удар считается неупругим. При встрече двух частиц типа шлак-шлак и железо-железо, удары неупругие. После того как частицы железной руды расплавились, образуется две новые частицы: железо и шлак, состав и плотность которых принимается в соответствии с расчетами баланса и термодинамики. При встрече шлаковой частицы газовой, был реализован вариант образования шарообразных полых частиц шлака, которые образуются в результате турбулизационно-инерционного механизма. Этот вопрос заслуживает отдельного рассмотрения.

Плотность газа по высоте рассчитывается по слоям, на n -ом слое вычисляется по следующей формуле:

$$\rho_{cl,n}^2 = \frac{\sum \rho_{cl,n}^{2-q}}{c_{cl,n}^{2-q}} \cdot \frac{\sum V_{cl,n}^{2-q}}{V_{cl,n}} + \rho_0^2 \cdot \left(1 - \frac{\sum V_{cl,n}^{2-q}}{V_{cl,n}}\right), \quad (15)$$

где $\sum \rho_{cl,n}^{2-q}$ – сумма плотностей газовых частиц на n -ом слое;

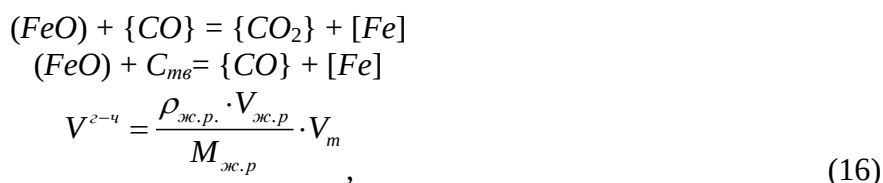
$c_{cl,n}^{2-q}$ – кол-во газовых частиц на n -ом слое;

$\sum V_{cl,n}^{2-q}$ – сумма объёмов газовых частиц на n -ом слое;

$V_{cl,n}$ – объём n -го слоя;

ρ_0^2 – начальная плотность газа, рассчитываемая из материального баланса.

Объём газовой частицы, определяется из объёма расплавившейся железной руды, в результате реакций:



где $\rho_{ж.р.}$ – плотность железной руды;

$V_{ж.р.}$ – объём железной руды;

$M_{ж.р.}$ – молярная масса железной руды;

V_m – молярный объём газа.

$$\rho_0^2 = \frac{\sum_{i=1}^k \rho_k \cdot \chi_k}{(1 + \frac{T - T_0}{T_0})}, \quad (17)$$

где ρ_k – плотность k -го компонента смеси газа при н.у.;
 χ_k – доля k -го компонента смеси газа при н.у., T_0 ;
 T – текущая температура газа в градусах кельвина.

Плотность среды по высоте канала делится на n частей. Плотность среды на n -ом слое вычисляется по следующей формуле:

$$\rho_{cl,n} = \frac{\sum \rho_{cl,n}^q}{c_{cl,n}^q} \cdot \frac{\sum V_{cl,n}^q}{V_{cl,n}} + \rho_{cl,n}^2 \cdot (1 - \frac{\sum V_{cl,n}^q}{V_{cl,n}}), \quad (18)$$

где $\sum \rho_{cl,n}^q$ – сумма плотностей частиц на n -ом слое;
 $c_{cl,n}^q$ – кол-во частиц на n -ом слое;
 $\sum V_{cl,n}^q$ – сумма объёмов частиц на n -ом слое;
 $\rho_{cl,n}^2$ – плотность газа на n -ом слое рассчитываемая по формуле (15).

Созданная имитационная модель позволяет наглядно изучить механизм гравитационного сепаратора при разном гранулометрическом составе, оценить среднее время пребывания заданной частицы, определить средний расход частиц железа и шлака.

Библиографический список

1. Цымбал В.П., Мочалов С.П., Калашников С.Н. Модели и механизмы самоорганизации в технике и технологиях. В 3-х.: Ч. III. Примеры реализации идей и принципов синергетики: Учеб. Пособие / Под ред. В.П. Цымбала. СибГИУ. – Новокузнецк, 2005. – 264 с.
2. Цымбал В.П. Мочалов С.П., Рыбенко И.А. и др. Процесс СЭР – металлургический струйно-эмульсионный реактор / Под ред. В.П. Цымбала. – М: «Металлургиздат», 2014. – 488 с.
3. Сеченов П.А., Оленников А.А., Цымбал В.П. Исследование динамики изменения состава шлака в зонной модели колонного струйно-эмульсионного реактора // Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло: история, современное состояние, будущее. В 2 ч. Часть 2. Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве. УрФУ. Екатеринбург, 2014. – Ч. 2. – С. 105-110.
4. Лавренко А.Т. Автореферат диссертации магистра: «Анализ работы сепаратора прямого коксового газа». [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.uran.donetsk.ua>. Заглавие с экрана.
5. Гидравлика Часть 1. Методические материалы по курсу «Гидравлика» Крамаренко В.В. Савичев О.Г – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 124 с.
6. А.Д. Альтшуль, В.И. Калицун, Ф.Г. Майрановский, П.П. Пальгунов. Примеры расчетов по гидравлике. Учебное пособие для вузов. Под ред. А.Д. Альтшуля. М., Стриндзат, 1977. – 248 с.
7. Ore Enrichment Required for a Self-Organizing Jet-Emulsion Reactor / V.P. Tsymbal, S.P. Mochalov, M.S. Parovinchakidp. // SteelinTranslation. – 2009. – Vol. 39 No 4. 310-312 pp.

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ГРАВИТАЦИОННОГО СЕПАРАТОРА В КОЛОННОМ СТРУЙНО- ЭМУЛЬСИОННОМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ

Сеченов П.А., Цымбал В.П.

Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк, Россия, pavesa89@mail.ru

Аннотация. В статье показана структура и алгоритмы программной реализации, взаимосвязь между основным модулем и классами программ, описано предназначение функций каждого класса; приведены примеры взаимодействия между главным модулем и классами. Представлена получившаяся имитационная модель гравитационного сепаратора колонного СЭР с описанием возможностей программы. Ниже рассматривается подход к алгоритмическому обеспечению и программной реализации этой задачи.

Ключевые слова: имитационная модель, гравитационный сепаратор, струйно-эмульсионный реактор, взаимодействие частиц, алгоритмы, программная реализация.

Целью работы является описание алгоритмов и создание имитационной модели гравитационного сепаратора колонного струйно-эмульсионного реактора на основе физической постановки задачи, представленной в статье [1].

На рисунке 1 представлены силы, действующие на частицу: сила давления потока F_C , сила тяжести F_G и архимедова сила F_A .

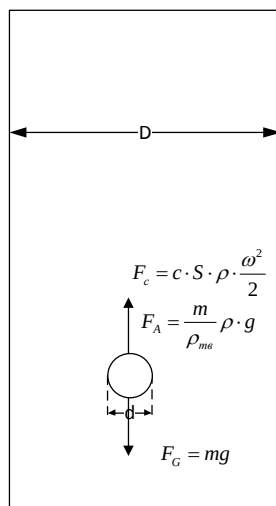


Рисунок 1 – Силы, действующие на частицу в гравитационном сепараторе

В условиях динамического равновесия принцип Д'Аламбера для движущейся частицы приводит к уравнению [2]:

$$F_G - F_C - F_A = m \frac{d\omega_{ms}}{dt}, \quad (1)$$

где ω_{ms} – скорость движения сферической частицы.

Сила тяжести выражается как:

$$F_G = mg, \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения.

Сила давления потока:

$$F_c = c \cdot S \cdot \rho \cdot \frac{\omega^2}{2}, \quad (3)$$

где S – площадь сечения обтекаемого тела по миделю (площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную векторам скорости набегающего потока);
 ρ – плотность смеси;
 ω – скорость потока смеси;
 c – коэффициент лобового сопротивления, который зависит от формы обтекаемого тела и числа Рейнольдса.

Подъёмная или архимедова сила:

$$F_A = \frac{m}{\rho_{мс}} \rho \cdot g. \quad (4)$$

Из уравнений (1) – (4) получим:

$$\frac{d\omega_{мс}}{dt} = g \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{мс}} \right) - \frac{c \cdot \rho \cdot \omega^2}{2 \cdot m} \cdot S. \quad (5)$$

Реализованная программа, состоит из основного модуля и 5 классов (рисунок 2). Как видно из рисунка, отображение частиц и статистических данных вызывается в основном модуле, а отображение графиков происходит в соответствующем классе. Передача данных осуществляется между основным модулем и классами (например, вызов функции класса расчета и возвращение результата из соответствующего класса), передачи данных между классами не осуществляется.

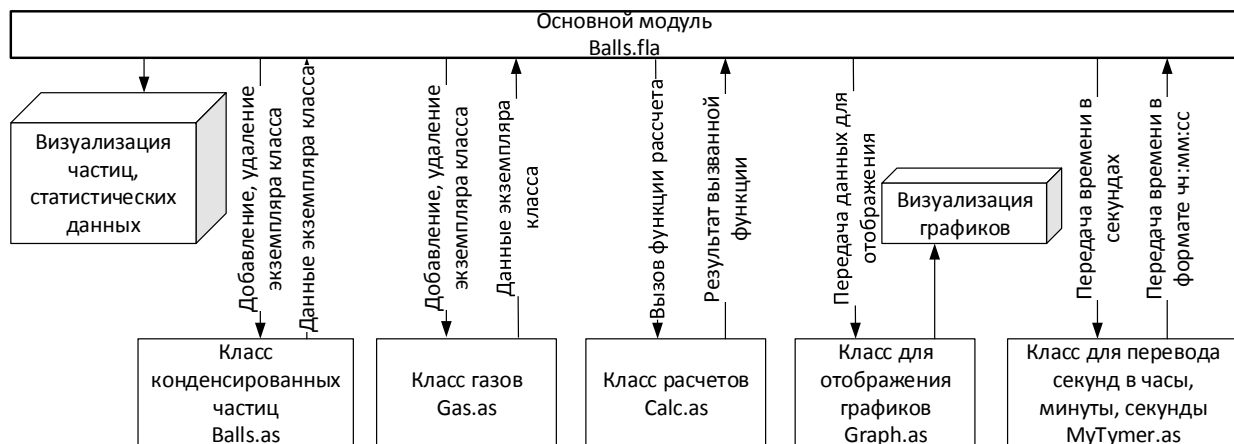


Рисунок 2 – Основные классы программы, передача данных

Рассмотрим каждый из классов более подробно. На рисунке 3 представлены основные функции для класса конденсированных частиц.

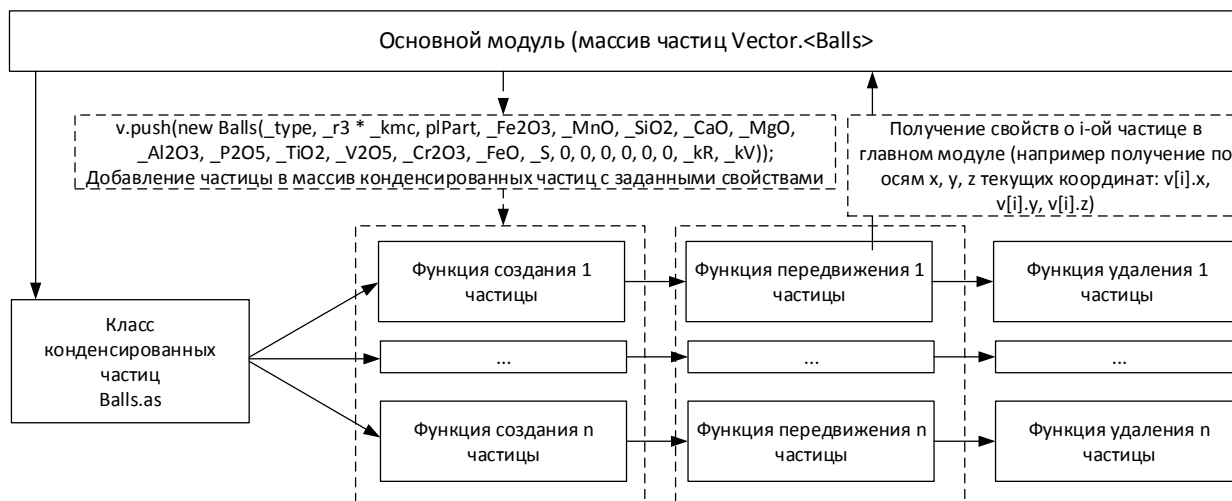


Рисунок 3 – Основные функции для класса конденсированных частиц, взаимодействие с основным модулем

Функция создания частицы включает следующие параметры: идентификатор частицы, радиус частицы, коэффициент увеличения радиуса, коэффициент скорости, плотность и массовые проценты возможных веществ конденсированных частиц (Fe_2O_3 , MnO , SiO_2 , CaO , MgO , Al_2O_3 , P_2O_5 , TiO_2 , V_2O_5 , Cr_2O_3 , FeO , S , Fe , C , Mn).

Данная функция вызывается основным модулем, после чего вызывается функция передвижения частицы.

В функции передвижения частицы, в зависимости от типа, происходит: расчет плавления для железной руды в соответствии с данными, полученными ранее [3], сжигания угля; движение по спирали (радиус колебаний меняется случайно на каждом шаге), средний радиус зависит от положения частицы по высоте ректора (в нижних слоях реактора радиус движения по окружности больше) [4]; определение скорости частицы в реакторе, с учётом сил, действующих на частицу и скоростей потока, рассмотренных в предыдущей статье; проверка того, что частица не вылетела за границы реактора; если частица долетела до уровня шлакового канала, то скорость частицы увеличивается пропорционально отношению внутренних площадей колонного реактора и площади шлакового канала.

Функция удаления частицы, вызывается из основного модуля, например, при вылете частицы в шлаковое отверстие или при полном расплавлении частицы железной руды.

Класс газов содержит те же основные функции, что и класс конденсированных частиц (создание частицы, передвижении и удаление). Функция создания газовой частицы включает: идентификатор, радиус частицы и логическую переменную, которая указывает, зародился ли пузырек газа на границе шлак-металл или нет.

Функции передвижения газовой частицы учитывает: эпюру скоростей (в центре потока скорость выше), место возникновения газовой частицы (на границе шлак-металл или в газовой среде). Частицы газа движутся со скоростью потока по высоте канала; совершают колебательные движения по осям x и z .

Класс расчетов содержит в себе часто используемые функции, для решения поставленной задачи, которые могут быть использованы и в других программах. На рисунке 4 показаны основные функции расчета, а также пример вызова функции расчета объёма из основного модуля для последнего в массиве экземпляра конденсированных частиц.

Класс для отображения графиков, позволяет строить графики по входным данным (рисунок 5).

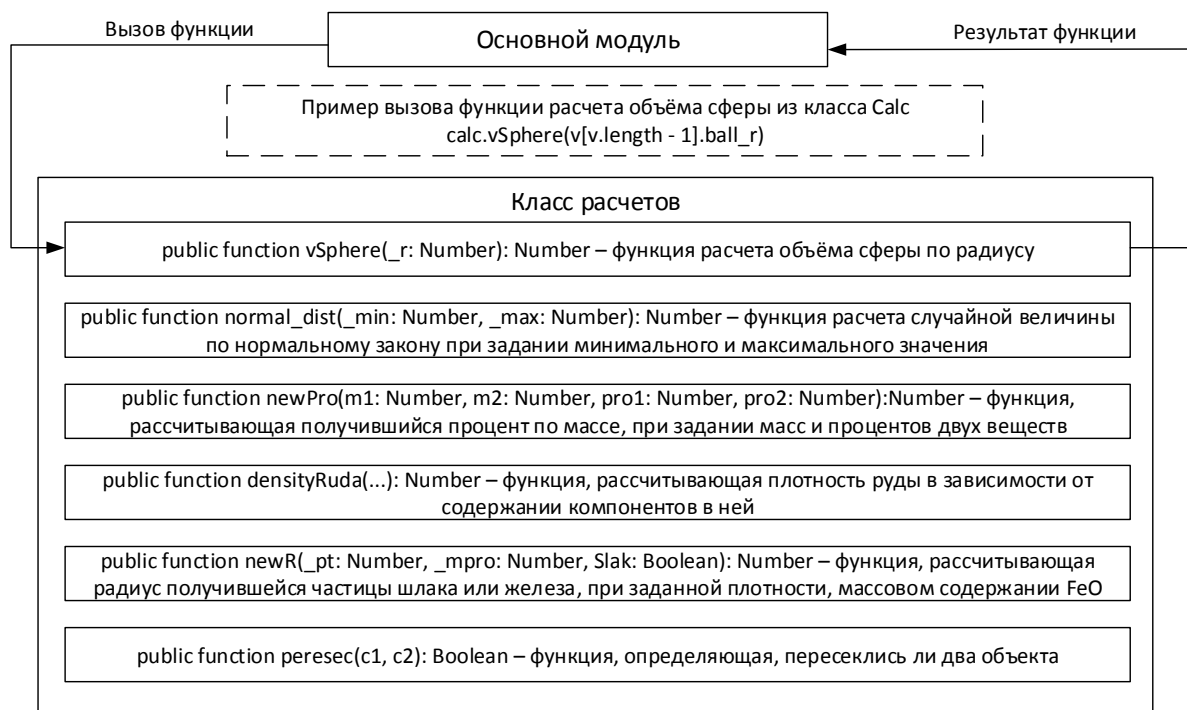


Рисунок 4 – Функции класса расчетов

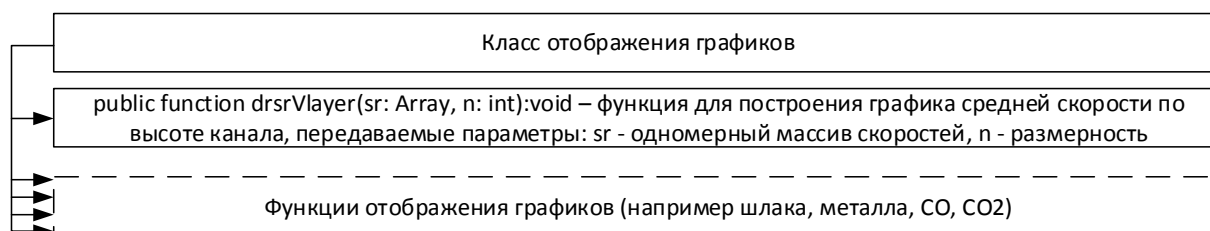


Рисунок 5 – Функция отображения на графике

Схема функций основного модуля показана на рисунке 6.

Рассмотрим различные варианты взаимодействия между частицами основного модуля.

Функция упругого столкновения конденсированных частиц сначала проверяет на пересечение i -ю частицу с частицами, начинающимися с $i+1$ позиции и до конца массива частиц. Если есть столкновение между частицами, то по плотностям и радиусам частиц, находятся их массы, после чего в соответствии с законом сохранения импульса, находятся новые вектора скоростей частиц.

Функция неупругого столкновения конденсированных частиц в случае объединения, находит радиус, плотность, состав и вектор скорости образовавшейся частицы, при этом одна частица меняет свой радиус и плотность, а вторая удаляется из массива частиц.

Функция встречи шлака с газом, рассматривает ситуацию, когда шлак «наматывается» на газ [4], при этом рассчитывается, плотность и радиус образовавшейся частицы, одна частица меняет свойства, другая удаляется.

Функция встречи C с CO_2 , в случае нахождения пересечения, удаляет две текущие частицы, и создает новую частицу газа CO в соответствии с количеством вещества исходных частиц.

Отметим, что наиболее медленная часть программы состоит в функции проверки пересечения двух частиц. Сложность данной функции, а, следовательно, и программы $O(N^2)$, где O – функция скорости алгоритма от N – количества обрабатываемых частиц.

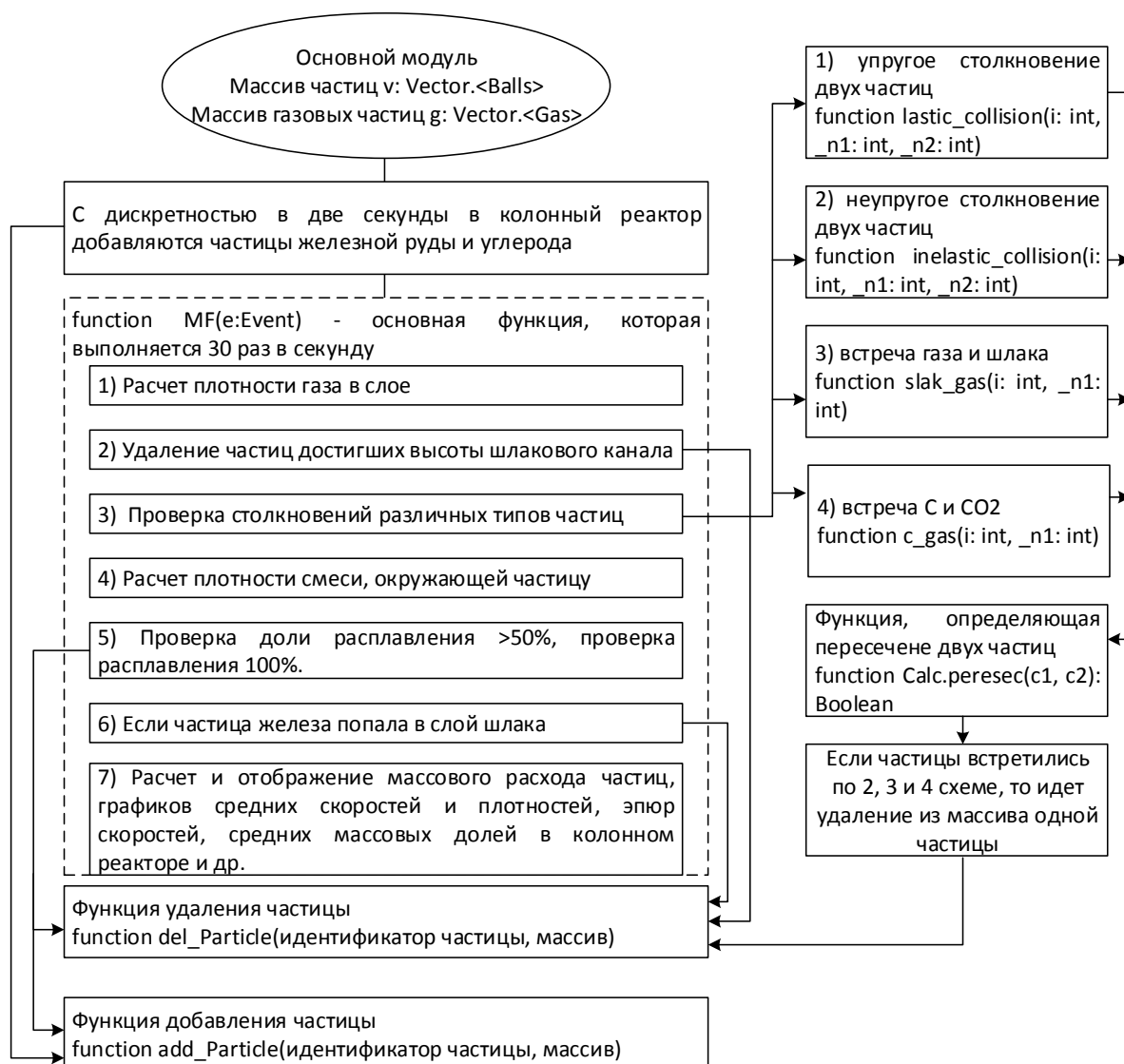


Рисунок 6 – Функции основного модуля

На рисунке 7 представлен фрагмент работы созданной имитационной модели, а также графическое представление результатов моделирования.

Наряду с дифференциацией результатов движения и взаимодействия частиц в программе выводится информация: об общем количестве частиц в реакторе, количестве частиц железной руды, углерода, шлака, железа, CO , CO_2 ; средние массы за минуту железной руды, шлака и железа; графики массового содержания соответствующих частиц; график распределения средних масс компонентов частиц в реакторе, среднее время пребывания частиц шлака и железа, соотношение приход-расход масс в реакторе. Также предусмотрена возможность менять количество подаваемых частиц железной руды и углерода, размер подаваемых частиц, начальную скорость потока в реакторе, скорость растворения частицы.

Тестирование показало работоспособность данного алгоритма и удовлетворительное совпадение конечных результатов имитационного моделирования с законом сохранения вещества.

Полученная модель в определенной степени является заместителем объекта, в частности на ней можно изучить: время пребывания частиц в реакторе, распределение плотностей по высоте канала, влияние на процесс гранулометрического состава подаваемой шихты и др.

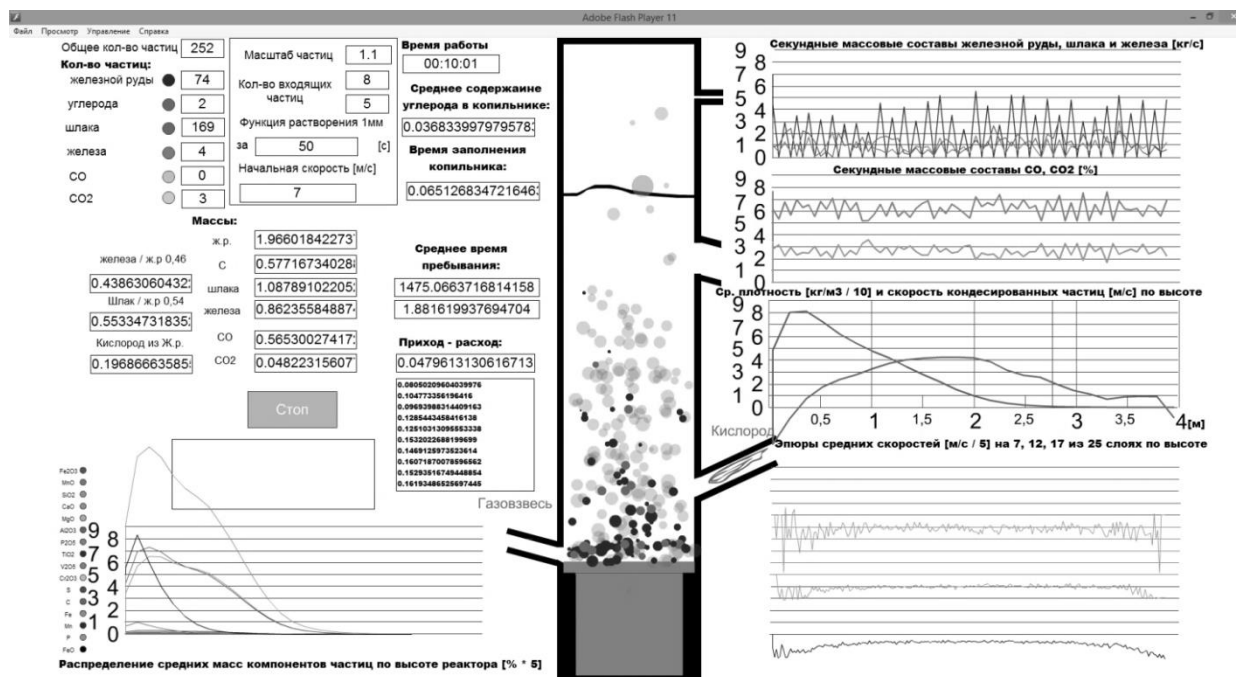


Рисунок 7 – Пример программной реализации имитационной модели гравитационного сепаратора типа СЭР

Библиографический список

1. Сеченов П.А., Цымбал В.П. Постановка задачи создания имитационной модели гравитационного сепаратора в колонном реакторе агрегата СЭР. // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве. УрФУ. Екатеринбург, 2015. – С. 114-119.
2. Лавренко А.Т. Автореферат диссертации магистра: «Анализ работы сепаратора прямого коксового газа». [Электронный ресурс] /Режим доступа: <http://www.uran.donetsk.ua>. Заглавие с экрана.
3. Сеченов П.А., Оленников А.А., Цымбал В.П. Исследование динамики изменения состава шлака в зонной модели колонного струйно-эмульсионного реактора. // Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло: история, современное состояние, будущее. В 2 ч. Часть 2. Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве. УрФУ. Екатеринбург, 2014.– Ч. 2. – С. 105-110.
4. Цымбал В.П., Мочалов С.П., Рыбенко И.А. и др. Процесс СЭР – металлургический струйно-эмульсионный реактор / Под ред. В.П. Цымбала. – М: «Металлургиздат», 2014. – 488 с.

РЕШЕНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ НА ЯЗЫКЕ ПРОГРАММИРОВАНИЯ VISUAL C# С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ПАКЕТОВ*

Гурин И.А., Спирин Н.А., Лавров В.В., Бякова М.В.

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
г. Екатеринбург, Россия, sportsoft@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена рассмотрению подходов к решению задачи оптимизации на языке программирования Visual C#. Постановка задачи оптимизации выполнена на примере оптимального распределения природного газа в группе доменных печей с учетом индивидуальных технологических ограничений на каждую печь и параметров работы доменного цеха. Рассмотрены преимущества и недостатки решения при интеграции с математическими пакетами, такими как Microsoft Excel, MATLAB, Fortran и MathCAD.

Ключевые слова: программирование, visual studio, оптимизация функции, математические пакеты, доменный процесс.

Abstract. The work provides an overview of approaches to solving the optimization task in the programming language Visual C#. Formulation of the optimization problem is made on example of the optimal distribution of natural gas in group of blast furnaces considering the individual technological limits on each blast furnace and parameters of blast-furnace plant. Discusses the benefits and disadvantages the solution when integrated with mathematical packages, such as Microsoft Excel, MATLAB, Fortran and MathCAD.

Keywords: programming, visual studio, optimization functions, mathematical packages, blast furnace.

Современные средства разработки программного обеспечения, например, среда Microsoft Visual Studio (C#), позволяют в короткие сроки создавать стильные и функциональные приложения. Однако эти средства не содержат в себе встроенных математических библиотек, которые необходимы при разработке программного обеспечения для решения научно-практических задач, а сторонние математические библиотеки, такие как Extreme Optimization и IMSL Numerical Library, имеют высокую лицензионную стоимость. С другой стороны, инженерные пакеты с большим количеством встроенных математических библиотек и специальных функций, например, Microsoft Excel, Fortran, MathCAD, MATLAB и др. не имеют встроенных средств создания удобного пользовательского интерфейса и не позволяют разрабатывать функциональные Windows-приложения. В связи с этим, хотя подход интеграции среды Visual Studio с инженерными пакетами и является нетривиальной задачей, он весьма интересен при решении сложных математических задач.

В докладе рассматривается реализованный в среде Microsoft Visual Studio на языке C# метод решения задачи оптимизации на примере оптимального распределения природного газа в группе доменных печей с учетом индивидуальных технологических ограничений на каждую печь и параметров работы доменного цеха. Работа выполняется в рамках разработки автоматизированной информационно-моделирующей системы для оценки эффективности использования топливно-энергетических ресурсов на отдельных доменных печах, а также расчета их оптимального распределения при заданном на доменный цех общем объеме этих ресурсов [1].

Используемый подход основан на следующих положениях: при относительно небольших колебаниях параметров относительно базовых значений целесообразно использовать принцип малых отклонений и свести задачу оптимизации к линейному математическому программированию. В общем виде математическая модель оптимального распределения природного газа в доменном цехе содержит линейную целевую функцию и

* Работа выполнена при финансовой поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.A03.21.0006.

The work was supported by Act 211 Government of the Russian Federation, contract № 02.A03.21.0006

ограничения. Целевая функция сводит к максимуму эффективность использования природного газа в цехе [2]:

$$Z = \sum_{j=1}^n \{ \alpha (e_j C_K - C_{\text{ПГ}}) + (1 - \alpha) C_{\text{П}} [\Delta \Pi_j^{\text{ПГ}} - e_j \Delta \Pi_j^K] \} V_j^{\text{ПГ}} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где Z – эффективность использования природного газа в цехе, руб./час;
 n – количество печей в цехе, шт.;
 α – весовой коэффициент, который определяет, что предпочтительнее – выигрыш в денежном выражении или в производительности, $0 < \alpha \leq 1$;
 e_j – эквивалент замены кокса на природный газ, кг кокса/м³ природного газа;
 C_K – стоимость кокса, руб./кг кокса;
 $C_{\text{ПГ}}$ – стоимость природного газа, руб./м³;
 $C_{\text{П}}$ – условно постоянный коэффициент, который показывает на сколько увеличиваются затраты при увеличении производительности, руб./т чугуна;
 $\Delta \Pi_j^{\text{ПГ}}$ – изменение производительности j -й печи при увеличении расхода природного газа на 1 м³, т чугуна/м³ ПГ;
 $\Delta \Pi_j^K$ – изменение производительности j -й печи при увеличении расхода кокса на 1 кг, т чугуна/кг кокса;
 $V_j^{\text{ПГ}}$ – расход природного газа на j -й печи, м³/час.

Как видно из выражения (1), часть, расположенная в фигурных скобках, имеет постоянное значение при данном расчете и представляет собой коэффициент эффективности использования природного газа на j -й печи. Поэтому упрощенно значение целевой функции Z можно представить по формуле:

$$Z = \sum_{j=1}^n k_j V_j^{\text{ПГ}} \rightarrow \max, \quad (2)$$

где k_j – коэффициент эффективности использования природного газа, руб./м³ природного газа.

Задача оптимизации включает следующие компоненты:

- максимизируемая целевая функция Z ;
- коэффициенты, отражающие влияние расходов природного газа на показатели теплового, газодинамического и шлакового режимов доменной плавки;
- ограничения на показатели теплового, газодинамического и шлакового режимов по печам (максимальные и минимальные величины содержания S и Si в чугуне, расхода газа на доменную печь, теоретической температуры горения на фурмах, обобщенного показателя теплового состояния низа печи, отношения теплоемкостей потоков шихты и газов в шахте, степени уравнивания шихты газовым потоком и др.);
- ограничения на цех в целом по запасам кокса и природному газу, требуемая производительность цеха.

На данный момент алгоритм решения задачи оптимизации реализован в пакете Microsoft Excel, где с использованием встроенной надстройки «Поиск решения» реализован блок оптимального распределения природного газа в базовом режиме, позволяющий оценить эффективность использования топливно-энергетических ресурсов [3].

С другой стороны, среда Microsoft Visual Studio включает средства автоматизации приложений. Например, для автоматизации расчета в электронных таблицах написана библиотека объектов Microsoft Office Excel, которая позволяет выполнять практически все действия, которые можно выполнить вручную через интерфейс пользователя. Библиотека включает возможности чтения и изменения ячеек на листах книги, создание диа-

грамм и вызов макросов. Имея такой функционал, принято решение об интеграции библиотека объектов Microsoft Excel с Microsoft Visual Studio (C#).

Подход интеграции Microsoft Excel и Microsoft Visual Studio (C#) основан на следующей схеме взаимодействия. Excel-документ хранит модель расчета. Пользовательское приложение включает информацию о сопоставлении между исходными данными и соответствующими ячейками в электронной таблице Excel, а также исходные данные для расчета, которые хранятся в базе данных. Для решения задачи пользовательское приложение имеет возможности чтения и редактирования исходных данных, функционал выполнения процесса расчета, а также чтения его результатов.

Шаги алгоритма оптимизации при такой схеме взаимодействия представлены на рисунке 1.

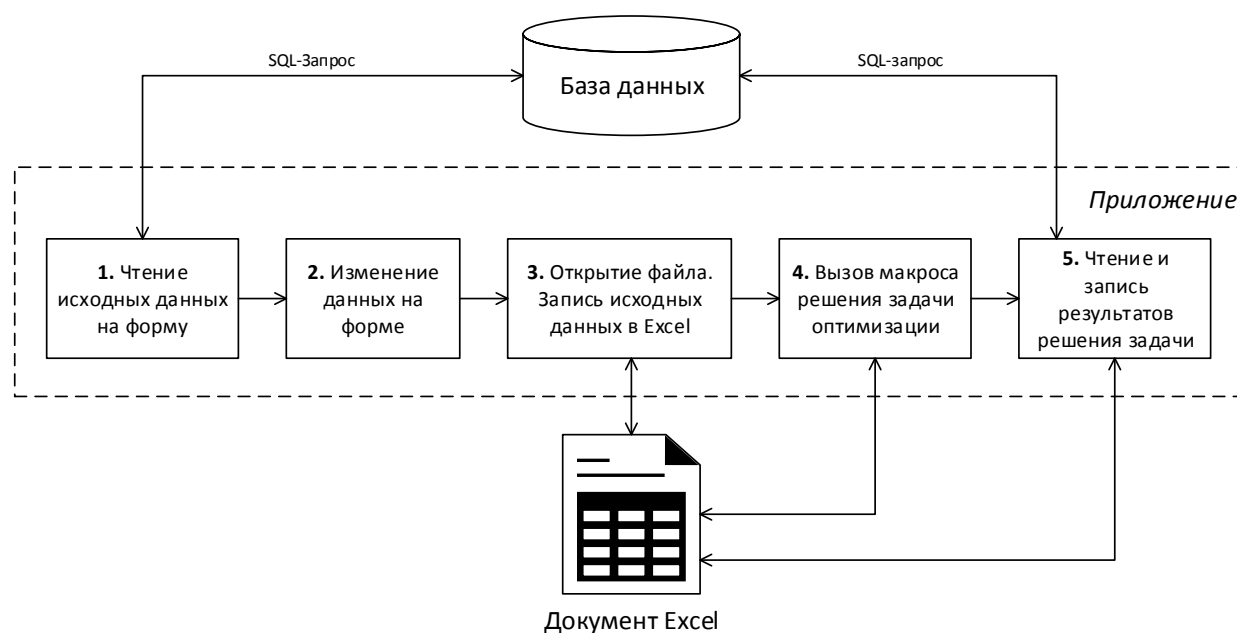


Рисунок 1 – Алгоритм работы оптимизации при интеграции с Microsoft Excel

Преимуществом такого подхода является быстрая разработка программного средства за счет сокращения времени на разработку, тестирование и отладку математической библиотеки. В отличие от первоначального варианта прямой работы пользователя с Excel-документом, этот подход имеет следующие основные преимущества:

- централизованное хранение и возможность автоматической выгрузки исходных данных для расчета из централизованной базы данных предприятия;
- оперативное представление пользователю в удобном виде нескольких вариантов расчета оптимизации в количественном и графическом виде.

Однако, в ходе решения задачи оптимизации при помощи интеграции с Microsoft Excel были обнаружены следующие недостатки:

- максимальное количество ограничений в надстройке «Поиск решения» при нахождении целевой функции составляет 100. Данное ограничение не позволяет гибко решать задачу, настраивая ограничения на каждую печь;
- низкая скорость решения задачи. Действия с Excel-файлом осуществляются через открытие приложения Microsoft Excel в фоновом режиме. Открытие занимает большой промежуток времени, а выполнение операций чтения и записи осуществляется с задержкой;
- «зависание» процесса Excel на компьютере пользователя. Даже корректное программное завершение работы с приложением Microsoft Excel и освобождение ресурсов на

стороне приложения не приводит к реальному освобождению ресурсов на вычислительной станции;

- необходимость хранения отношений между данными приложения и соответствующими ячейками Excel-файла. Другими словами, логика работы клиентского приложения связана с реализацией модели оптимизации в Excel-файле, поэтому любое изменение модели оптимизации требует постоянной перенастройки диапазонов ячеек и перекompilляции приложения;

- отсутствие возможности изменять модель внутри программы. Например, изменение количества печей или ограничений по печам требует ручного изменения документа Excel, либо предполагает хранение копий документа с разными моделями;

- проблема программной совместимости версий. Библиотека объектов поставляется вместе с приложением Microsoft Excel и может быть несовместима с версией, используемой при разработке программного обеспечения.

В связи с большим количеством недостатков, обнаруженных при таком подходе к решению задачи, был рассмотрен метод решения задачи с использованием пакета MATLAB. Особенностью этого пакета является возможность создания динамически подключаемых библиотек DLL, которые затем можно использовать при программировании приложений. Среди множества вариантов, MATLAB поддерживает сборку библиотеки для разработчиков на языке программирования Visual C#. Использование DLL не требует установки экземпляра математического пакета на конечный компьютер, а средой исполнения компонентов MATLAB является свободно распространяемый продукт MATLAB Runtime.

Решение задачи оптимизации в среде MATLAB осуществляется с помощью функции `linprog` [4]. Функция `linprog` решает задачу линейного программирования в форме:

$$\begin{aligned} f^T \cdot x &\rightarrow \inf, \\ A \cdot x &\leq b, \\ Aeq \cdot x &\rightarrow beq, \\ lb &\leq x \leq ub. \end{aligned} \quad (3)$$

Основными входными данными `linprog` являются: вектор коэффициентов целевой функции f , матрица ограничений-неравенств A , вектор правых частей ограничений-неравенств b , матрица ограничений-равенств Aeq , вектор правых частей ограничений-равенств beq , вектор lb , ограничивающий план x снизу, вектор ub , ограничивающий план x сверху. На выходе функция `linprog` даёт оптимальный план x задачи (3) и экстремальное значение целевой функции $fval$.

Проанализировав особенности данного и предыдущего методов, можно сделать вывод, что интеграция MATLAB в среду Visual Studio полностью исключает недостатки, присущие решению в электронных таблицах Microsoft Excel.

Рассмотрим кратко особенности методов интеграции с пакетами MathCAD и Fortran, которые не использовались на практике в связи с их недостатками.

Математический пакет MathCAD, как и Microsoft Excel, использует при интеграции со средой разработки COM-подключение. Поэтому данному методу присущи те же недостатки, главными из которых являются необходимость установки дорогостоящей копии MathCAD на каждом конечном компьютере приложения, проблема программной совместимости между версиями библиотеки для работы с COM-объектом и низкая скорость решения задачи.

Язык программирования Fortran используется в первую очередь для научных и инженерных вычислений, при этом для использования своего функционала во внешних приложениях включает возможность сборки библиотек. Однако Visual C# не поддерживает корректную работу с неуправляемыми библиотеками, которые создаются в Fortran

95, а современные версии языка программирования включают только коммерческие версии математических библиотек, таких как IMSL. Поэтому данный метод не проверялся на практике.

Таким образом, в данной работе рассмотрены четыре подхода к решению задачи оптимизации линейной функции, два из которых были реализованы. Первый реализованный подход включает интеграцию с пакетом Microsoft Excel и использует для решения задачи встроенную надстройку «Поиск решения», вызываемую с помощью макроса. Вторым реализованным подходом основан на интеграции с пакетом MATLAB. Такой подход позволяет использовать богатый функционал математического пакета в сочетании с возможностями разработки стильных и удобных пользовательских интерфейсов.

Библиографический список

1. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О.П. Онорин, Н.А. Спирин, В.Л. Терентьев, Л.Ю. Гилева, В.Ю. Рыболовлев, И.Е. Косаченко, В.В. Лавров, А.В. Терентьев; под ред. Н.А. Спирина. Екатеринбург: УГТУ–УПИ. 2005. 301 с.
2. Спирин Н.А. Оптимизация распределения природного газа в доменном цехе при изменении параметров плавки / Н.А. Спирин, Л.Ю. Гилёва, В.В. Лавров, А.С. Истомин, И.А. Гурин, А.А. Бурыкин, К.А. Щипанов. Известия вузов. Черная металлургия. 2014. № 6. С. 45–49.
3. Решение задачи оптимизации в среде программирования Microsoft Visual Studio (C#) / Гурин И.А., Спирин Н.А., Лавров В.В., Бякова М.В. Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: Труды X Всероссийской научно-практической конференции (17-19 декабря 2015 г.). Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: изд. центр СибГИУ, 2015. С. 41–45.
4. Кетков Ю.Л. MATLAB 7: программирование, численные методы. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 752 с.

УДК 669.162.263

К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ШАХТНЫХ ПЕЧЕЙ С ПЛАВЛЕНИЕМ МАТЕРИАЛОВ*

Швыдкий В.С.¹, Фатхутдинов А.Р.^{1,2}, Алексеев А.Н.²

¹ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
г. Екатеринбург, Россия, vshvit@isnet.ru

²АО «Уралметаллургэнерго»
г. Екатеринбург, Россия

Аннотация. Сформулирована задача стационарного теплообмена в шахтных слоевых печах, в которых побудительной причиной движения обрабатываемых материалов является плавление последних. Здесь проявляется та особенность процессов переноса энергии, что их интенсивность в значительной степени определяется скоростью движения материала, которая, в свою очередь существенно зависит от темпа плавления частиц. Поскольку единственным способом примирения указанного противоречия является итерационный подход, то, в целом, при математической формулировке задачи приходится прибегать к идеализации отдельных явлений. В частности, отдельные идеализации являются вынужденными в силу недостаточной теоретической проработки ряда вопросов, например, математической теории движения сыпучих материалов в шахтных печах. При описании газомеханики слоя в работе используется приближение безвихревого течения.

* Работа выполнена при финансовой поддержке, постановление № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.А03.21.0006.

The work was supported by Act 211 Government of the Russian Federation, contract № 02.А03.21.0006

Ключевые слова: слоевой процесс, теплообмен, плавление, безвихревое течение, математическое описание.

Abstract. Objective of stationary heat exchange in mine layer furnaces in which reason of movement of materials is a fractioned melting of the latter. Here Ta manifests feature transfer processes of energy that their intensity is largely is determined by the speed of the material, which in turn, substantially depends on the tempo melting point particles. Since the only way to reconciliation of the contradictions is specified an iterative approach, in General, in the mathematical formulation of the tasks necessary to resort to idealization of certain phenomena. In particular, private idealizing are compelled by virtue of insufficient number of theoretical issues, for example, mathematical theory of movement bulk materials in the shaft furnaces. When describing gazomehaniki layer in deliberations about usecation an irrotational flow.

Keywords: layered process, heat, melting, bezvihrevoe for a mathematical description.

В последнее время работы по математическому моделированию металлургических агрегатов развиваются весьма интенсивно. Однако вопрос о надёжных методах оптимизации их конструктивных и режимных параметров, в особенности шахтных слоевых печей, всё ещё остаётся актуальным, поскольку имеющиеся математические модели газодинамики и теплообмена не учитывают механизма движения слоя материала, подвергающегося тепловой обработке. В каждой конкретной шахтной печи источники движения материала специфичны, однако имеется класс агрегатов, в которых побудительной причиной движения является плавление шихты. В этом случае скорость движения (опускания) материалов сама является суммарным результатом развития теплофизических процессов, что должно найти отражение в математической модели шахтной печи [1–3].

Рассмотрим эту проблему на примере шахтной печи для расплавления медных пластин, полученных из цеха электролиза. Физическая постановка задачи заключается в следующем (рисунок 1). В шахтную печь высотой H и характерным средним радиусом R через дискретно расположенные газораспределительные устройства диаметром d_{ϕ} (в дальнейшем называемые фурмами) вдувается газ (продукты сгорания топлива) в количестве Q_v , м³/с, с температурой T_0 , °C. Для создания необходимой высоты зоны плавления газораспределительные устройства размещаются на трех горизонтах, причём расстояние от «днища» печи до плоскостей осей фурм составляет $H_{1\phi}$, $H_{2\phi}$, $H_{3\phi}$, м. Сверху в печь загружают шихтовые материалы, эквивалентный диаметр частиц которых d_{m0} , м, температура t_0 , °C, а объёмный расход Q_m , м³/с. В процессе передачи теплоты от газов к материалу происходит нагрев, плавление и перемещение последнего. Требуется найти распределение температур и скоростей материала и газов в объёме печи.

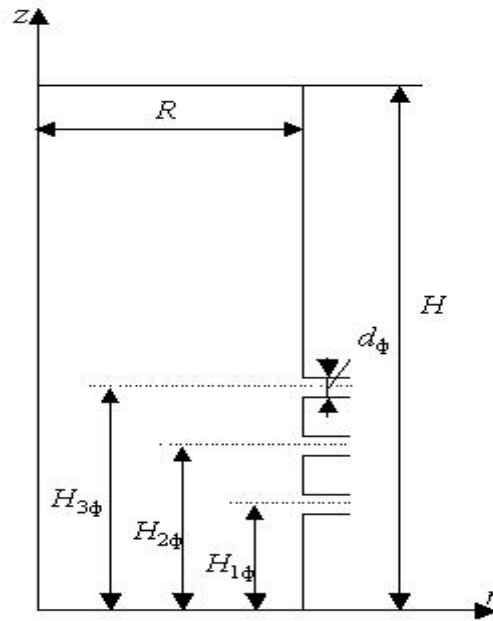
Хотя горячий газ вводится в рабочее пространство печи дискретно, будем считать движение теплоносителей осесимметричным. Основанием для такого упрощения является то обстоятельство, что для рассматриваемой конструкции печи расстояние между осями фурм по окружности наружной поверхности не превышает 0,54 м, а при этих условиях уже на расстоянии R от плоскости фурм течение газов становится практически двумерным [3].

Математическая формулировка поставленной задачи в предположении о безвихревом установившемся характере движения газов и материалов включает следующие уравнения.

Уравнение баланса массы газов (уравнение неразрывности) имеет вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\varepsilon_r r w_{rr}) + \frac{\partial}{\partial z} (\varepsilon_r w_{rz}) = 0, \quad (1)$$

где r и z — радиальная и аксиальная координаты, м;
 w_{rr} и w_{rz} — радиальная и аксиальная компоненты скорости газа, м/с;
 ρ_r — плотность газа, кг/м³;
 ε — порозность слоя.



R – средний радиус; H – высота;

$H_{1ф}$, $H_{2ф}$, $H_{3ф}$ – расстояние от «днища» печи до плоскостей осей фурм; $d_{ф}$ – диаметр фурм

Рисунок 1 – Принципиальная схема газовой шахтной печи

Вводя функцию тока $\psi(r, z)$, имеющую смысл массового расхода газа, соотношениями:

$$w_{rr} = \frac{1}{\varphi_r r} \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad w_{rz} = -\frac{1}{\varphi_r r} \frac{\partial \psi}{\partial r}, \quad (2)$$

и используя условие отсутствия завихренности $\partial w_{rr}/\partial z - \partial w_{rz}/\partial r = 0$ [4], получаем определяющее уравнение для функции тока

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\varphi_r r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\varphi_r r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = 0. \quad (3)$$

Уравнение теплового баланса (энергии), объединённое с уравнением неразрывности, запишется так:

$$c_r \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(T \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(T \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) \right] = -\alpha_v r (T - t_{\text{мас}}) - r L \rho_m (1 - \varepsilon) \frac{d\gamma}{d\tau}, \quad (4)$$

где c_r – удельная теплоёмкость газа, Дж/(кг·К);
 T – температура газа, °С;
 $t_{\text{мас}}$ – среднемассовая температура материала, °С;
 L – удельная теплота плавления материала, Дж/кг;
 α_v – объёмный коэффициент теплопередачи, Вт/(м³·К);
 $\gamma = (d_{\text{м0}}^3 - d_{\text{м}}^3)/d_{\text{м0}}^3$ – степень расплавления куска шихты, доли;
 ρ_m – плотность материала «куска» шихты, кг/м³;
 τ – время, с.

Соответствующие схеме рисунка 1 граничные условия уравнения (3) имеют вид:

$$\psi = \begin{cases} \rho_r Q_V & \text{при } r = 0 \text{ и } 0 \leq z < H; \\ \rho_r Q_V & \text{при } 0 \leq r \leq R \text{ и } z = 0; \\ \rho_r Q_V & \text{при } r = R \text{ и } 0 \leq z < H_{1\phi}; \\ \rho_r Q_V - \frac{\rho_r Q_{1V}}{d_\phi} \left(z - H_{1\phi} + \frac{d_\phi}{2} \right) & \text{при } r = R \text{ и } H_{1\phi} - \frac{d_\phi}{2} \leq z \leq H_{1\phi} + \frac{d_\phi}{2}; \\ \rho_r Q_V - \rho_r Q_{1V} & \text{при } r = R \text{ и } H_{1\phi} + \frac{d_\phi}{2} \leq z \leq H_{2\phi} - \frac{d_\phi}{2}; \\ \rho_r Q_V - \rho_r Q_{1V} - \frac{\rho_r Q_{2V}}{d_\phi} \left(z - H_{2\phi} + \frac{d_\phi}{2} \right) & \text{при } r = R \text{ и} \\ & H_{2\phi} - \frac{d_\phi}{2} \leq z \leq H_{2\phi} + \frac{d_\phi}{2}; \\ \rho_r Q_V - \rho_r Q_{1V} - \rho_r Q_{2V} & \text{при } r = R \text{ и } H_{2\phi} + \frac{d_\phi}{2} \leq z \leq H_{3\phi} - \frac{d_\phi}{2}; \\ \rho_r Q_V - \rho_r Q_{1V} - \rho_r Q_{2V} - \frac{\rho_r Q_{3V}}{d_\phi} \left(z - H_{3\phi} + \frac{d_\phi}{2} \right) & \text{при } r = R \\ & \text{и } H_{3\phi} - \frac{d_\phi}{2} \leq z \leq H_{3\phi} + \frac{d_\phi}{2}; \\ 0 & \text{при } r = R \text{ и } H_{3\phi} + \frac{d_\phi}{2} \leq z \leq H. \end{cases} \quad (5)$$

Здесь $Q_{1V} + Q_{2V} + Q_{3V} = Q_V$.

$$\partial\psi/\partial z = 0 \text{ при } z = H \text{ и } 0 \leq r \leq R. \quad (6)$$

Заметим, что соотношение (6) эквивалентно утверждению об одномерном характере движения газов на выходе из слоя.

Для температуры газа на оси печи ($r = 0$) имеем условие симметричности температурного поля:

$$\partial T / \partial r = 0. \quad (7)$$

На стенках печи (кроме фурм) задаются потери теплоты конвекцией и теплопроводностью в окружающую среду:

$$\text{при } r = R - \lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} = k(T - T_{\text{окр}}), \quad k = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_i \frac{S_i}{\lambda_{mi}} + \frac{1}{\alpha_2} \right), \quad (8)$$

где k – коэффициент теплопередачи от газа в окружающую среду, Вт/(м²·К);
 α_1 – коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности, Вт/(м²·К);
 α_2 – коэффициент теплоотдач на внешней поверхности, Вт/(м²·К);
 S_i – толщина i -го огнеупорного слоя кладки, м;
 λ_{mi} – коэффициент теплопроводности i -го огнеупорного слоя, Вт/(м·К);
 λ_r – коэффициент теплопроводности газа у внутренней стенки, Вт/(м·К).

Поскольку печи данного типа не имеют копильника, то в качестве граничного условия для «днища» печи можно принять условие отсутствия тепловых потерь, т.е.:

$$\partial T / \partial z = 0 \text{ при } z = 0 \text{ и } 0 \leq r \leq R. \quad (9)$$

На уровне засыпи, а также у стенки печи движение газа одномерное, поэтому уравнение теплового баланса упрощается до соотношения:

$$c_r \rho_r \varepsilon w_{rz} \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_v (t_{\text{mac}} - T) \text{ при } z = H, \quad (10)$$

причём здесь $t_{\text{mac}} = t_0 = \text{const}$.

Тогда уравнение (10) превращается в ОДУ первого порядка, имеющее решение:

$$T(z) = t_0 + A \cdot \exp\left(-\frac{\alpha_v z}{c_r \rho_r \varepsilon w_{rz}}\right), \quad (11)$$

где A – постоянная интегрирования.

При $r = R$ и $z = H_{1\phi}$ $T = T_0$, следовательно,

$$A = (T_0 - t_0) \cdot \exp\left(\frac{\alpha_v H_{1\phi}}{c_r \rho_r \varepsilon w_{rz}}\right) \text{ и}$$

$$T = t_0 + (T_0 - t_0) \cdot \exp\left[-\frac{\alpha_v (H - H_{1\phi})}{c_r \rho_r \varepsilon w_{rz}}\right] \text{ при } z = H \text{ и } 0 \leq r \leq R. \quad (12)$$

При анализе закономерностей движения и нагрева материала вполне допустимо предположение об их одномерности («поршневой» характер движения). В самом деле, получаемые из цеха электролиза пластины имеют размер 800×900×10 мм, в то время как радиус печи составляет 2412 мм при её высоте, равной 9205 мм. Конечно, и в процессе загрузки в печь, и в процессе движения внутри печи пластины могут (и будут) деформироваться и изменять форму, однако в любом случае горизонтальные перемещения материала маловероятны. В этих условиях уравнение баланса массы материала можно записать так:

$$\rho_m (1 - \varepsilon) w_{mz} S = \text{const} \text{ при } z > z_{\text{пл}};$$

$$\frac{\partial}{\partial z} [\rho_m (1 - \varepsilon) w_{mz}] = \rho_m (1 - \varepsilon) \frac{d\gamma}{d\tau} \text{ при } 0 < z \leq z_{\text{пл}}, \quad (13)$$

где S – площадь поперечного сечения шахты, м²;

w_{mz} – скорость опускания материала, м/с;

$z_{\text{пл}}$ – горизонт плавления материала, м.

При одномерном движении уравнение теплообмена (нагрева материала) имеет вид:

$$c_m \rho_m (1 - \varepsilon) w_{mz} \frac{\partial t_{\text{mac}}}{\partial z} = \alpha_v (t_{\text{mac}} - T), \quad (14)$$

где c_m – удельная теплоёмкость материала, Дж/(кг·К).

Фигурирующая в уравнениях скорость движения материала w_{mz} целиком определяется динамикой его плавления. В плане описания плавления материала отметим следующее. Теплофизические свойства расплава и твёрдой шихты в области температуры плавления различаются крайне незначительно, поэтому представляется допустимым в целях упрощения модели пренебречь учётом закономерностей стекания (растекания) расплава по твёрдому остатку «куска» шихты. Такое упрощение эквивалентно допущению о мгновенном удалении расплава, что характерно для задач абляции [5]. Тогда уравнения

блока математической модели шахтной печи, связанного с процессом плавления материала, сводится к уравнению теплопроводности с соответствующими краевыми условиями:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial t}{\partial \tau_1} = \frac{1}{x^{\nu-1}} \frac{\partial}{\partial x} \left(x^{\nu-1} \frac{\partial t}{\partial x} \right), \quad \tau_1 > 0, \quad 0 < x < \delta(\tau_1); \quad (15)$$

$$\tau_1 = 0, \quad \delta(0) = d_{\text{м0}} / 2, \quad t(x, 0) = t_{\text{к}}(x); \quad (16)$$

$$t(\delta, \tau_1) = t_{\text{пл}}; \quad (17)$$

$$x = 0, \quad \partial t / \partial x = 0; \quad (18)$$

$$x = \delta(\tau_1), \quad \lambda_{\text{м}} \frac{\partial t(\delta, \tau_1)}{\partial x} - \rho_{\text{м}} L \frac{\partial \delta}{\partial \tau_1} = \alpha_{\text{F}} (T - t_{\text{пл}}), \quad (19)$$

где $a = \lambda_{\text{м}} / (c_{\text{м}} \cdot \rho_{\text{м}})$ – коэффициент температуропроводности куска, $\text{м}^2/\text{с}$;

x – координата изменения температуры куска, м;

δ – радиус нерасплавившейся части куска, м;

$t_{\text{пл}}$ – температура плавления материала куска, $^{\circ}\text{C}$;

$t_{\text{к}}$ – значение локальной температуры куска перед началом плавления, $^{\circ}\text{C}$;

α_{F} – коэффициент теплоотдачи на единицу поверхности куска, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$;

ν – коэффициент формы куска.

Совокупность уравнений (1) – (19), представленная (в различных сочетаниях) в конечно-разностном виде, и составляет математическую инженерную модель шахтной печи для плавки черновой меди. В то же время нельзя не отметить узкие места в реализации этой модели, связанные, в основном, со свойствами слоя и, в первую очередь, с его порозностью. Поскольку расчёт движения материала в настоящее время невозможен и приходится принимать допущение о его поршневом характере, то и поле порозности можно *только задавать* либо на основе эксперимента, либо исходя из других соображений.

Построение дискретного аналога модели. На первом этапе исследований, как уже указывалось, можно ограничиться допущением о безвихревом характере течения газа в слое $\omega = 0$. Тогда основным расчётным уравнением будет соотношение

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\varphi r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\varphi} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = 0. \quad (20)$$

Получим на его основе дискретный аналог. Для этого умножим (20) на «площадь» контрольного объёма $drdz$ и проинтегрировав по нему, используя шаблон, показанный на рисунке 2, находим:

$$\int_{z_s}^{z_n} \int_{r_w}^{r_e} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\varphi r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) dr dz + \int_{r_w}^{r_e} \int_{z_s}^{z_n} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\varphi} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) dz dr = 0. \quad (21)$$

В первом интеграле левой части первое интегрирование можно выполнить точно [6]:

$$\int_{z_s}^{z_n} \int_{r_w}^{r_e} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\varphi r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) dr dz = \int_{z_s}^{z_n} \left[\frac{1}{(\varphi)_e r_e} \left(\frac{\partial \psi}{\partial r} \right)_e - \frac{1}{(\varphi)_w r_w} \left(\frac{\partial \psi}{\partial r} \right)_w \right] dz. \quad (22)$$

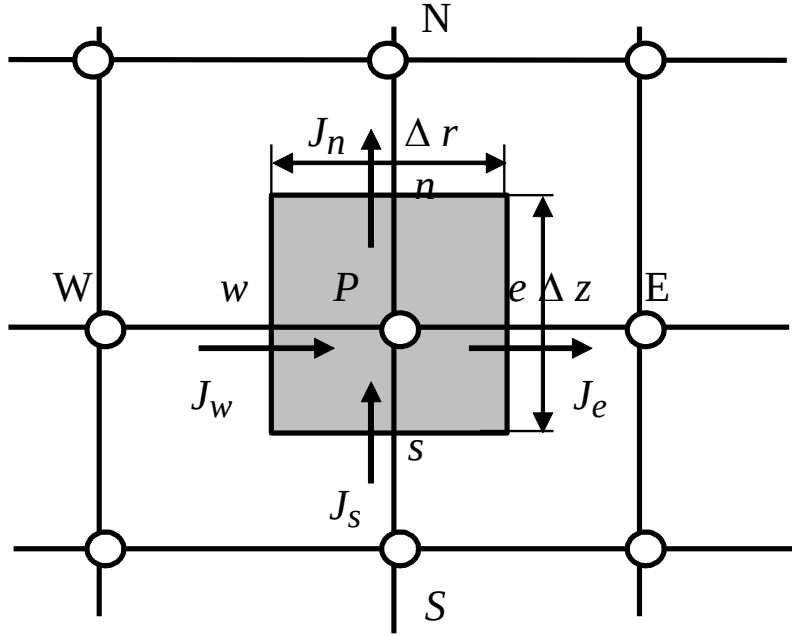


Рисунок 2 – Контрольный объем (затитая область) для двухмерного случая

Если принять, что хорошими приближениями для производных по r являются их значения на горизонте $z = z_P$, то окончательно получим:

$$\int_{z_s}^{z_n} \int_{r_w}^{r_e} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\varphi r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) dr dz = \left[\frac{1}{(\varphi)_e r_e} \frac{\psi_E - \psi_P}{(\delta r)_e} - \frac{1}{(\varphi)_w r_w} \frac{\psi_P - \psi_W}{(\delta r)_w} \right] \Delta z, \quad (23)$$

где $(\delta r)_e = r_E - r_P$, $(\delta r)_w = r_P - r_W$.

Второе слагаемое сразу требует предположения о записи всех производных в полюсе P :

$$\begin{aligned} \int_{r_w}^{r_e} \int_{z_s}^{z_n} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\varphi} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) dz dr &= \frac{\Delta r}{r_P} \left[\frac{1}{(\varphi)_n} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} \right)_n - \frac{1}{(\varphi)_s} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} \right)_s \right] = \\ &= \frac{\Delta r}{r_P} \left[\frac{1}{(\varphi)_n} \frac{\psi_N - \psi_P}{(\delta z)_n} - \frac{1}{(\varphi)_s} \frac{\psi_P - \psi_S}{(\delta z)_s} \right]. \end{aligned} \quad (24)$$

В этих выражениях индексы n и s просто означают, что интегрирование по r выполняется вдоль линий $z_n = (z_N + z_P)/2$ и $z_s = (z_P + z_S)/2$.

Объединяя полученные результаты, получаем дискретный аналог дифференциального уравнения для функции тока безвихревой задачи в виде

$$A_P \psi_P = A_E \psi_E + A_W \psi_W + A_N \psi_N + A_S \psi_S, \quad (25)$$

где $A_E = \frac{4}{(r_E + r_P)[(\varphi)_E + (\varphi)_P]} \frac{\Delta z}{(\delta r)_e}$; $A_W = \frac{4}{(r_W + r_P)[(\varphi)_W + (\varphi)_P]} \frac{\Delta z}{(\delta r)_w}$;

$A_N = \frac{2}{r_P[(\varphi)_N + (\varphi)_P]} \frac{\Delta r}{(\delta z)_n}$; $A_S = \frac{2}{r_P[(\varphi)_S + (\varphi)_P]} \frac{\Delta r}{(\delta z)_s}$;

$A_P = A_E + A_W + A_N + A_S$.

В изотермической задаче все параметры среды в этих коэффициентах постоянны [7].

Точно так же, как и в случае функции тока, проинтегрируем уравнение энергии газа (уравнение теплового баланса) по контрольному объёму:

$$\begin{aligned} & \int_{z_s}^{z_n} \int_{r_w}^{r_e} c_V \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(T \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(T \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) \right] dr dz + \\ & + \int_{z_s}^{z_n} \int_{r_w}^{r_e} \alpha_V r (T - t_{\text{mac}}) dr dz + \int_{z_s}^{z_n} \int_{r_w}^{r_e} r L \rho_M (1 - \varepsilon) \frac{d\gamma}{d\tau} dr dz = 0. \end{aligned} \quad (26)$$

В первом слагаемом (26) первое интегрирование можно было бы выполнить точно, если бы не теплоёмкость газа при постоянном объёме c_V . Поэтому примем допущение, что хорошим средним значением этой величины будет её значение в полюсе P . Тогда вместо (26) получим:

$$\begin{aligned} & c_{V,P} \left\{ \underbrace{\int_{z_s}^{z_n} \left[T_e \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} \right)_e - T_w \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} \right)_w \right] dz - \int_{r_w}^{r_e} \left[T_n \left(\frac{\partial \psi}{\partial r} \right)_n - T_s \left(\frac{\partial \psi}{\partial r} \right)_s \right] dr}_{\text{Конвективные слагаемые}} \right\} + \\ & + \underbrace{\int_{z_s}^{z_n} \int_{r_w}^{r_e} \alpha_V r (T - t_{\text{mac}}) dr dz + \int_{z_s}^{z_n} \int_{r_w}^{r_e} r L \rho_M (1 - \varepsilon) \frac{d\gamma}{d\tau} dr dz}_{\text{Источниковые слагаемые}} = 0. \end{aligned} \quad (27)$$

Конвективные слагаемые. Их четыре, но поскольку они все однотипные, то достаточно рассмотреть одно из них. Поэтому рассмотрим первый из интегралов, который обозначим символом I_e .

$$I_e \equiv c_{V,P} \int_{z_s}^{z_n} T_e \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} \right)_e dz. \quad (28)$$

Однако если T и ψ – гладкие функции, то существует среднее значение $\bar{T}_e$, определяемое соотношением:

$$\bar{T}_e \equiv \frac{\int_{z_s}^{z_n} T_e \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} \right)_e dz}{\int_{z_s}^{z_n} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} \right)_e dz} \approx \frac{I_e}{c_{V,P} (\psi_{ne} - \psi_{se})}, \quad (29)$$

в котором индексами ne и se обозначены соответствующие вершины контрольного объёма, показанного на рисунке 2. Следовательно, уравнение (28) можно переписать в виде:

$$I_e = c_{V,P} \bar{T}_e (\psi_{ne} - \psi_{se}). \quad (30)$$

Следующая задача заключается в том, чтобы выразить $\bar{T}_e, \psi_{ne}, \psi_{se}$ через значения переменных в узлах сетки. Для этого сделаем три предположения. Во-первых, предположим, что величина T постоянна внутри каждого контрольного объёма (КО) и имеет зна-

чение, соответствующее конкретному узлу, лежащему в центре данного КО. Во-вторых, предположим, что $\bar{T}_e$ принимает значение T , которое газ имеет выше по течению от стороны контрольного объёма e . Смысл этих предположений легко понять, если обратить внимание на то, что направление (и интенсивность) течения через сторону e связано посредством уравнения (2) с $(\partial\psi/\partial z)_e$ и, следовательно, с $\psi_{ne}-\psi_{se}$. В частности, если эта разность положительна, то течение направлено от P к E . Отсюда следует, что при таких условиях величина $\bar{T}_e$ должна быть равна T_P . Если же разность $\psi_{ne}-\psi_{se}$ отрицательна, то течение направлено от E к P и величина $\bar{T}_e$ должна быть принята равной T_E .

С учётом сказанного запишем выражение (30) в новом виде

$$I_e \approx c_{V,P} \left\{ T_E \left[\frac{(\psi_{ne} - \psi_{se}) - |\psi_{ne} - \psi_{se}|}{2} \right] + T_P \left[\frac{(\psi_{ne} - \psi_{se}) + |\psi_{ne} - \psi_{se}|}{2} \right] \right\}. \quad (31)$$

Присутствие в этом уравнении разности значений ψ сначала в круглых скобках (арифметической разности), а затем под знаком модуля гарантирует, что один из множителей, стоящих в квадратных скобках, обязательно будет равен нулю. Оставшееся слагаемое будет определять расход через сторону КО со стороны узла, расположенного вверх по течению от этой стороны. Иными словами, в общий дискретный аналог вводится схема, ориентированная против потока.

Третье предположение состоит в том, что значение функции тока в данной вершине контрольного объёма считается равным среднему арифметическому из её значений в четырёх соседних узлах, например

$$\psi_{se} \approx \frac{1}{4} (\psi_{SE} + \psi_E + \psi_P + \psi_S). \quad (32)$$

Аналогичные выражения можно записать для ψ_{ne} , ψ_{nw} и ψ_{sw} .

Таким образом, мы проинтегрировали первое конвективное слагаемое. Те же операции можно проделать и с другими слагаемыми, причём важной особенностью будет введение схемы, ориентированной против потока. Объединив эти результаты, после некоторых преобразований получим следующее выражение для суммы интегралов всех конвективных слагаемых $I_{\text{конв}}$:

$$I_{\text{конв}} \equiv B_E (T_P - T_E) + B_W (T_P - T_W) + B_N (T_P - T_N) + B_S (T_P - T_S), \quad (33)$$

где

$$\begin{aligned} B_E &\equiv \frac{1}{2} c_{V,P} [(\psi_{se} - \psi_{ne}) + |\psi_{se} - \psi_{ne}|], \\ B_W &\equiv \frac{1}{2} c_{V,P} [(\psi_{nw} - \psi_{sw}) + |\psi_{nw} - \psi_{sw}|], \\ B_N &\equiv \frac{1}{2} c_{V,P} [(\psi_{ne} - \psi_{nw}) + |\psi_{ne} - \psi_{nw}|], \\ B_S &\equiv \frac{1}{2} c_{V,P} [(\psi_{sw} - \psi_{se}) + |\psi_{sw} - \psi_{se}|]. \end{aligned} \quad (34)$$

Можно заметить, что ни один коэффициент B не может стать отрицательным, хотя они могут обращаться в нуль. Это одно из обстоятельств, обеспечивающих сходимость

итераций. Отметим также, что здесь величины ψ_{ij} пока не выражены через значения величин в узлах. Полные выражения будут даны позже.

Источниковые слагаемые. Если не вникать в содержание переменных, то интегралы, отображающие источниковые слагаемые, можно упростить. Приведём соответствующие преобразования без комментариев.

$$\begin{aligned} & \int_{z_s}^{z_n} \int_{r_w}^{r_e} \alpha_V r (T - t_{\text{mac}}) dr dz + \int_{z_s}^{z_n} \int_{r_w}^{r_e} r L \rho_M (1 - \varepsilon) \frac{d\gamma}{d\tau} dr dz = \\ & = \alpha_{V,P} (T_P - t_{\text{mac},P}) r_P \Delta r \Delta z + L_P \rho_{M,P} (1 - \varepsilon_P) \left(\frac{d\gamma}{d\tau} \right)_P r_P \Delta r \Delta z. \end{aligned} \quad (35)$$

Полное конечно-разностное уравнение (для уравнения энергии). Объединяя результаты (33), (34) и (35), получаем дискретный аналог уравнения энергии газа:

$$\begin{aligned} & B_E (T_P - T_E) + B_W (T_P - T_W) + B_N (T_P - T_N) + B_S (T_P - T_S) + \\ & + \alpha_{V,P} (T_P - t_{\text{mac},P}) r_P \Delta r \Delta z + L_P \rho_{M,P} (1 - \varepsilon_P) \left(\frac{d\gamma}{d\tau} \right)_P r_P \Delta r \Delta z = 0. \end{aligned} \quad (36)$$

Уравнение (36) является главным результатом всех до сих пор выполненных вычислений в отношении уравнения энергии – уравнения теплопереноса. Преобразуем его к канонической форме уравнения численной схемы:

$$A'_P T_P = A'_E T_E + A'_W T_W + A'_N T_N + A'_S T_S + S_T, \quad (37)$$

где

$$\begin{aligned} & A'_E \equiv B_E, \quad A'_W \equiv B_W, \quad A'_N \equiv B_N, \quad A'_S \equiv B_S, \\ & S_T \equiv \alpha_{V,P} t_{\text{mac},P} r_P \Delta r \Delta z - L_P \rho_{M,P} (1 - \varepsilon_P) \left(\frac{d\gamma}{d\tau} \right)_P r_P \Delta r \Delta z, \\ & A'_P \equiv A'_E + A'_W + A'_N + A'_S + \alpha_{V,P} r_P \Delta r \Delta z. \end{aligned} \quad (38)$$

В выражениях (38) подробная запись коэффициентов B имеет вид

$$\begin{aligned} B_E &= \frac{c_{V,P}}{8} [(\psi_{SE} + \psi_S - \psi_{NE} - \psi_N) + |\psi_{SE} + \psi_S - \psi_{NE} - \psi_N|], \\ B_W &= \frac{c_{V,P}}{8} [(\psi_{NW} + \psi_N - \psi_{SW} - \psi_S) + |\psi_{NW} + \psi_N - \psi_{SW} - \psi_S|], \\ B_N &= \frac{c_{V,P}}{8} [(\psi_{NE} + \psi_E - \psi_{NW} - \psi_W) + |\psi_{NE} + \psi_E - \psi_{NW} - \psi_W|], \\ B_S &= \frac{c_{V,P}}{8} [(\psi_{SW} + \psi_W - \psi_{SE} - \psi_E) + |\psi_{SW} + \psi_W - \psi_{SE} - \psi_E|]. \end{aligned}$$

При одномерном движении материала дискретный аналог уравнения теплообмена запишется в виде

$$\frac{t_{\text{mac},n} - t_{\text{mac},s}}{\Delta z} = \left(\frac{\alpha_V}{c_M \rho_M (1 - \varepsilon) w_{Mz}} \right)_P (t_{\text{mac},P} - T_P)$$

или в канонической форме

$$t_{\text{мис},P} = T_P + (t_{\text{мис},N} - t_{\text{мис},S}) / N_P. \quad (39)$$

Здесь:

$$NP = 2 \left(\frac{\alpha_V}{c_M \rho_M (1 - \varepsilon) w_{MZ}} \right)_P \Delta z.$$

На первом этапе исследований скорость движения материала w_{MZ} можно задавать по производительности печи.

Построенный дискретный аналог используется в созданном программном обеспечении, с целью расчета газодинамического режима шахтной печи. На текущий момент программно реализована несколько упрощенная модель шахтной печи. Она реализована на программируемом логическом контроллере, в результате выдает прогнозные рекомендации по положению миксера (% заполнения). Печь работает в ручном режиме под управлением оператора. Ниже на рисунке 3 показано сопоставление прогноза модели по положению миксера (синий цвет) и фактического положения (розовый цвет).

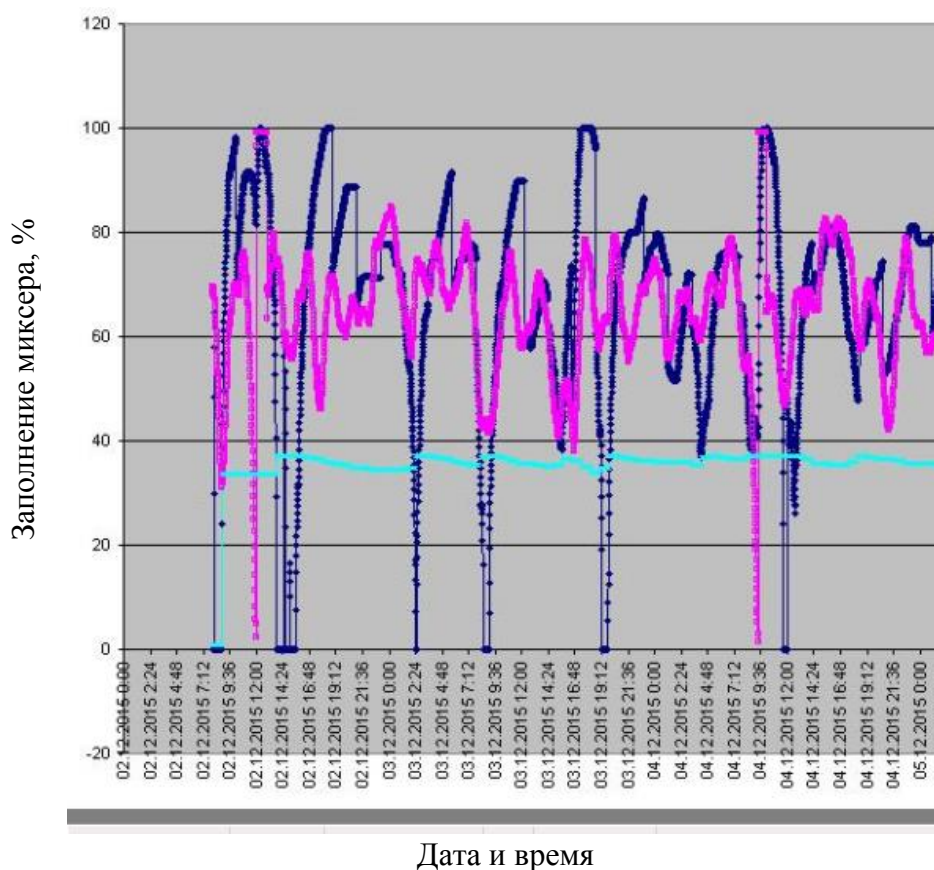


Рисунок 3 – Сопоставление прогноза модели и фактического положения миксера

В большинстве случаев даже упрощенная модель ведет себя адекватно, но есть ряд моментов, над которыми необходимо ещё работать в плане расчёта процессов плавления.

Библиографический список

1. Китаев Б.И. Тепло- и массообмен в плотном слое / Тимофеев В.Н., Боковиков Б.А. – М.: Металлургия, 1972. – 432 с.

2. Китаев Б.И. Теплотехника доменного процесса / Ярошенко Ю.Г., Суханов Е.Л. и др. – М.: Metallurgy, 1978. – 218 с.
3. Гордон Я.М. Тепловая работа шахтных печей и агрегатов с плотным слоем / Боковиков Б.А., Швыдкий В.С. и др. – М.: Metallurgy, 1989. – 121 с.
4. Швыдкий В.С. Элементы теории систем и численные методы моделирования процессов тепломассопереноса / Спирин Н.А., Лодыгичев М.Г. и др. – М.: Интернет Инжиниринг, 1999. – 520 с.
5. Био М. Вариационные принципы в теории теплообмена. Перевод с англ. – М.: Энергия, 1975. – 208 с.
6. Гордон Я.М. Механика движения газов и материалов в шахтных печах / Максимов Е.В., Швыдкий В.С. – Алма-Ата.: Наука, 1989. – 144 с.
7. Швыдкий В.С. Математические методы теплофизики: Учебник для вузов / Лодыгичев М.Г., Шаврин В.С. – М.: Теплотехник, 2005. – 232 с.

УДК 669.02.001

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННОГО ПОТОКА В КОЛОННОМ РЕАКТОРЕ СЭР И МЕХАНИЗМ ТУРБУЛЕНТНОЙ ВЯЗКОСТИ

Цымбал В.П., Сеченов П.А., Оленников А.А., Падалко А.Г.

*Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк, Россия, tsymbal33@mail.ru*

Аннотация. При математическом описании важной диссипативной структуры (гравитационного сепаратора) в самоорганизующемся струйно-эмульсионном реакторе создана имитационная модель, которая основана на использовании «первых принципов» и метода статистических испытаний Монте-Карло. В качестве первого уровня рассматриваются дисперсные частицы шихты и продуктов реакций, а также все возможные варианты их превращений и взаимодействий.

Ключевые слова: диссипативная структура, имитационная модель, метод Монте-Карло, дисперсные частицы, взаимодействия, гетерогенный поток, турбулентная вязкость.

Abstract. In the mathematical description of the important dissipative structures (gravity separator) in self-organizing jet-emulsion reactor created a simulation model, which is based on «first principles» and method Monte Carlo. As the first level are considered the dispersed particles of the charge and reaction products, as well as all possible transformations and their interactions.

Keywords: dissipative structure, simulation model, the Monte Carlo method, dispersed particles interact, heterogeneous flow, turbulent viscosity.

Коллективом ученых, производственников и проектировщиков был создан и доведен до уровня крупномасштабной опытной установки на Запсибметкомбинате [1-3] новый металлургический процесс и агрегат СЭР (самоорганизующийся струйно-эмульсионный реактор).

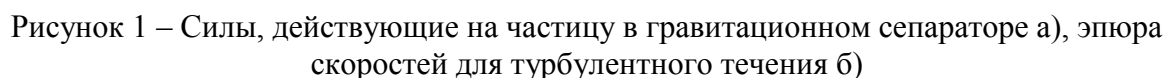
При создании этого агрегата была предпринята попытка использования некоторых идей теории самоорганизации (синергетики), таких как принципы подчинения и наименьшего принуждения, большого отклонения от термодинамического равновесия и др. Для реализации этих принципов удалось использовать ряд интересных физических эффектов, таких как диспергация шихты встречными струями газа, создание самоорганизующегося реактора-осциллятора за счет использования эффекта критического истечения двухфазного потока и обратной связи по изменению газосодержания продуктов реакций, нижняя подача рабочей смеси из реактора-осциллятора в колонный реактор, организация внутреннего пневмотранспорта рабочей смеси.

Сочетание этих факторов и мероприятий позволило создавать в агрегате динамические диссипативные структуры, что привело к резкому уменьшению удельного объема агрегата (в 10-15 раз) и обеспечило значительную гибкость управления, в том числе соот-

Естественно, что важнейшим моментом реализации рассматриваемого процесса являются математические модели. Зонная модель процесса была рассмотрена ранее [2,3]. Ниже мы остановимся на одной из важнейших диссипативных структур – гравитационном сепараторе, который образуется в вертикальном колонном реакторе при определенных режимах течения двухфазного потока рабочей смеси, подготовленной в реакторе-осцилляторе.

При создании и математическом описании этой важной диссипативной структуры, предназначенной для разделения металла, шлака и газа, удалось реализовать имитационную модель, основанную на использовании «первых принципов». В данном случае в качестве нижнего уровня иерархии рассматриваются дисперсные частицы шихты и продуктов реакций, а также все возможные варианты их превращений и взаимодействий. Ядром этой модели является процесс обтекания конденсированной частицы вертикальным потоком газа. А благодаря имитации случайности с использованием метода Монте-Карло и созданию специального алгоритма, реализующего все возможные взаимодействия, проигрывается на ЭВМ огромное число столкновений и превращений.

На рисунке 1 представлены силы, действующие на частицу: сила давления потока F_C , направленная снизу вверх, сила тяжести F_G и архимедова сила F_A . В зависимости от соотношения этих сил частица может подниматься, опускаться или оставаться неподвижной.


$$F_G - F_C - F_A = m \frac{d\omega_{m\phi}}{dt}, \quad (1)$$

Сила тяжести выражается как:

$$F_G = mg. \quad (2)$$

Сила давления потока:

$$F_c = c \cdot S \cdot \rho \cdot \frac{\omega^2}{2}, \quad (3)$$

где S – площадь сечения обтекаемого тела по миделю (площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную векторам скорости набегающего потока);
 ρ – плотность смеси;
 ω – скорость потока смеси;
 c – коэффициент лобового сопротивления, который зависит от формы обтекаемого тела и числа Рейнольдса. Для сферических частиц в турбулентном режиме, коэффициент $c = 0,44$.

Подъёмная или архимедова сила:

$$F_A = \frac{m}{\rho_{мс}} \rho \cdot g. \quad (4)$$

Из уравнений (1) – (4) получим:

$$\frac{d\omega_{мс}}{dt} = g \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{мс}} \right) - \frac{c \cdot \rho \cdot \omega^2}{2 \cdot m} \cdot S. \quad (5)$$

Параболическое распределение скоростей при турбулентном движении в круглых трубах наступает не у самого начала трубы, а на некотором расстоянии l_n от входного сечения, которое находят по формуле [5]:

$$l_n = 2,52 \cdot D / \lambda, \quad (6)$$

где D – диаметр канала;
 λ – коэффициент Дарси.

Для турбулентного движения определить коэффициент Дарси, можно по формуле Г. Блазиуса:

$$\lambda = 0,3164 / Re^{0,25}. \quad (7)$$

Эпюру скоростей рассчитываем по формуле Альтшуля [6]:

$$V = V_{\text{макс}} (y / r_0)^{0,9\sqrt{\lambda}}, \quad (8)$$

где y – расстояние от точки, в которой рассчитывается скорость до стенки трубы;
 r_0 – радиус колонного реактора.

Нормальный закон распределения для гранулометрического состава руды, угля и других частиц генерируется с использованием метода Неймана.

Перейдём к рассмотрению соударений частиц. В имитационной модели различают два типа ударений: упругие (для нерасплавленных частиц) и неупругие (для расплавленных частиц). Для неупругого соударения, скорость объединенной частицы:

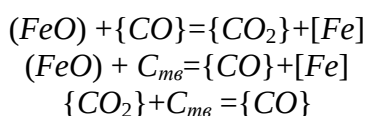
$$\omega = \frac{m_1 \bar{\omega}_1 + m_2 \bar{\omega}_2}{m_1 + m_2} . \quad (9)$$

Для упругих ударов из закона сохранения импульса и энергии получим:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \bar{\omega}_1 \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 + m_2)} + \bar{\omega}_2 \frac{2m_2}{(m_1 + m_2)} \\ \omega_2 &= \bar{\omega}_1 \frac{2m_1}{(m_1 + m_2)} + \bar{\omega}_2 \frac{(m_2 - m_1)}{(m_1 + m_2)} . \end{aligned} \quad (10)$$

Процессы, происходящие в верхней части реактора [1, 2], определяют характер изменения состава конденсированных веществ и являются преимущественно восстановительными.

Здесь возможны следующие основные реакции:



На основе данных реакций, были выбраны следующие механизмы взаимодействия частиц. В нижнюю часть колонного реактора с потоком газа подаются частицы железной руды заданного грануляционного состава, согласно нормальному закону распределения. Состав железной руды и газов, поступающих в реактор, взят в соответствии с термодинамическими и балансовыми расчетами [7]. Зависимость скорости растворения частицы от радиуса взята из работы [8]. Кроме того в реактор могут поступать твердые частицы углерода. При встрече двух частиц типа: железная руда – железная руда, углерод – углерод и железная руда – углерод удары считаются упругими. Как только частица железной руды расплавилась более чем на 50% при встрече железная руда – углерод удар считается неупругим. При встрече двух частиц типа шлак-шлак и железо-железо, удары неупругие. После того как конкретная частица железной руды расплавилась, образуется две новые частицы: железо и шлак, средний состав и плотность которых принимается в соответствии с расчетами баланса и термодинамики, а затем разыгрываются по нормальному закону распределения.

На рисунке 2 представлен фрагмент работы созданной имитационной модели, а также графическое представление результатов моделирования.

Наряду с отображением результатов движения и взаимодействия частиц, выводится информация: об общем количестве частиц в реакторе, количестве частиц железной руды, углерода, шлака, железа, CO, CO₂; средние массы за минуту железной руды, шлака и железа; графики массового содержания соответствующих частиц. Также предусмотрена возможность изменения количества подаваемых частиц железной руды и углерода.

Тестирование показало работоспособность данного алгоритма и удовлетворительное совпадение конечных результатов имитационного моделирования с законом сохранения вещества. Созданная имитационная модель, являющаяся в определенной степени заместителем объекта, позволяет наглядно изучать механизм процессов в гравитационном сепараторе при разном гранулометрическом составе, оценивать среднее время пребывания частиц, определять средний расход частиц железа и шлака, при различном заданном количестве частиц углерода.

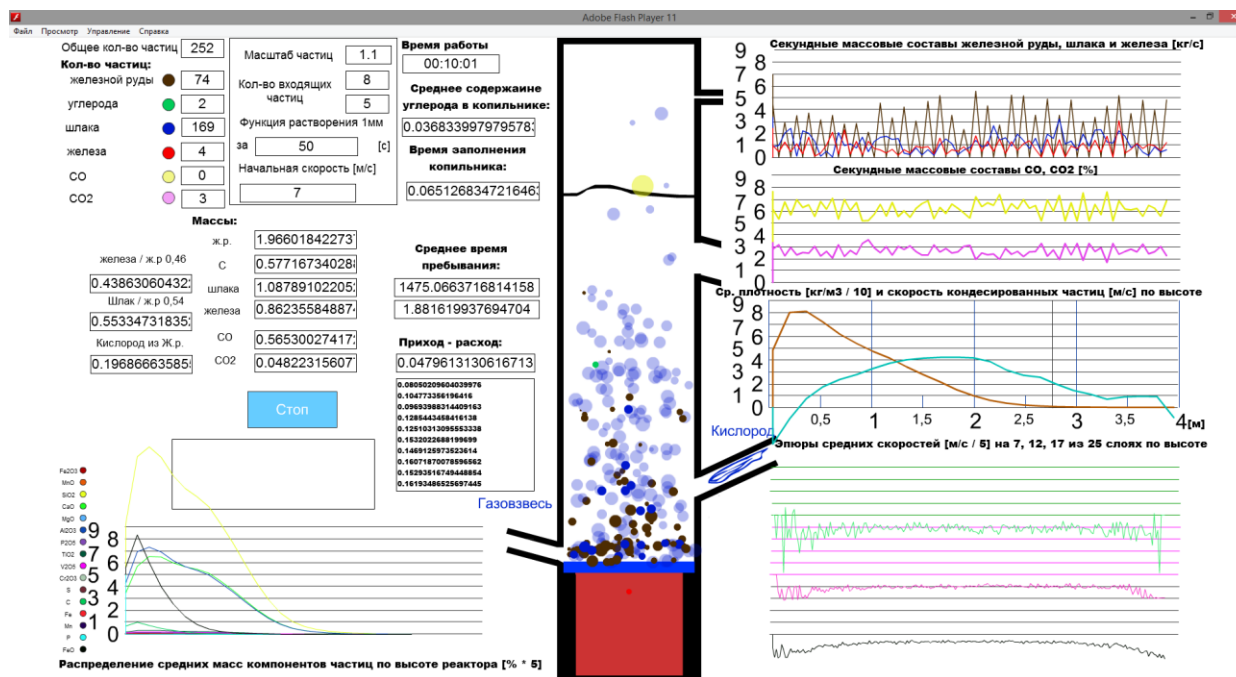


Рисунок 2 – Фрагмент реализации имитационной модели гравитационного сепаратора

Задача обтекания частицы и турбулентная вязкость

Естественно, что проблема течения даже гомогенного турбулентного потока является достаточно сложной, в нашем же случае имеет место обтекание частицы гетерогенным потоком. Очевидно, что замкнутое аналитическое решение такой задачи вряд ли возможно, особенно, если учесть, что, как показала О.А. Ладыженская [9], для случая турбулентного движения единственного решения уравнения Навье-Стокса для общего вида начальных и граничных условий не существует. В связи с этим, одним из возможных подходов, как показано выше на примере создания конкретной имитационной модели гравитационного сепаратора, является декомпозиция этой проблемы на две задачи:

- задача обтекания конкретной частицы потоком на достаточно коротком интервале длины, зависящим от уровня турбулентности;
- статистическое моделирование характера взаимодействия частиц методом Монте-Карло.

Поэтому очень важно понять, что такое турбулентная вязкость и коэффициент вязкого трения в уравнении Навье-Стокса.

Дж. Стокс получил решение задачи обтекания сферического тела вязкой жидкостью, нашел распределение поля скоростей вокруг шарика и силу, действующую на него (закон Стокса):

$$F = 6\pi\eta Rv_0, \quad (11)$$

где R – радиус частицы;

v_0 – скорость движения шарика относительно жидкости.

При обтекании тела наряду с лобовым сопротивлением могут возникнуть составляющие вязких сил, ортогональные к вектору скорости движения тела относительно жидкости (подъемная сила по Жуковскому).

Обычная вязкость – это макроскопическое проявление молекулярного движения и перемешивания. Если в жидкости формируются макроскопические пульсации, это приводит к перемешиванию в макроскопических масштабах и приводит к изменению вязких

сил, в частности сил увлечения, с которыми поток действует на обтекаемое тело и стенки труб.

Поэтому уравнение (11) для одной частицы, также как и приведенное ниже [9] уравнение для поля давлений $\rho(\vec{r}, t)$ и поля скоростей $\vec{U}(\vec{r}, t)$

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{U}(\vec{r}, t)}{\partial t} + (\vec{U}(\vec{r}, t), \vec{\nabla}) \vec{U} \right] = -\vec{\nabla} \rho - \eta \Delta \vec{U}(\vec{r}, t) \quad (12)$$

справедливы, только если скорость не превышает критического значения, определенного числом Рейнольдса, т.е. пока линии тока реальных течений не становятся «извилистыми».

Л. Прантл в 1925 г. предложил формулу для *турбулентной вязкости* [9]:

$$\eta_T = l^2 \left| \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} \right|, \quad (13)$$

где l – длина перемешивания, определенная из опыта;

$\bar{U}$ – среднее значение скорости потока,

а Т. фон Карман, основываясь на предположении о подобии пульсации скорости в различных точках жидкости, пришел к выводу, что касательные напряжения (вязкие силы) зависят только от средней скорости и ее производных и дополнил выражение Прантля соотношением для длины перемешивания

$$l \cong k \left| \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} / \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial y^2} \right|, \quad (14)$$

где k – безразмерный коэффициент.

В этих выражениях сформулированы два важных понятия: длина перемешивания (корреляционная длина поля турбулентных пульсаций) и свойство подобия пульсаций скорости. Интересно подчеркнуть, что О.А. Ладыженская также показала, как надо «подправить» уравнение Навье-Стокса, чтобы его однозначная разрешимость была доказана. Для этого нужно постоянный коэффициент вязкости η заменить на зависящий от поперечных градиентов скорости потока:

$$\eta \rightarrow \tilde{\eta} = \eta \left[1 + \beta \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \frac{\partial U_k}{\partial x_i} \right) \right], \quad (15)$$

где β – некая величина, такая, что поправочное слагаемое в квадратных скобках вступает в силу только при резких изменениях вязкости в соседних слоях жидкости.

Эвристическая ценность этого соотношения, особенно, если его рассматривать вместе с формулой Прантля и дополнением Т. фон Кармана, заключается в том, что *понятие турбулентной вязкости следует рассматривать как результат коллективного поведения совокупностей частиц или их ансамблей и прежде всего пульсаций скорости.*

Тем более это важно для гетерогенного потока.

Турбулентную вязкость можно изучать, измеряя силу увлечения обтекаемого тела потоком, который удобно характеризовать одним параметром – числом Рейнольдса.

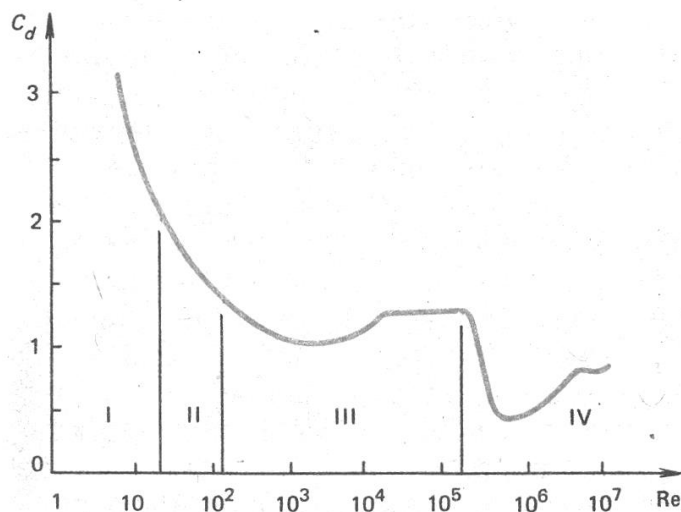
Наиболее простой подход – измерение силы, действующей на обтекаемый цилиндр. Вместо силы [9] принято фиксировать коэффициент увлечения C_d , представляю-

щий собой отношение силы, действующей на цилиндр, к величине $\rho v_0^2 D l$ (D – диаметр, l – длина цилиндра), характеризующей силу давления, оказываемого потоком на ортогональное к нему сечение цилиндра:

$$C_d \approx \frac{F_\eta}{\rho v_0^2 D l} \quad (16)$$

Так как, вязкая сила, действующая в ламинарном потоке на обтекаемый цилиндр, пропорциональна коэффициенту вязкости и средней скорости, как и в законе Стокса $F = 6\pi\eta R v_0$, то с учетом (16) в ламинарном потоке коэффициент увлечения должен убывать с ростом v_0 : $C_d \approx 1/v_0$.

Имеются данные [9] экспериментально измеренного коэффициента увлечения в функции числа Рейнольдса (см. рисунок 3). В этом же литературном источнике приведены картины обтекания цилиндра при различных числах Рейнольдса, а также делается заключение, что длина перемешивания l в формуле Прантля должна меняться не монотонно в зависимости от числа Re . Немонотонное изменение величины l свидетельствует о наличии перестроек в турбулентных структурах, т.е. возникновение и разрушение некоторого порядка в турбулентных пульсациях, что подтверждается также характером зависимости коэффициента увлечения от Re (рисунок 3).



I – ламинарный поток; II – вырожденная турбулентность; III – частично упорядоченная (умеренная) турбулентность; IV – сильная турбулентность

Рисунок 3 – Коэффициент увлечения как функция числа Рейнольдса

Основные выводы и направления исследований

С учетом показанного выше опыта имитационного моделирования и представленных рассуждений, позволивших несколько прояснить понятие турбулентной вязкости, в том числе для гетерогенного потока, определена постановка задач и направлений дальнейших исследований.

1) Совершенствование разработанной имитационной модели движения вертикального потока двухфазной среды (газовзвеси дисперсных частиц шихты и продуктов реакций) применительно к колонному реактору агрегата СЭР:

– проверка соответствия статистических результатов этой модели законам сохранения;

– получение конкретных статистических закономерностей: эпюр скоростей по радиусу и высоте, плотности смеси, времени пребывания частиц шихты, продуктов реакций и др.

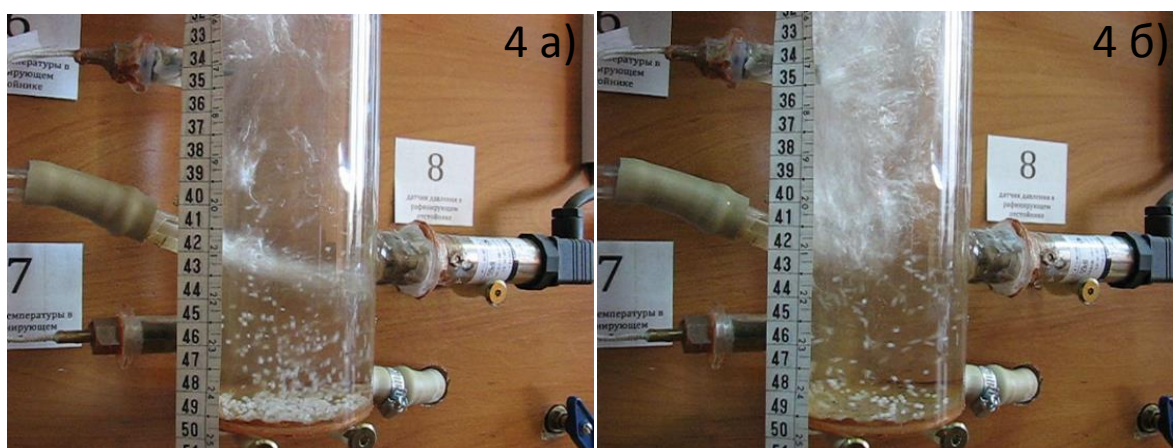
2) Создание аналогичной имитационной модели для системы – воздух, вода, твердые частицы, применительно к автоматизированной установке физического моделирования и привязка полученных на ней результатов к числу Рейнольдса:

– исследование вязкости через скорость опускания шарообразных частиц, а также измерение коэффициента (силы) увлечения;

– исследование скорости диффузии (скорости растворения) шарообразных частиц при разных числах Рейнольдса, проверка зависимости между вязкостью и коэффициентом диффузии;

– измерение размеров и скоростей пульсации при разных числах Рейнольдса для обоснования применимости соотношений (13) и (14).

На рисунке 4 представлен фрагмент эксперимента по определению турбулентной вязкости на установке физического моделирования.



а) начало подачи газозвеси (газ и вода) в колонный реактор (вода и частицы);

б) турбулентные потоки газозвеси и твердых частиц

Рисунок 4 – Фрагмент эксперимента по определению турбулентной вязкости на установке физического моделирования

3) Перенос этих результатов на модель реального агрегата и получение обобщенных закономерностей для решения задач подобного типа.

Для решения этой задачи планируется использовать разработанную на кафедре ИТМ автоматизированную установку низкотемпературного физического моделирования, благодаря созданию которой имеется возможность проверить адекватность специально созданной аналогичной имитационной модели для системы – воздух, вода, твердые частицы, и также привязать полученные результаты к числу Рейнольдса с целью их возможного переноса на реальный процесс.

Есть основания надеяться, что в результате этих экспериментов, а также накопления статистик по результатам машинных экспериментов на имитационной модели будут получены обобщенные закономерности для решения задач подобного типа.

Библиографический список

1. Цымбал В.П. Мочалов С.П., Рыбенко И.А. и др. Процесс СЭР – металлургический струйно-эмульсионный реактор /Под ред. В.П. Цымбала. – М: «Металлургиздат», 2014. – 488 с.
2. V.P. Tsymbal, S. P. Mochalov, K. M. Shakirov Controlling the Composition of the Metal in the Direct Reduction of Dust-Sized Materials and Waste Products in a Jet-Emulsion Reactor. Springer Journals, 2015, Vol. 59, pp 119-125: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11015-015-0070-0>.
3. В.П. Цымбал, В.И. Кожемяченко, И.А. Рыбенко и др. Использование принципов самоорганизации и диссипативных структур при создании нового струйно-эмульсионного металлургического процесса. /Сборник докладов международной научно-практической конференции. Творческое наследие В. Е. Грум-Гржимайло. Часть 1. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – с.486-495.
4. Лавренко А.Т. Автореферат диссертации магистра: «Анализ работы сепаратора прямого коксового газа». [Электронный ресурс] /Режим доступа: <http://www.uran.donetsk.ua>.
5. Гидравлика Часть 1. Методические материалы по курсу «Гидравлика» Крамаренко В.В. Савичев О.Г – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 124 с.
6. А.Д. Альтшуль, В.И. Калицун, Ф.Г. Майрановский, П.П. Пальгунов. Примеры расчетов по гидравлике. Учебное пособие для вузов. Под ред. А.Д. Альтшуля. М., Стриндздат, 1977. – 248 с.
7. OreEnrichmentRequiredforaSelf-OrganizingJet-EmulsionReactor / V.P. Tsymbal, S.P. Mochalov, M.S. Parovinchakidr. // SteelinTranslation. – 2009. – Vol. 39 No 4. – 310-312 с.
8. Сеченов П.А., Олеников А.А., Цымбал В.П. Исследование динамики изменения состава шлака в зонной модели колонного струйно-эмульсионного реактора. Тепло-техника и информатика в образовании, науке и производстве. УрФУ,– Екатеринбург, 2014.105-110 с.
9. Бакай А.С., Сигов Ю.С. Многоликая турбулентность.– М.:Знание, 1980, 48 с.

УДК 539.3

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОЛОГИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ АНИЗОГРИДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Бурнышева Т.В.

*Новокузнецкий институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения «Кемеровский государственный университет»
г. Новокузнецк, Россия, tburn@mail.ru*

Аннотация. Рассматривается задача идентификации фактических условий нагружения составной оболочечной конструкции путем интерпретации данных натурных испытаний. Для решения задачи идентификации приложенная нагрузка рассматривалась в качестве комбинации сжимающей силы и изгибающего момента. Вычисление перемещений проводилось численно методом конечных элементов в пакете программ «Композит». Рассматривались два способа моделирования нагружения: распределением погонной нагрузки по верхней кромке конструкции и передачей силы и момента через «жесткий» узел. Найденные в результате параметры нагружения через «жесткий» узел обеспечивают совпадение расчетных и экспериментально измеренных перемещений в пределах погрешности измерений. Найденные параметры нагружения использовались при решении задачи идентификации жесткости крышек люков.

Ключевые слова: сетчатая композитная конструкция, натурные испытания, интерпретация данных, идентификация, метод конечных элементов.

Abstract. Solution of the problem of identification of actual loading condition of composite shell construction using Interpretation of data of field test is regarded. The construction consists of a stringer compartment, which is made of aluminum alloy, and composite lattice shell. To solve the identification problem, the applied load is considered as a combination of compressive force and bending moment. Calculation of displacements carried out numerically by the finite element method software package «Composite». Two ways of modeling the loading are regarded: the distribution of the linear load at the upper edge of the construction and force and torque transmission through the «hard» node. Found as a result of loading parameters through «hard» node provide agreement between the calculated and experimentally measured displacements within the measurement error. Parameters loading used in solving the problem of identification stiffness hatches.

Keywords: composite lattice shell, field testing, data interpretation, identification, finite element method.

В настоящее время в качестве составных частей агрегатов космических летательных аппаратов (КЛА) используются анизотридные композиционные оболочки [1, 2]. Такие оболочки представляют собой регулярную систему ребер (спиральных и кольцевых) и обшивку. К конструктивным особенностям практически реализуемых конструкций следует отнести наличие в оболочках вырезов, усиленных окантовкой.

Расчет напряженно-деформированного состояния анизотридных конструкций нерегулярной структуры требует дискретного моделирования [3], которое традиционно выполняется методом конечных элементов. При проведении многочисленных трудоемких расчетов, обусловленных варьированием геометрических параметров конструктивных элементов и многократным перестраиванием конструкции, целесообразно использовать дискретное моделирование в сочетании с методами планирования вычислительного эксперимента. Это позволяет в рамках единой методологии решать, в том числе, задачи идентификации, сокращая при этом количество необходимых вариантов расчета [4, 5].

Математическая модель сетчатой конструкции может быть рассмотрена на уровне «черного ящика» и представлена в виде [6]:

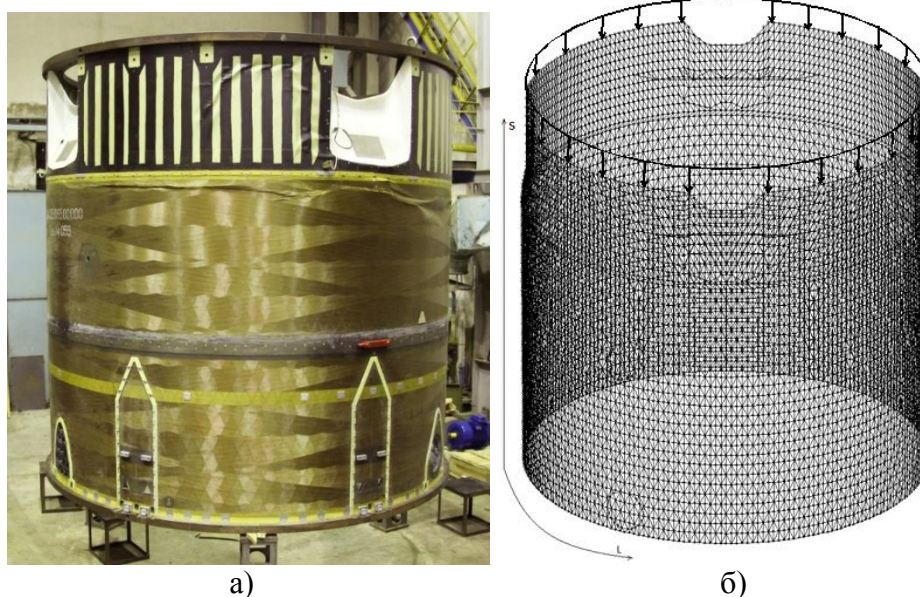
$$\chi = \Psi(\rho)\check{r}, \quad (1)$$

где χ – вектор переменных состояния (перемещений, напряжений и деформаций);
 $\check{r}$ – вектор переменных воздействий (приложенные силы);
 Ψ – оператор модели;
 ρ – вектор параметров модели, включающий «внутренние» характеристики моделируемого объекта (физико-механические константы материалов, геометрические размеры конструкции и т.п.).

Натурные испытания сложных конструкций связаны с необходимостью интерпретации неполных данных эксперимента, содержащих погрешности вследствие неточного воспроизведения в эксперименте заданных условий нагружения, неполного соответствия фактических прочностных и жесткостных параметров элементов конструкции их проектным значениям. Поэтому анализ данных натурных испытаний должен сопровождаться уточнением фактических условий конкретного эксперимента над конкретным экземпляром испытываемого изделия.

Решение задачи идентификации приложенной нагрузки рассматривалось на примере составного отсека КЛА. Натурные эксперименты проводились в ОАО ЦНИИСМ, г. Хотьково. Данные экспериментов были представлены автору статьи в рамках выполнения научно-исследовательской работы.

Исследуемая силовая конструкция (рисунок 1, а) представляет собой цилиндрическую оболочку и состоит из двух частей: композитной сетчатой оболочки в виде усеченного конуса и стрингерного алюминиевого отсека.



а – общий вид, б – общий вид расчетной модели и схема приложения нагрузки

Рисунок 1 – Составная цилиндрическая оболочка

Реберная структура сетчатой оболочкой из углепластика соединялась внешней поверхностью с однослойной обшивкой. Высота цилиндра составляла $0,69R$ (R – радиус оболочки). Высота сечения спиральных и кольцевых ребер h_r одинакова, ширина сечения составляет $0,25h_r$. Расстояние между спиральными ребрами по высоте равно $2,63h_r$. Расстояние между осями пар кольцевых ребер равно $3,56h_r$. Конструкция подкреплялась двумя шпангоутами, встроенным кольцом и четырьмя продольными ребрами. Круглые вырезы под люки, усиленные двумя окантовками переменной толщины, закрыты крышками, форма которых совпадает с формой вырезов.

Металлический отсек – однослойная алюминиевая обшивка цилиндрической формы высотой $0,53R$, включающая четыре равномерно расположенных по окружности проема, частично закрытых несъемными крышками, укреплена шестью десятками алюминиевых стрингеров и тремя шпангоутами. Стрингерный отсек стыкуется с нижней (композитной) частью конструкции при помощи соединительного кольца. В средней части стрингерный отсек содержит промежуточный шпангоут сложной геометрии. Данный шпангоут имеет переменное сечение – между проемами сечение имеет z-образную форму, у проемов – форму тавра. Часть шпангоута возле проемов имеет вид пластины. Торцевые шпангоуты имеют сечение в форме неравнобокого уголка. Толщины обшивок композитной и алюминиевой частей конструкции равны $h_k = h_c = h$.

Для проведения численного расчета НДС конструкции в пакете программ «Композит-НК» была построена дискретная модель оболочки (рисунок 1, б). Схема разбиения обшивки нижней части конструкции на треугольные конечные элементы получалась естественным образом наложением оребрения. Границы треугольных элементов составляют проекции осей спиральных ребер и линии, проходящие через точки их пересечения параллельно продольной оси оболочки и вдоль окружности. Эта же сетка узлов используется при разбивке каждого ребра и шпангоутов на конечные элементы типа балок Тимошенко.

Для моделирования ребер и стрингеров алюминиевой части конструкции используется двухузловой конечный элемент с 6-ю степенями свободы в каждом узле и аппроксимацией прогибов эрмитовыми полиномами 3-й степени, учитывающий деформации поперечного сдвига по сдвиговой модели Тимошенко. Обшивка и окантовки моделирова-

лись элементами изгибаемой пластины Зенкевича с неполной кубической аппроксимацией прогибов. Перемещения вдоль осей элементов ребер и в плоскости каждого треугольника обшивки аппроксимировались линейными сплайнами.

В натурном эксперименте к верхней кромке конструкции прикладывалась сжимающая сила $\vec{F}$ (рисунок 1, б). Нагружение осуществлялось через плиту, жесткость которой превышает жесткость испытываемой конструкции. При этом возможно появление трудно контролируемой погрешности (смещения точки приложения равнодействующей от оси оболочки и отклонения вектора равнодействующей от оси оболочки). Такая погрешность может быть выявлена и количественно оценена путем идентификации.

Исходя из формального представления математической модели анизотридной конструкции (1) задача идентификации нагрузок на сетчатую оболочку может быть сформулирована следующим образом.

Известно: вектор структурных параметров модели ρ , априорно заданный вектор переменных воздействий $\check{r}$, модель реакции конструкции на воздействия χ , данные натурального эксперимента $Q' = \chi$.

Необходимо определить: параметры вектора нагрузок $\tilde{R} \subseteq \check{r}$, при которых выполняются ограничения на параметры нагрузок

$$\tilde{F}(\check{r}) \geq 0 \quad (2)$$

и обеспечивается минимум критерия качества идентификации

$$\Psi = \|\chi - Q\| \rightarrow \min, \quad (3)$$

где Q' – данные натурального эксперимента.

Задача идентификации приложенной нагрузки для рассматриваемой составной цилиндрической оболочки заключалась в следующем: найти сосредоточенные силы и моменты в «жестком» узле, обеспечивающие минимальное рассогласование вычисленных и измеренных перемещений. Нагрузка в вычислительном эксперименте представлялась в виде комбинации равномерно приложенной нагрузки $\vec{F}$ и неравномерно распределенной нагрузки, создающей изгибающий момент:

$$\tilde{F} = a_1 \vec{F} + a_2 \vec{F} \sin(\alpha) + a_3 \vec{F} \cos(\alpha). \quad (4)$$

Распределение перемещений в конструкции представлялось в виде линейной комбинации трех полей перемещений с теми же коэффициентами:

$$u = a_1 u + a_2 u_s + a_3 u_c. \quad (5)$$

Критерием идентификации выбирался минимум функционала вида:

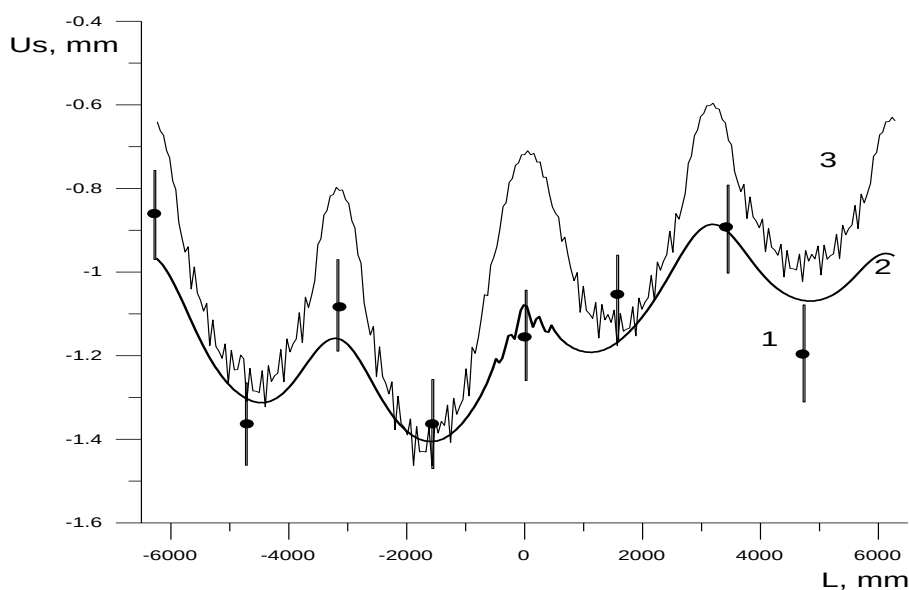
$$\Phi = \|U - (a_1 u + a_2 u_s + a_3 u_c)\|, \quad (6)$$

где U – вектор значений натурального эксперимента.

Базисные функции u , u_s и u_c рассчитывались численно при приложении трех составляющих нагрузок (5) по отдельности. Расчет коэффициентов a_1 , a_2 , a_3 проводился методом наименьших квадратов. Идентификация модели проводилась по данным испытаний двух однотипных конструкций (А и Б), изготовленных в разное время. В процессе нагружения оболочки экстензометрами измерялись перемещения в направлении образующей.

На рисунке 2 представлено распределение измеренных и вычисленных перемещений. Вертикальными отрезками показаны границы возможной погрешности измерений

используемыми датчиками, которая не превышает 2% от верхнего предела диапазона измерений, равного 5 мм, т.е. $\pm 0,1$ мм.



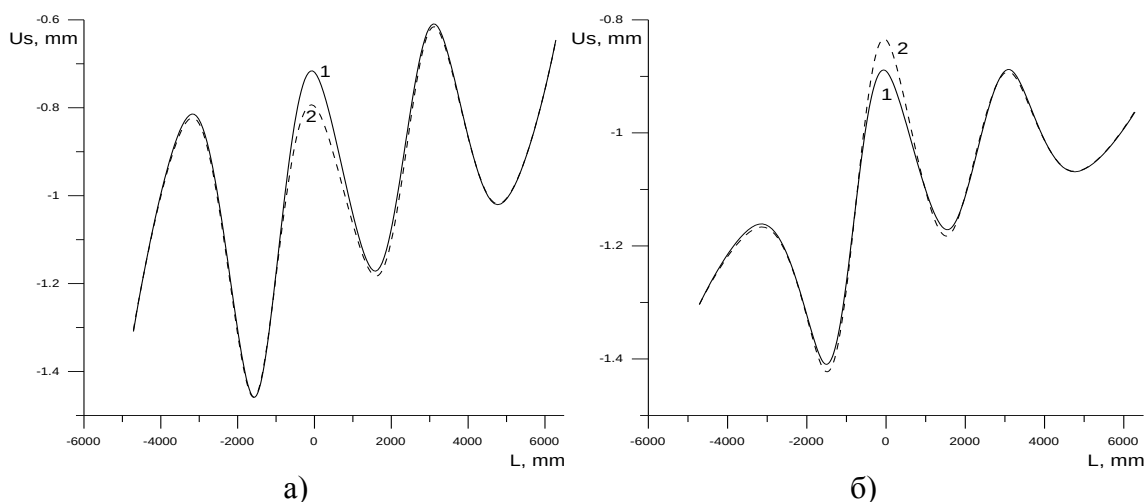
1– данные натурного эксперимента; 2 – результаты численного расчета при задании нагрузки с использованием «жесткого» узла; 3 – результаты численного расчета с заданием распределенной нагрузки

Рисунок 2 – Распределение осевых перемещений в композиционной части конструкции

Из графика видно, параметры нагружения через «жесткий» узел, найденные в результате идентификации, обеспечивают совпадение расчетных и экспериментально измеренных перемещений в пределах погрешности измерений. Расчет с приложением погонной силы на кромке не позволяет обеспечить согласование расчетных и экспериментальных данных.

В агрегатах КЛА, крышки люка соединяются с основной частью конструкции механическим соединением, что создает возможность некоторого нарушения совместности деформирования крышек и ответной части конструкции (окантовок люков). Влияние такой несовместности проявляется как уменьшение жесткости крышек по сравнению с проектной, что приводит к искажению напряженно-деформированного состояния. Представляется актуальной оценка фактической жесткости крышек люка, которая также может быть выполнена методом параметрической идентификации. Как предельный случай, промоделируем ситуацию, в которой крышка люка имеет нулевую жесткость (крышка люка не соединена с окантовкой).

Рассматриваемая оболочка имеет три люка. Были рассмотрены шесть возможных ситуаций: 1) закрыты все люки, 2) открыт один нижний люк, 3) открыты два нижних люка, 4) открыт верхний люк, 5) открыты один нижний и верхний люки, 6) открыты все люки. В результате вычислительного эксперимента получено: раскрытие люка влияет на перемещения только в окрестности этого люка. Влияние раскрытия люков зависит от способа приложения нагрузки: при распределенной нагрузке раскрытие центрального люка увеличивает перемещения на 10%, а при сосредоточенной силе – уменьшает на 7%. Раскрытие нижних люков оказывает меньшее влияние: при распределенной нагрузке перемещения уменьшаются на 2%, а при сосредоточенной на 1%. На рисунке 3 представлены перемещения в композитной части конструкции в рассмотренных случаях.



а) распределенной по верхней кромке, б) сосредоточенной в «жестком» узле;
1 – при закрытых люках; 2 – при открытых люках

Рисунок 3 – Распределение осевых перемещений в композиционной части конструкции Б при нагрузке

Идентификация параметров конструкции по данным натурных испытаний позволяет получать объективную оценку отклонений факторов, определяющих фактические условия испытаний, от номинальных проектных значений. Приведенные результаты иллюстрируют использование идентификации для оценки фактических условий нагружения и соединения крышек люков с окантовками, что позволяет обоснованно распространить данные испытаний на другие условия реальной работы конструкции.

Библиографическое описание

1. Васильев В. В., Разин А. Ф. Композитные сетчатые балочные элементы для авиационных конструкций / Вопросы оборонной техники. 2006. № 1/2. С. 3-6.
2. Васильев В. В., Барынин В. А., Разин А. Ф., Петроковский С. А., Халиманович В. И. Анизотридные композитные сетчатые конструкции – разработка и приложение к космической техники / Композиты и наноструктуры. 2009. № 3. С. 38 - 50.
3. Бурнышева Т. В., Каледин В.О. Сравнение дискретного и континуального подхода к расчету напряженного состояния сетчатых оболочечных конструкций при статическом нагружении / Научно-технический вестник Поволжья. 2011. №4 С. 113-116.
4. Бурнышева, Т. В. Методика проектировочного расчета сетчатых оболочечных конструкций из композиционных материалов при статическом нагружении // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. - №3. – С. 97-100.
5. Бурнышева, Т. В. Применение методологии вычислительного эксперимента в задачах проектирования и диагностики анизотридных конструкций космических летательных аппаратов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. - №6. – С. 98-102.
6. Казначеева О.К., Каледин В.О. Идентификация параметров упругости и жесткости конструкций из армированных материалов. – Новочеркасск: ЛИК, 2012.–135 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОБМЕНА В ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ

Ермакова Л.А., Мочалов С.П., Красноперов С.Ю.

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет»

г. Новокузнецк, Россия, ermakova@sibsiu.ru

Аннотация. В работе представлены математическая модель и результаты моделирования нестационарных тепломассообменных процессов в дисперсных средах, для условий прямого восстановления в высокотемпературной восстановительной среде, соответствующей условиям прямого восстановления характерным для процесса в струйно-эмульсионном агрегате на принципах самоорганизации.

Ключевые слова: струйно-эмульсионный агрегат непрерывного действия, прямое восстановление, тепломассообмен, математическое моделирование.

Abstract. The paper presents a mathematical model and the results of the simulation of non-stationary heat and mass transfer processes in dispersed media, the conditions for a direct reduction in the high-temperature reducing atmosphere, to the terms of the direct reduction process in the characteristic jet-emulsion unit on the principles of self-organization.

Keywords: jet-emulsion unit continuous, direct reduction, heat and mass transfer, mathematical modeling.

При разработке технологии получения металла методом прямого восстановления из пылевидных руд или отходов промышленных предприятий в струйно-эмульсионном агрегате типа СЭР [1-3] необходимо произвести оценку времени для нагрева и восстановления, разных по размеру и составу железосодержащих материалов при различных режимах ведения процесса.

Характерные особенности процессов в агрегате типа СЭР, которые необходимо учитывать при моделировании процессов тепломассообмена [1]:

- протекание физико-химических процессов в отдельных зонах при различных степенях отклонения от термодинамического равновесия в системе под давлением;

- высокие скорости тепломассообменных процессов, окислительно-восстановительных реакций и фазовых превращений за счет больших удельных поверхностей дисперсных сред (конвертерный шлак $20 \div 30 \text{ м}^2/\text{кг}$, окалина $1 \div 2 \text{ м}^2/\text{кг}$, концентрат марганца $10 \div 20 \text{ м}^2/\text{кг}$, пылевидная известь $10 \div 20 \text{ м}^2/\text{кг}$, зола $200 \div 300 \text{ м}^2/\text{кг}$), высокой температуры ($1300 \div 1700 \text{ }^\circ\text{C}$) в основных реакционных зонах струйного (газовзвеси) и эмульсионного типов, интенсивного перемешивания (барботирования) и турбулизации потоков в рафинирующем отстойнике;

- достижение необходимой степени восстановления оксидов исходного сырья за время пребывания в реакционной камере ($1 \div 3 \text{ с}$) и рафинирующем отстойнике ($10 \div 15 \text{ мин}$);

- протекание в основных реакторах и зонах агрегата процессов высокотемпературного твердофазного и жидкофазного восстановления металлов твердыми (C, Al, Si), газообразными (CO, H₂O), и растворенными в железе ([C]) реагентами.

Математическая модель процесса тепломассообмена частиц с учетом фазового перехода: процесс нестационарного тепломассообмена опишем уравнением теплопроводности и молекулярной диффузии для частиц сферической формы с граничными условиями 3 рода [4-5]. Уравнения теплопроводности и молекулярной диффузии, а также граничные условия для безразмерной относительной температуры и концентрации имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \tilde{C}}{\partial Fo_D} = \frac{1}{\tilde{r}^2} \frac{\partial}{\partial \tilde{r}} \left(\tilde{r}^2 \frac{\partial \tilde{C}}{\partial \tilde{r}} \right) \\ \frac{\partial \Theta}{\partial Fo_D} = \frac{1}{Lu \tilde{r}^2} \frac{\partial}{\partial \tilde{r}} \left(\tilde{r}^2 \frac{\partial \Theta}{\partial \tilde{r}} \right) \\ \tilde{C}|_{Fo_D=0} = 0 \quad \Theta|_{Fo_D=0} = 0 \\ \left. \frac{\partial \tilde{C}}{\partial \tilde{r}} \right|_{\tilde{r}=0} = 0 \quad \left. \frac{\partial \Theta}{\partial \tilde{r}} \right|_{\tilde{r}=0} = 0 \\ \left. \frac{\partial \tilde{C}}{\partial \tilde{r}} \right|_{\tilde{r}=1} = Bi_D (1 - \tilde{C}) \quad \left. \frac{\partial \Theta}{\partial \tilde{r}} \right|_{\tilde{r}=1} = Bi (1 - \Theta) \end{array} \right., \quad (1)$$

где $\tilde{C} = \frac{C - C_0}{C^* - C_0}$ – безразмерная относительная концентрация;

C_0 – начальная концентрация рассматриваемого элемента в частице;

C – концентрация этого элемента в окружающей среде;

$\Theta = \frac{t - t_0}{t_{cp} - t_0}$ – безразмерная относительная температура;

t_0 – начальная температура частицы;

t_{cp} – температура окружающей среды;

R – радиус частицы;

$\tilde{r} = \frac{r}{R}$ – безразмерный радиус;

$Lu = \frac{D}{a}$ – число Льюиса;

$Fo_D = \frac{D\tau}{R^2}$ – диффузионное число Фурье;

$Bi_D = \frac{\beta R}{D}$ – диффузионное число Био;

$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}$ – число Био;

D – коэффициент диффузии, м²/с;

β – коэффициент массоотдачи, м/с;

a – коэффициент температуропроводности частицы, м²/с;

λ – коэффициент теплопроводности частицы, Вт/(м·К);

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

τ – время, с.

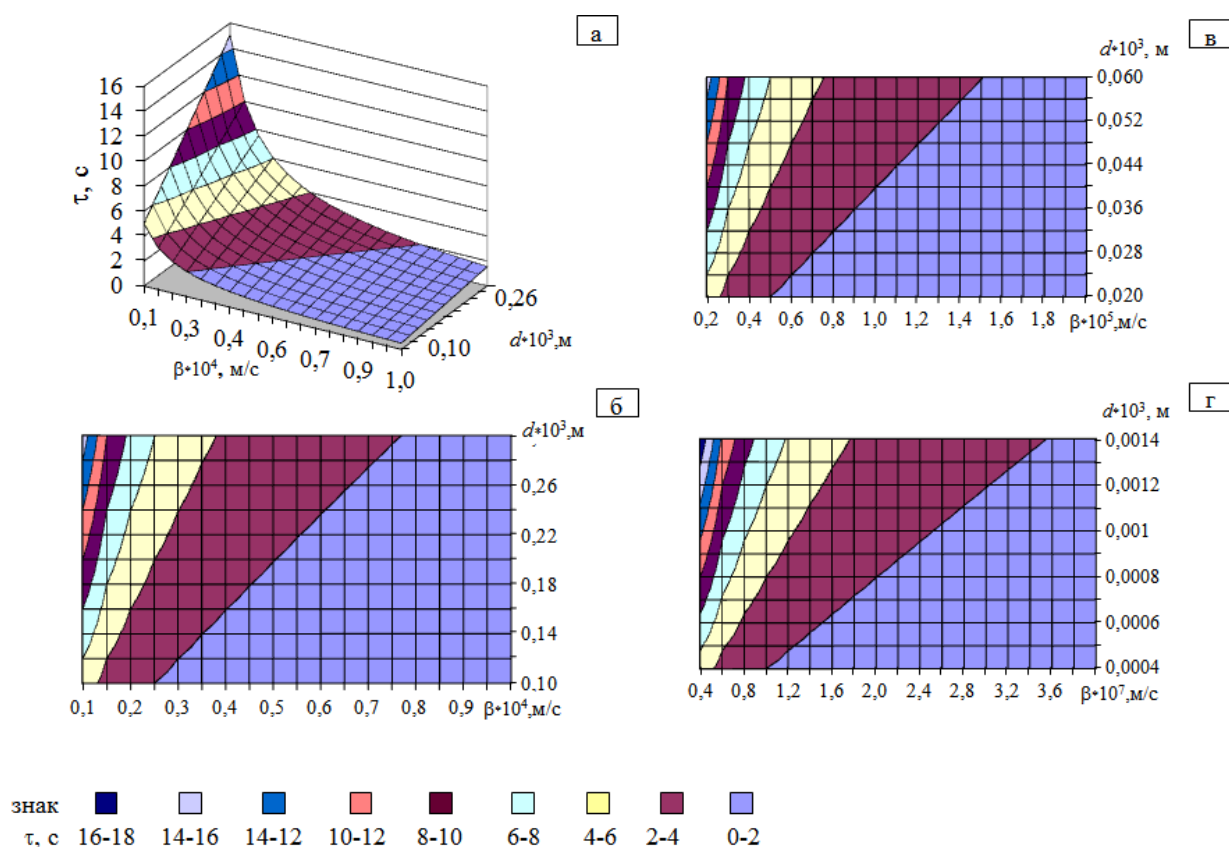
Краевая задача решалась методом разделения переменных с использованием быстро сходящихся рядов. Особенность методики решения заключается в построении схемы расчета, которая позволяет получать результаты, характеризующие связь между определяющими параметрами задачи в заданном любом интервале переменных, представленных как в критериальной, так и в размерной физической формах [6-8].

При расчете на каждой итерации сначала в зависимости от состава шихтовых материалов определяли температуру плавления частиц, затем рассчитывали текущую температуру, по которой определяли коэффициент диффузии с учетом фазового состояния частицы. После чего на следующей итерации определяли новые теплофизические параметры материала с учетом полученного состава и фазового состояния.

Результаты математического моделирования: Расчет процесса массообмена осуществляли для условий прямого восстановления в газовой и эмульсионной средах при ламинарном и турбулентном режимах, характерных для процесса в струйно-эмульсионном агрегате на принципах самоорганизации.

Вид выражения для расчета коэффициента массоотдачи зависит от принятого допущения о механизме переноса вещества. Капли, для приведенного диапазона размеров, будем рассматривать как твердые сферические частицы, перенос вещества в которых происходит только за счет молекулярной диффузии, тогда коэффициент массоотдачи по дисперсной фазе для диапазона температур $800 \div 1600^\circ\text{C}$ и указанных размеров частиц принимает значения $\beta = 1,0 \cdot 10^{-4} \div 4,0 \cdot 10^{-7}$ [9-10].

В исследовании приняты диапазон изменения размеров для материалов $0,025 \div 3$ мм, и температура среды в соответствии с условиями жидкофазного восстановления $1400 \div 1600^\circ\text{C}$. Результаты расчета температуры и степени восстановления частиц железорудного концентрата показали (рисунок 1), что за время процесса $0,3 \div 0,6$ с частицы диаметром до $0,5 \cdot 10^{-3}$ м успевают прогреться, расплавиться и в них начинают протекать восстановительные процессы. Частицы более крупного размера не успевают прогреться до температуры фазового перехода и остаются не восстановленными.



а, б – капля металла, в – жидкий оксид, г – твердая частица

Рисунок 1 – Зависимость времени массообмена в различных дисперсных частицах от определяющих параметров

Таким образом, разработанная модель тепломассообмена позволяет определять в любой момент времени температуру и состав частицы или капли, находящейся в высокотемпературной восстановительной среде.

Библиографический список

1. Процесс СЭР – металлургический струйно-эмульсионный реактор / В.П. Цымбал, С.П. Мочалов, И.А. Рыбенко и др. // -М: Металлургиздат, 2014.-488с.
2. Разработка новых наукоемких металлургических процессов и агрегатов струйно-эмульсионных типа на принципах самоорганизации / В.П. Цымбал, С.П. Мочалов, К.М. Шакиров и др. // Новые промышленные технологии и материалы. - Новокузнецк, 2000. - С. 299-308
3. Процесс и агрегат типа самоорганизующийся струйно-эмульсионный реактор, как пример наукоемкой технологии в металлургии. / В.П. Цымбал, С.П. Мочалов, В.И. Кожемяченко, И.А. Рыбенко, С.Ю. Красноперов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2005. -№ 6. – С. 60 – 65.
4. Моделирование процессов и разработка технологии получения металла из отходов на основе непрерывного струйно-эмульсионного процесса / В.П. Цымбал, С.П. Мочалов, Л.А. Ермакова // Известия вузов. Черная металлургия. -2000. -№2. -С. 60.
5. Совместная математическая модель тепломассообменных процессов в дисперсных средах применительно к условиям восстановительных процессов в струйно-эмульсионных агрегатах / Л.А. Ермакова, С.П. Мочалов, С.Н. Калашников //Металлургия на пороге XXI века: достижения и прогнозы: Мат. всеросс. науч.-практ. конф., Новокузнецк, 28 сентября -1 октября 1999 г. -Новокузнецк, 1999. -С. 238-240.
6. Калашников С.Н. Математическая модель и методика решения задач нестационарного тепломассообмена совокупности частиц пылевидных железосодержащих материалов / С.Н. Калашников, Л.А. Ермакова, С.П. Мочалов // Известия вузов. Черная металлургия.-2001.-№6.-С.67-71.
7. Методика и результаты расчета процессов в реакторах агрегата струйно-эмульсионного типа для технологии прямого получения металла из дисперсных материалов / Л.А. Ермакова, С.П. Мочалов // Известия вузов. Черная металлургия.-2004.-№10.-С.48-51.
8. Методика численно-аналитического моделирования тепломассообменных процессов в дисперсных системах/С.Н. Калашников, С.П. Мочалов, С.Ю. Красноперов, Л.А. Ермакова//Численно-аналитические методы решения краевых задач. Сборник трудов межвузовской научной конференции. Новокузнецк, 1998. -С. 52-54.
9. Кафаров В. В., Глебов М. Б. Математическое моделирование основных процессов химических производств. -М.: Высшая школа, 1991. - 400с.
10. Перенос в барботируемом металлическом расплаве при наличии в нем гетерогенной зоны / Камкина Л. В., Яковлев Ю.Н., Колбин Н.А. и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. -1995. -№2. - С. 8-10.

УДК 004.942

О СПОСОБАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ НАТУРНЫХ СТРУКТУР МАТЕРИАЛОВ*

Мышляев Л.П., Циряпкина И.В.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

г. Новокузнецк, Россия, irinatsiryapkina@gmail.com

Аннотация. *Представлено два способа идентификации структур материалов: 1) путем взвешенного суммирования предварительно выбранного набора фракталов; 2) путем поднастройки механизма генерирования фрактала.*

* Работа поддержана грантом РФФИ по проекту № 15-07-02231

Ключевые слова: Идентификация натуральных материалов, фрактал, фрактальная размерность, метод Нелдера-Мида, фрактальная модель.

Abstract. Two methods of full-scale structures' identification are represented materials: 1) by weighted summation of selected fractals; 2) by adjustment of fractal generation mechanisms.

Keywords: Identification of full-scale materials, fractal, fractal dimension, The Nelder–Mead method or downhill simplex method, fractal model.

В работе [1, 2] представлено три постановки задачи идентификации натуральных структур материалов фрактальными моделями с использованием заранее известных фрактальных структур. В первом варианте решения описание структур осуществлялось одним типовым фракталом. В качестве типового фрактала выбирались такие, фрактальная размерность которых близка к фрактальной размерности натурной структуры.

При решении второй постановки задачи, описание натурной структуры осуществлялось взвешенной комбинацией из двух типовых фракталов, взятых со своим весовыми коэффициентами. Алгоритм формирования таких фрактальных моделей показан на рисунке 1.

Наилучшие результаты получились при комплексировании фракталов с разными весовыми коэффициентами для каждого пикселя поверхности структуры. Пример решения показан на рисунке 2.

Наиболее оптимальным вариантом идентификации натурной структуры является описание ее по частям. То есть для каждого «кусочка» натурной структуры подбирается своя фрактальная модель. Вариант такого решения показан на рисунке 3. Как было отмечено в [3] данный способ позволяет описать материал с хорошим воспроизведением натуральных особенностей структуры.

Общим недостатком всех перечисленных постановок задач является слабо аргументированный подход при выборе идентифицирующих фракталов [4]. Поэтому в дальнейших исследованиях предлагается идентифицировать натурные структуры, подстраивая параметры алгоритма (механизма) генерирования фракталов. Постановка такой задачи идентификации следующая.

Дано.

1. Механизм (алгоритм) формирования фракталов (множество Жюлиа) [5-7]

$$f(Z + 1) = Z^2 + C, \quad (1)$$

где $f(Z + 1)$ – динамический закон формирования фрактальной структуры;
 Z – переменная величина;
 C – параметр;
 $Z, C \in \mathbb{C}$;

$$C = p + j \cdot q; Z = x + j \cdot y, \quad (2)$$

где p и q – начальные коэффициенты (координаты) формирования фрактальной структуры;
 x, y – координаты на комплексной плоскости;
 $p, q, x, y \in \mathbb{C}$;
 j – мнимая единица.

2. Натурные структуры материалов

$$St_i; i = \overline{1, I}, \quad (3)$$

где i – номер структуры;
 I – количество структур.

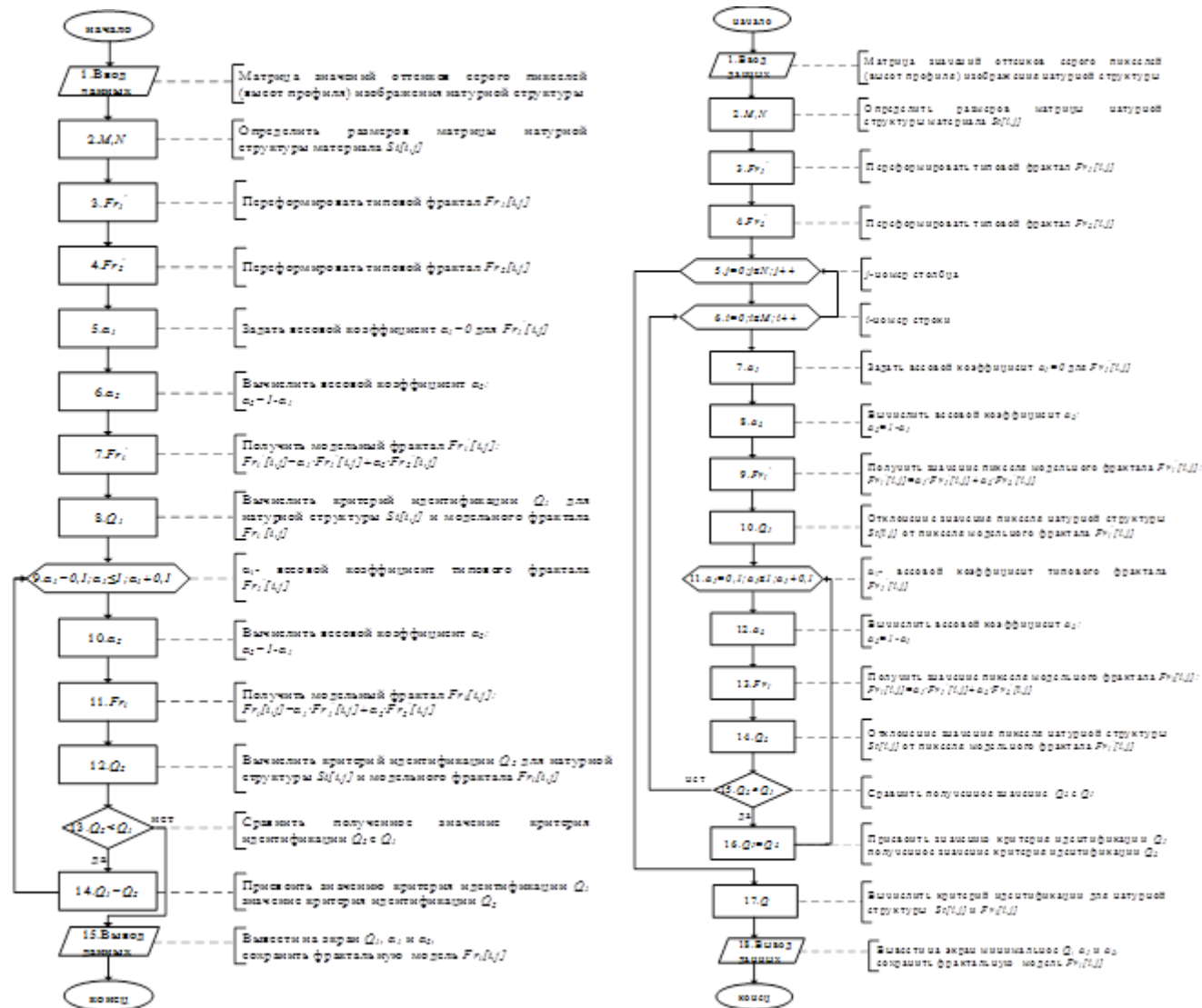


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма идентификации натуральных структур материалов комбинацией двух типовых фракталов с подбором весовых коэффициентов α : а) одинаковыми для всей структуры ;б) для каждого пикселя структуры

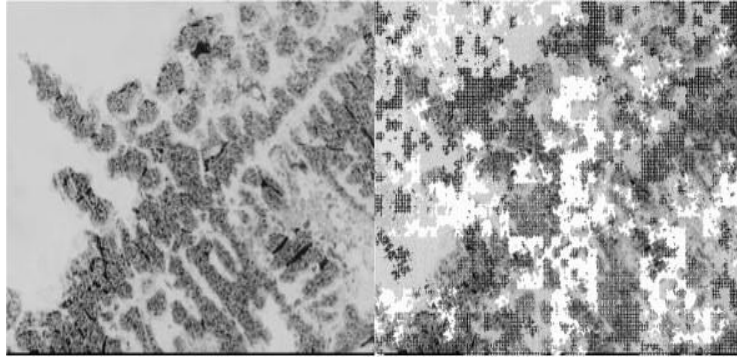


Рисунок 2 – Пример комплексного описания структуры стали двумя модельными фракталами

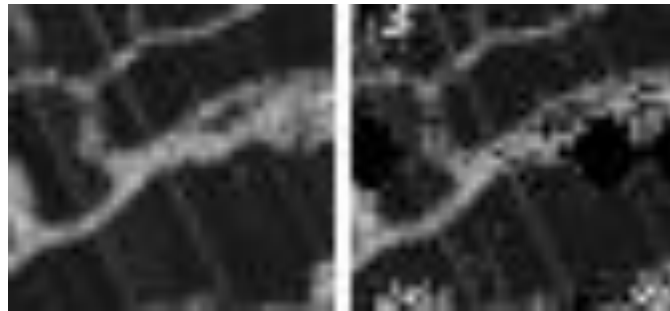


Рисунок 3 – Пример описания участка натурной структуры стали с соотнесением ему наиболее адекватных модельных фракталов

3. Критерий идентификации

$$Q_{i,l} = \sum_{m,n;l=1}^{M,N,L} |St_i(m,n) - Fr_k(p,q)| \overline{p,q} \min, \quad (4)$$

где St_i – i -ая натурная структура;
 Fr_k – k -ая фрактальная модель;
 m,n – количество точек на изображении натурной структуры, $m \in \overline{1, M^{max}}$,
 $n \in \overline{1, N^{max}}$.

4. Начальные коэффициенты p и q принадлежат множеству Мандельброта или лежат вблизи его границ.

Ограничения.

1. $M \in \overline{1, M^{max}}$, $N \in \overline{1, N^{max}}$, где M^{max} , N^{max} – размеры изображения натурной структуры.

Требуется.

1. Определить параметры алгоритма формирования фрактала таким образом, чтобы минимизировать критерий идентификации.

При решении задачи алгоритм формирования фракталов «множество Жюлиа» был представлен в виде системы комплексных уравнений [4] и реализован на языке C#. При поиске минимального значения критерия идентификации Q использован метод Нелдера-Мида [8, 9], где в качестве значения функции в вершинах симплекса берется значение Q , сформированным с начальными коэффициентами p и q , равными координатам вершинам симплекса. Ввиду того, что поверхность отклика – многоэкстремальная, то перед использованием метода Нелдера-Мида необходимо использовать процедуру поиска отыскания всех минимумов Q , описанную в [4].

Предложенный способ идентификации проверена на модельном примере и сделан вывод об его эффективности применения для идентификации натуральных структур.

Библиографический список

1. Starovackaya S.N. Materials structure description by fractal complex./ S.N.Starovackaya, L.P. Myshlyaev, I.V. Tsiryapkina // External fields processing and treatment technology and preparation of nanostructure of metalls and alloys: Book of the International seminar articles, 1 – 7 October/ Ed. By V.Gromov ; Siberian State Industrial University:Publishing Center SibSIU, 2014.-348p.
2. Старовацкая С.Н. Методы идентификации структур материалов фракталами./ С.Н. Старовацкая, И.В. Циряпкина, Л.П. Мышляев // Фундаментальные проблемы современного материаловедения, 2014-№3.-том 11.-С.290-293.
3. Фрянов В.Н., Мышляев Л.П., Циряпкина И.В., Коряга М.Г., Любогощев В.И. // Фрактальные модели в задачах оценивания структурных свойств горных пород:- Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности.»- Кемерово, 2014,С. 157-160.
4. Л.П. Мышляев, И.В. Циряпкина // Разработка процедуры идентификации структур материалов на основе формирования фракталов. -Труды IX Всероссийской научно- практической конференции,- «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве» -Новокузнецк, 2015, С.149-152.
5. Пайтген Х.О. Красота фракталов. Образы комплексных динамических систем. / Х.О. Пайтген, П.Х. Рихтер : Пер. с англ. – М.:Мир ,1993,-176с.
6. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. / Б. Мандельброт. - М.: Институт компьютерных исследований, 2002г.-656с.
7. Федер Е. Фракталы: Пер. с англ.-М.:Мир,1991.-254с.
8. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс: Пер. с англ.-М.: радио и связь, 1988.-128 с.:ил.
9. Л.Льюнг. Идентификация систем. Теория для пользователя.: пер. с англ/ - М., Наука, 1991-432с.
10. Странные аттракторы. - М.: Мир, 1981.

УДК 669.001.57

ИЗУЧЕНИЕ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛА ИЗ ПЫЛЕВИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В СТРУЙНО-ЭМУЛЬСИОННОМ АГРЕГАТЕ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Ермакова Л.А.

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет»
г. Новокузнецк, Россия, ermakova@sibsiu.ru

Аннотация. В работе были предложены математические модели, описывающие процесс восстановления в частицах различной формы и каплях. При моделировании восстановления исследовалась возможность протекания процесса как в диффузионном, так и в кинетическом режимах. Полученные результаты используются для выработки рекомендаций к параметрам входного потока при получении металла в струйно-эмульсионном агрегате.

Ключевые слова: струйно-эмульсионный агрегат непрерывного действия, прямое восстановление, математическая модель.

Abstract. In this work we have been proposed mathematical model describing the process of recovery in the particles of different shapes and drops. In the simulation, studied the possibility of recovery of the process in the diffusion and in the kinetic modes. The results are used to make recommendations to the parameters input in the preparation of the metal in the jet-emulsion a unit continuous.

Keywords: jet-emulsion unit continuous, direct reduction, mathematical model.

Сегодня в области металлургии наблюдается интенсивный рост числа работ направленных на создание новых процессов и агрегатов прямого получения губчатого железа и металла из мелкодисперсных материалов, в том числе из отходов (окалины, шлама, колошниковой пыли). Это связано с конъюнктурой рынка черных металлов, требующей повышение технико-экономического уровня развития металлургического производства и решения экологических проблем. Наибольший интерес представляют процессы, позволяющие восстанавливать металл непосредственно из пылевидных отходов, не затрачивая энергию на окомкование и используя имеющуюся при этом большую реакционную поверхность для ускорения процессов. Одной из важнейших задач при разработке новых технологий является оценка времени протекания процесса восстановления исходных материалов при различных режимах. В данной работе выполнен теоретический анализ процессов восстановления в частицах различной формы и каплях, для условий, возникающих в струйно-эмульсионном агрегате непрерывного действия [1, 3].

Восстановление твердых сферических частиц газами. Для этого случая (за исключением непродолжительного начального периода) наиболее вероятно торможение процесса диффузией в твердой частице [4], поэтому продвижение фронта реакции вглубь сферической частицы, как показано на рисунке 1а, описали дифференциальным уравнением:

$$-\frac{dn}{d\tau} = \frac{D}{y}(C_0 - C_S)S, \quad (1)$$

где n – количество оксида, моль;

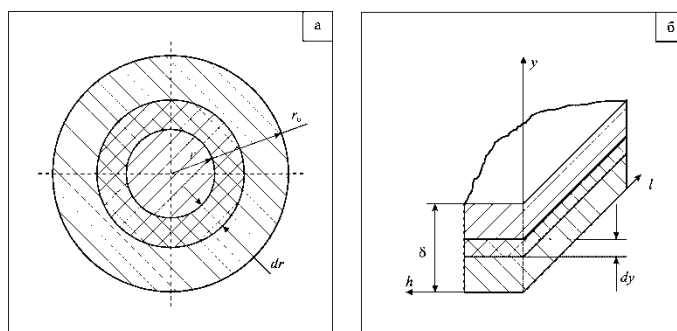
τ – время, с;

D – коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$;

$y = r_0 - r$ – толщина восстановленного слоя, м;

C_0 и C_S – концентрации оксида (или восстановителя) в объеме и на фронте восстановления, моль/ м^3 ;

$S = 4\pi r^2$ – площадь, м^2 .



а – частица сферической формы, б – частица пластинчатой формы

Рисунок 1 – Представление продвижения фронта реакции вглубь частицы

При продвижении фронта реакции на $dy = dr$ за время $d\tau$ восстановится dn молей восстановителя

$$dn = 4\pi r^2 dr \cdot \rho \cdot X_0 \cdot \frac{1000}{M} = 4\pi r^2 dr \cdot C_0, \quad (2)$$

где ρ – плотность частицы, кг/м³;
 X_0 – массовая доля оксида в частице;
 M – молекулярная масса оксида, г/моль.
 С учетом (2) уравнение (1) привели к виду

$$r_0 dr - r dr = D \left(1 - \frac{C_S}{C_0} \right) d\tau. \quad (3)$$

Интегрирование в пределах $\tau = 0 \dots \tau$, $r = r_0 \dots r$ и преобразование дает

$$r = r_0 - \sqrt{2D \left(1 - \frac{C_S}{C_0} \right) \tau}. \quad (4)$$

Степень восстановления частицы α можно определить как

$$\alpha = 1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^3. \quad (5)$$

Тогда, разделив уравнение (4) на r_0 и подставив в (5) получили

$$\Theta = 1 - \left[1 - \left(1 - \frac{C_S}{C_0} \right)^{1/2} \left(\frac{2D\tau}{r_0^2} \right)^{1/2} \right]^3. \quad (6)$$

Суммарное количество восстановленного оксида к моменту времени τ составит

$$m_\tau = m_0 \alpha = m_0 \left[1 - \left(1 - \frac{\sqrt{2D\tau}}{r_0} \right)^3 \right], \quad (7)$$

где m_0 и m_τ – начальная масса и масса восстановленного к моменту времени τ оксида, кг.

Восстановление пластинчатых частиц газами. В этом случае также наиболее вероятно торможение процесса диффузией в твердой частице. Полагая, что толщина частицы δ много меньше ее длины l и ширины h , сводим задачу к одномерной.

Аналогично предыдущему, продвижение фронта этой реакции, которое приведено на рисунке 1б, описали дифференциальным уравнением

$$-\frac{dn}{d\tau} = \frac{D}{y} (C_0 - C_S) hl \cdot 2. \quad (8)$$

Далее с учетом $-dn = (hldy) \cdot C_0 \cdot 2$ нашли зависимость y от τ $y dy = D \left(1 - \frac{C_S}{C_0} \right) d\tau$ или

$y^2 = 2D \left(1 - \frac{C_S}{C_0} \right) \tau$, из которой следует

$$y = \sqrt{2D \left(1 - \frac{C_S}{C_0} \right) \tau}. \quad (9)$$

Степень восстановления пластины

$$\alpha = \frac{2y}{\delta} = \sqrt{4 \left(1 - \frac{C_S}{C_0}\right) \frac{2D\tau}{\delta^2}}. \quad (10)$$

При $C_S/C_0 \rightarrow 0$ $\alpha = 2\sqrt{\frac{2D\tau}{\delta^2}}$, а время полного восстановления

$$\tau_6 = \frac{\delta^2}{8D}. \quad (11)$$

Общая масса восстановленного к моменту времени τ оксида m_τ составит

$$m_\tau = m_0 \cdot \alpha = 2m_0 \sqrt{\frac{2D\tau}{\delta^2}}. \quad (12)$$

Восстановление твердых частиц газами в режиме кристаллохимической кинетики. Константа скорости кристаллохимического превращения k – аналог константы скорости массоотдачи β при постоянстве толщины диффузионного слоя, что возможно в случае образования новой фазы «рыхлой» структуры или при восстановлении жидкой частицы.

Тогда для сферической формы можно записать уравнение

$$-\frac{dn}{d\tau} = kC_0 \cdot 4\pi r^2. \quad (13)$$

С учетом (8) получили $dr = kd\tau$ или $r = r_0 - k\tau$. Отсюда следует, что время полного восстановления определяется выражением $\tau_6 = \frac{r_0}{k}$, а степень восстановления уравнением вида

$$\alpha = 1 - \left(1 - \frac{k\tau}{r_0}\right)^3. \quad (14)$$

Восстановление оксидов из жидких растворов газами. Если металл восстанавливается из жидкой оксидной капли сферической формы, причем оксид представляет собой раствор, то кинетическое описание процесса осложняется переменной концентрацией оксида железа в объеме капли. При этом полное восстановление принципиально невозможно. Правда, в этом случае возможно одно упрощение, связанное со слабым изменением радиуса капли в результате восстановления только одного из компонентов оксидной капли. Действительно, если объем капли уменьшается даже в два раза, то ее радиус уменьшится всего в 1,25 раза и в первом приближении его изменением можно пренебречь.

Тогда в дифференциальном уравнении

$$-\frac{dn}{d\tau} = \frac{D}{\delta}(C_0 - C_S)S = \frac{D}{\delta}(C_0 - C_S)4\pi r^2, \quad (15)$$

где D – коэффициент диффузии в жидком оксиде, м²/с;
 δ – приведенная толщина диффузионного слоя, м.

Величина $S \approx \text{const}$, а изменение C_0 свяжем со скоростью W . Поскольку $n = V \cdot C_0 = \frac{4}{3}\pi r^3 \cdot C_0$, то $dn = \frac{4}{3}\pi r^3 dC_0$ с учетом которого из (15) получили:

$$-\frac{dC_0}{(C_0 - C_S)} = \frac{3\beta}{r} d\tau, \quad (16)$$

где $\beta = \frac{D}{\delta}$ – константа скорости массоотдачи, м/с.

После интегрирования уравнения (16) имеем

$$\ln \frac{(C_0^H - C_S)}{(C_0^\tau - C_S)} = 3 \frac{\beta}{r} \tau. \quad (17)$$

При $C_S \rightarrow 0$ из (17) получили $C_0^\tau = C_0^H e^{-3 \frac{\beta}{r} \tau}$, из которого вытекают уравнения для расчета степени восстановления

$$\alpha = 1 - \frac{C_0^\tau}{C_0^H} = 1 - e^{-3 \frac{\beta}{r} \tau} \quad (18)$$

и массы восстановленного оксида

$$m_\tau = m_0 \alpha = m_0 \left(1 - e^{-3 \frac{\beta}{r} \tau} \right). \quad (19)$$

Время восстановления оксида τ_X на X процентов нашли из условия $\frac{X}{100} = 1 - e^{-3 \frac{\beta}{r} \tau_X}$. Из которого следует, что $\tau_X = -\frac{r}{3\beta} \ln \left(1 - \frac{X}{100} \right)$.

Расчет основных параметров процессов восстановления осуществлялся в соответствии с законом распределения частиц материалов по размерам, полученным на основе обработки рассматриваемых материалов [5-7]. В исследовании приняты диапазон изменения размеров для материалов 0,025÷3 мм, и температура в соответствии с условиями восстановления: для твердофазного 800÷1200 °С и жидкофазного 1300÷1600 °С. При расчете использовались значения коэффициентов диффузии, приведенные в работах [8, 9] и константа скорости кристаллохимического превращения из работы [9].

Результаты расчетов восстановления железосодержащего материала, отражающие зависимость времени восстановления твердых частиц и капель от размера и от температуры среды, представлены в таблице 1 (звездочкой помечен наиболее вероятный размер частиц).

Анализ результатов показывает, что твердофазное восстановление лимитируемое диффузией в частицах материалов не реально, так как при диффузии CO в частице время процесса восстановления очень маленькое, а при диффузии ионов железа в частице очень большое. Наиболее реальным является жидкофазное высокотемпературное восстановление. Так, время протекания процессов для размеров капель 0,025 ÷ 1 мм при температуре 1600 °С не превышает 2 минут. Так как тепловые процессы протекают на порядок быстрее [10], рассматриваемый вариант технологии практически реализуем.

Таблица 1 – Результаты расчета процессов восстановления в системах

Вид системы	Лимитирующая стадия	Описание характеристик системы			Значение параметров				Результаты расч.	
		Вид модели	Степень восстановления	Время восстановления	$D, \text{ м}^2/\text{с}$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$d \cdot 10^3, \text{ м}$	$\beta, \text{ м/с}; k, \text{ м/с}$	$\tau, \text{ с}$	$\alpha, \%$
Сферическая частица материала в газе	Диффузия CO в частице	$-\frac{dn}{dt} = \frac{D}{y} (C_0 - C_s) S$	$\alpha = 1 - \left(1 - \frac{\sqrt{2D\tau}}{r_0}\right)^3$	$\tau_e = \frac{r_0^2}{2D}$	$1,16 \cdot 10^{-5}$	800	0,1*	9.58	$1,1 \cdot 10^{-4}$	95
					$1,16 \cdot 10^{-5}$	800	0,03-1	38.7-0.96	$9,7 \cdot 10^{-6} - 1,1 \cdot 10^{-2}$	95
					$1,84 \cdot 10^{-5}$	1200	0,1*	13.1	$6,8 \cdot 10^{-5}$	95
					$1,84 \cdot 10^{-5}$	1200	0,03-1	43.7-1.31	$6,1 \cdot 10^{-6} - 6,8 \cdot 10^{-3}$	95
Сферическая частица материала в газе	Диффузия ионов Fe^{+} в частице	$-\frac{dn}{dt} = \frac{D}{y} (C_0 - C_s) S$	$\alpha = 1 - \left(1 - \frac{\sqrt{2D\tau}}{r_0}\right)^3$	$\tau_e = \frac{r_0^2}{2D}$	$1,37 \cdot 10^{-14}$	800	0,1*	$4,9 \cdot 10^{-9}$	$9,1 \cdot 10^4$	95
					$1,37 \cdot 10^{-14}$	800	0,03-1	$1,6 \cdot 10^{-8} - 4,9 \cdot 10^{-10}$	$8,2 \cdot 10^3 - 9,1 \cdot 10^6$	95
					$3,34 \cdot 10^{-12}$	1200	0,1*	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$3,7 \cdot 10^2$	95
					$3,34 \cdot 10^{-12}$	1200	0,03-1	$4,0 \cdot 10^{-6} - 1,2 \cdot 10^{-7}$	$34,3 \cdot 10^4$	95
Плстинчатая частица материала в газе	Диффузия ионов Fe^{+} в частице	$-\frac{dn}{dt} = \frac{D}{y} (C_0 - C_s) hl \cdot 2$	$\alpha = 2 \sqrt{\frac{2D\tau}{\delta^2}}$	$\tau_e = \frac{\delta^2}{8D}$	$1,37 \cdot 10^{-14}$	800	1,1*	$4,4 \cdot 10^{-10}$	$1,1 \cdot 10^7$	95
					$1,37 \cdot 10^{-14}$	800	0,025-3	$2,0 \cdot 10^{-8} - 1,6 \cdot 10^{-10}$	$5,7 \cdot 10^3 - 8,2 \cdot 10^7$	95
					$3,34 \cdot 10^{-12}$	1200	1,1*	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$4,5 \cdot 10^4$	95
					$3,34 \cdot 10^{-12}$	1200	0,025-3	$4,8 \cdot 10^{-6} - 4,0 \cdot 10^{-8}$	$23,3 \cdot 10^5$	95
Сферическая частица материала в газе	Кристаллохимическая кинетика	$-\frac{dn}{dt} = kC_0 \cdot 4\pi r^2$	$\alpha = 1 - \left(1 - \frac{k\tau}{r_0}\right)^3$	$\tau_e = \frac{r_0}{k}$		1200	0,1*	0,12	$4,2 \cdot 10^{-4}$	95
						1200	0,03-1	0,12	$1,2 \cdot 10^{-4} - 4,2 \cdot 10^{-3}$	95
Капля шлака в эмульсии	Диффузия ионов Fe^{+} в шлаке	$-\frac{dn}{dt} = \frac{D}{\delta} (C_0 - C_s) S$	$\alpha = 1 - e^{-\frac{\beta}{r}\tau}$	$\tau_e = -\frac{r}{\beta} \ln\left(1 - \frac{X}{100}\right)$	$3,144 \cdot 10^{-12}$	1300	0,1*	$1,13 \cdot 10^{-6}$	44,42	95
					$3,144 \cdot 10^{-12}$	1300	0,03-1	$3,8 \cdot 10^{-6} - 1,1 \cdot 10^{-7}$	$4 - 4,4 \cdot 10^3$	95
					$3,144 \cdot 10^{-12}$	1300	1,1*	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$5,3 \cdot 10^3$	95
					$3,144 \cdot 10^{-12}$	1300	0,025-3	$4,5 \cdot 10^{-6} - 3,8 \cdot 10^{-8}$	$2,8 - 3,9 \cdot 10^4$	95
					$1,08 \cdot 10^{-10}$	1600	0,1*	$3,88 \cdot 10^{-5}$	1,29	95
					$1,08 \cdot 10^{-10}$	1600	0,03-1	$1,3 \cdot 10^{-4} - 3,8 \cdot 10^{-6}$	0,12-129	95
					$1,08 \cdot 10^{-10}$	1600	1,1*	$3,5 \cdot 10^{-6}$	156	95
					$1,08 \cdot 10^{-10}$	1600	0,025-3	$1,6 \cdot 10^{-4} - 1,3 \cdot 10^{-6}$	$8,1 \cdot 10^{-2} - 1,1 \cdot 10^3$	95

Полученные при моделировании результаты позволили выработать требования к составу и размерам фракций входного потока, времени пребывания материалов в различных зонах агрегата для реализации процессов твердофазного восстановления в реакционной камере и жидкофазного восстановления в рафинирующем отстойнике.

Библиографический список

1. Процесс СЭР – металлургический струйно-эмульсионный реактор / В.П. Цымбал, С.П. Мочалов, И.А. Рыбенко и др. // -М: Металлургиздат, 2014.-488с.
2. Разработка новых наукоемких металлургических процессов и агрегатов струйно-эмульсионных типа на принципах самоорганизации / В.П. Цымбал, С.П. Мочалов, К.М. Шакиров и др. // Новые промышленные технологии и материалы.-Новокузнецк, 2000.-С.299-308
3. Процесс и агрегат типа самоорганизующийся струйно-эмульсионный реактор, как пример наукоемкой технологии в металлургии. / В. П. Цымбал, С. П. Мочалов, В. И. Кожемяченко, И. А. Рыбенко // Известия вузов. Черная металлургия. – 2005. -№ 6. – С. 60 – 65.
4. Брусов Л.П. // Физикохимия прямого получения железа. -М.: Наука. 1977. -С. 159-162.
5. Методика численно-аналитического моделирования тепломассообменных процессов в дисперсных системах/С. Н. Калашников, С. П. Мочалов, С. Ю. Красноперов, Л. А. Ермакова//Численно-аналитические методы решения краевых задач. Сборник трудов межвузовской научной конференции. Новокузнецк, 1998. -С. 52-54.
6. Калашников С.Н. Математическая модель и методика решения задач нестационарного тепломассообмена совокупности частиц пылевидных железосодержащих материалов/С.Н. Калашников, Л.А. Ермакова, С.П. Мочалов//Изв. вузов. Черн. металлургия.-2001.-№6.-С.67-71.
7. Цымбал В.П., Мочалов С.П., Ермакова Л.А. Моделирование процессов и разработка технологии получения металла из отходов на основе непрерывного струйно-эмульсионного процесса // Изв. вузов. Черная металлургия. -2000. -№2. -С. 60.

8. Князев В. Ф., Гиммельфарб А. И., Неменов А. М. Бескоксовая металлургия железа. -М.: Металлургия, 1971. –271 с.
9. Заниград М. И. Кинетика и механизм взаимодействия сульфидно-металлических и оксидных расплавов: Дис... доктора хим. наук. Свердловск УПИ им. С. М. Кирова, - 1981, - 419 с.
10. Методика и результаты расчета процессов в реакторах агрегата струйно-эмульсионного типа для технологии прямого получения металла из дисперсных материалов / Л.А. Ермакова, С.П. Мочалов // Известия вузов. Черная металлургия.-2004.-№10.- С.48-51.

УДК 669.046.586.4:544.3

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНВЕРТЕРНОГО ВАНАДИЕВОГО ШЛАКА

Голодова М.А., Рожихина И.Д., Нохрина О.И., Рыбенко И.А.

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет»
г. Новокузнецк, Россия, golodova_ma@mail.ru

Аннотация. Методом термодинамического моделирования с применением программного комплекса «Терра» выполнены расчеты параметров равновесного состояния процессов восстановления железа, ванадия, марганца и титана из конвертерного ванадиевого шлака углеродом коксика и кремнием ферросилиция. Расчеты реализованы как отдельно для каждого типа восстановителя так и совместно. Построены зависимости параметров процесса от расходов восстановителей. Проведен анализ полученных результатов.

Ключевые слова: процесс восстановления, ванадий, железо, марганец, титан, конвертерный ванадиевый шлак, термодинамическое моделирование.

Abstract. Method of thermodynamic modeling using program complex «Terra» calculations of parameters of equilibrium processes reduction of iron, manganese, vanadium and titanium converter of vanadium slag by carbon sieves and silica ferrosilicon. Calculations are implemented separately for each type of reductant and together. Process parameter dependences of cost reducing agents. The analysis of the results obtained.

Keywords: the process of recovery, vanadium, iron, manganese, titanium, vanadium converter slag, thermodynamic modelling.

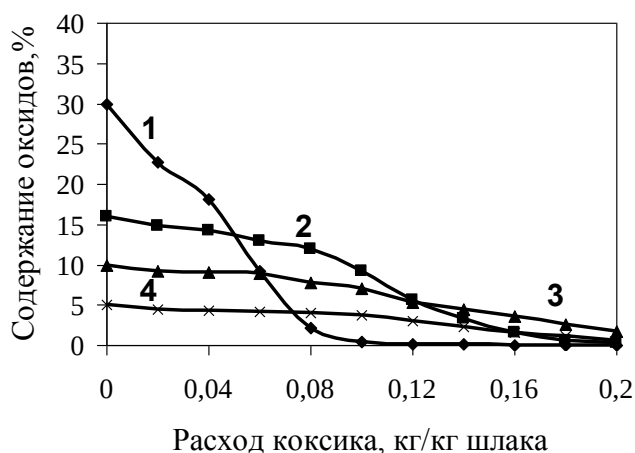
Одним из наиболее эффективных, а, следовательно, и востребованных легирующих элементов для получения сталей с высокими эксплуатационными свойствами является ванадий, а перспективной технологией легирования сталей – обработка конвертерным ванадиевым шлаком с использованием в качестве восстановителей углерода и кремния. Однако промышленные конвертерные ванадиевые шлаки, наряду с оксидами ванадия (от 10 до 30% V_2O_5), содержат оксиды железа, титана, марганца, кремния и кальция (10 ÷ 30 % SiO_2 , 1 ÷ 5 % CaO , 1 ÷ 5 % MgO , 4 ÷ 12 % MnO , 25 ÷ 35 % Fe_2O_3 , 2 ÷ 12 % TiO_2 , 1 ÷ 3% Al_2O_3). Исследование процесса восстановления элементов в такой сложной многокомпонентной оксидной системе возможно только при использовании современных методов и программных продуктов термодинамического моделирования [1 – 4].

При решении задачи исследования процессов восстановления элементов из конвертерного ванадиевого шлака использовали один из методов термодинамического моделирования на основе расчета параметров равновесного состояния в модельных термодинамических системах [2-4]. Достоинство этих методов заключается в возможности реализации многовариантных расчетов равновесного состояния многокомпонентных систем при варьировании в широком диапазоне управляющих воздействий. Расчет термодинамического равновесия позволяет выяснить принципиальную возможность получения тех или иных веществ, выделение которых является основным при решении задачи оценки предельного конечного состояния, и определить область допустимых значений парамет-

ров. При реализации термодинамического моделирования использовали готовый программный продукт – программный комплекс «Терра», разработанный в Московском государственном техническом университете, позволяющий на основе принципа максимума энтропии находить равновесный состав многокомпонентной, гетерогенной термодинамической системы для высокотемпературных условий [1].

При исследовании процесса восстановления элементов из конверторного ванадиевого шлака (16,0 % V_2O_5 , 5,0 % TiO_2 , 10% MnO , 25,0 % $Fe_{общ.}$) были проведены расчеты равновесных составов гетерогенной смеси шлака и восстановителей при температуре 1873 К. Граничные условия были определены по расчетам коэффициента извлечения ванадия η_V для расходов коксика в пределах от 0 до 0,5 кг/кг шлака и ферросилиция ФС75 в пределах от 0 до 0,5 кг/кг шлака [5]. Коэффициент извлечения ванадия η_V близок к 1 при удельном расходе коксика более 0,2 кг/кг шлака и ферросилиция более 0,25 кг/кг шлака, эти расходы и были выбраны в качестве граничных значений.

Анализ результатов расчетов, представленных на рисунках 1 и 2, показал, что восстановление железа из оксидов железа заканчивается при удельном расходе коксика 0,1 кг/кг шлака, а при восстановлении кремнием ферросилиция – при 0,14 кг/кг шлака. Восстановление ванадия начинается после полного восстановления железа. Содержание оксидов марганца и титана с увеличением расхода восстановителей изменяется незначительно, что указывает на ограничение их степени восстановления при заданной температуре. При восстановлении ванадия и титана коксиком достигаются меньшие значения остаточного содержания их оксидов в продуктах восстановления, чем при восстановлении ферросилицием (0, 25 % и 1,3 % для ванадия, 0,08 % и 0,60 % для титана соответственно).

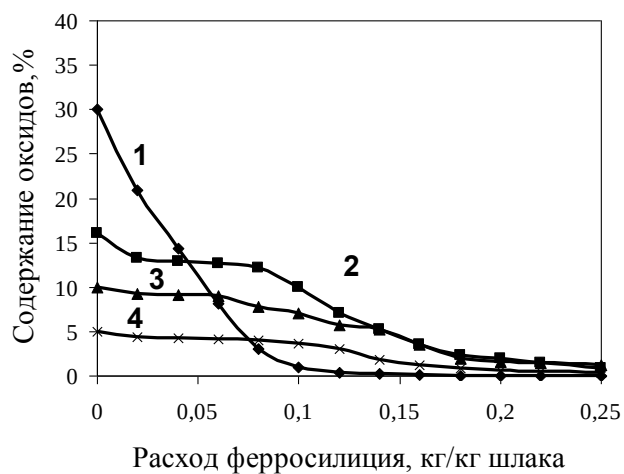


1 – оксиды железа, 2 – оксиды ванадия, 3 – оксид марганца, 4 – оксиды титана

Рисунок 1 – Зависимости содержания оксидов железа, ванадия, титана и марганца в шлаке от расхода коксика при 1873К

Согласно полученным расчетным данным, представленным на рисунках 3 – 6, при углеродосиликотермическом восстановлении (углеродом коксика и кремнием ферросилиция) содержание оксидов железа в продуктах восстановления конверторного ванадиевого шлака при удельном расходе коксика более 0,1 кг не зависит от расхода ферросилиция ФС75. Содержание оксидов ванадия снижается с увеличением расходов восстановителей при любом их соотношении и достигает значения 0,04 % при удельном расходе коксика более 0,14 кг/кг шлака и ферросилиция более 0,2 кг/кг шлака. Содержание оксидов титана в шлаке менее 2 % достигается при удельном расходе ферросилиция ФС75 более 0,1 кг/кг шлака при любых значениях расхода коксика. Минимальное количество оксидов титана составляет около 0,01 % при максимальных расходах обоих восстановите-

лей. Содержание оксида марганца в продуктах восстановления конвертерного ванадиевого шлака снижается при восстановлении одним коксиком или одним ферросилицием до 1 %.



1 – оксиды железа, 2 – оксиды ванадия, 3 – оксид марганца, 4 – оксиды титана

Рисунок 2 – Зависимости содержания оксидов железа, ванадия, титана и марганца в шлаке от расхода ферросилиция при 1873К

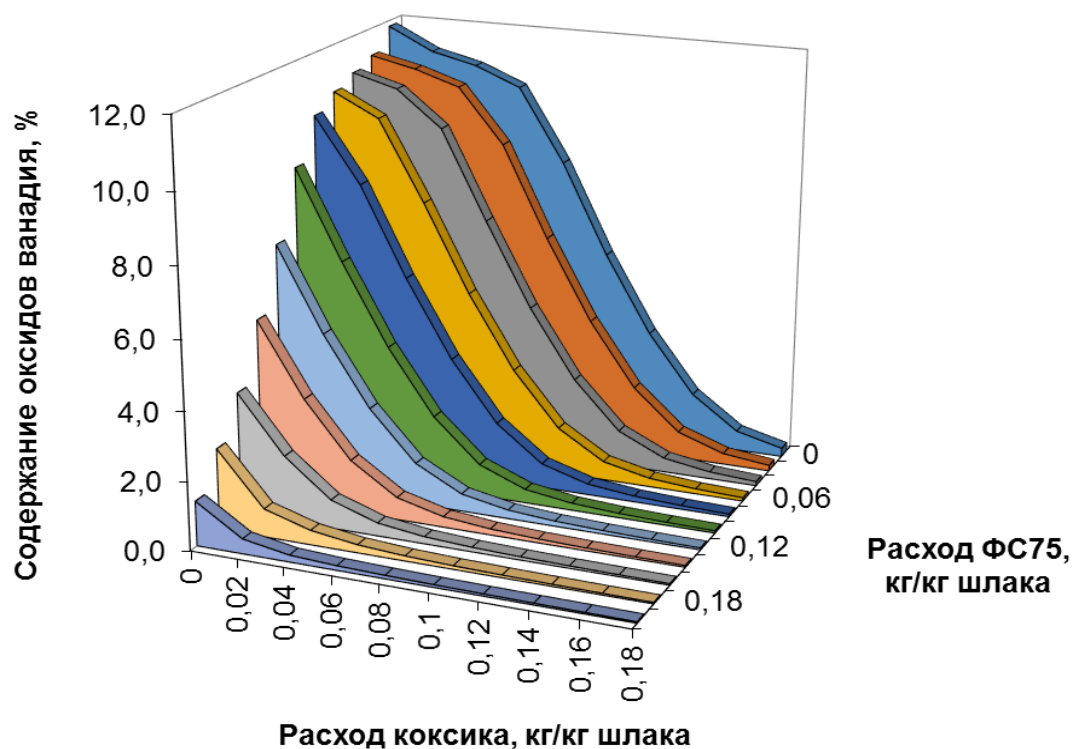


Рисунок 3 – Изменение содержания оксидов ванадия в шлаке при совместном восстановлении углеродом коксика и кремнием ферросилиция

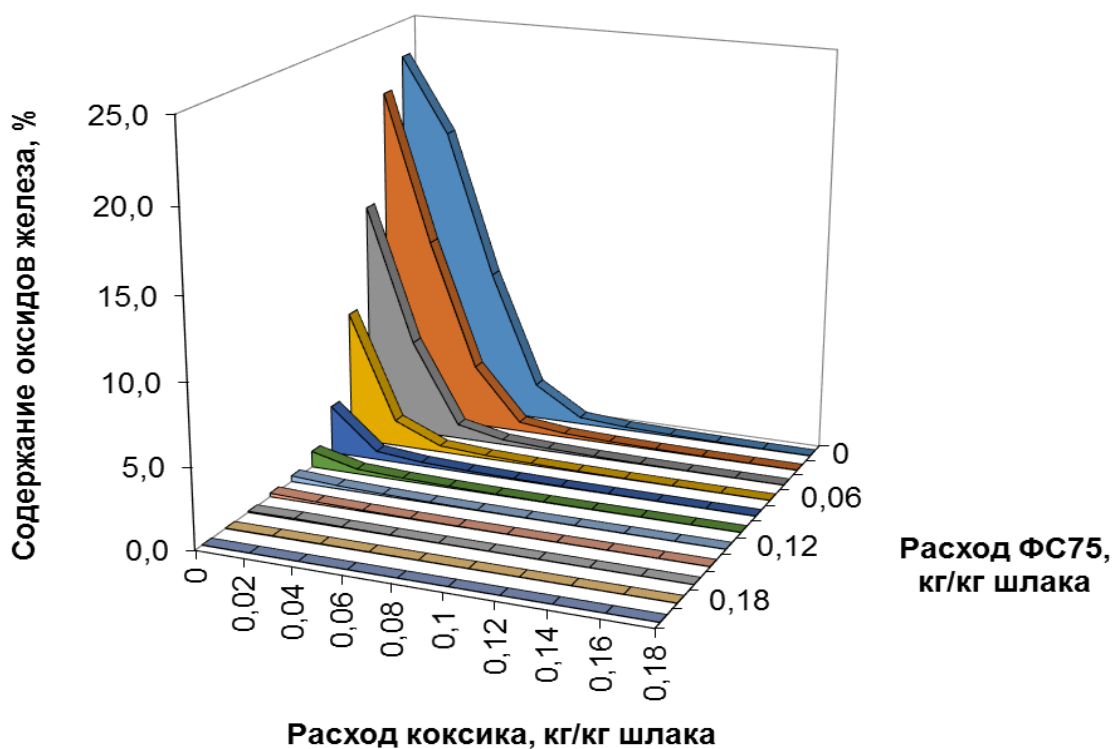


Рисунок 4 – Изменение содержания оксидов железа в шлаке при совместном восстановлении углеродом коксика и кремнием ферросилиция

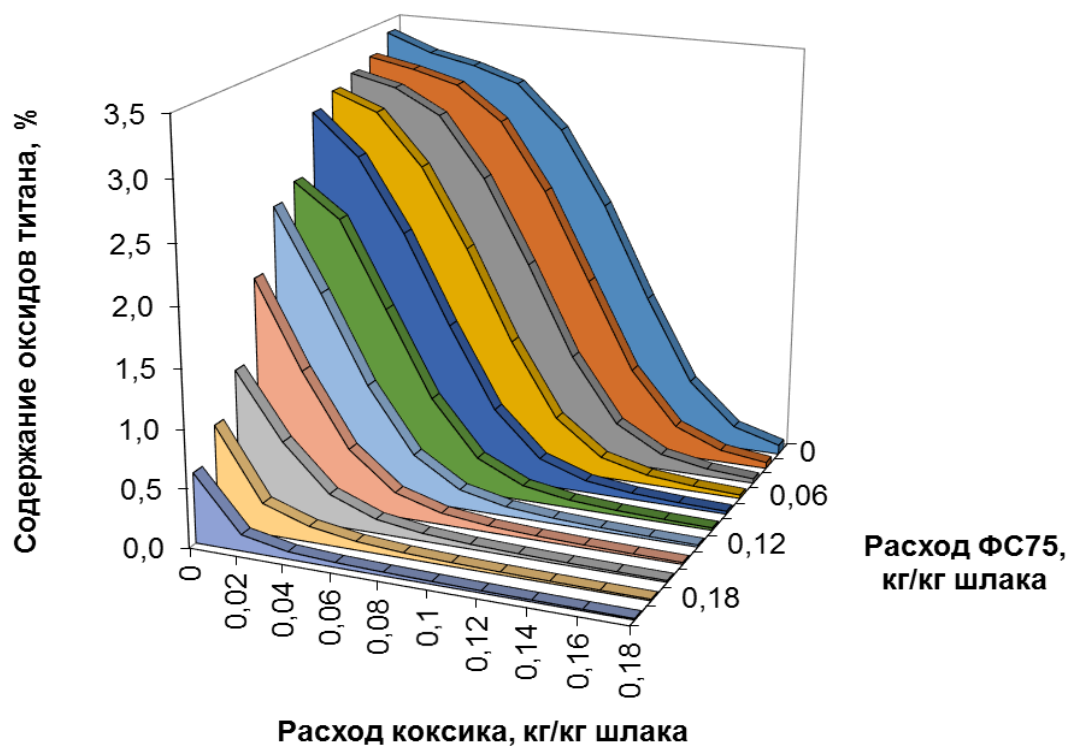


Рисунок 5 – Изменение содержания оксидов титана в шлаке при совместном восстановлении углеродом коксика и кремнием ферросилиция

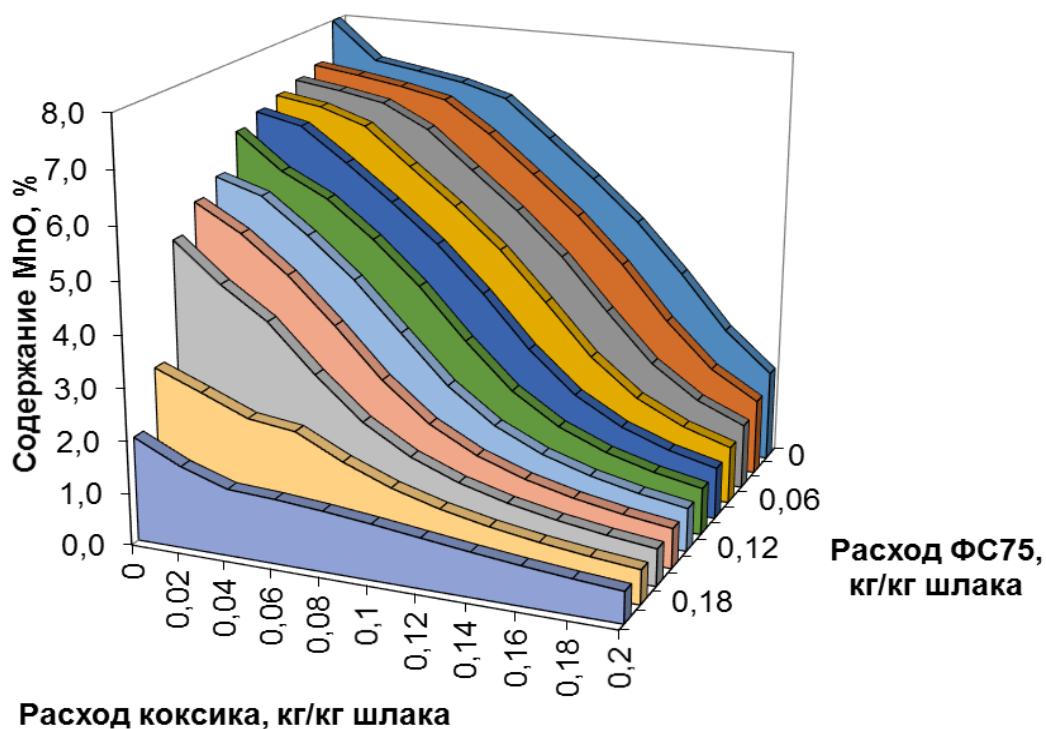


Рисунок 6 – Изменение содержания оксида марганца в шлаке при совместном восстановлении углеродом коксика и кремнием ферросилиция

При совместном восстановлении марганца из его оксида углеродом коксика и кремнием ферросилиция в заданном диапазоне расходов восстановителей удастся достичь содержания оксида в шлаке 0,5 % (рисунок 6). Необходимо отметить, что содержание оксидов ванадия при таких расходах восстановителей составляет менее 0,05 %. Восстановление марганца при данных условиях ограничено.

Результаты расчетов содержания в продуктах восстановления карбида ванадия и ванадия металлического при совместном восстановлении конвертерного ванадиевого шлака углеродом коксика и кремнием ферросилиция показали, что восстановление ванадия проходит с преимущественным образованием карбида ванадия. При заданных расходах восстановителей (до 0,2-х кг коксика и 0,25-ти кг ферросилиция) железо и ванадий восстанавливаются из конвертерного ванадиевого шлака практически полностью [6]. Титан в продуктах восстановления конвертерного ванадиевого шлака согласно полученным расчетным данным находится также в виде карбида титана. При удельных расходах восстановителей менее 0,20 кг на 1 кг конвертерного ванадиевого шлака не происходит полного восстановления титана и марганца из их оксидов даже при максимальных расходах обоих восстановителей [7 – 9].

Библиографический список

1. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах / Н.А. Ватолин, Б.Г. Трусов, Г.К. Моисеев. – М. : Metallurgia, 1994. – 175 с.
2. Моделирование и оптимизация стационарных режимов металлургических процессов : монография / И. А. Рыбенко, С. П. Мочалов ; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2015. – 170 с.
3. Исследование условий и режимов процесса восстановления ванадия в элементарных системах / М. А. Голодова, В. И. Дмитриенко, И. Д. Рожихина, И. А. Рыбенко // Известия вузов. Черная металлургия. – 2010. - № 4. – С. 7 – 11.

4. Рыбенко И. А. Моделирование условий и режимов восстановления железа и марганца в элементарной системе Fe-Mn-C-O / И. А. Рыбенко, В. Н. Буинцев // Наука и образование в современной конкурентной среде : мат. международной науч.-практ. конф. – Уфа, 2014. – С. 142 – 145.

5. Голодова М.А. Исследование процессов восстановления ванадия и оптимизация технологии обработки стали конвертерным ванадиевым шлаком: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, специальность 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов» / М.А. Голодова ; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк, 2012 г.

6. Голодова М.А. Исследование процесса восстановления ванадия и железа из многокомпонентной оксидной системы / Голодова М.А., Дмитриенко В.И., Рожихина И.Д., Рыбенко И.А. // «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (Сибресурс – 17 – 2011)» : Доклады 17-ой международной научно-практической конференции. – Томск, 2011. – С. 57 – 60.

7. Голодова М.А. Исследование условий восстановления титана из конвертерного ванадиевого шлака / М.А. Голодова, И.Д. Рожихина, В.И. Дмитриенко // «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (Сибресурс – 16 – 2010)» : Доклады 16-ой международной научно-практической конференции. – Томск, 2010. – С. 41 – 43.

8. Голодова М.А. Исследование процесса восстановления марганца из конвертерного ванадиевого шлака // М.А. Голодова, И.Д. Рожихина, О.И. Нохрина, В.И. Дмитриенко, «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (Сибресурс – 20 – 2014)» : Доклады 20-ой межд. научн.-практ. конференции. – Томск, 2014. – С. 29 – 32.

9. Исследование восстановления марганца и титана из конвертерного ванадиевого шлака / М. А. Голодова, В. И. Дмитриенко, И. Д. Рожихина, И. А. Рыбенко // Металлургия: Технологии, управление, качество : сб. науч. тр. Всероссийской науч.-практ. конф. 9-11 ноября 2011 г.; под ред. Протопопова Е.В. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2011. – С. 95 – 98.

УДК 669.046.46:544.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ЧИСТЫХ ОКСИДНЫХ СИСТЕМ

Голодова М.А., Рожихина И.Д., Нохрина О.И., Рыбенко И.А.

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет»
г. Новокузнецк, Россия, golodova_ma@mail.ru

Аннотация. Методом термодинамического моделирования с применением программного комплекса «Терра» выполнен расчет процесса восстановления элементов из чистых оксидных систем на основе пентаоксида ванадия. Определены зависимости параметров процесса восстановления ванадия и железа из их оксидов от расхода восстановителей.

Ключевые слова: процесс восстановления, элементарная система, ванадий, железо, термодинамическое моделирование.

Abstract. Method of thermodynamic modeling using program complex «Terra» is executed the calculation process of restoring items from pure oxide of vanadium pentoxide vanadium-based systems. Defined parameters of the recovery process of vanadium and iron from their oxides from reducing consumption.

Keywords: the recovery process, elemental system, vanadium, iron, thermodynamic modelling.

В настоящее время большое значение приобретает развитие технологии легирования стали из оксидных материалов, например, ванадиевого шлака с применением в качестве восстановителей углерода и кремния, позволяющих получить высокую степень восстановления ванадия и имеющих малую стоимость. Внедрение таких технологий невоз-

можно без исследования процессов восстановления элементов, в том числе и из чистых оксидных систем.

Для решения задачи по восстановлению ванадия из его оксидов было проведено теоретическое исследование процесса углеродосиликотермического восстановления ванадия из пентаоксида ванадия и из пентаоксида ванадия в присутствии оксида железа (III) методом термодинамического моделирования.

При реализации термодинамического моделирования процесса восстановления ванадия из его оксидов использовался готовый программный продукт, позволяющий на основе принципа максимума энтропии находить равновесный состав многокомпонентной гетерогенной термодинамической системы для высокотемпературных условий – программный комплекс «Терра», разработанный в Московском государственном техническом университете [1].

Исследование осуществлялось путем решения модельных задач [2 – 5] по определению условий восстановления ванадия в системах, входной поток которых состоит из совокупности элементов $V\text{-}Fe\text{-}O\text{-}C\text{-}Si$, представленных набором веществ $V_2O_5 - kFe_2O_3 - nC - mSi$, где k , n и m – массы оксида железа, углерода и кремния, приходящиеся на 1 кг пентаоксида ванадия. Исходный состав системы формировался путем задания значений параметров k , n , m . Значение k принималось равным 0 и 1, а значения n и m варьировались в пределах от 0 до 1.

Проведенные ранее исследования влияния температуры на процесс восстановления элементов [6 – 9] показали, что в системах $V_2O_5\text{-}C\text{-}Si$, $V_2O_5\text{-}C$ и $V_2O_5\text{-}Si$, процесс восстановления ванадия из его оксидов не зависит от температуры в интервале от 1673 до 2073 К, поэтому дальнейшие расчеты проводили для температуры 1873 К.

В результате расчетов были определены массы продуктов восстановления в системах $V_2O_5\text{-}C$, $V_2O_5\text{-}Si$, $V_2O_5\text{-}C\text{-}Si$, $V_2O_5 - Fe_2O_3 - C - Si$.

Полученные зависимости изменения массы веществ от расходов восстановителей в указанных системах приведены на рисунках 1 – 6.

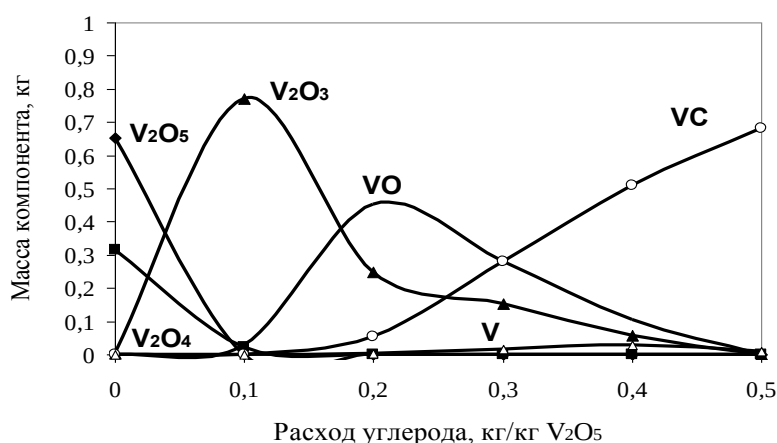


Рисунок 1 – Зависимости массы V_2O_5 и продуктов восстановления ванадия от расхода углерода в системе $V_2O_5\text{-}C$ при 1873 К

Из зависимостей, представленных на рисунках 1 и 2, следует, что в системе $V_2O_5\text{-}C$ пентаоксид ванадия полностью восстанавливается с преимущественным образованием карбида ванадия при расходе углерода 0,5 кг/кг V_2O_5 и в системе $V_2O_5\text{-}Si$ – с преимущественным образованием силицидов ванадия при расходе кремния 0,7 кг/кг V_2O_5 . Масса ванадия металлического незначительна и не превышает 0,034 кг/кг V_2O_5 при восстановлении углеродом.

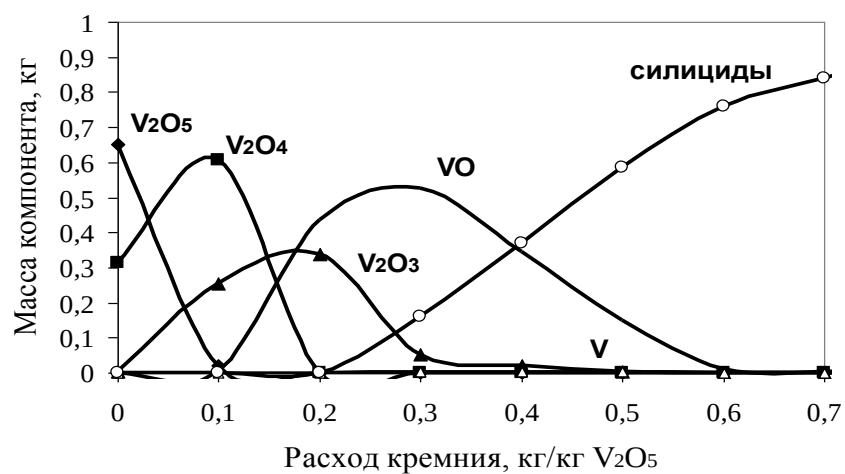


Рисунок 2 – Зависимости массы V_2O_5 и продуктов восстановления от расхода кремния в системе V_2O_5-Si при 1873 К

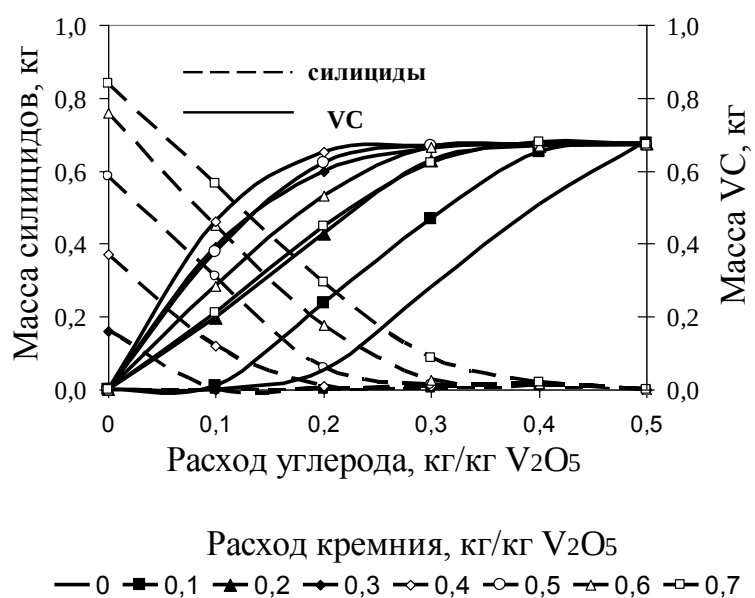


Рисунок 3 – Зависимости массы карбида ванадия и силицидов ванадия от расхода восстановителей в системе V_2O_5-C-Si при 1873 К

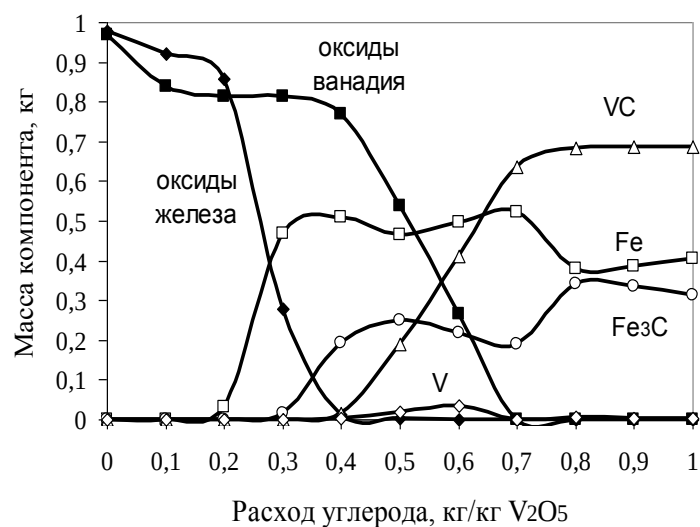


Рисунок 4 – Зависимости массы продуктов восстановления ванадия и железа от удельного расхода углерода в системе $V_2O_5-Fe_2O_3-C$ при 1873 К

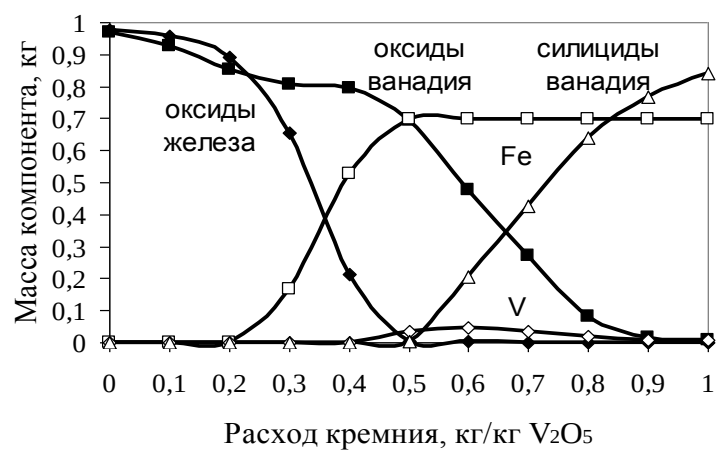


Рисунок 5 – Зависимость массы продуктов восстановления ванадия и железа от удельного расхода кремния в системе $V_2O_5-Fe_2O_3-Si$ при 1873 К

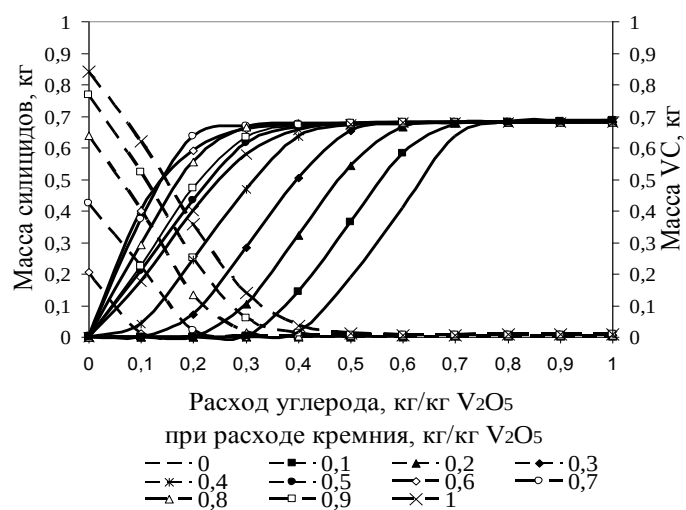


Рисунок 6 – Зависимость массы карбида ванадия и силицидов ванадия от расхода восстановителей в системе $V_2O_5-Fe_2O_3-C-Si$ при 1873 К

Результаты расчетов масс продуктов процесса восстановления в системе V_2O_5-C-Si , приведенные на рисунке 3, показали, что ванадий, восстановленный из пентаоксида ванадия при углеродосиликотермическом восстановлении, также находится в основном в виде карбида ванадия и силицидов ванадия. Восстановление первоначально проходит с образованием карбида ванадия, а далее при увеличении расхода кремния более чем 0,3 кг/кг V_2O_5 образуются также силициды ванадия VSi_2 , V_5Si_3 и V_3Si . Масса ванадия металлического согласно расчетным данным незначительна и не превышает 8 % от массы восстанавливаемого ванадия. С увеличением удельного расхода кремния эта величина уменьшается в связи с образованием силицидов ванадия.

Результаты термодинамического моделирования также показали, что при углеродосиликотермическом восстановлении ванадия из пентаоксида углерод является преобладающим восстановителем.

Расчеты процесса восстановления ванадия и железа в системах $V_2O_5-Fe_2O_3-C$ и $V_2O_5-Fe_2O_3-C$ показали, что восстановление ванадия из пентаоксида ванадия начинается только после полного восстановления железа (рисунки 4, 5).

При восстановлении оксидов только углеродом процесс проходит с преимущественным образованием карбида ванадия, аналогично восстановлению ванадия в системе V_2O_5-C , а восстановление железа проходит с образованием металлического железа (при расходе углерода более 0,2 кг/кг V_2O_5) и карбида железа Fe_3C . Количество металлического ванадия в системах $V_2O_5-Fe_2O_3-C$ и V_2O_5-C одинаково (не превышает 8% от массы восстанавливаемого ванадия). Последний появляется в системе при удельном расходе углерода выше 0,3 кг/кг V_2O_5 . Углерод расходуется не только на восстановление металлов из их оксидов, но и на образование карбидов этих металлов.

Ванадий в системе $V_2O_5-Fe_2O_3-Si$ восстанавливается с преимущественным образованием силицидов ванадия, появляющихся при удельном расходе кремния более 0,4 кг/кг V_2O_5 . Масса металлического ванадия составляет не более 0,045 кг при удельном расходе кремния 0,6 кг/кг V_2O_5 , что значительно выше массы металлического ванадия, полученного при восстановлении ванадия из системы V_2O_5-Si . Восстановленное железо появляется в системе при удельном расходе кремния более 0,2 кг/кг V_2O_5 . Термодинамический расчет не выявил в системе наличия силицидов железа.

При углеродосиликотермическом процессе восстановления ванадия в системе $V_2O_5-Fe_2O_3-C-Si$ продуктами являются карбид и силициды ванадия (рисунок 6). Карбид ванадия появляется в системе при расходе углерода более 0,4 кг/кг V_2O_5 . Силициды ванадия при углеродосиликотермическом восстановлении ванадия в присутствии оксида железа (III) появляются только при расходе кремния более 0,6 кг/кг V_2O_5 . При восстановлении ванадия одним кремнием образование силицидов ванадия начинается уже при удельном расходе кремния 0,4 кг/кг V_2O_5 . Масса ванадия металлического в системе $V_2O_5-Fe_2O_3-C-Si$ незначительна и не превышает 11 % от массы восстанавливаемого ванадия, что выше, чем в системе V_2O_5-C-Si .

Из полученных результатов следует, что при заданных условиях процесс восстановления ванадия до карбида ванадия является основным. Характер зависимостей изменения массы продуктов восстановления ванадия в системе $V_2O_5-Fe_2O_3-C-Si$ аналогичен характеру зависимостей при восстановлении ванадия из системы V_2O_5-C-Si . Железо восстанавливается до железа металлического и карбида железа. Анализ полученных зависимостей изменения массы продуктов углеродосиликотермического восстановления железа, показал, что при удельном расходе кремния и удельном расходе углерода выше 0,3 и 0,1 кг/кг V_2O_5 соответственно масса железа и масса карбида железа не зависят от расхода углерода.

Одной из задач исследования явилось определение зависимости между удельными расходами углерода и кремния при углеродосиликотермическом восстановлении элементов.

Зависимость между удельными расходами кремния и углерода, необходимыми для полного восстановления 1 кг пентаоксида ванадия в системе с достоверностью аппроксимации, равной 0,99, можно описать формулами:

$$q_{Si} = -3,2143q_C^2 + 0,15q_C + 0,7 \text{ (система } V_2O_5-C-Si)$$

$$q_{Si} = -1,7262q_C^2 - 0,2083q_C + 1,0125 \text{ (система } V_2O_5-Fe_2O_3-C-Si)$$

Проведенное термодинамическое моделирование позволило сделать вывод, что восстановление ванадия из пентаоксида ванадия углеродом, кремнием и совместно углеродом и кремнием происходит с преимущественным образованием карбида ванадия и силицидов ванадия. Масса ванадия металлического незначительна. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что при углеродосиликотермическом восстановлении ванадия углерод является основным восстановителем. Присутствие в системе оксидов железа увеличивает необходимые удельные расходы углерода и кремния. Характер зависимостей массы продуктов восстановления ванадия от удельного расхода углерода и кремния сохраняется.

Библиографический список

1. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах / Н.А. Ватолин, Б.Г. Трусов, Г.К. Моисеев. – М. : Металлургия, 1994. – 175 с.
2. Исследование условий процесса восстановления ванадия в системе V-O-C-Fe-Si / М. А. Голодова, И. Д. Рожихина, В. И. Дмитриенко, И. А. Рыбенко // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (Сибресурс 15 – 2009) : сб. докл. 15-ой междунар. науч.-практ. конф. – Томск, 2010. – С. 57 – 59.
3. Исследование условий и режимов процесса восстановления ванадия в элементарных системах / М. А. Голодова, В. И. Дмитриенко, И. Д. Рожихина, И. А. Рыбенко // Известия вузов. Черная металлургия. – 2010. - № 4. – С. 7 – 11.
4. Исследование процесса восстановления ванадия и железа из многокомпонентной оксидной системы / М. А. Голодова, В. И. Дмитриенко, И. Д. Рожихина, И. А. Рыбенко // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (Сибресурс 17 – 2012) : докл. 17 междунар. науч.-практ. конф. – Томск, 2011, 2012. – С. 57 – 60.
5. Термодинамическая оценка возможности легирования стали при обработке ее ванадийсодержащим шлаком / В. И. Дмитриенко [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2010. - № 10. – С. 17 – 20.
6. Исследование условий процесса восстановления ванадия и железа из конвертерного ванадиевого шлака / И. А. Рыбенко [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2011. - № 4. – С. 3 – 5.
7. Исследование восстановления марганца и титана из конвертерного ванадиевого шлака / М. А. Голодова, В. И. Дмитриенко, И. Д. Рожихина, И. А. Рыбенко // Металлургия: Технологии, управление, качество : сб. науч. тр. Всероссийской науч.-практ. конф. 9-11 ноября 2011 г.; под ред. Протопопова Е.В. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2011. – С. 95 – 98.
8. Голодова М.А. Исследование влияния температуры на процесс восстановления ванадия из оксидных систем / М.А. Голодова, И.Д. Рожихина, О.И. Нохрина, И.А. Рыбенко // «Технические науки – от теории к практике» : сборник статей по материалам XLVIII-XLIX международной научно-практической конференции, №7-8 (44). – Новосибирск, 2015. – С. 70 – 77.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ КОЛЬЦЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ НАГРЕВЕ

Каледин В.О.¹, Ульянов А.Д.¹, Каледин Вл.О.²

¹Новокузнецкий институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кемеровский государственный университет»
г. Новокузнецк, Россия, zbrg@mail.ru

²ОАО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения»
г. Хотьково, Россия

Аннотация. Рассмотрена математическая модель термоупругого тела вращения из анизотропного материала, физико-механические свойства которого зависят от температуры. Решение задачи термоупругости при силовых и температурных воздействиях получено методом конечных элементов в осесимметричной постановке. Используя предложенную методiku и программную реализацию, была исследована модель кольца из композиционного материала при низкотемпературных и высокотемпературных воздействиях.

Ключевые слова: термоупругость, термодеструкция, композиционные материалы, математическая модель, функционально-объектная схема, структурная модель, высокотемпературные воздействия.

Abstract. The considered math model of thermoelastic body rotation of the anisotropic material. Physical and mechanical properties of the model are temperature dependent. Solution of the problem of thermoelasticity in the force and temperature effects produced by finite element method in the axially symmetric formulation. Using the proposed methodology and software implementation, the model has been studied rings of composite material at low and high temperature influences. Define the fields of stresses and displacements in the cross section of the ring at the low and high temperature influences.

Keywords: thermoelastic, thermodestruction, composite materials, math model, structure model, high-level thermal enforces.

Задачи отыскания термоупругих деформаций тел вращения из композиционных материалов актуальны при проектировании конструкций, работающих при повышенных температурах. Основной особенностью задач данного класса является деградация материала при повышении температуры, приводящая к снижению его прочностных и жесткостных характеристик. Это затрудняет получение адекватных оценок напряжений и несущей способности. В известных работах, например [1], для этой цели используются модели, не учитывающие выгорания материала. Модели, учитывающие изменение физико-механических характеристик при нагреве, разрабатывались либо для конструкций из традиционных материалов [2], либо для тонких пограничных слоёв композиционного материала [3], что делает их трудно применимыми к расчету тонкостенных композитных элементов конструкций сложной формы при их проектировании.

В настоящей работе предложена методика, позволяющая учитывать изменение свойств материала при изменении температуры и вводить произвольную форму поперечного сечения рассматриваемого тела вращения. Задача решается для объектов, обладающих осевой симметрией. Это делает возможным использование двумерной постановки и конечно-элементной модели, составленной из плоских элементов продольного сечения [4] – [5]. Переход от объемных конечных элементов к плоским значительно сокращает объем вычислений и погрешность расчета.

Разрешающее уравнение получено на основе минимизации потенциальной энергии, которая выражается через перемещения и упругие константы материала с любой схемой армирования. При этом материал считаем термоупругим, а деформации и гради-

енты температуры достаточно малы, чтобы было возможным использование линейного закона Дюамеля-Неймана (1) для анизотропного материала[6]:

$$\sigma_{ij} = d_{ijkl} (e_{kl} - \Delta t \zeta_{kl}), \quad (1)$$

где σ_{ij} – тензор напряжений;
 e_{kl} – линейный тензор деформаций;
 d_{ijkl} – компоненты тензора упругости;
 Δt – разность текущей и начальной температуры;
 ζ_{kl} – коэффициенты линейного теплового расширения (КЛТР).

Компоненты тензора упругости и коэффициенты теплового расширения являются функциями температуры. По мере прогрева материала эти величины изменяются, причем модули упругости уменьшаются вплоть до нуля при достижении критической температуры, при которой материал выгорает. Отметим, что процесс нагрева может рассматриваться отдельно, поскольку его характерное время существенно превышает характерное время процесса упругой деформации. Тогда в каждый момент времени температура, а значит, и характеристики материала, известны, а деформации успевают измениться так, что выполняются условия равновесия. В этом случае равновесную конфигурацию в каждый текущий момент времени можно найти как решение несвязанной задачи термоупругости из вариационного принципа Лагранжа [7], приравняв к нулю вариацию потенциальной энергии:

$$\delta \left(\int_V w dV - \int_V F_i u_i dV - \int_S f_i u_i dS \right) = 0, \quad (2)$$

где w – плотность энергии деформации;
 u_i – векторное поле перемещений;
 F_i – объемные силы;
 f_i – поверхностные силы;
 V – объем;
 S – поверхность тела.

Плотность энергии деформации выражается через деформации и напряжения следующим образом:

$$w = \frac{1}{2} \sigma_{ij} (e_{ij} - \Delta t \zeta_{ij}) + const. \quad (3)$$

Константа в этом соотношении несущественна, поскольку ее вариация равна нулю. С учетом линейности тензора деформаций функционал из (2) оказывается квадратичным, и условие его стационарности равносильно условию минимума:

$$\min \Pi = \min (W - A), \quad (4)$$

где $W = \int_V w dV$ – полная энергия деформации;

$A = \int_V F_i u_i dV + \int_S f_i u_i dS$ – работа внешних сил.

Геометрия осесимметричного элемента конструкции полностью определяется формой продольного сечения. Сечение задается в плоскости $XO\rho$ цилиндрической системы координат, где ось X совпадает с осью симметрии тела вращения. Задача статики решается по алгоритму метода конечных элементов в форме метода перемещений [4] – [5]. В качестве неизвестных возьмем амплитудные значения линейных перемещений u – осевые, v – радиальные, w – окружные, по нескольким учитываемым гармоникам. Эти перемещения, заданные в узлах конечно-элементной сетки сечения, аппроксимируем в пределах элемента с использованием обычной техники изопараметрического отображения [4].

Используя физический закон (1), получим выражение энергии деформации в точке с координатами (X, ρ, Φ) :

$$w = \frac{1}{2} (\varepsilon - \Delta t \zeta)^T D (\varepsilon - \Delta t \zeta), \quad (5)$$

где ε – вектор деформаций;
 ζ – вектор КЛТР;
 Δt – разность начальной и узловой температуры;
 D – матрица упругости.

Потенциальная энергия элемента складывается из энергии деформации за вычетом работы внешних сил:

$$II = \frac{1}{2} \int_V (\varepsilon - \Delta t \zeta)^T D (\varepsilon - \Delta t \zeta) dV - A. \quad (6)$$

Равновесие тела достигается при минимуме потенциальной энергии, для отыскания которого необходимо выразить деформации и перемещения через узловые переменные и найти их из условия равенства нулю частных производных от потенциальной энергии по искомым узловым переменным.

Произвольная схема армирования приводит к взаимному влиянию нормальных и касательных напряжений, что вызывает при изменении температуры не только линейные деформации, но и кручение. Таким образом, даже при осесимметричных воздействиях деформирование может не быть осесимметричным. Поэтому допускается возможность одновременных симметричных и антисимметричных деформаций, описываемых двумя гармониками ряда Фурье по окружной координате Φ :

$$\begin{cases} u_X(X, \rho, \Phi) = u(X, \rho) + u^c(X, \rho) \cos \Phi + u^s(X, \rho) \sin \Phi \\ u_\rho(X, \rho, \Phi) = v(X, \rho) + v^c(X, \rho) \cos \Phi + v^s(X, \rho) \sin \Phi \\ u_\Phi(X, \rho, \Phi) = w(X, \rho) + w^c(X, \rho) \cos \Phi + w^s(X, \rho) \sin \Phi \end{cases}. \quad (7)$$

Для аппроксимации зависимости перемещений от радиальной и осевой координат используем нормализованные координаты (ξ, η) . Начало нормализованной системы (ξ, η) помещено в центр тяжести элемента, а стороны четырехугольного элемента совпадают с координатными линиями $\xi = \pm 1, \eta = \pm 1$. Функции формы $N_i(\xi, \eta)$ для таких элементов известны [3], что позволяет представить каждую гармонику перемещений (7) на элементе в виде линейной комбинации базисных функций с коэффициентами, равными узловым переменным. Вектор деформаций в произвольной точке элемента выражается через узловые переменные $\bar{\delta}_e$:

$$\varepsilon = (B_0 + B_c \cos \Phi + B_s \sin \Phi) \bar{\delta}_e, \quad (8)$$

где B_0 , B_c и B_s – матрицы связи амплитуд гармоник деформаций с узловыми перемещениями элемента, не зависящие от окружной координаты Φ , содержащие производные от базисных функций по координатам.

Условие минимума потенциальной энергии известным образом приводится к системе линейных алгебраических уравнений:

$$K\Delta = Q, \quad (9)$$

где K – матрица жесткости;
 Δ – вектор амплитуд гармоник узловых перемещений;
 Q – вектор эквивалентных узловых сил, включающий силовые и температурные составляющие.

Решив систему уравнений (9) и подставив узловые переменные в интерполяционную формулу, найдем амплитуды разложения в ряд Фурье перемещений в любой точке сечения. Тогда могут быть вычислены деформации по формулам (8), а затем напряжения (как в цилиндрических координатах, так и в главных осях анизотропии) по формуле (1). Алгоритм решения реализован в комплексе «Композит 2015» [5].

Рассмотрим результаты исследования напряжений в кольце с продольным сечением, показанным на рисунке 1: r – малый радиус скругления, R – большой радиус скругления, $R1$ – внутренний радиус кольца, $R2$ – внешний радиус, H – продольный размер. Правая грань сечения EF закреплена.

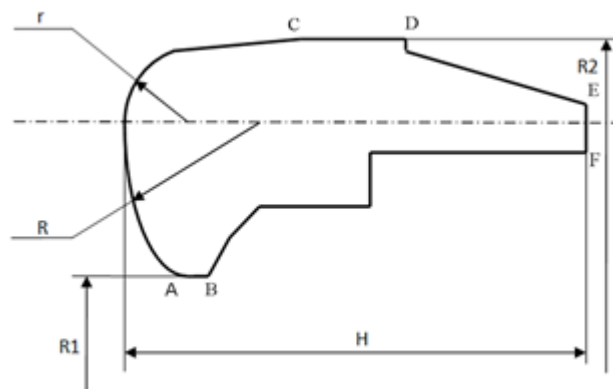
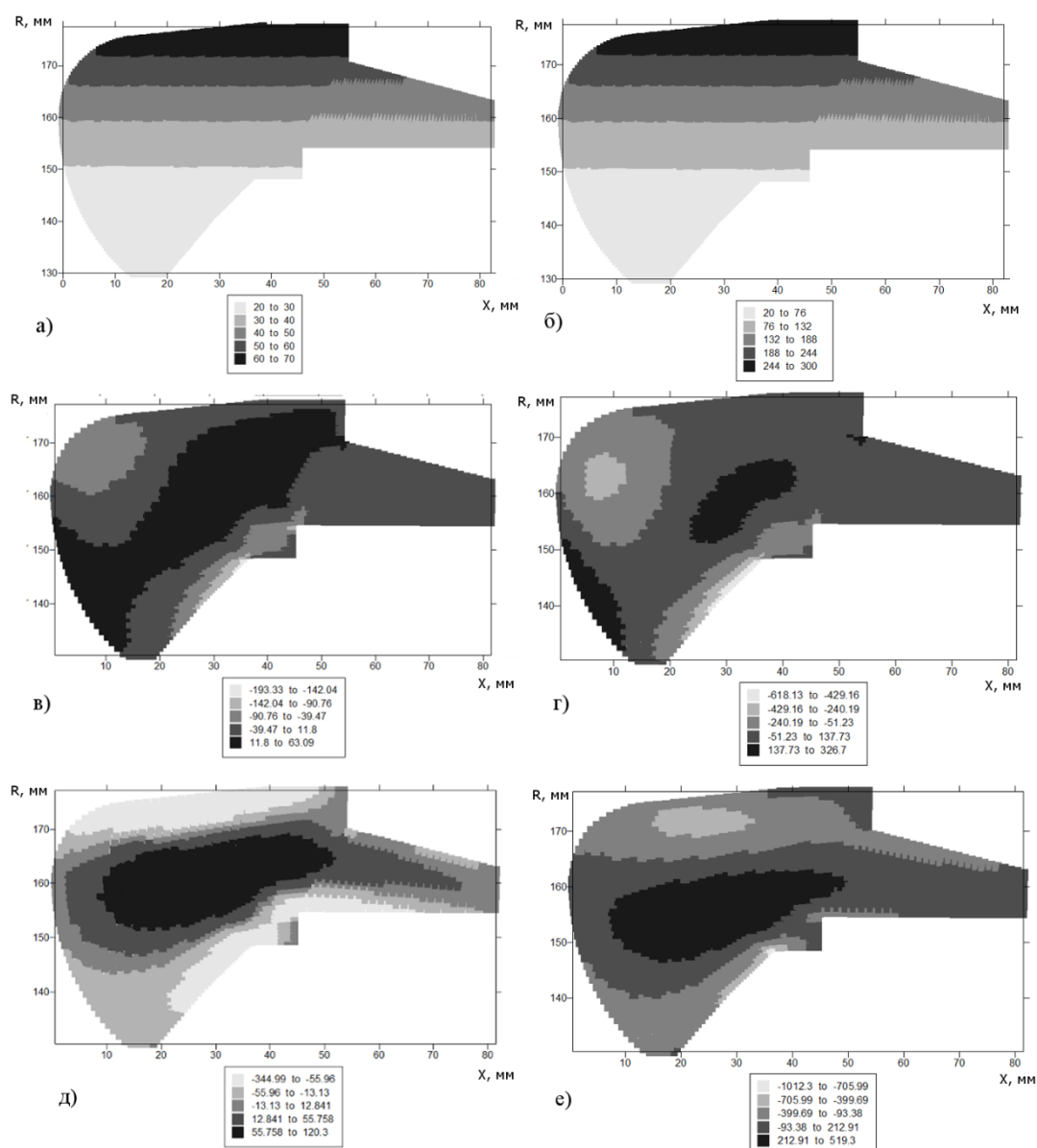


Рисунок 1 – Сечение кольца

Проведены расчеты напряжений при неравномерном распределении температур по сечению кольца: при низкотемпературном нагреве (от 20°C до 70°C) и при высокотемпературном нагреве (от 20°C до 300°C). Распределение температур для обоих случаев изображено на рисунках 2а и 2б. При температурном воздействии свыше 100°C модуль упругости линейно уменьшается до нуля при 300°C.

При сравнении полей напряжений при низкотемпературном и высокотемпературном воздействии учтём, что приращение температуры увеличивается в 5,6 раза. При этом максимальные сжимающие напряжения увеличиваются только в 3 раза, а максимальные растягивающие напряжения – в 5 раз. Это объясняется тем, что растяжение преобладает в центре сечения, а сжимающие напряжения действуют в зоне более высоких температур, что приводит к уменьшению модулей упругости. Характер распределения касательных

напряжений не изменился, но максимальные значения напряжений увеличились в 3-4 раза.



а, б – температура; в, г – осевые нормальные напряжения; д, е – касательные напряжения в плоскости сечения; слева – низкотемпературное воздействие, справа – высокотемпературное воздействие

Рисунок 2 – Поля температур (°C) и напряжений (МПа) в сечении кольца

С помощью разработанной методики возможно вычисление перемещений и напряжений в телах вращения из композиционных материалов с изменяющимися при нагреве свойствами.

Библиографический список

1. Вохмянин И.Т. Проектирование равнопрочных упругих тороидальных оболочек вращения в условиях термостатического нагружения / И.Т. Вохмянин, Ю.В. Немировский // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. - 2011. - № 2 (17). - С. 65-77.

2. Гаращенко А.Н. Математическое моделирование работы резиноподобных теплозащитных в широком диапазоне температур / А.Н. Гаращенко, В.Л. Страхов, Г.В. Кузнецов, В.П. Рудзинский // Внутрикамерные процессы и горение в установках на твёрдом топливе и в ствольных системах. – Институт механики Уральского отделения РАН (Ижевск), 2008. – С. 15-24.
3. Мельников А.С. Уточненная математическая модель работы вспучивающейся огнезащиты на минеральной основе / А.С. Мельников, В.Л. Страхов // Пожаровзрывобезопасность, Т. 16 – М.: Пожнаука, 2007. – №4. – С 26-33.
4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич – М.: Мир, 1975. – 541 с.
5. Бате К.-Ю. Методы конечных элементов / Пер. с англ. В.П. Шидловского под ред. Л.И. Турчака. – М. ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 1024 с.
6. Каледин В.О. Моделирование статики и динамики оболочечных конструкций из композиционных материалов / В.О. Каледин., С.М. Аульченко, А.Б. Миткевич, Е.В. Решетникова, Е.А. Седова, Ю.В. Шпакова - М. ФИЗМАТЛИТ, 2014. - 196 с.
7. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела: Учеб.пособие для вузов. 2-е изд., испр. / Ю.Н. Работнов – М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. Лит., 1988. – 712 с.

УДК 519.685

ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОБЪЕКТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Гилёва А.Е., Решетникова Е.В.

*Новокузнецкий институт (филиал) федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кемеровский
государственный университет»*

г. Новокузнецк, Россия, anna310591@yandex.ru, elenares@yandex.ru

Аннотация. В работе рассматривается функционально-объектная декомпозиция конечно-элементной математической модели для прочностных расчетов в программном комплексе «Композит НК». Приведен алгоритм применения структурной и функциональной декомпозиции. Показаны преимущества объектно-функционального подхода при решении прикладных задач.

Ключевые слова: функционально-объектная декомпозиция, программный комплекс «Композит НК», метод конечных элементов, алгоритм, композиционные материалы.

Abstract. The paper discusses a functional-object decomposition for finite-element mathematical model for strength calculation in the software package «Composite NK». An algorithm for using structural and functional decomposition. The advantages of object-functional approach in solving applied problems.

Keywords: functional and object decomposition, software complex «Composite NK», finite element method, algorithm, composite materials.

В настоящее время конструкции из полимерных композиционных материалов находят широкое применение в авиационной и ракетно-космической технике. Затраты на их производство велики и не позволяют проводить множество физических экспериментов на реальных конструкциях. В стремлении к снижению этих затрат вопросы совершенствования программного расчета на прочность остаются актуальными.

При производстве ответственных высоконагруженных конструкций летательных аппаратов расчет прочности производится для каждого изготовленного экземпляра при фактических физико-механических характеристиках и нормативных нагрузках. Такой расчет является неотъемлемой частью технологического процесса и направлен на возможно более полный учет особенностей свойств изделия, которые могут варьироваться с изменением условий протекания химических реакций при переработке композиционного

материала. Это требует от программного обеспечения высокой гибкости и приспособленности к внесению изменений.

Между тем, современное программное обеспечение, используемое в промышленности, не позволяет в полной мере обеспечить сопровождение расчетов прочности конструкции при изменении физико-механических свойств. В то же время необходимость учета воздействий разнообразной физической природы требует гибкой настройки математических моделей и алгоритмов расчета.

При описании математической модели задаются математические уравнения и неравенства, связывающие числовые значения переменных состояния моделируемого объекта и прилагаемые к нему воздействия. Формальную постановку будем представлять в виде отображения:

$$q = K(p)r,$$

где q – вектор переменных состояния;
 r – вектор переменных воздействий;
 K – оператор модели;
 p – вектор параметров модели, включающий внутренние характеристики моделируемого объекта

Сложность рассматриваемых в работе моделей обуславливается наличием дифференциальных и интегральных соотношений, что требует применения сложных математических методов. Идея работы состоит в применении декомпозиции оператора модели на части, каждая из которых содержит существенно меньшее число переменных величин в сравнении со всей системой. За основу расчета принята методика, подробное описание которой приводится в [3].

Первоначально сложную систему будем декомпозировать по структурному признаку. Согласно принятому методу конечных элементов разобьем исходную конструкцию на некоторые подобласти – конечные элементы, которые в общем виде могут быть любого типа. Модель конечного элемента (рисунок 1), как и вся конструкция в целом, содержит структурные составляющие, переменные воздействий и состояний.

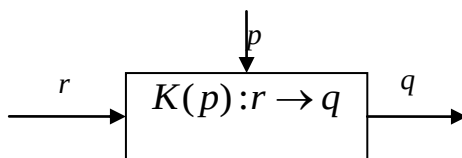


Рисунок 1 – Модель конечного элемента

В результате применения методики [3] получается разрешающее уравнение для одного конечного элемента, что приводит к системе алгебраических уравнений, составляющими которой являются матрица этой системы уравнений (матрица жесткости), вектор правых частей и вектор неизвестных. Представим систему в виде графа функциональной зависимости (рисунок 2).

При вычислении матриц D , B и Q (рисунок 2) происходит обращение к множеству аргументов, которые представляют собой вычисляемые переменные, что является сложной функциональной зависимостью. Целью применения дальнейшей декомпозиции является получение объектов с минимально возможным набором переменных.

Функционально-объектная реализация методики обеспечивает наглядное представление алгоритма при записи программы и упрощает возможность его дальнейших модификаций. Методика реализована в комплексе «Композит НК».

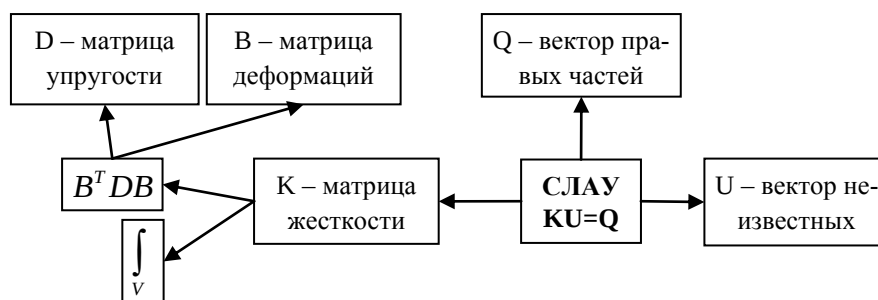


Рисунок 2 – Граф функциональной зависимости

Алгоритм расчета можно представить как последовательность шагов вычисления значений функциональных объектов, одни из которых являются аргументами других. Функциональный объект определим как некоторую структуру данных с заданным форматом представления. Множество значений некоторого объекта будем представлять как совокупность переменных, расположенных в заданном порядке и имеющих заданные атрибуты (тип и размерность).

К основным этапам программного расчета, представленного на рисунке 3, можно отнести: предварительное задание входных данных, расчет локальных матриц жесткости элементов, сборку в единую систему уравнений, решение системы и расчет напряжений. Выполнение этих этапов реализовано в виде отдельных подпрограмм. Последним этапом является представление полученных результатов в понятном для пользователя виде.



Рисунок 3 – Этапы программного расчета

На этапе подготовки исходных данных проводится структурная декомпозиция, отражающая связи и зависимости между структурными составляющими моделируемого объекта и между происходящими в них процессами. В формулировке рассматриваемой математической модели принимается упрощающая гипотеза Кирхгофа-Лява и предположение об осесимметричности конструкции, таким образом, в нашем случае структурным элементом является одномерный конечный элемент. На рисунке 4 приведена схема структурной декомпозиции.

Исходные данные для проведения типового расчета включают набор таблиц с числовыми данными, описывающими расчетную модель. Таблицы по своему содержанию можно разделить на два типа: содержащие данные об узлах и данные о топологии и геометрии элементов. Каждый набор данных хранится в отдельном файле. Таблицы создаются в ходе интерпретации текста, написанного на входном языке «Ядро» [2]. Интерпретатор этого языка является независимым приложением в составе комплекса «Композит НК». Также исходным является файл с данными характеристик материалов и файл с опциями расчета статике.

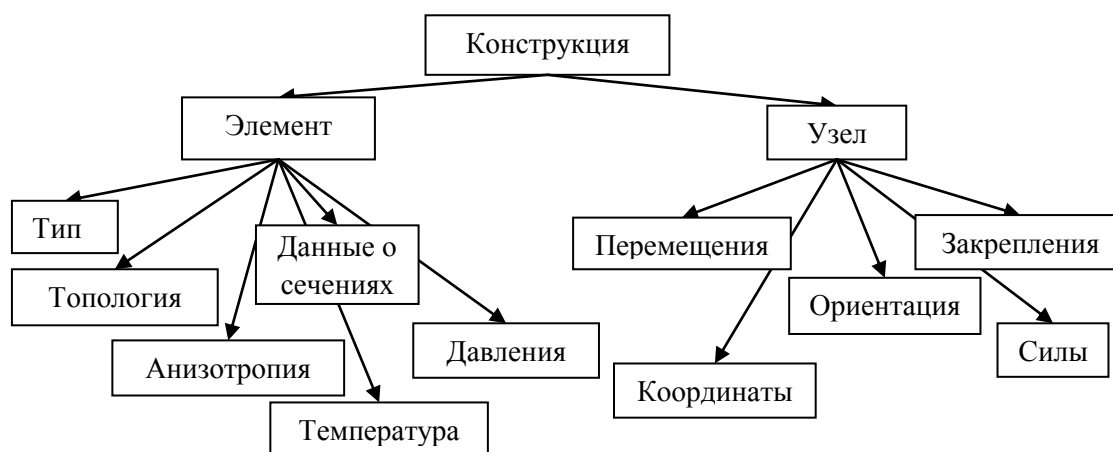


Рисунок 4 – Схема структурной декомпозиции

Результатом выполнения этапа сборки локальных матриц являются файлы, содержащие матрицы жесткости для каждого элемента. Схематичное представление этого этапа в виде графа функциональных зависимостей показано на рисунке 5.

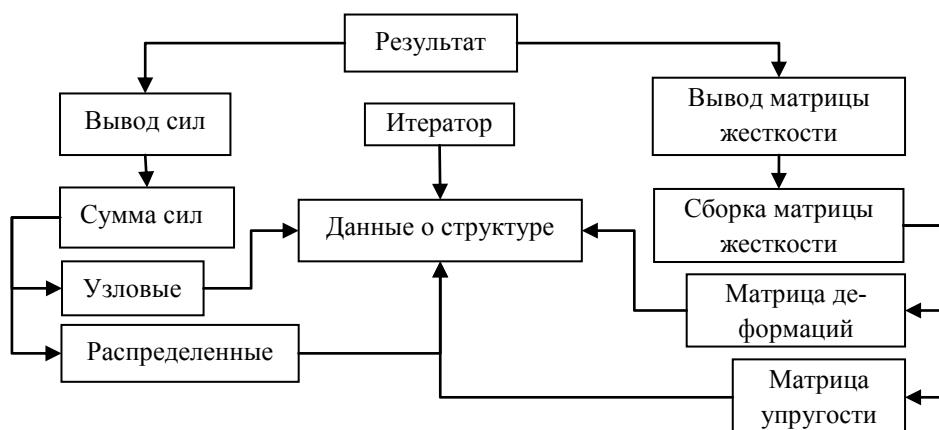


Рисунок 5 – Схема сборки локальных матриц

По индексу элемента из файлов выбираются необходимые данные и формируются соответствующие матрицы.

В функциональном классе вычисления матрицы жесткости элемента входящими аргументами являются матрица упругости и матрица деформаций (рисунок 5). В свою очередь эти матрицы вычисляются в другом классе со своими аргументами. Например, для матрицы упругости некоторые аргументы вводятся из файлов (опции расчета, данные характеристик материалов), а некоторые вычисляются в отдельных классах (температура, армирование). Для вектора сил аргументами являются температура, давление и заданные узловые нагрузки. Завершающим шагом первого этапа является выгрузка промежуточных результатов в файл.

Следующим этапом является сборка глобальной матрицы. Аргументами для формирования этой матрицы являются вычисленные на предыдущем шаге локальные матрицы, а также файл с опционными характеристиками расчета статики. Затем вычисленная глобальная матрица факторизуется и выгружается в файл.

Аргументами решения системы линейных алгебраических уравнений являются глобальные матрицы жесткости и сил, опционные характеристики. Все аргументы загружаются из файлов, полученный результат – перемещения – также выводится в файл.

Итогом расчета прочности конструкции является вычисление возникающих напряжений. Это выполняется на заключительном этапе. Аргументами расчета являются перемещения и данные об упругих характеристиках материала, загружаемые из файлов.

Формирование текстовых таблиц результатов производится с помощью отдельных программ комплекса «Композит НК». Текстовые таблицы могут экспортироваться для последующей обработки программами научной и деловой графики и офисными приложениями.

Решение задач прочностного расчета осесимметричных конструкций из полимерных композиционных материалов ранее было реализовано в программе Shells [1,4]. Однако при необходимости реализации новых алгоритмических решений приходилось дублировать существующие фрагменты программного кода, что затрудняло ее поддержку. Таким образом, было принято решение о функционально-объектной декомпозиции этой задачи и ее реализации в комплексе «Композит НК».

Отличительной особенностью объектно-функционального подхода, реализованного в программном комплексе «Композит НК», является сокращение сроков написания программного кода вычислительной программы. Данный пакет не является средством решения ограниченного класса задач, а может конфигурироваться пользователем под решение конкретных прикладных задач с наглядным представлением алгоритма в виде набора функционально-объектных схем. В этом случае при многократном использовании фрагментов программного кода нет необходимости в его копировании, что значительно уменьшает трудоемкость, а использование открытого кода и возможность расширения библиотеки классов позволяют решать даже самые узкоспециализированные задачи.

Библиографический список

1. Гилёва, А. Е. Разработка программного обеспечения для расчета напряженно деформированного состояния пространственно армированных оболочек / А.Е. Гилёва, К.И. Знаткова, Е.В. Решетникова // Краевые задачи и математическое моделирование: темат. сб. науч.ст. – Новокузнецк, 2014. – С.57-62.
2. Каледин, В.О. Концепции языка программирования «Ядро» [Текст] / В.О. Каледин. – Новокузнецк: НФИ КемГУ, 2010. – 47 с.
3. Каледин, В.О. Моделирование статике и динамики оболочечных конструкций из композиционных материалов / В.О. Каледин, С.М. Аульченко, А.Б. Миткевич [и др.]. – М. : Физматлит, 2014. – 96 с.
4. Каледин, В.О. К исследованию осесимметричного термоупругого деформирования спирально армированных оболочек [Текст] / В. О. Каледин // Современные проблемы механики деформируемого твердого тела. Динамика сплошной среды. – Новосибирск, 2001. – Вып. 119. – С. 57 - 61.

УДК 539.3

МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНОЙ УПРУГОЙ КОНСТРУКЦИИ, СОДЕРЖАЩЕЙ ПОДАТЛИВЫЕ ОБЪЕМНО НЕСЖИМАЕМЫЕ СЛОИ

Каледин В.О., Вячкин Е.С.

*Новокузнецкий институт (филиал) федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кемеровский
государственный университет»
г. Новокузнецк, Российская Федерация, viachkine@mail.ru*

Аннотация. Рассмотрена математическая модель многослойной упругой конструкции, содержащей податливые объемно несжимаемые слои. Представлена постановка решаемой задачи, с описанием объекта и его физико-математических характеристик. В дальнейшем предложен вывод системы алгебраических уравнений, чтобы учесть влияния объемной несжимаемости.

Ключевые слова: композиционные материалы, математическая модель, объемно несжимаемый материал, многослойная конструкция.

Abstract. The mathematical model of multi-layer flexible structure comprising pliable volume incompressible layers. Presented statement of the problem, a description of the object and its physical and mathematical characteristics. In the future, we proposed the conclusion of the system of algebraic equations to account for the effect of the volume is incompressible.

Keywords: composite materials, mathematical model, volumetric incompressible material, multi-layer construction.

Объектом расчета является многослойный пакет в форме сферического сегмента, содержащий чередующиеся упругие слои из более жесткого материала (тарели) и слои эластомера. Слоистый пакет находится между двумя жесткими сферическими основаниями (рисунок 1), одно из которых закреплено неподвижно, а второе нагружается осевой силой, вертикальной поперечной силой и моментом, действующим в вертикальной плоскости.

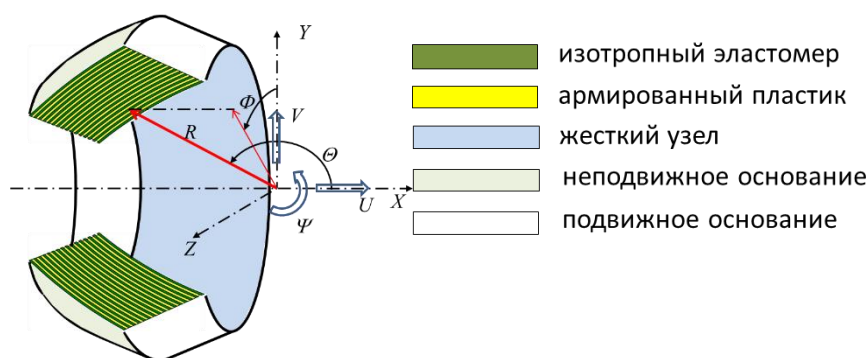


Рисунок 1 – Схема объекта расчета

Тарели и слои эластомера имеют форму концентрических сферических сегментов, но их размеры по дуге меридиана различаются. Размеры для конкретных вариантов моделируемого объекта задаются в качестве исходных данных.

Физико-механические характеристики материала тарелей являются исходными данными для расчета. В типовом случае тарели обладают упругой симметрией, такой, что модули упругости в направлении меридиана и в направлении касательной к окружности неизменны в окружном направлении. В частности, материал может быть трансверсально изотропным, т.е. модули упругости вдоль меридиана и окружности одинаковы и равны 65000 МПа. Модуль упругости в направлении нормали к слоям более низкий и равен 9000 МПа. Коэффициенты взаимного влияния нормальных и касательных напряжений в осях «меридиан – окружность – нормаль» равны нулю. Модули сдвига предполагаются известными и равными 4500 МПа.

Эластомер имеет модуль сдвига 0,1 МПа и коэффициент Пуассона 0,4995. Относительно коэффициента Пуассона необходимо сделать замечание: объемно несжимаемый материал имеет коэффициент Пуассона, равный 0,5, вследствие чего в дальнейшем приведенное выше значение рассматривается как ориентировочное.

При упругом деформировании сплошной среды, содержащей внутренние кинематические связи, отдельные компоненты деформаций остаются нулевыми. Для решения задачи используем регуляризацию по Тихонову [1], в которой жесткие кинематические связи снимаются, а определяющие уравнения среды записываются так, чтобы малые деформации, несовместимые со связями, вызывали большие (но конечные) напряжения.

Предельный переход обеспечит получение решения исходной задачи. В качестве параметра регуляризации выберем величину, обратную к модулю объемного сжатия; при устремлении к нулю этого параметра получаем среду с бесконечным объемным модулем упругости, т.е. объемно-несжимаемую.

Итак, несжимаемый материал с внутренней связью, наложенной на объемную деформацию, будем рассматривать как предельный случай изотропного материала с бесконечно большим модулем объемного сжатия и конечным модулем сдвига.

Примем для регуляризованной модели обобщенный закон Гука в виде [2]:

$$\sigma_{ij} = \lambda \Theta \cdot \delta_{ij} + 2\mu e_{ij}, \quad (1)$$

где σ_{ij} – компонента тензора напряжений;

e_{ij} – компонента тензора деформаций;

Θ – объемная деформация;

λ, μ – постоянные Ламе;

δ_{ij} – симметричный символ Кронекера.

Объемная деформация, входящая в равенство (1), выражается через компоненты тензора деформаций следующим образом:

$$\Theta = \delta_{ij} e_{ij}. \quad (2)$$

Постоянные Ламе выражаются через «технические» упругие постоянные – модуль Юнга E , сдвиговой модуль упругости (второго рода) G и коэффициент Пуассона ν – следующими равенствами:

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} = G. \quad (3)$$

Следуя общепринятому описанию, линейную зависимость между деформациями и напряжениями запишем в матричном виде:

$$\boldsymbol{\sigma} = D(\lambda, \mu) \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (4)$$

где $\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\varepsilon}$ – матрицы-столбцы:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\sigma} &= [\sigma_x \quad \sigma_r \quad \sigma_\varphi \quad \tau_{xr} \quad \tau_{r\varphi} \quad \tau_{x\varphi}]^T, \\ \boldsymbol{\varepsilon} &= [\varepsilon_x \quad \varepsilon_r \quad \varepsilon_\varphi \quad \gamma_{xr} \quad \gamma_{r\varphi} \quad \gamma_{x\varphi}]^T. \end{aligned} \quad (5)$$

Матрица упругости D , с учетом равенства (1), принимает вид:

$$D(\lambda, \mu) = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Нулевое значение постоянной μ соответствует материалу с нулевой сдвиговой жесткостью, а значение $\lambda = 0$ – материалу с нулевым коэффициентом Пуассона. В первом случае матрица упругости (6) вырождена. Во втором случае она обратима и положительно определена. При изменении коэффициента Пуассона ν от нуля до 0,5, как видно из (3), постоянная λ увеличивается от нуля до бесконечности, причем при любом конечном неотрицательном λ матрица упругости (6) остается положительно определенной. Далее, будем считать сдвиговой модуль μ постоянным, а постоянную λ – варьируемой от начального значения λ_0 до бесконечности. Введем малый параметр α , стремящийся к нулю при бесконечно большом λ . Тогда из (6) имеем:

$$D(\lambda, \mu) = D(\lambda_0, \mu) + \frac{1}{\alpha} H, \quad (7)$$

где обозначено:

$$H = D(\lambda_0, 0), \quad \frac{1}{\alpha} = \lambda - \lambda_0, \quad (8)$$

λ_0 – выбранное фиксированное значение постоянной Ламе.

Рассмотрим переход от регулярного определяющего уравнения (4) к предельному случаю [3]. Поскольку при вариации малого параметра остаются фиксированными λ_0 и μ , уравнение (4) при переменном α принимает вид:

$$\sigma(\alpha) = \left(D_0 + \frac{1}{\alpha} H \right) \epsilon(\alpha). \quad (9)$$

Примем, что деформации $\epsilon(\alpha)$ являются непрерывно дифференцируемой функцией малого параметра в окрестности точки $\alpha=0$, и их можно представить в виде разложения в степенной ряд (в дальнейшем это будет доказано). С точностью до малых второго порядка, имеем:

$$\epsilon(\alpha) = \epsilon(0) + \alpha \epsilon'_\alpha(0). \quad (10)$$

Подставив правую часть (10) в уравнение (9), получим разложение в ряд для напряжений:

$$\sigma(\alpha) = \left(D_0 + \frac{1}{\alpha} H \right) (\epsilon(0) + \alpha \epsilon'_\alpha(0)) = D_0 \epsilon(0) + H \epsilon'_\alpha(0) + \alpha D_0 \epsilon'_\alpha(0) + \frac{1}{\alpha} H \epsilon(0). \quad (11)$$

В предельной точке $\alpha=0$ третье слагаемое полученного выражения обращается в нуль.

Остановимся подробнее на четвертом слагаемом, содержащем множитель $\frac{1}{\alpha}$. Матрица H определяется выражением (8); это – матрица упругости вырожденного материала, имеющего нулевой модуль сдвига. Из (6) при $\mu = 0$ получим:

$$H = \lambda_0 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Матрица (12) имеет единственное ненулевое собственное число, которому соответствует собственный вектор с координатами (1, 1, 1, 0, 0, 0). Остальные собственные векторы обладают тем свойством, что сумма трех первых компонент собственного вектора равна нулю. Применительно к вектору-столбцу деформаций вида (5) это означает, что произведение матрицы H на столбец деформаций равно нулю тогда (и только тогда), когда объемная деформация равна нулю. Таким образом, множество всех векторов деформаций, для которых объемная деформация равна нулю, образует ядро матрицы H . Следовательно, четвертое слагаемое в правой части (11) тождественно равно нулю, если $\boldsymbol{\varepsilon}(0)$ – деформация, при которой не изменяется объем. Но предельный случай $\alpha=0$ и есть объемно несжимаемый материал. Таким образом, если будет вычислено предельное значение деформации $\boldsymbol{\varepsilon}(0)$ и предел его производной по параметру $\boldsymbol{\varepsilon}'(0)$, то предельное значение напряжений может быть вычислено следующим образом:

$$\boldsymbol{\sigma}(0) = D_0 \boldsymbol{\varepsilon}(0) + H \boldsymbol{\varepsilon}'(0). \quad (12)$$

С учетом отмеченного выше свойства, можно ослабить требования к вычислению производной от деформаций по параметру. В самом деле, произведение матрицы H на вектор-столбец не изменится, если к этому вектору добавить произвольный вектор из ядра матрицы H . Тогда предел напряжений в точке $\alpha=0$ равен

$$\boldsymbol{\sigma}(0) = D_0 \boldsymbol{\varepsilon}(0) + H [\boldsymbol{\varepsilon}'(0) + \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}], \quad (13)$$

где $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}$ – любой вектор-столбец деформации без изменения объема.

Отметим, что матрица упругости (7) при любых положительных постоянных Ламе и положительном параметре α остается симметричной и положительно определенной, при этом матрица H симметрична и полуположительно определена. Обе матрицы инвариантны относительно преобразования поворота координатных осей.

С учетом регуляризованного физического закона (9) функционал Лагранжа преобразуется в

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V \boldsymbol{\varepsilon}^T \left(D_0 + \frac{1}{\alpha} H \right) \boldsymbol{\varepsilon} dV - \int_{S_2} (\bar{\mathbf{q}} \cdot \bar{\mathbf{u}}) ds. \quad (14)$$

Применение метода Ритца [5] к минимизации функционала (14) приводит к следующей системе линейных алгебраических уравнений с малым параметром:

$$\left[K + \frac{1}{\alpha} C \right] X(\alpha) = R, \quad (15)$$

где K – положительно определенная симметричная матрица высокого порядка N ;
 C – полуположительно определенная симметричная матрица того же порядка;

- X – вектор-столбец неизвестных;
 R – заданный вектор-столбец нагрузок;
 α – малый параметр.

Требуется определить: предел решения $X(\alpha)$ при стремлении α к нулю; предел производной $X(\alpha)$ по параметру α при стремлении α к нулю.

Рассмотрим решение системы (15) в окрестности предельной точки $\alpha=0$. Решение $X(\alpha)$ имеет в этой точке конечный предел и непрерывную первую производную; нетрудно показать также, что и производные высших порядков непрерывны. Поэтому ряд Тейлора для $X(\alpha)$ в окрестности точки $\alpha=0$ является сходящимся, и с точностью до малых высших порядков имеем:

$$X(\alpha) = X^* + \alpha Z + O(\alpha^2), \quad (16)$$

где $O(\alpha^2)$ – малая второго порядка относительно параметра α .

Подставим (16) в матричное уравнение (15):

$$\left[K + \frac{1}{\alpha} C \right] (X^* + \alpha Z + o(\alpha)) = R. \quad (17)$$

Раскрыв скобки, имеем:

$$KX^* + \alpha KZ + \frac{1}{\alpha} CX^* + CZ + o(\alpha) = R. \quad (18)$$

Вектор X^* принадлежит ядру матрицы C , поэтому произведение CX^* равно нулю. Второе и четвертое слагаемые в левой части (18) – бесконечно малые величины. Переходя к пределу при $\alpha \rightarrow 0$, из (18) получим:

$$KX^* + CZ = R. \quad (19)$$

Сформулируем вспомогательную алгебраическую задачу следующим образом: найти вектор $X^* \in G$ и вектор $Z \in H$, отвечающие уравнению (19). Для этого условие принадлежности ядру $X^* \in G$ запишем в виде равенства: $CX^* = 0$, или в силу симметрии матрицы C – в виде $C^T X^* = 0$, и добавим это равенство к системе (19). Получим матричное уравнение:

$$\begin{bmatrix} K & C \\ C^T & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X^* \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (20)$$

Любое частное решение системы линейных алгебраических уравнений (18) позволяет однозначно найти предел решения системы (15) и с точностью до слагаемого, принадлежащего ядру, найти предел производной решения системы (15). Алгоритм решения реализован в комплексе «Композит - НК» [6].

Библиографический список

1. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач [Текст]/А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин – М.:Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 284 с.

2. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела [Текст]: Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., испр. / Ю.Н. Работнов – М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. Лит., 1988. – 712 с.
3. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов [Текст]/ В.В. Васильев – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике [Текст]/ О. Зенкевич – М.: Мир, 1975. – 541 с.
5. Каледин В.О. Моделирование статики и динамики оболочечных конструкций из композиционных материалов / В.О. Каледин., С.М. Аульченко, А.Б. Миткевич, Е.В. Решетникова, Е.А. Седова, Ю.В. Шпакова - М. ФИЗМАТЛИТ, 2014. - 196 с.
6. Каледин, В.О. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Композит НК» / В.О. Каледин, Т.В. Бурнышева, И.В. Равковская, Е.В. Решетникова, Е.А. Седова, С.В. Эптешева, Ю.В. Шпакова, А.М. Шпаков, Д.И. Глечиков, А.Ю. Марченко // Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ, 17 февраля 2010, № 2010611370.

УДК 536.46

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ С УЧЕТОМ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА КОНСТРУКЦИОННЫХ И ОТДЕЛОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Каледин В.О., Вячкина Е.А.

Новокузнецкий институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кемеровский государственный университет»

г. Новокузнецк, Российская Федерация, SedovaEA@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается получение математической модели процесса горения строительных объектов с учетом химического состава материалов. Полученная математическая модель может быть использована для расчета выбросов при пожаре.

Ключевые слова: химический состав, математическая модель, зональный метод, интегральный метод, полевой метод.

Abstract. Considered obtaining a mathematical model of the combustion process of construction objects with regard to the chemical composition of materials. The obtained mathematical model can be used to calculate emissions from the fire.

Keywords: chemical composition, mathematical model, zonal method, integral method, method of field.

При пожаре, гибель людей во многом обусловлена отсутствием противопожарных знаний и навыков у граждан. Но в большинстве случаев люди умирают от едкого дыма и газа, а не огня. В любой квартире на сегодняшний день хватает предметов и материалов, из которых при горении выделяются в больших количествах более 70 видов токсичных веществ, таких как окись углерода, углекислый газ, дифосген, фосген, цианистый водород. И это далеко не полный список. Долгое пребывание человека в такой атмосфере и шансы на выживание сокращаются. По статистике: более половины пострадавших от дыма гибнет на месте пожара. Часть пострадавших, кому повезло выбраться, получают тяжёлые отравления едкими химикатами, каждый третий из них умирает в больнице, не приходя в сознание. При пожаре умирают от воздействия дыма, причём скорость его распространения велика.

Помимо человеческих потерь, происходит еще и загрязнение окружающей среды в связи с выбросами в атмосферу продуктов горения.

1 Расчет параметров пожара

Существует несколько методов расчета распространения пожара в закрытом помещении. Рассмотрим наиболее часто употребляемые.

1.1 Интегральный метод

Интегральный метод применяется:

- для зданий и сооружений, содержащих развитую систему помещений малого объема простой геометрической конфигурации;
- проведении имитационного моделирования для случаев, когда учет стохастического характера пожара является более важным, чем точное и детальное прогнозирование его характеристик;
- для помещений, где характерный размер очага пожара соизмерим с характерным размером помещения.

При использовании данного метода основным параметром пожара при моделировании возможной обстановки, является площадь пожара, значение которой зависит от ее формы.

При расчете зоны пожара, данная модель использует табличные значения линейной скорости распространения пожара, а не фактические. Табличные значения представляют собой приблизительные значения для зданий различного назначения. Кроме того, метод не учитывает отделочные материалы помещений. Таким образом, невозможно достаточно точно подсчитать, какое расстояние пройдет огонь за промежуток времени между возгоранием и началом тушения пожара пожарным расчетом.

Недостатком данного метода является то, что он позволяет получить только приближенные оценки таких необходимых параметров пожара, как скорость распространения, изменение температуры, объем выгоревшей части помещения.

1.2 Зональный метод

Зональный метод применяется для:

- помещений и систем помещений простой геометрической конфигурации, линейные размеры которых соизмеримы между собой;
- помещений большого объема, когда размер очага пожара существенно меньше размеров помещения;
- рабочих зон, расположенных на разных уровнях в пределах одного помещения (наклонный зрительный зал кинотеатра, антресоли и т.д.).

Основан на разделении горящего помещения на зоны. Обычно выделяют три зоны:

- зона активного горения;
- зона теплового воздействия;
- зона задымления.

Зональный метод позволяет получить представление о размерах характерных зон, возникающих при пожаре в помещении, а также о средних параметрах состояния среды внутри этих зон. Кроме того, метод позволяет рассчитать для любого момента развития пожара значение всех локальных параметров состояния в любой точке пространства помещения.

Именно на зональном методе основана советская методика, описанная в ГОСТ 12.1.004-91 [1]. Данная методика используется в большинстве стран бывшего СССР.

1.3 Полевой метод

Полевой метод предназначен для:

- для помещений сложной геометрической конфигурации, а также помещений с большим количеством внутренних преград (атриумы с системой галерей и примыкающих коридоров, многофункциональные центры со сложной системой вертикальных и горизонтальных связей и т.д.);
- для помещений, в которых один из геометрических размеров гораздо больше (меньше) остальных (тоннели, закрытые автостоянки большой площади и т.д.);
- для иных случаев, когда применимость или информативность зонных и интегральных моделей вызывает сомнение (уникальные сооружения, распространение пожара

по фасаду здания, необходимость учета работы систем противопожарной защиты, способных качественно изменить картину пожара, и т.д.).

Полевой метод основан на решении уравнений в частных производных, выражающих фундаментальные законы сохранения в каждой точке расчетной области. С его помощью можно рассчитать температуру, скорость и скорость концентрации компонентов смеси в каждой точке расчетной области. Однако, его использование требует значительных вычислительных ресурсов, что является его существенным недостатком.

Для проведения анализа процессов горения строительных и отделочных материалов необходимо собрать информацию о химическом составе материалов. Определим, какие материалы будем анализировать. Основными строительными материалами на сегодняшний день являются пенобетон, известь, гипсовые смеси, портландцемент, глины, цементы, шлаки, сталь, дерево. Однако при анализе процессов горения необходимо учитывать не только строительные материалы, но и отделочные.

2 Анализ процессов горения строительных и отделочных материалов

Проведем оценку химического состава строительных материалов и их подверженность горению. Большинство строительных материалов либо вообще не подвержены горению, как цемент, стекло, глина, кирпич, либо при горении может стекловаться – кварцевый песок. Исследование реакций горения остальных материалов позволяет выявить наиболее опасные соединения.

Для удобства структурирования рассмотрим отдельно материалы, необходимые для отделки пола, потолка, стен, окон, межкомнатных и входных дверей (таблица 1).

Таблица 1 – Применение материалов в строительстве и вещества, входящие в их состав

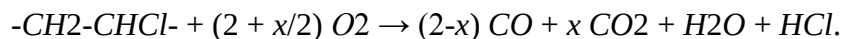
Потолок	
натяжной	ПВХ + полиэстеровая ткань с полиуретановым покрытием
пластиковые панели	ПВХ
гипсокартон	гипс + бумага
навесной	пенопласт
беленый	гашеная известь ($CaCO_3$)
Стены	
пластиковые панели	ПВХ
обои (виниловые, бумажные, моющиеся-пенопленовые)	ПВХ + бумага
гипсокартон	гипс + бумага
крашеные	краска
беленые	гашеная известь
деревянные	дерево
штукатуренные	штукатурка
МДФ	ДСП + бумага

Продолжение таблицы 1

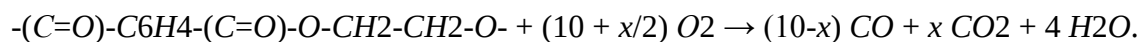
Пол	
линоле- ум(промышленный , бытовой)	ПВХ
ламинат	ДВП + бумага
ЛДСП	ДСП + бумага
ДСП, ДВП	дерево + карбами- доформальдегид- ные смолы
деревянный	дерево
кафель	глина + кварцевый песок
паркет	дерево + лак
Двери	
деревянные	дерево
стали	
Окна	
пластиковые	ПВХ
деревянные	дерево
стекло	SiO_2 , CaO , K_2O , Na_2O
Другое	
глина	Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 , Fe_2O_3 , FeO , CaO , MgO , K_2O , Na_2O
цемент	CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 , P_2O_5
кирпич	Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 , Fe_2O_3 , FeO , CaO , MgO , K_2O , Na_2O

Выпишем уравнения реакций горения отделочных материалов.

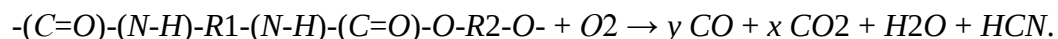
Поливинилхлорид (ПВХ) $(-CH_2-CHCl-)_n$ входит в состав многих материалов. При температурах выше $110-120^\circ C$ склонен к разложению с выделением хлористого водорода HCl . При высоких температурах горение протекает по реакции:



Полиэстер — полиэтилентерефталат (ПЭТ, лавсан) $(-(C=O)-C_6H_4-(C=O)-O-CH_2-CH_2-O-)_n$ при температуре более $850^\circ C$ полностью сгорает до CO и CO_2 :



Полиуретан — $(-(C=O)-C_6H_4-(C=O)-O-CH_2-CH_2-O-)_n$ при температуре более $850^\circ C$ полностью сгорает до CO и CO_2 :



Аналогично выпишем реакции для всех представленных в таблице 1 отделочных материалов.

Анализ реакций горения отделочных материалов позволяет выделить основные продукты: угарный газ, углекислый газ, хлористый водород, цианистый водород, стирол, этиленбензол, толуол, бензол. Определим наиболее опасные их концентрации. CO (угарный газ) – смертельная концентрация 0,4% в течении 20-30 минут. CO_2 – концентрация более 30% в воздухе – мгновенная потеря сознания и смерть. HCl (хлористый водород) – концентрация 75-150 мг/м³ – непереносима. HCN (цианистый водород) – 120-300 мг/м³ 30-60 минут – опасные для жизни токсические явления, 240-360 мг/м³ 5 минут – смерть, 420-500 мг/м³ – смерть. Стирол – 1,5 мг/м³ – смерть (для крыс). Этиленбензол – 1 мг/м³ – нарушение работы печени, 10 мг/м³ – воспаление слизистой оболочки дыхательных путей, 100-1000 мг/м³ – вызывают функциональные и органические изменения. Толуол – 250-500 мг/м³ – смерть. Бензол – более 3200 мг/м³ – нейротоксические симптомы.

3 Математическая модель

Исходными данными для связанной физико-химической задачи являются: геометрические размеры помещения, материалы внутренней отделки и стен, расположение окон и дверей, через которые возможен приток свежего воздуха. Основываясь на зональном методе, можно рассчитать среднюю температуру каждой зоны помещения в любой момент времени. Так же, можно будет рассчитать положение пламени в каждый момент времени и, как следствие, объёмы выгоревших материалов.

В входе расчёта будет учитываться приток свежего воздуха, обеспечивающего зону очага возгорания достаточным для поддержания химической реакции уровнем кислорода. Количество кислорода, необходимого для поддержания процесса горения, составляет двадцать один процент от общего объёма закрытого помещения.

В процессе реакции горения кислород будет активно расходоваться на процессы окисления и термического разложения. Интенсивность данных процессов влияет на количество токсичных веществ, выделяемых материалами. Чем больше кислорода доступно для процесса горения, тем больше реакций произойдёт.

На основе полученных сведений о температуре и процентном содержании кислорода в воздухе, можно будет узнать, в какой момент времени, какие вещества начнут выделяться из отделочных и строительных материалов при окислении и выгорании.

$$\left\{ \begin{array}{l}
T = 115,6 * \left(\frac{t}{t_{max}} \right)^{4,75} * e^{-4,75(t/t_{max})} * (T_{max} - T_0) + T_0; \\
T_{max} - T_0 = 224 * q_k^{0,528}; \\
t_{max} = 32 - 8,1 q_k^{3,2} * e^{-0,92 q_k}; \\
t_{max} = \frac{\sum P_i Q_{H_i}^p}{6285 * A * \sqrt{h}} * \frac{n_{cp} \sum P_i}{\sum n_i P_i}; \\
q_k = \frac{\sum P_i * Q_{H_i}^p}{(6S - A) * Q_{H_0}^p}; \\
q_{kp.p.} = \frac{4500 * \Pi^3}{1 + 500 * \Pi^3} + \frac{V^{0,333}}{6 * V_0}; \\
\Pi = \frac{\sum A_i h^{0,5}}{V^{0,667}}; \\
\Pi = \frac{\sum A_i h^{0,5}}{S}; \\
\Pi = \frac{\sum V_i P_i}{\sum P_i}; \\
V = a * b * h; \\
V_{O_2} = 0,21 * V; \\
-CH_2-CHCl- + (2 + x/2) O_2 \rightarrow (2-x) CO + x CO_2 + H_2O + HCl; \\
-CH-(C_6H_5)-CH_2- + (6 + x/2) O_2 \rightarrow (8 - x) CO + x CO_2 + 4 H_2O; \\
-CH-(C_6H_5)-CH_2- \rightarrow C_6H_5-CH=CH_2; \\
-CH-(C_6H_5)-CH_2- + (1,5 + x/2) O_2 \rightarrow C_6H_6 + (2 - x) CO + x CO_2 + H_2O; \\
-CH-(C_6H_5)-CH_2- + H_2O \rightarrow C_6H_5-CH_2-CH_3 + 0,5 O_2; \\
CH-(C_6H_5)-CH_2- + (0,5 + x/2) O_2 \rightarrow C_6H_5-CH_3 + (1 - x) CO + x CO_2; \\
C_6H_{10}O_5 + (3 + x/2) O_2 \rightarrow (6 - x) CO + x CO_2 + 5 H_2O; \\
C_6H_{10}O_5 + (3 + x/2) O_2 \rightarrow (6 - x) CO + x CO_2 + 5 H_2O.
\end{array} \right. \quad (1)$$

Система (1) объединяет в себе уравнения физики, описывающие распространение пожара при различных условиях, а так же химические реакции, протекающие в очаге возгорания и позволяет рассчитать количество выделяемых химических соединений.

Библиографический список

1. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ «Пожарная безопасность. Общие требования» - Москва: Изд-во стандартов, 1991. – 126 с.

О ПОСТРОЕНИИ БАНКА ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНЫХ ВЕЙВЛЕТОВ

Зайцев В.Н.

*Новокузнецкий институт (филиал) федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кемеровский
государственный университет»*

г. Новокузнецк, Россия, vn.zaytsev@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрен вопрос построения специальных дискретных вейвлетов на основе известных сейсмических импульсов и их применимость к решению задачи подавления волн-помех, проведено моделирование среды распространения упругих волн, построена синтетическая сейсмограмма с внесением дополнительных возмущений, произведена обработка полученной сейсмотрассы предложены дальнейшие пути решения данной проблемы.

Ключевые слова: упругие волны, сейсмоакустика, вейвлеты, вейвлет-анализ, преобразование Фурье, шумоподавление, математическая модель, разностные схемы, сейсмические импульсы.

Abstract. The question of building a special discrete wavelet based on the known seismic pulses and their applicability to the problem of suppressing the waves, interference, simulated environment of propagation of elastic waves based synthetic seismogram with the introduction of additional disturbances made treatment received seismograms suggested further ways of solving this problem.

Keywords: elastic waves, seismic acoustics, wavelets, wavelet analysis, Fourier transform, noise reduction, math model, finite difference schemes, seismic impulses.

Шумоподавление в задачах обработки сейсмоакустических сигналов является очень сложной задачей, некорректное решение которой может оказать сильное влияние на последующие этапы обработки сигнала [1]. Одним из самых эффективных инструментов для решения этой задачи является вейвлет-анализ. Математический аппарат вейвлет-анализа сформировался в восьмидесятых годах двадцатого века как альтернатива спектральному анализу на основе Фурье-преобразований, и его появление стало одним из самых важных событий в математическом мире за последние несколько десятков лет, потому как он представлял собой совершенно новую концепцию, которая практически сразу нашла свое применение в прикладных исследованиях во многих областях науки и техники. В настоящее время вейвлеты используются для решения задач синтеза и анализа сигналов различной природы, обработки изображений, компрессии данных, цифровой фильтрации, в распознавании образов и речи, и даже для решения некоторых специальных видов дифференциальных уравнений. Особенно широкое применение данный математический аппарат нашел в таких областях науки как: радиофизика, физика твердого тела, акустика, оптика, нелинейная динамика, биология, медицина, сейсмология и экономика.

Вейвлет-анализ представляет собой очень гибкое и эффективное средство цифровой обработки сигналов, которая заключается в особенностях вейвлета как аналитической функции – способность давать четкую привязку спектральных характеристик сигнала ко времени. Исходя из этой особенности, вейвлет-преобразование, в отличие от преобразования Фурье, позволяет получить двумерное представление одномерного сигнала, при этом время и частота рассматриваются как независимые переменные, что позволяет получить качественно новую информацию о спектральных характеристиках сигнала и повысить информативность результатов обработки.

Вейвлет-преобразование представляет собой свертку анализируемой функции $f(t)$ с двухпараметрической вейвлет-функцией $\psi_{s,t_0}(t)$ [2]:

$$W(s, t_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{s,t_0}^*(t) dt, \quad (1)$$

которая получается из материнского вейвлета $\psi_0(t)$ с помощью масштабных преобразований и сдвигов по времени [2]:

$$\psi_{s,t_0}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi_0\left(\frac{t-t_0}{s}\right), \quad (2)$$

где s – масштаб вейвлет-преобразования, который отвечает за ширину вейвлета;
 $t_0 \in \mathbb{R}$ – сдвиг по времени, определяющий положение вейвлета на оси t .

Кратномасштабный анализ реализуемый посредством вейвлет-преобразований зарекомендовал себя как очень эффективный метод обработки нестационарных сигналов, к числу которых относятся и сейсмоакустические сигналы, получаемые в результате экспериментальных работ по сейсмической разведке. Стоит отметить, что очень многие процессы в окружающем нас мире являются по своей природе нестационарными и очень явно демонстрируют изменение своих статистических свойств с течением времени, а применение к сигналам подобного рода классических методов спектрального и вероятностного анализа приводит к трудностям в интерпретации полученных, в результате обработки, данных. Именно поэтому вейвлетный анализ представляет такой интерес для наук о земле, и, в частности, сейсмологии, так как открывает очень широкий спектр возможностей для цифровой обработки данных сейсморазведки, которая представляет собой самый основной метод для исследования строения земной коры. Такое положение в современной геофизике сейсморазведки получила благодаря возможности исследовать глубокозалегающие геологические слои с очень высокой степенью детализации [1].

Ключевым моментом, определяющим успешность обработки сейсмограмм, и любых других сигналов имеющих сложную природу, является выбор материнского вейвлета. Анализирующая функция должна максимально соответствовать классу функций, которые описывают исследуемый сигнал, так как ее форма должна отражать поведение сигнала и его составляющих [2]. Тем не менее сложность выбора материнского вейвлета заключается в том, что полученный при полевых измерениях сигнал представляет собой сумму полезных волн и волн-помех, подлежащих фильтрации. Ко всему прочему, адекватный выбор вейвлет-функции для анализа осложняется отсутствием формальных критериев для определения вейвлетного базиса в случае различных сигналов.

Исходя из вышесказанного представляется логичным использование в качестве материнского, вейвлета построенного на основе стандартных функций аналитической аппроксимации отраженного сигнала, давно известных в сейсморазведке. В данной работе в качестве импульса, принятого за основу использовался, так называемый импульс Клаудера, представляющий собой линейную автокорреляционную функцию, и который описывается функцией следующего вида [3]:

$$K(t) = \text{real} \left[\frac{\pi k t (T-t)}{(\pi k t) e^{(2\pi i f_0 t)}} \right], \quad (3)$$

где $k = \frac{(f_2-f_1)}{T}$ – скорость изменения частоты с течением времени;

$f_0 = \frac{(f_2+f_1)}{2}$ – средняя частота полосы пропускания;

$i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

Построение вейвлета на основе импульса Клаудера осуществлялось по методике, предложенной в [4]. Изображение полученной вейвлет-функции ψ представлено на рисунке 1.

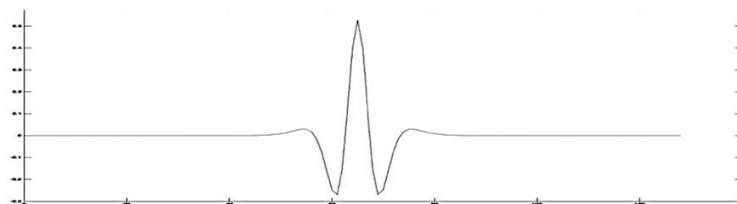


Рисунок 1 – Вейвлет Клаудера

Сейсмоакустические методы исследования земной коры основываются на изучении особенностей распространения упругих волн в геологических породах. Из-за различий в плотности этих пород скорости распространения упругих волн в них также различаются. Зная время, за которое волна от источника возбуждения достигает приемника, и скорости распространения упругих волн в различных средах, можно установить геологический разрез исследуемой местности. Схема измерения для сейсмоакустического исследования представляет собой, как правило, множество расположенных в линию датчиков – коса, источник возбуждения и регистрирующее устройство – сейсмостанция [1].

Моделирование среды, в которой происходит распространение упругих волн производилось с использованием метода конечных разностей и уравнения акустической волны [5]. Моделирование производилось с использованием разностных схем второго порядка и варьированием переменной скорости волнового акустического уравнения:

$$\nabla^2 \psi(x, z, t) = \frac{d^2 \psi(x, z, t)}{dx^2} + \frac{d^2 \psi(x, z, t)}{dz^2} = \frac{1}{v^2(x, z)} \frac{d^2 \psi(x, z, t)}{dt^2}. \quad (4)$$

Аппроксимация второго порядка с производной по времени может быть представлена следующим образом:

$$\nabla^2 \psi(x, z, t) = \frac{1}{\Delta t^2 v^2} [\psi(x, z, t + \Delta t) - 2\psi(x, z, t) + \psi(x, z, t - \Delta t)], \quad (5)$$

где Δt – интервал дискретизации по времени.

Моделируемая среда является трехслойной и скорости распространения акустических волн задавались вручную: в первом слое скорость их распространения равняется 200 м/с, во втором слое – 280 м/с, в третьем – 320 м/с, что примерно соответствует верхнему почвенному слою, состоящему из гравия, щебня и песка [1]. Изображение геологической среды распространения акустической волны полученной в результате моделирования представлено на рисунке 2.

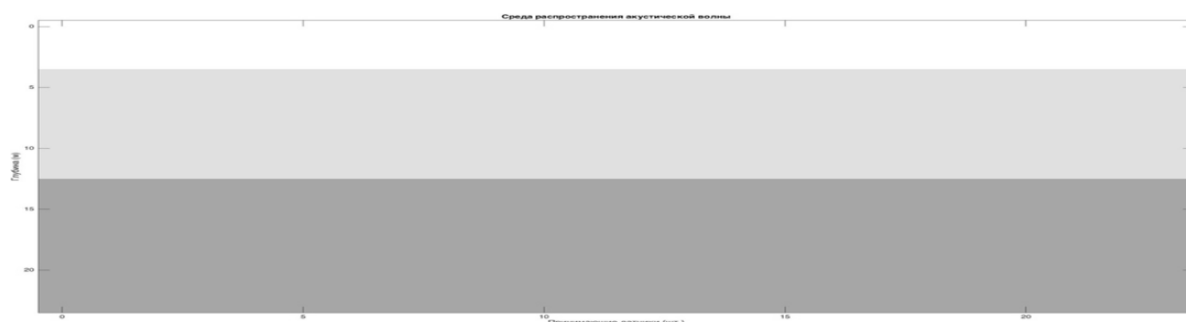


Рисунок 2 – Трехслойная геологическая среда с параллельными преломляющими границами

Источник возбуждения упругой волны находился ровно в середине верхней границы первого слоя, на расстоянии 12 метров от каждого края моделируемой среды. Дополнительные возмущения в сигнале, имитирующие различные волны-помехи были внесены

с использованием вейвлета Ормсбая. В результате работы модели, внесения возмущений в сигнал и его интерполяции в 4 раза была получена сейсмограмма, представление на рисунке 3.

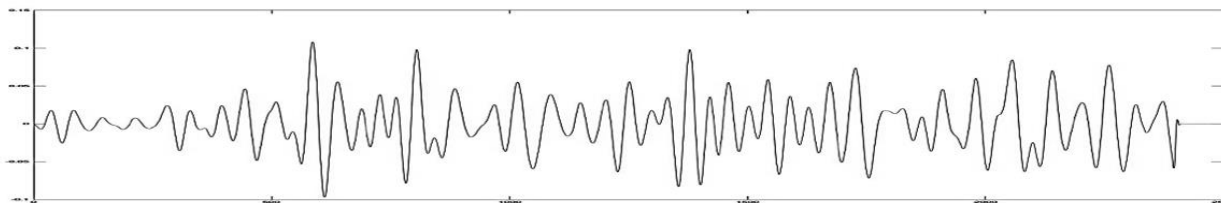


Рисунок 3 – Синтетическая сейсмограмма

Полученная сейсмограмма является очень близкой по спектральным характеристикам к сигналам, получаемым в результате проведения полевых испытаний, хотя и не отражает всех особенностей, которые могут возникать в случае проведения реальных экспериментов. Тем не менее, сгенерированная синтетическая сейсмограмма представляет собой нестационарный сигнал, что накладывает существенные ограничения на методы, которые можно применять для его анализа.

Одним из самых распространенных методов шумоподавления в цифровой обработке сигналов является метод спектрального вычитания [6], однако основное свое применение он нашел в обработке сигналов, имеющих стационарную природу. Существуют и другие алгоритмы увеличения отношения сигнал/шум, основанные на оконном преобразовании Фурье, что позволяет применять их к нестационарным сигналам, но качество шумоподавления будет очень сильно зависеть от разрешающей способности используемого окна и, как и в дискретном преобразовании Фурье, невозможно одновременно обеспечить хорошее разрешение и по времени, и по частоте, так как разрешение окна по осям остается постоянным [2]. Так как в сейсмограмме информация по частотам распределена неравномерно, то для решения задачи шумоподавления можно использовать методы вейвлет-анализа, в частности – дискретное вейвлет преобразование.

Для решения задачи шумоподавления в полученном синтетическом сейсмоакустическом сигнале применялся пакет прикладных программ MATLAB. В данном пакете был разработан алгоритм фильтрации сигнала от шума основанный дискретном вейвлет-преобразовании с использованием функции мягкой пороговой обработки [7]. В качестве анализирующих вейвлетов были выбраны показанный в статье вейвлет Клаудера, вейвлет Добеши с 10-ю коэффициентами, вейвлет Симлет с 8-ю коэффициентами и вейвлет Койфлет с 5-ю коэффициентами. Вейвлеты семейств Добеши, Симлет и Койфлет являются широко известными классами дискретных вейвлетов показавших свою практическую применимость в обработке синтетических и полевых сейсмограмм [2].

Для сравнения качества шумоподавления к исходному сигналу представленному на рисунке выше был добавлен белый гауссовый шум, с отношением сигнал/шум равным 9 дБ, который был равномерно распределен по энергии сигнала. В результате данной операции была получена сеймотрасса представленная на рисунке 4.

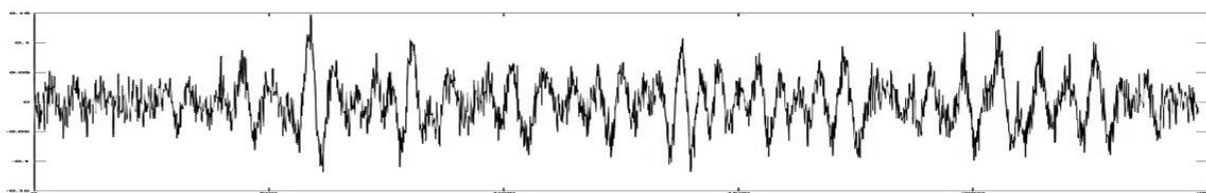


Рисунок 4 – Синтетическая сейсмограмма содержащая равномерный белый гауссовый шум

Для каждого материнского вейвлета сигнал разбивался на десять уровней разложения, после чего рассчитывались коэффициенты функции мягкой пороговой обработки и производилось удаление незначущих коэффициентов детализации [7]. В результате обработки были получены сеймотрассы, представленные на рисунке 5.

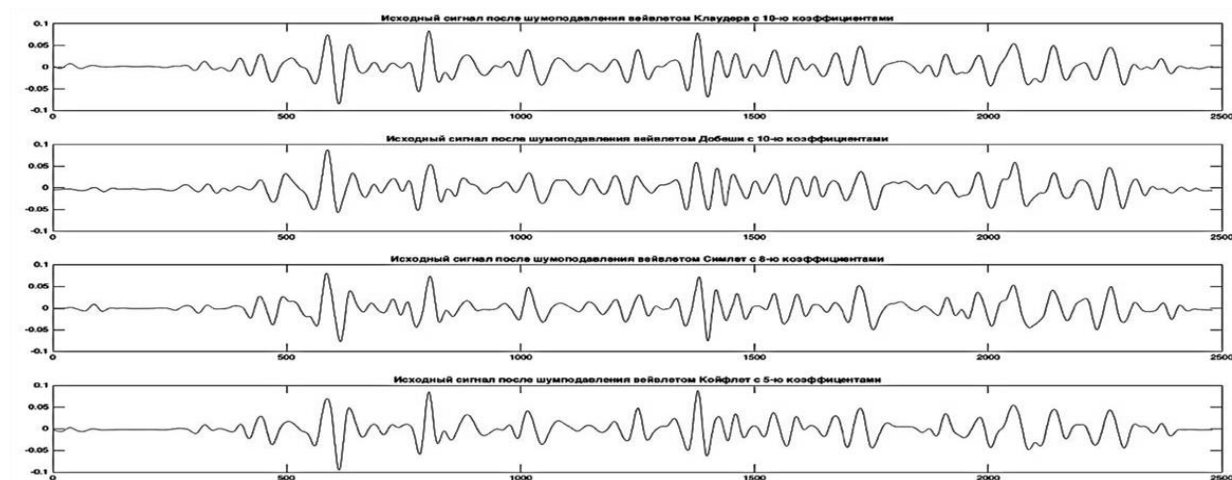


Рисунок 5 – Синтетическая сейсмограмма после обработки вейвлетами различных типов

В качестве критерия сравнения было выбрано отношение сигнал/шум, которое рассчитывалось по следующему алгоритму: из исходной, незашумленной сейсмограммы производилось вычитание полученной в результате обработки материнскими вейвлетами сейсмограммы, после чего по формуле (7) [6] вычислялось безразмерное значение отношения сигнал/шум:

$$SNR = \left(\frac{\delta_{signal}}{\delta_{noise}} \right)^2 \quad (6)$$

где δ_{signal} – среднеквадратичное значение амплитуды сигнала;

δ_{noise} – среднеквадратичное значение амплитуды шума.

Затем, вычислялось значение отношения сигнал/шум в децибелах [6]:

$$SNR(dB) = 10 \log_{10}(SNR) \quad (7)$$

и производилось сравнение полученных для каждой сеймотрассы значений. Результаты сравнения шумоподавления вейвлетами различных сейместв представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Отношение сигнал/шум для вейвлетов различных семейств

Материнский вейвлет	Вейвлет Клаудера	Вейвлет Добеши	Вейвлет Симлет	Вейвлет Койфлет
Отношение сигнал/шум	8.4185	6.8479	7.1798	8.1522

Из представленной таблицы видно, что наибольшее отношение сигнал/шум наблюдается для вейвлета, построенного на основе сейсмического импульса Клаудера, что говорит об целесообразности применения метода построения вейвлетов специального вида на основе известных сейсмологии аналитических представлений волн. Вейвлет Клаудера показал свою эффективность в сравнении с известными вейвлетами несмотря на то, что полученная сейсмограмма не является созданной на основе метода вибросейсм, с формой волн которого он коррелирует наилучшим образом.

Однако необходимо дальнейшее исследование данной методики с построением вейвлетов основанных на других сейсмических импульсах, таких как импульс Пузырева, Берлаге, Риккера. Также, необходимо дополнительно исследовать возможность обработки сейсмограмм вейвлетами с использованием методов пакетного вейвлет-преобразования, которое является улучшением обычного вейвлет-преобразования и уже сейчас демонстрирует лучшее качество обработки сигналов. Стоит отметить, что качество шумоподавления с использованием пороговой обработки очень сильно зависит не только от выбора материнского вейвлета, но также от используемой при пороговой обработке функции, поэтому использование более сложных функций, например Видаковича, для расчета пороговых коэффициентов также может обеспечить лучшее качество обработки сейсмоакустического сигнала.

Библиографический список

1. Хмелевской, В.К. Геофизические методы исследования земной коры / В.К. Хмелевской. – Д.: Международный университет природы, общества и человека «Дубна», 1999. – 203 с.
2. Добеши, И. Десять лекций по вейвлетам / И. Добеши. И: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 464 с.
3. Ryan H. Ricker, Ormsby, Klauder, Butterworth – A Choise of Wavelets // CSEG Recorder, 1994, – р. 8-9.
4. Дунаева, К.А., Сагайдачная О.М. Вопросы обработки сейсмической информации с построением специальных дискретных вейвлетов для решения нетрадиционных задач сейсморазведки // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2007. №5.
5. Бреховских, Л.М. Волны в слоистых средах / Л.М. Бреховских – 2-е изд., перераб. и доп. – М:Наука, 1973. – 343 с.
6. Солонина, А.И. Цифровая обработка сигналов. Моделирование в MATLAB: учеб. пособие / А.И. Солонина, С.М. Арбузов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 816 с.
7. Donoho D.L. De-noising by soft-thresholding // IEEE Trans. on Inform. Theory, 1995, #3. – р. 613-627.

УДК 539.3

О РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ СЕТЧАТЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Штейнбрехер О.А.

*Новокузнецкий институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения «Кемеровский государственный университет»
г. Новокузнецк, Россия, olga_sht@mail.ru*

Аннотация. Рассматривается задача оптимизации сетчатых конструкций по критерию массы при ограничениях по прочности и критическим нагрузкам общей и местной устойчивости. Рассматриваются основные идеи метода решения задач оптимизации сетчатых конструкций на основе замены многих ограничений R -предикатом допустимых областей. Приводится пример использования метода при нелинейных ограничениях, в том числе при наличии локальных минимумов.

Ключевые слова: сетчатые конструкции, оптимальные параметры, дискретное моделирование, методы оптимизации, R -предикаты.

Abstract. The problem of optimizing the lattice designs for mass criterion under constraints on strength and critical loads of general and local stability. The basic idea of a method for solving optimization problems mesh designs based on the replacement of many restrictions R -predicate permissible areas. An example of the algorithm in the case of non-linear constraints, including the presence of local minima.

Keywords: lattice design, optimal parameters, discrete modeling, optimization techniques, R -predicates.

Широко применяемые в машиностроении сетчатые конструкции [1] представляют собой регулярную систему кольцевых и спиральных ребер, подкрепленных или не под-

крепленных оболочкой (рисунок 1). Как правило, конструкции машиностроения имеют вид оболочки вращения конической формы.



Рисунок 1 – Сетчатые конструкции из композиционных материалов

Как известно при проектировании большую роль играют оптимизационные расчеты, заключающиеся в определении оптимальных геометрических и физико-механических проектных параметрах модели. Поиск оптимальных параметров является частью подготовки эскизного проекта, который предшествует этапу рабочего проектирования, а именно опытно-конструкторским работам, созданию опытных образцов, испытаний и выпуску серийной продукции. Данные полученные на этапе оптимального проектирования позволяют сократить временные и материальные затраты на этапах испытаний и избежать разрушения серийных конструкций при их эксплуатации.

При решении задачи оптимального проектирования силовых конструкций одним из критериев оптимальности выступает минимум массы конструкции, при котором должны выполняться условия на прочность, общую, местную и осесимметричную устойчивость.

Условия на прочность заключаются в не превышении максимальными нормальными напряжениями предела прочности материала на растяжение (сжатие), а максимальными напряжениями поперечного сдвига – предела прочности на сдвиг для всех сечений ребер конструкции.

Условия на общую устойчивость подразумевают, что заданная нагрузка не превышает критическую, приводящую к потере устойчивости. Дополнительное условие на осесимметричную устойчивость обусловлено тем, что предыдущее условие не учитывает данную форму потери устойчивости.

Условие на местную потерю устойчивости ограничивает сжимающие силы в отрезках ребер между точками пересечения эйлеровой критической силой.

В качестве проектных параметров для типовой сетчатой конструкции рассматриваются толщина сетчатой структуры (высота сечений ребер) h , толщины спиральных и кольцевых ребер δ_c и δ_k , расстояния между спиральными ребрами a_c (по нормали к оси ребра) и между кольцевыми ребрами a_k , углом наклона спиральных ребер (по отношению к образующей) φ , толщиной h_o и структурой наружной обшивки (если она имеется) (рисунок 2).

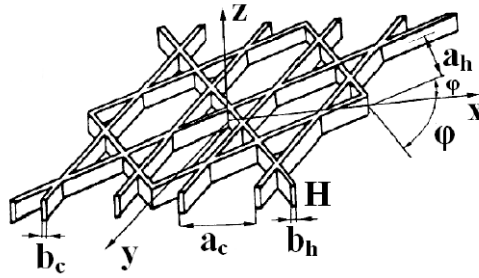


Рисунок 2 – Сетчатая структура ребер

Для оболочечной конструкции характерны еще такие проектные параметры как радиусы верхнего R_0 и нижнего оснований R_z и длина конструкции L , в случае если разница радиусов верхнего и нижнего основания конструкции мала, расчетная модель представляется в виде цилиндрической оболочки с одним радиусом R .

С учетом данных обозначений можно представить целевую функцию в виде суммы масс спиральных и кольцевых ребер [2]:

$$M = 2\pi RLh\rho_c(2\bar{\delta}_c + \bar{\rho}_k\bar{\delta}_k), \quad (1)$$

где $\bar{\delta}_c = \frac{\delta_c}{a_c};$

$$\bar{\delta}_k = \frac{\delta_k}{a_k};$$

$$\bar{\rho}_k = \frac{\rho_k}{\rho_c} \text{ – плотность материалов ребер.}$$

Ограничения по прочности, устойчивости и дополнительное условие на положительность размеров конструктивных элементов для вектора варьируемых параметров p будет иметь вид:

$$\begin{cases} \sigma_{кр} - \sigma(p) \geq 0, \\ \lambda(p) - 1 \geq 0, \\ p_i \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

Таким образом задача оптимизации сводится к задаче нахождения минимума функции (1) при ограничениях (2).

С помощью аналитического аппарата можно с некоторым приближением описать математически целевую функцию и функции ограничений для сетчатой конструкции не имеющей особенностей. В случае более сложной модели аналитическое описание модели не целесообразно, поэтому используются методы оптимального проектирования сетчатых конструкций на основе континуальных моделей. Однако отличительной особенностью современных анизотридных конструкции является нарушение регулярности реберной структурой, наличие вырезов и их усиления в виде окантовок. Моделирование и расчеты таких конструкций на прочность базируются на полном дискретном моделировании [3]. Данный подход позволяет получить более достоверные расчеты в элементах конструкций вблизи вырезов и их усиления.

В случае дискретного моделирования конструкции можно получить целевую функцию и функции ограничений используя аппроксимацию откликов при проведении

вычислительного эксперимента [4] с варьированием определяемых проектных параметров при заданных геометрических и физических характеристиках модели.

Поиск оптимальных параметров – минимума целевой функции с учетом ограничений – может производиться методами условной оптимизации.

Рассмотрим модификацию метода симплексного поиска для решения задач оптимального проектирования конструкции, где минимизируемая функция представлена в виде R-предиката [5] целевой функции и ограничений [6].

В качестве целевой функции определяем функцию расчета объема конструкции при заданных n переменных:

$$z(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Решением задачи оптимизации будет являться точка x с координатами $(x_1, x_2, \dots, x_n)$, в которой целевая функция принимает минимальное значение:

$$\min_{\Omega \in R^n} z(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где z – целевая функция;

x_i – варьируемые проектные параметры;

Ω – область допустимых решений.

Область допустимых решений Ω определяется системой из N ограничений-неравенств:

$$\Omega: \begin{cases} \omega_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0, \\ \omega_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0, \\ \dots \\ \omega_N(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0. \end{cases}$$

В качестве ограничений выступают ограничения на размеры конструктивных элементов, условия на прочность, жесткость и (или) устойчивость конструкции.

Сам метод представляет собой ход симплексного поиска при отражении наихудшей вершины, где наихудшая вершина определяется из максимума функции, которая вычисляется в каждом узле как сумма координат умноженных на коэффициент $R = -\sum \nabla \omega_i \bar{\omega}_i$, где ω_i – нормализованный предикат ограничения (границы), $\bar{\omega}_i$ – среднее значение нормализованного предиката.

Так как целевые функции и функции ограничений для задач оптимизации сетчатых оболочек, как правило, имеют нелинейный вид, рассмотрим действие алгоритма на примере подобных функций.

На рисунке 3 представлена задача (3) с нелинейными функциями ограничений, образующих острый угол и линейной целевой функцией:

$$\begin{cases} z(x, y) = -20x, \\ x > 0, \\ y > 0, \\ 2y - x^2 > 0 \\ x - y^2 > 0. \end{cases} \quad (3)$$

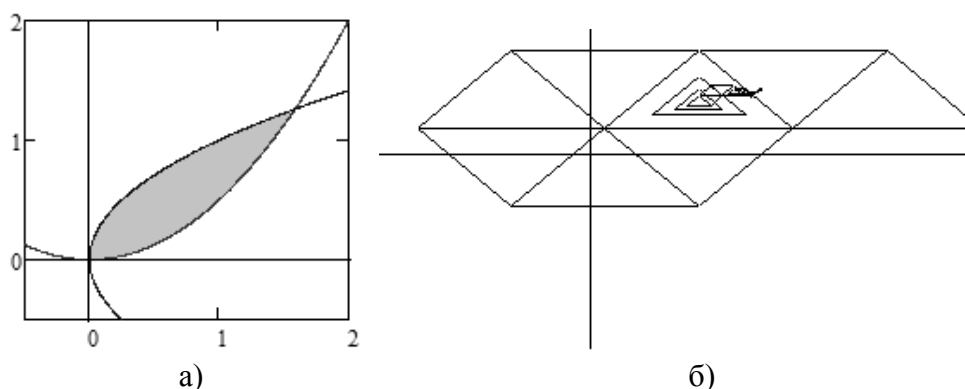


Рисунок 3 – Область ограничений (а) и траектория движения симплекса (б) для задачи с нелинейными функциями ограничений, образующих острый угол

Минимальное значение целевой функции достигается в точке с координатами $x = \sqrt[3]{4} \approx 1.587$ и $y = \sqrt[3]{2} \approx 1.26$. Траектория движения симплекса с начальными значениями (1;1) представлена рисунке 3б. При достижении размера симплекса значения меньше $\varepsilon = 10^3$ после уточнения итоговый результат соответствует точке с координатами (1.587; 1.259).

На рисунке 4 представлена задача, имеющая нелинейные ограничения, образующие несколько локальных минимумов на пересечении:

$$\begin{cases} z(x, y) = -10y, \\ x > 0, \\ 6x - y > -1, \\ 1 - xy > 0, \\ y - (x - 1)^2 > 0. \end{cases} \quad (4)$$

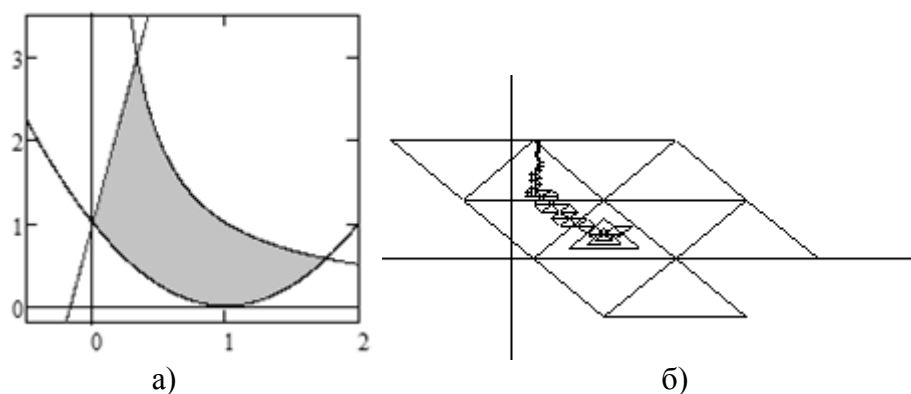


Рисунок 4 – Область ограничений (а) и траектория движения симплекса (б) для задачи с локальными минимумами

Минимальное значение целевой функции достигается в точке с координатами $x = \frac{1}{3} \approx 0.3333$ и $y = 3$. При движении симплекса (рисунок 4б) из точки (2; 2), находящейся за пределами симплекса, этап алгоритма «движение к начальной точке» приводит к точке с координатами (1.133; 0.5). Дальнейшее движение симплекса, при уменьшении его размера, идет вблизи границы $1 - xy > 0$ до границы $6x - y > -1$. Итоговый результат поиска, после уточнения результата, соответствует точке с координатами (0.332; 2.971).

Таким образом, во всех рассмотренных примерах получена сходимость к искомой точке. Погрешность вычисления координат оптимума не превышает размеров симплекса.

Исходя из изложенных выше соображений, данный алгоритм может применяться для решения задачи оптимизации сетчатых конструкций при использовании в качестве уравнений целевой функции (1) и функций ограничений (2) аппроксимации откликов вычислительного эксперимента любого порядка.

Библиографический список

1. Васильев В.В. Механика конструкций из композитных материалов, М.: Машиностроение, 1988, 272 с.
2. Васильев В. В. и др. Анизотридные композитные сетчатые конструкции – разработка и приложения к космической технике // Композиты и Наноструктуры. 2009. №3. С. 38–50.
3. Бурнышева Т.В., Каледин В.О. Сравнение дискретного и континуального подхода к расчету напряженного состояния сетчатых оболочечных конструкций при статическом нагружении, Науч.-технич. вестник Поволжья, 2011, №4, с. 113-116
4. Виварский М. С., Лурье М. В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. Киев: «Техніка», 1975, 168 стр.
5. Рвачев В.Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения, Киев, Наукова думка, 1982, 552 с.
6. Каледин В.О. Оптимизация анизотридных сетчатых конструкций из композиционных материалов с ограничениями по прочности, жесткости и устойчивости // Проблемы оптимального проектирования сооружений: докл. 3-й Всерос. конф. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. арх.-стр. ун-та, 2014. – С. 190-197.

УДК: 66.971

ПРИМЕНЕНИЕ САД СИСТЕМ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В УСТАНОВКЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ПРЕССОВАНИЯ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Скуратов А.П., Горохов Ю.В., Потапенко А.С.

ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»,
г. Красноярск, Россия, komvzvodt-81@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты компьютерного моделирования процесса непрерывного литья и прессования цветных металлов. Изложена разработанная на базе программного продукта Ansys Fluent трехмерная математическая модель установки, позволяющая оценить динамику изменения теплового состояния элементов ее конструкции. Представлены результаты расчета теплообмена при реализации процесса литья и прессования алюминиевого сплава на опытной лабораторной установке.

Ключевые слова: установка, непрерывное литье и прессование, алюминиевый сплав, компьютерная модель, теплообмен.

Abstract. The results of computer modeling of non-ferrous metals continuous casting and extrusion are represented. The three-dimensional mathematical model of the continuous casting and extrusion installation has been designed with Ansys Fluent software. The model helps to estimate dynamics of thermal state changes of the installation elements. There are the results of calculations of heat exchange while aluminum alloy casting and extrusion with the experimental laboratory installation.

Keywords: installation, continuous casting and extrusion, aluminum alloy, computer model, heat exchange.

В последние годы широкое применение получили САД/САЕ системы, позволяющие автоматизировать процесс приближенного интегрирования дифференциального уравнения теплопроводности для моделей, построенных в программных комплексах. Современные САД/САЕ системы, такие как ANSYS, являются эффективными инструмен-

тами, обеспечивающими минимальные затраты материальных средств и времени при проектировании сложных инженерных объектов [1].

В работе на базе программного продукта ANSYS разработана трехмерная компьютерная модель теплообмена в установке непрерывного литья и прессования цветных металлов (рисунок 1) [2, 3].



1 – электродвигатель переменного тока; 2 – редуктор; 3 – соединительная муфта; 4 – корпус; 5 – кристаллизатор; 6 – опора; 7 – матрица; 8 – заливная воронка; 9 – дозатор

Рисунок 1 – Установка непрерывного литья и прессования цветных металлов

На первом этапе моделирования выполнено построение геометрии установки в программном продукте Ansys Mechanical APDL [4,5]. Далее с помощью булевых операций разработана модель вращающейся части установки и заливаемого алюминиевого расплава, где металл представлен одним расчетным объемом, а корпус – другим. Целью данной операций является обеспечение возможности использования конечно-элементной сетки с различными типами ячеек. Полученная модель импортирована в программный модуль Ansys Fluent, где уравнения переноса теплоты и сплошности записывались в виде

$$W_x \frac{\partial t}{\partial x} + W_y \frac{\partial t}{\partial y} + W_z \frac{\partial t}{\partial z} = \alpha \nabla^2 t, \quad (1)$$

и

$$\frac{\partial W_x}{\partial x} + \frac{\partial W_y}{\partial y} + \frac{\partial W_z}{\partial z} = 0. \quad (2)$$

Уравнение движения в модели используется лишь для оси z, так как установка расположена горизонтально:

$$W_x \frac{\partial W_x}{\partial x} + W_y \frac{\partial W_y}{\partial y} + W_z \frac{\partial W_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 W_z. \quad (3)$$

Конвективная составляющая задавалась с использованием элемента LINK34 программы, который учитывает дифференциальное уравнение конвективной теплоотдачи на границе поверхность – среда:

$$\alpha_k = -\frac{\lambda}{\Delta t} \cdot \frac{\partial t}{\partial n}. \quad (4)$$

Отметим, что наряду с уравнениями энергии в модели учтен также фазовый переход металла в процессе непрерывного литья из жидкого в твердое состояние. Граничные условия в модели учитывали скорость и температуру заливаемого металла на входе и выходе из матрицы, а также радиационный и конвективный тепловые потоки от поверхностей стенок установки и металла во внешнюю среду. При этом значение коэффициента теплоотдачи конвекцией табулировалось в зависимости от текущей температуры движущихся элементов установки и металла.

Для вычисления радиационного теплового потока использован двухузловой нелинейный элемент программы (SHELL57), учитывающий эффективную площадь излучающей поверхности и коэффициент излучения. Плотность потока собственного интегрального излучения абсолютно черного тела определялась в соответствии с законом Планка как величина суммарной энергии излучения тела по всем длинам волн.

Для расчета распределения поля температуры в элементах установки с учетом скорости их вращения относительно центральной оси использован соответствующий трёхмерный элемент программы (SOLID87) – тетраэдр, состоящий из 10 узлов, в каждом из которых определялась температура.

В результате решения тепловой задачи определены температурные поля элементов установки после каждого оборота вращающейся части (рисунки 2 и 3). Расчеты проведены в соответствии с технологическим регламентом работы установки, когда скорость вращения корпуса кристаллизатора совпадала со скоростью заливаемого металла.

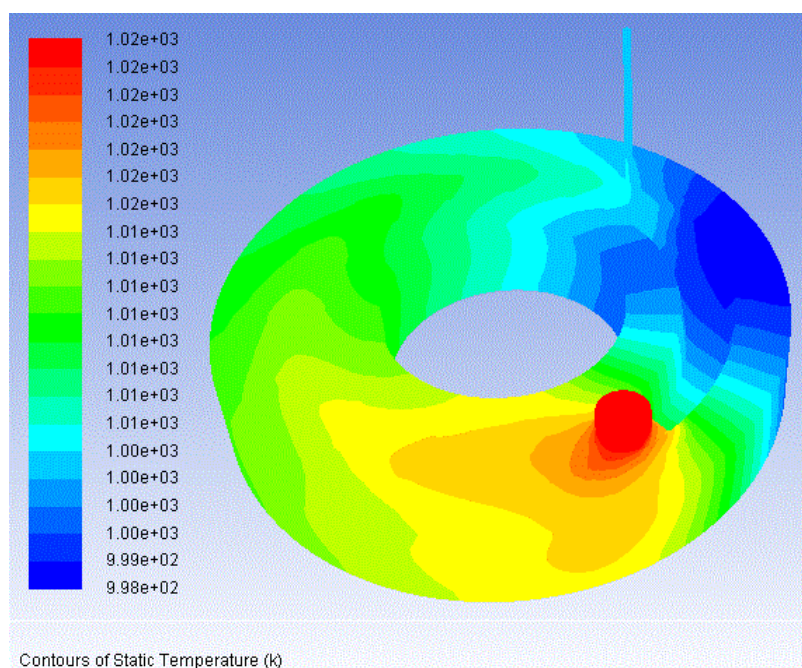


Рисунок 2 – Поле температуры в элементах установке непрерывного литья и прессования металла после 1 оборота

Предварительный анализ показывает, что в процессе работы установки имеет место непрерывное изменение температуры ее элементов. Так, при заданной постоянной температуре окружающей среды, равной 20 °С, происходит практически линейное увеличение температуры поверхности корпуса примерно на 8 °С за один его оборот. Очевидно, что в промышленных условиях это обстоятельство не дает возможность обеспечить длительную и надежную эксплуатации установки. В связи с этим возникает необходимость в

дальнейших инженерных решениях по совершенствованию конструкции и режимов работы установки непрерывного литья и прессования цветных металлов.

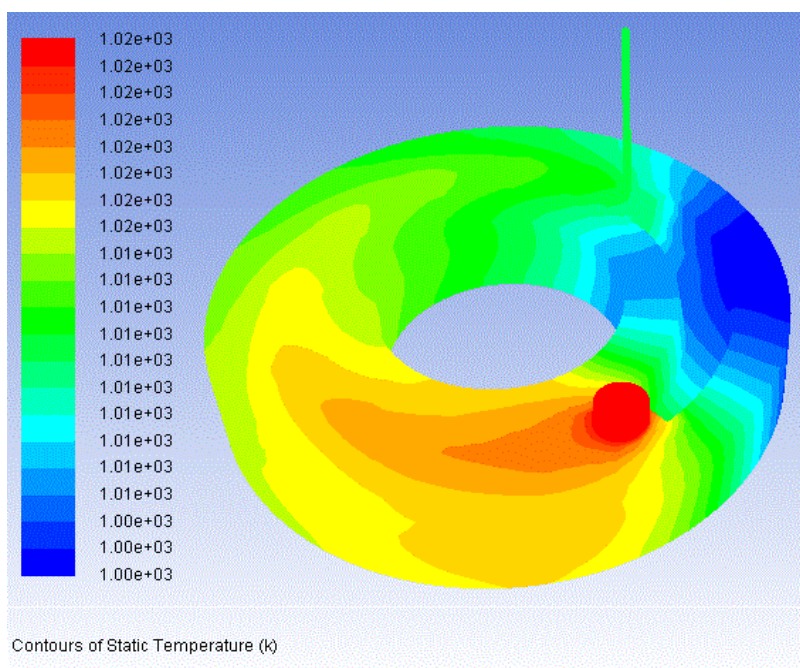


Рисунок 3 – Поле температуры в элементах установке непрерывного литья и прессования металла после 2 оборота

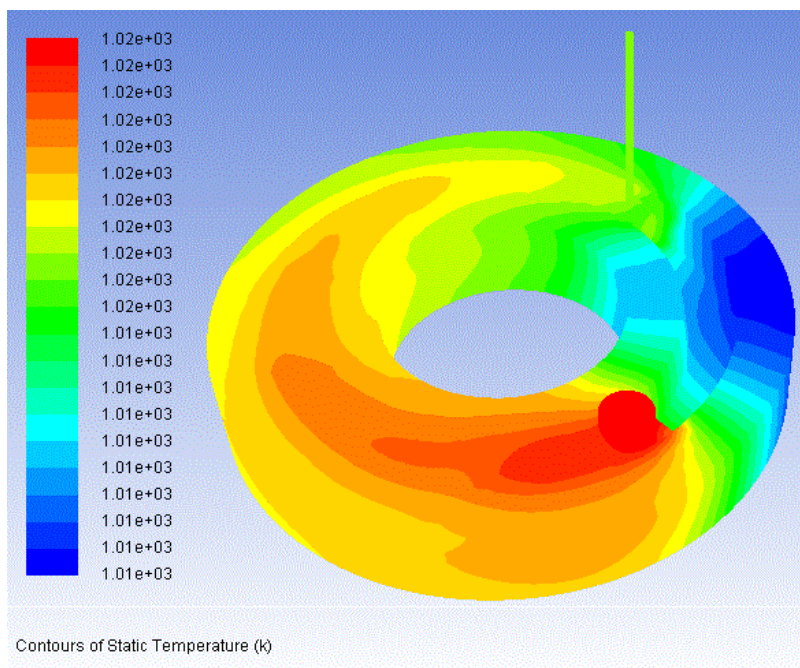


Рисунок 4 – Поле температуры в элементах установке непрерывного литья и прессования металла после 3 оборота.

Библиографический список

1. ANSYS Fluent-Solver Theory Guide: Release 14.0 // ANSYS, Inc. – 2013. – 420 p.
2. Горохов, Ю.В. Основы проектирования конструктивных параметров установки непрерывного литья-прессования металлов / Ю.В. Горохов, И.В. Солопко, И.Л. Константинов // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2009. – № 3. – С. 20–23.

3. Пат. 102550 Российская Федерация, МКП В 21 С 23/08. Установка для непрерывного литья, прокатки и прессования металла / С.В. Беляев, С.Б. Сидельников, Ю.В. Горохов [и др.]; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 7.

4. Потапенко, А. С. Моделирование теплового процесса в установке совмещённого литья и прессования цветных металлов / А. С. Потапенко, А. П. Скуратов, А. А. Пьяных // Сборник материалов X Юбилейной Всероссийской научно-технической конференции. – 2014.

Скуратов, А. П. Расчётное исследование теплового режима установки совмещённого литья и прессования цветных металлов/ А. П. Скуратов, Ю. В. Горохов,

5. А. С. Потапенко// Сборник тезисов докладов шестого международного конгресса Цветные металлы и минералы. – 2014. – С. 436

УДК 681.5.015

ИНТЕГРАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВНУТРЕННИХ МЕХАНИЗМОВ И ВХОД-ВЫХОДНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ОБЪЕКТОВ*

Мышляев Л.П.¹, Евтушенко В.Ф.¹, Файрушин Ш.А.², Леонтьев И.А.², Лысенко Н.А.¹

¹ФГБОУ ВПО «СибГИУ»

г. Новокузнецк, Россия, evtushenko_vf@sibsiu.ru

²ЗАО «Стройсервис»

г. Кемерово, Россия, commerce@stroyservis.com

Аннотация. Статья посвящена особенностям применения математических моделей внутренних механизмов и вход-выходных зависимостей при исследовании и решении практических задач. Показано, что для практического применения необходима их тесная интеграция с надлежащей модификацией модели внутренних механизмов объекта.

Ключевые слова: математическая модель внутренних механизмов объекта, вход-выходные зависимости, интеграция моделей, комбинированная модель.

Abstract. Application features of mathematical internal mechanism models and input-output plants relations for researches and practical tasks are presented in the paper. The paper substantiates the necessity of the tight integration and appropriate modification of internal mechanism plant model.

Keywords: mathematical internal mechanism plant model, input-output relations, models integration, combined model.

Математические модели, используемые в различного рода исследованиях и при решении практических задач во многих областях человеческой деятельности, разделяются на модели внутренних механизмов процессов (объектов), «...эксплуатируемые в таких фундаментальных дисциплинах, как физика, химия и т. п...», и модели объекта, «...отражающие его «важнейшие свойства» по отношению к заранее заданным входным и выходным переменным» [1]. Последние – это модели, применяемые, главным образом в теории управления.

Модели первого типа эффективны для решения исследовательских задач при задаваемых граничных условиях, «удобных» для этих моделей. Применение моделей внутренних механизмов в реальных условиях, т. е. с использованием натурных данных порождает ряд существенных проблем, решение которых возможно только с модификацией моделей. Во-первых, натурные данные, зарегистрированные в действующих системах, содержат кроме полезной составляющей помеху, имеющую, как правило, высокочастотный характер, и отрицательно влияющую на модельные результаты. Поэтому необходимо проводить каким либо способом регуляризацию модели, преобразуя вычислительную процедуру или выделяя полезную составляющую натурных данных.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект №15-07-01972

Во-вторых, любая модель описывает только определенные стороны процесса и не приспособлена (конкретизирована) для каждого объекта. Поэтому надо поднастраивать эту модель к конкретным условиям, что также ведет к модификации модели. В частности, в модель либо вводятся дополнительные составляющие, учитывающие эффекты неконтролируемых факторов, либо поднастраиваются ее коэффициенты (параметры). То есть в модель вводится ретроспективная обратная связь. Пояснением этих процедур может служить схема рисунка 1 [2], где обозначено:

- MBM – модель внутренних механизмов процесса;
- БПН – блок поднастройки модели внутренних механизмов;
- БЗ – блок задержки, используемый для синхронизации натуральных Y , расчетных Y^P и модельных Y^M значений выходных воздействий объекта;
- ОП – оператор преобразования отклонений δY , в частности, экстраполятор;
- $\delta Y = Y_c^P - Y$ – отклонения синхронизированных расчетных и натуральных значений выходных воздействий;
- δk – вектор параметрических коррекций модели внутренних механизмов с использованием ее прямых и обратных связей;
- надстрочные индексы «м» и «р» означают модельные и расчетные значения, полученные с помощью модифицированной модели внутренних механизмов.

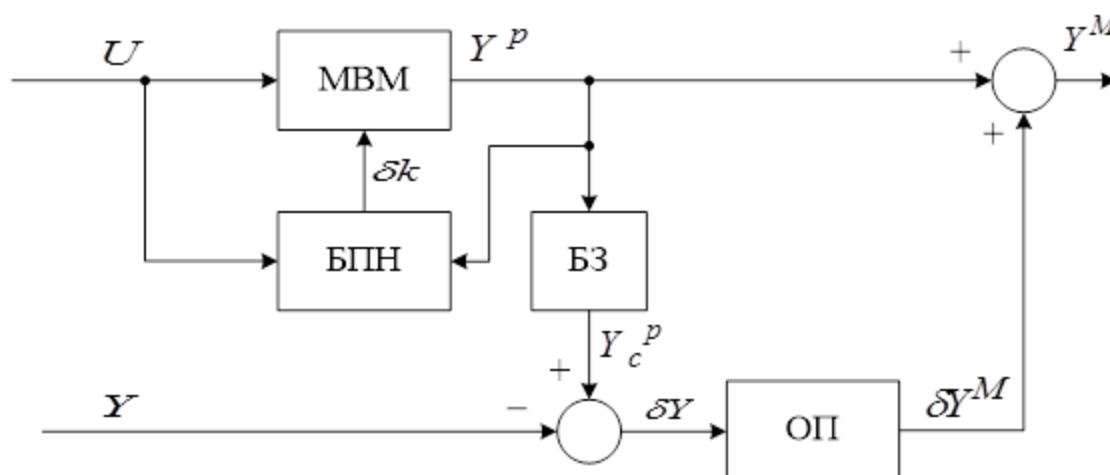


Рисунок 1 – Схема модифицированной математической модели

В третьих, один из вариантов использования модели при синтезе алгоритмов управления связан с обращением модели [1]. В общем случае, для динамических моделей эта операция физически неосуществима [1], и возможно только приближенное решения. Кроме того, для некоторых моделей, число входных и выходных воздействий у которых не одинаково (неквадратичная матрица), получить обратный оператор не получается возможным без дополнительных условий.

Модели вход-выходных зависимостей строятся зачастую на основе концепции возмущенного-невозмущенного движения [3,4] и описывают поведение объекта «в малом», то есть в окрестности базовых траекторий. Тем самым они «привязаны» к базовым траекториям, что и является их недостатком.

Наиболее эффективно рациональное объединение, интеграция моделей рассматриваемых типов с максимальным использованием их положительных свойств. Примером такой интеграции может служить схема рисунка 2, где приняты следующие обозначения:

- БОБЗ – блок определения базовых значений (траекторий) переменных Z ;
- MBM – модель внутренних механизмов процесса;

- МВВЗ – модель вход-выходных зависимостей;
- БРО – блок расчета отклонений δZ ;
- БО – блок объединения воздействий Y_o^M и δY^M ;
- $Z = \{U; W_k; S\}$ – обобщенный вектор управляющих U , контролируемых внешних W_k и переменных состояний S объекта управления;
- $Y^M = Y_o^M + \delta Y^M$ – модельные значения выходных воздействий объекта управления, представленные, в частности, как сумма опорного уровня Y_o^M и приращений δY^M ;
- δZ – приращения переменных относительно их базовых значений;
- подстрочный индекс: «о» означает опорный (базовый) уровень векторов $Z(i)$ и $Y(i)$;
- надстрочный индекс «м» означает модельные значения, рассчитанные с помощью МВМ и МВВЗ.

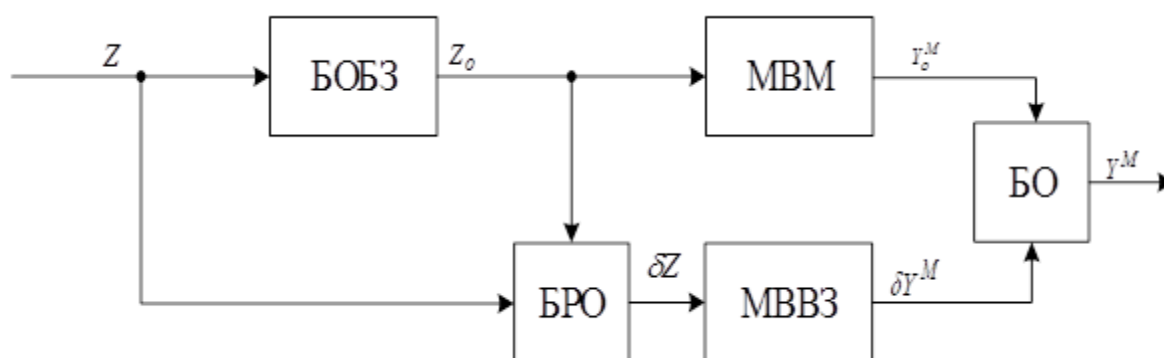


Рисунок 2 – Схема комбинированной математической модели

Заключение. Для практического применения необходима тесная интеграция моделей внутренних механизмов и вход-выходных зависимостей объекта с надлежащей их модификацией.

Библиографический список

1. Емельянов С.В. Новые типы обратной связи: Управление при неопределенности/ С.В. Емельянов, С.К. Коровин – М.: Наука. Физматлит, 1997. – 352 с.
2. Туркенич Д.И. Управление плавкой стали в конвертере / Д.И. Туркенич – М.: Металлургия, 1971. – 360 с.
3. Летов А.М. Динамика полета и управление / А.М. Летов– М.: Наука, 1969. – 360с.
4. Моисеев Н.Н. Элементы теории оптимальных систем / Н.Н. Моисеев – М.: Наука, 1975. – 528 с.

УДК 004.942:622.33

ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА МИГРАЦИИ ФЛЮИДОВ ПРИ ТЕХНОГЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ГЕОМАССИВ

Белый А.М., Павлова Л.Д.

*Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк, Россия, lefleure92@yandex.ru*

Аннотация. В статье представлены результаты аналитического обзора современных программных средств для моделирования сложных систем и визуализации моделируемых процессов. Описаны назначение, состав и возможности рассмотренных программных сред.

Ключевые слова: интерфейс, модель, моделирование, объект, приложение, проект, редактор, сценарий.

Abstract. In the article presents the results of the analytical review of modern software for modeling of complex systems and visualization of the modeled processes. Describes the purpose, structure and potential of the considered software environments

Keywords: interface, model, modeling, object, application, project, editor, script.

Моделирование является основным методом исследований во всех областях знаний и научно обоснованным методом оценок характеристик сложных систем, используемым для принятия решений в различных сферах деятельности. Существующие и проектируемые системы можно исследовать с помощью аналитических и имитационных математических моделей, реализуемых на современных компьютерах, которые в этом случае выступают в качестве инструментальных средств.

При проектировании сложных систем возникают разнообразные научные задачи, требующие оценки количественных и качественных закономерностей процессов функционирования таких систем, проведения структурного алгоритмического и параметрического их синтеза.

При подземной угледобыче выемочный участок в условиях высокой интенсивности горных работ представляет собой область, характеризующуюся протеканием сложных диффузионных процессов в метановоздушных потоках. Диффузионные процессы в выработанном пространстве относятся как к классу стационарных – распределения метана в выработанных пространствах при стационарных режимах вентиляции, так и нестационарных – изменения концентрации метана при изменении параметров вентиляции и газовыделения.

Теоретически процессы диффузии метана в воздушном потоке описываются общими уравнениями вида

$$\varepsilon \frac{\partial c}{\partial t} = D_{ij} \frac{\partial^2 c}{\partial x_i \partial x_j} - V_i \frac{\partial c}{\partial x_i}, \quad (1)$$

где c – концентрация метана;
 t – время диффузии;
 D_{ij} – коэффициент диффузии;
 V_i – скорость фильтрации.

Уравнение (1) включает нестационарный член dc/dt и функцию скорости фильтрации V_i . Для случая стационарной диффузии уравнения принимают вид

$$D_{ij} \frac{\partial^2 c}{\partial x_i \partial x_j} - V_i \frac{\partial c}{\partial x_i} = 0. \quad (2)$$

Для решения уравнений диффузии (2) необходимо знать описание скоростного поля, распределения коэффициента диффузии и определить граничные условия поступления метана в область фильтрационного потока.

Решение задач нестационарной диффузии в выработанных пространствах существенно упрощается, если характер процессов устанавливается в натурных условиях. В этом случае представляется возможным использование упрощенных моделей процесса.

В настоящее время помимо составления и расчета математических моделей применяются средства визуализации моделируемых процессов, что позволяет наиболее наглядно представить картину процесса. Для расчета и визуализации математических моделей могут быть использованы различные пакеты программ (Unity3D, UniSim, и др.), предназначенные для решения различных классов задач.

Unity3D – программная среда для разработки 2D/3D приложений, предназначенных для работы в операционных системах Windows, OS X, Linux и др. Все программные продукты, созданные в среде Unity, обладают поддержкой графических технологий DirectX и OpenGL [1].

Основной областью применения является разработка интерактивных симуляторов реальности с возможностью взаимодействия с окружающим миром.

Редактор Unity имеет простой интерфейс, состоящий из различных окон, благодаря чему можно производить отладку игры прямо в редакторе. Внешний вид интерфейса среды представлен на рисунке 1.

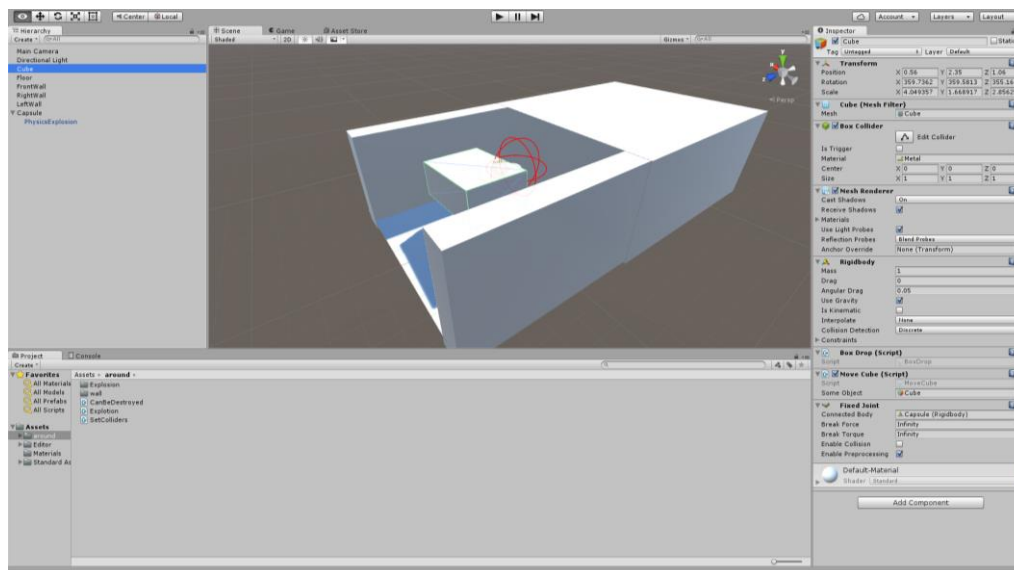


Рисунок 1 – Внешний вид интерфейса среды Unity3D

Движок поддерживает два сценарных языка: C#, JavaScript (модификация). Расчёты физики производит физический движок PhysX от NVIDIA.

Проект в Unity делится на сцены (уровни) – отдельные файлы, содержащие свои игровые миры со своим набором объектов, сценариев, и настроек. Объекты содержат наборы компонентов, с которыми взаимодействуют скрипты. К объектам могут быть применены коллизии (коллайдеры). Unity поддерживает физику твёрдых тел, ткани, физику типа Ragdoll.

В редакторе имеется система наследования объектов: дочерние объекты будут повторять все изменения позиции, поворота и масштаба родительского объекта. Скрипты в редакторе прикрепляются к объектам в виде отдельных компонентов.

Из отличительных особенностей Unity3D можно выделить следующие:

- простота импорта и оперирования сложными трехмерными моделями;
- физически реалистичное поведение объектов на сцене;
- наличие поддержки различных языков программирования для скриптов, что упрощает процесс разработки.

UniSim – семейство программ для статического и динамического моделирования технологических процессов. Пакет позволяет моделировать процессы добычи и промышленной подготовки нефти и газа, а также процессы нефтепереработки и нефтехимии. UniSim позволяет создавать статические и динамические модели технологических объектов и анализировать их работу в заданных производственных условиях [2].

Использование данного пакета позволяет решать следующие задачи:

- строить статические и динамические модели технологических процессов на основании библиотеки моделей, технологических объектов, настраиваемых под заданные

производственные условия и математических уравнений, описывающих физические процессы;

- проигрывать различные сценарии технологического процесса, в зависимости от различных производственных целей и условий, выбирая наиболее эффективные режимы работы;

- оценивать эффект от изменения сырья, остановок или изменений режимов работы оборудования в штатных и нештатных ситуациях;

- оценивать соответствие показателей реальной работы оборудования на объекте показателям, заявленным в спецификации;

- корректировать производственные задания в соответствии с возможностями оборудования.

Внешний вид интерфейса программы представлен на рисунке 2.

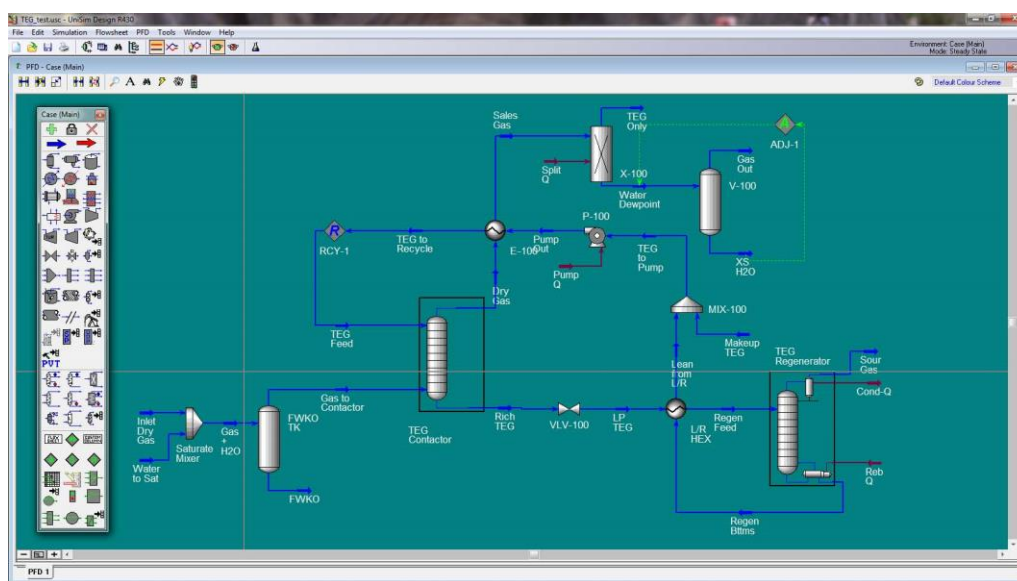


Рисунок 2 – Внешний вид интерфейса среды UniSim

UniSim Platform обеспечивает модульную, конфигурируемую и масштабируемую архитектуру, что позволяет расширять среду моделирования с ростом числа моделей и рабочих станций.

Можно выделить следующие отличительные особенности пакета UniSim:

- 1) объединение всех данных различных средств сбора информации в единой базе данных, что позволяет иметь одноразовый ввод информации из любого средства и многократное ее использование разными пользователями на различных уровнях управления;

- 2) непосредственная доступность всей вырабатываемой системой информации через средства Интернет/Инtranет;

- 3) всесторонняя открытость системы;

- 4) преемственность технических решений предыдущих систем автоматизации и реализация непосредственной связи и интеграции с существующими на предприятиях системами, комплексами и контроллерами.

Rand Model Designer – высокопроизводительная визуальная среда для разработки компонентных моделей сложных динамических систем, в которой используется образный, интуитивно понятный объектно-ориентированный язык моделирования высокого уровня, позволяющей быстро и качественно создавать сложные модели [3].

Rand Model Designer позволяет разрабатывать непрерывные, дискретные, гибридные модели и проводить интерактивные вычислительные эксперименты с разработанными моделями.

Среда предназначена для пользователей, проводящих многочисленные сложные и трудозатратные вычислительные эксперименты или создающих новые программные приложения, в основе которых лежат математические модели.

Продукт сочетает в себе интуитивно понятную среду объектно-ориентированного физического моделирования и мощные механизмы символьных вычислений, которые позволяют ускорять процесс подготовки качественных моделей.

Основными областями применения продукта являются:

- проведение научных вычислительных экспериментов, в том числе и с использованием внешних приборов и оборудования;
- проектирование технических систем;
- создание компьютерных тренажеров и программ анимаций процессов;
- разработка математических моделей физических систем и процессов с последующим включением их во внешние программные приложения.

Внешний вид интерфейса программы представлен на рисунке 3.

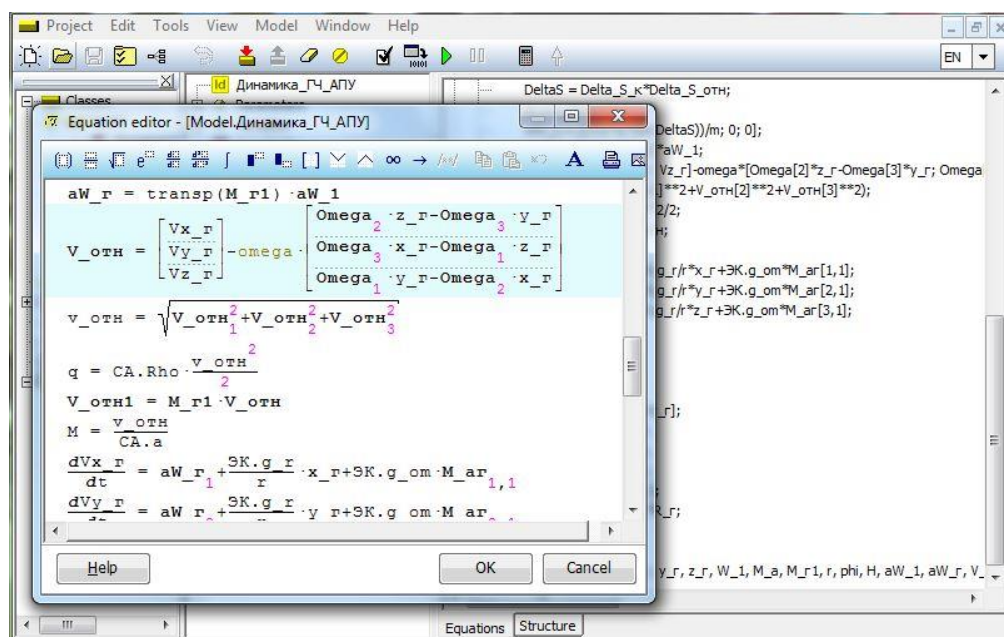


Рисунок 3 – Внешний вид интерфейса среды Rand Model Designer

Rand Model Designer обладает рядом особенностей, совокупность которых определяет его уникальную эффективность:

1) объектно-ориентированный подход к моделированию позволяет создавать библиотеки типовых компонентов, повторно использовать их, модифицировать, обмениваться компонентами с другими пользователями, и тем самым существенно экономить время разработки новых проектов;

2) входной язык не предъявляет никаких требований к знаниям по программированию: используются интуитивно понятные общепринятые формы для описания математических зависимостей и визуальные диаграммы для описания структуры и качественных изменений поведения моделируемой системы;

3) поддерживаются все виды связей между компонентами, в частности ненаправленные связи, что позволяет применять хорошо известные и интуитивно понятные методы моделирования физических систем, основанные на соединении готовых компонентов;

4) программный код выполняемой модели автоматически генерируется на основе математической модели и компилируется, что обуславливает высокую производительность при проведении вычислительных экспериментов;

5) при автоматическом построении совокупной системы уравнений учитывается ее структура, уменьшается размерность и символично разрешается часть уравнений, что в совокупности с использованием специальных численных методов дает возможность работать с большими системами уравнений (тысячи дифференциально-алгебраических уравнений) в том числе в режиме реального времени;

6) поддерживаются стохастические модели;

7) имеются мощные средства отладки моделей и демонстрации результатов модельных экспериментов, двухмерная и трехмерная анимация;

8) наличие встроенных средств разработки интерактивных пользовательских интерфейсов модели (органов индикации и управления) позволяет использовать готовую модель в виде независимого программного продукта (компьютерного тренажера);

9) возможность выполнять параметрическую оптимизацию моделей;

10) возможность создания исполняемого кода модели для встраивания в независимые внешние приложения с использованием API.

Исходя из анализа программных сред, применяемых для разработки статических и динамических моделей технологических объектов и протекающих в них процессов, можно сделать вывод, что наиболее адаптивной по своим функциональным возможностям для моделирования процесса миграции флюидов при техногенном воздействии на геомассив является среда визуального программирования Rand Model Designer, позволяющая создавать новые программные приложения, в основе которых лежат математические модели.

Библиографический список

1. Unity (игровой движок) [Электронный ресурс] // «Википедия – свободная энциклопедия», Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Unity_\(игровой_движок\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Unity_(игровой_движок))

2. Першин О.Ю. Учебный комплекс по моделированию и управлению технологическими объектами нефтегазовой промышленности / О.Ю. Першин // Труды РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина № 4 (265) 2011 – Москва: Изд. Издательский центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина 2011. – С. 175 – 181

3. Rand Model Designer – высокопроизводительная среда для создания и отладки интерактивных многокомпонентных моделей сложных динамических систем [Электронный ресурс] // «MVSTUDIUM Group. Scientific software development», Режим доступа: <http://www.mvstudium.com/index.htm>

УДК 532.546

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОБ ЭВОЛЮЦИИ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА РАЗНОВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ В ПОСТУПАТЕЛЬНОМ ПОТОКЕ

Крыштопин Д.В., Федяев Ю.С.

*Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева
г. Орёл, Россия*

Аннотация. В работе ставится задача об эволюции границы раздела жидкостей различных вязкостей в пористой среде. Исследуется движение границы в поступательном потоке. Предложена численная схема решения задачи на основе метода дискретных особенностей и параметрических сплайнов.

Ключевые слова: эволюция границы раздела жидкостей, фильтрация жидкостей, параметрические сплайны.

Рассмотрим плоскопараллельную линейную фильтрацию жидкости постоянной вязкости μ и плотности ρ в однородном слое пористого грунта постоянной толщины. Давление жидкости p и скорость фильтрации $\vec{v}$ в области течения D удовлетворяют

обобщённому закону Дарси и уравнению неразрывности, которые в безразмерных величинах имеют вид [1]:

$$\vec{v}(M, t) = \frac{K}{\mu} \nabla \varphi(M, t), \quad M \in D, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\nu_x(M, t)) + \frac{\partial}{\partial y}(\nu_y(M, t)) = 0, \quad M \in D, \quad (2)$$

где $K = \text{const}$ – проницаемость грунта;

$\varphi(M, t) = -p(M, t)$ – обобщённый потенциал скорости фильтрации;

t – время;

M – точка наблюдения.

Из уравнения (1) следует, что

$$\frac{\partial}{\partial x}(\nu_y(M, t)) - \frac{\partial}{\partial y}(\nu_x(M, t)) = 0, \quad M \in D. \quad (3)$$

Физическая скорость и скорость фильтрации взаимосвязаны равенством

$$\frac{d\vec{r}_M}{dt} = \vec{v}(M, t), \quad M \in D, \quad (4)$$

где $\vec{r}_M = x\vec{i} + y\vec{j}$ – радиус-вектор точки $M(\vec{i}, \vec{j})$ – орты декартовой системы координат Oxy).

Рассмотрим течение двух несмешивающихся жидкостей. Жидкость вязкости μ_1 занимает область D_1 , а жидкость вязкости μ_2 – область D_2 ($D = D_1 \cup D_2$). На границе раздела жидкостей капиллярные силы пренебрежимо малы. При движении одна из них полностью замещает другую. На подвижной границе раздела жидкостей Γ_t выполняются условия непрерывности давления и расхода жидкости, которые для касательной ν_τ и нормальной ν_n составляющей скорости фильтрации имеют вид:

$$\mu_1 \nu_\tau^+(M, t) = \mu_2 \nu_\tau^-(M, t), \quad \nu_n^+(M, t) = \nu_n^-(M, t), \quad M \in \Gamma_t. \quad (5)$$

Здесь и далее «+» («–») обозначают предельные значения функций при подходе к границе Γ_t со стороны (противоположной стороны) нормали $\vec{n}$. Орт $\vec{n}$ к границе Γ_t направлен в область D_1 и образует с ортом $\vec{\tau}$ правую двойку.

Если область D содержит бесконечно удалённую точку M_∞ и в ней нет источников (стоков) течения, то скорость фильтрации

$$\nu(M, t) \rightarrow 0, \quad M \rightarrow M_\infty. \quad (6)$$

Положение границы Γ_t в начальный момент времени $t = 0$ задано параметрическим уравнением (l – параметр)

$$\vec{r}_M = \vec{r}_0(l), \quad M \in \Gamma_0. \quad (7)$$

В последующие моменты времени $t > 0$ положения границы описывается уравнением

$$\frac{d\vec{r}_M}{dt} = \frac{\vec{v}^+(M,t) + \vec{v}^-(M,t)}{2}, \quad M \in \Gamma_t. \quad (8)$$

Задача эволюции границы Γ_t в области фильтрации состоит в том, что по заданным источникам (стокам) течения и её начальному положению (7) надо найти положение границы в последующие моменты времени. Для этого необходимо решить систему уравнений (2), (3), (8) при условиях (5) – (7).

Решение поставленной задачи сводится к системе интегрального и дифференциального уравнений [2]:

$$g - 2\lambda G_* g = 2\lambda \varphi_0, \quad \frac{d\vec{r}_M}{dt} = \vec{v}_0 + \nabla G_* g, \quad M \in \Gamma_t, \quad (9)$$

где $G_* g = \int_{\Gamma_t} g(N,t) \Omega(M,N) dl_N$ – потенциал двойного слоя плотности g ;

$$\Omega = (\vec{F}, \vec{n}_N);$$

$$\vec{F} = \nabla_N \Phi(M,N);$$

Φ – потенциал нормированного вихря, мощность которого равна -1 ;

$N \in \Gamma_t$ – точка расположения вихря;

φ_0 – потенциал скорости $v_0(M,t)$ невозмущённого течения;

параметр $\lambda = (\mu_2 - \mu_1)/(\mu_2 + \mu_1)$, $\lambda \in (-1;1)$.

Рассмотрим эволюцию границы Γ_t раздела различных жидкостей в поступательном потоке. Пусть граница Γ_t в начальный момент времени $t=0$ представляет собой окружность радиуса R с центром в точке $(0,0)$. Скорость потока на бесконечности равна $u\vec{e}_x$. Область протекания процесса безгранична, поэтому потенциал φ_0 скорости $\vec{v}_0$ невозмущённого течения примет вид: $\varphi_0 = ux$, $\vec{v}_0 = u\vec{e}_x$.

Уравнения (9) решим численно на основе метода дискретных особенностей [2]. Чтобы свести к минимуму численную неустойчивость, обеспечить гладкость кривой на каждом шаге по времени, Никольский Д. Н. в работе [3] предлагает использовать сглаживающую функцию для регуляризации дискретной схемы при неравномерном разбиении границы Γ_t . В данной работе предлагается использовать параметрические линейные и кубические сплайны [4, 5] для равномерного разбиения кривой Γ_t . Они представляют собой совокупность двух линейных или кубических сплайнов $S(x,l)$ и $S(y,l)$. В качестве естественного параметра l выступает длина дуги кривой Γ_t , которая отсчитывается от некоторой точки. Линейные и кубические сплайны $S(x,l)$ и $S(y,l)$ строятся на основе процедур и функций библиотеки с открытым исходным кодом ALGLIB [6].

В работе [7] получено аналитическое решение, из которого следует, что граница Γ_t всё время будет оставаться окружностью и двигаться поступательно со скоростью

$$\vec{v}_0 = \frac{2}{\Lambda+1} u\vec{e}_x, \quad \Lambda = \frac{1+\lambda}{1-\lambda}. \quad (10)$$

На рисунке 1 показано положение границы раздела жидкостей Γ_t в моменты времени $t=0$ и $t=1$. Расчёты проведены для $\lambda = -0.5; 0; 0.5$, $R=1$, $u=1$, $n=400$ – число точек разбиения кривой. Видим, что смещение границы зависит от

параметра λ и хорошо согласуется с аналитическим решением (10). Численная схема устойчива, кривая сохраняет первоначальную форму и гладкость. Визуальное сравнение эволюции границы Γ_t в работе [3] и в данной работе даёт возможность сделать вывод, что параметрические сплайны позволяют точнее найти положение границы в конкретные моменты времени, чем регуляризованная дискретная схема.

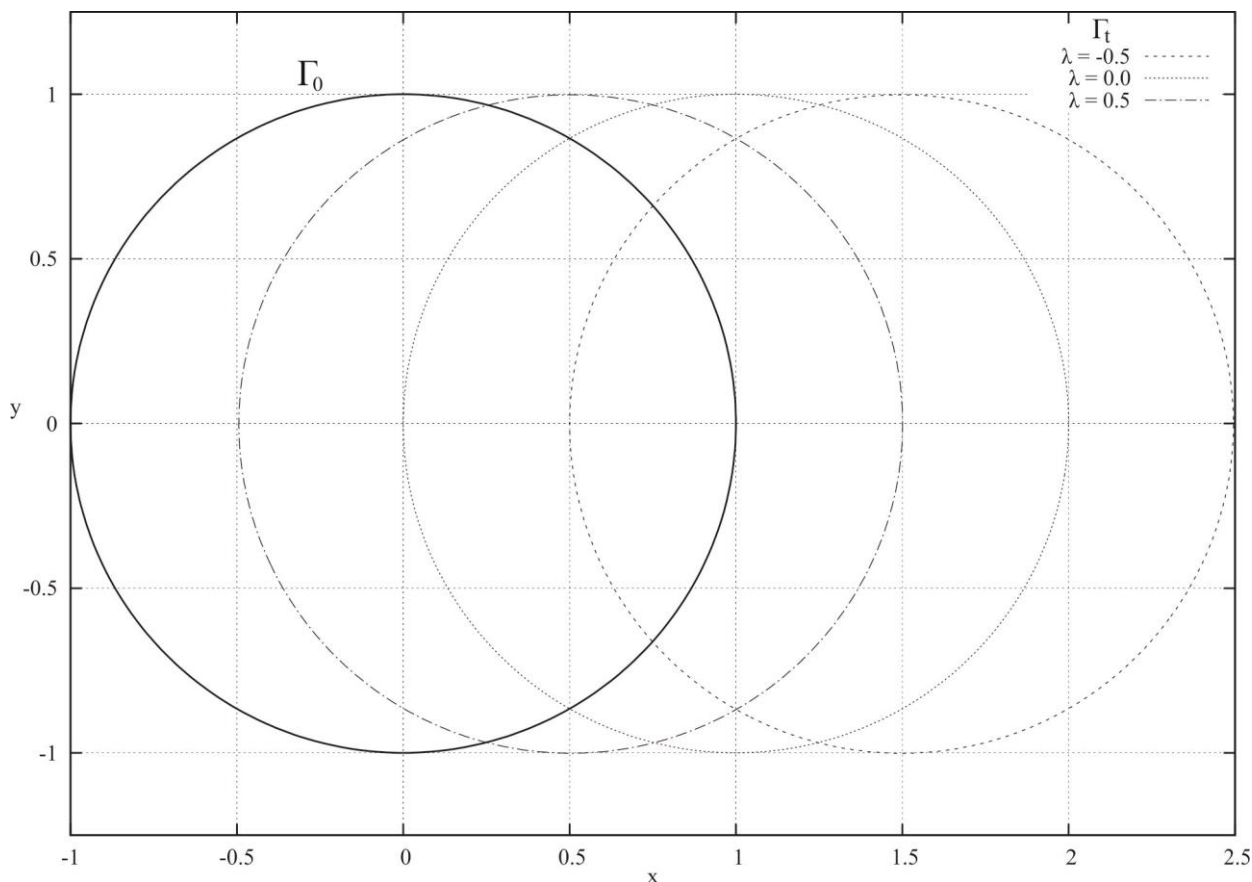


Рисунок 1 – Эволюция границы раздела жидкостей Γ_t при различных значениях λ

На рисунке 2 показаны положения границы раздела жидкостей Γ_t в различные моменты времени t при $\lambda = -0.75$ (случай соответствует более вязкой жидкости в области D_1), $R=1$, $u=1$, $n=400$. Для численного счёта использовались линейные параметрические сплайны. Видно, что в начальные моменты времени ($t=0.5; 1$) движущаяся граница Γ_t сохраняет свою форму. В более поздние моменты времени ($t=1.5; 2$) начинают образовываться так называемые вязкие пальцы [8]. Если для численного счёта использовать кубические параметрические сплайны, то результат несколько хуже. Вязкие пальцы начинают образовываться с более ранних времён: при $t=1$ они уже есть (рисунок 3). При времени $t > 1$ численный счёт рассыпается. Таким образом, для поставленной задачи численная схема, построенная на линейных параметрических сплайнах, более устойчива, чем схема с кубическими параметрическими сплайнами.

Из проведённых вычислительных экспериментов следует, что предложенная численная схема позволяет моделировать эволюцию границы раздела Γ_t разнотипных жидкостей в поступательном потоке. Полученные результаты хорошо согласуются с известными аналитическими и численными решениями [3, 7]. Предложенный в работе метод позволяет в дальнейшем исследовать течения различных жидкостей в неоднородном и анизотропном грунте [1].

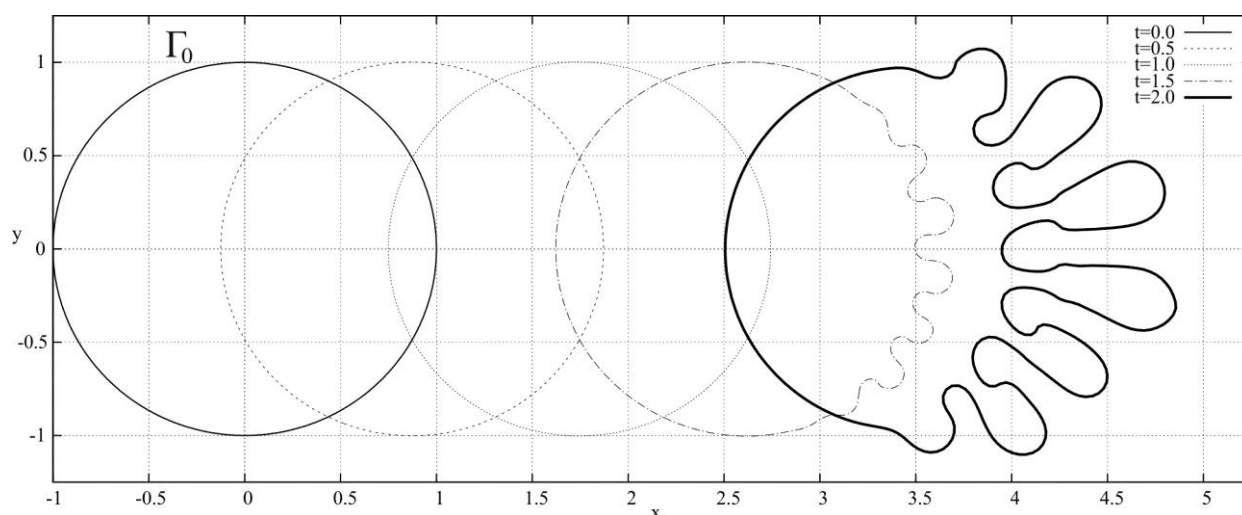


Рисунок 2 – Положения границы Γ_t в различные моменты времени, $\lambda = -0.75$: линейные параметрические сплайны

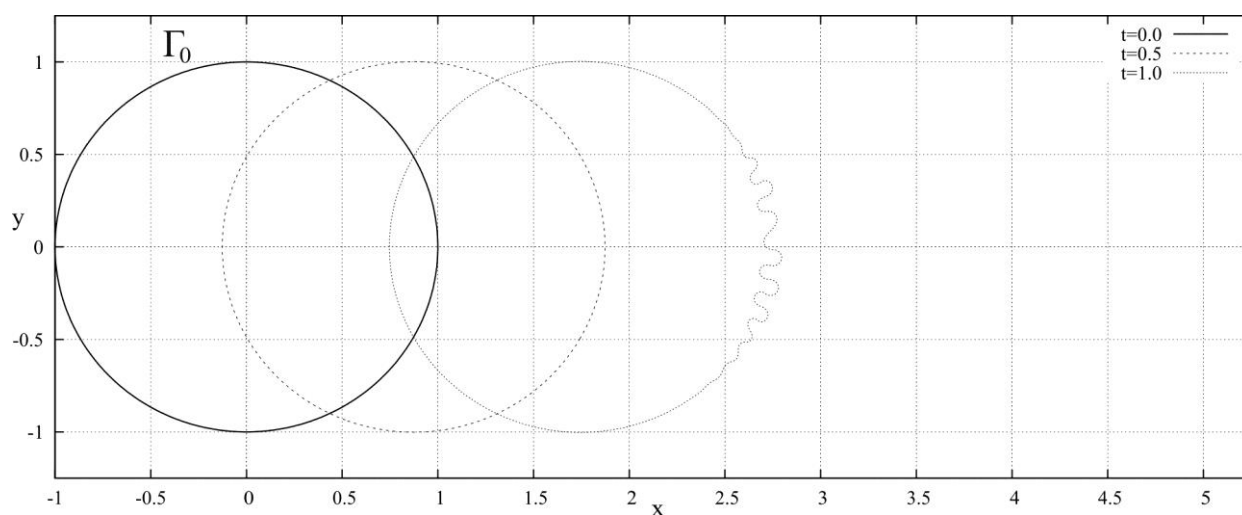


Рисунок 3 – Положения границы Γ_t в различные моменты времени, $\lambda = -0.75$: кубические параметрические сплайны

Библиографический список

1. Пивень В. Ф. Математические модели фильтрации жидкости. Орёл: Издательство ФГБОУ ВПО «Орловский государственный университет», ПФ «Картуш», 2015. 408 с.
2. Лифанов И. К. Метод сингулярных интегральных уравнений и численный эксперимент. М., 1995. 520 с.
3. Никольский Д. Н. Регуляризация дискретной схемы для плоской задачи об эволюции границы раздела различных жидкостей // Вычисл. технологии. 2010. Т. 15, № 1. С. 98-104.
4. Завьялов Ю. С., Квасов Б. И., Мирошниченко В. Л. Методы сплайн-функций. М.: Наука, 1980. 352 с.
5. Никольский Д. Н., Нестеренко Д. С. О моделировании плоскопараллельного процесса эволюции границы раздела различных жидкостей в грунте сложной геологической структуры // Ученые записки Орловского государственного университета. 2011. № 5. С. 164-168.

6. ALGLIB [Электронный ресурс]. URL: <http://www.alglib.net/> (дата обращения: 29.02.2016).
7. Воинов В. В. О точных решениях задачи движения границы раздела несмешивающихся жидкостей в пористой среде // Прикл. механика и техн. физика. 1991. № 1. С. 68-71.
8. Saffman P. G. Viscous fingering in Hele-Shaw cells // J. Fluid Mech. 1986. V. 173. N 12. P. 73-94.

УДК 681.518.5

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕСТНОГО ПОДОБИЯ ОБЪЕКТОВ И ВОЗДЕЙСТВИЙ В ПОДОБНЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ*

Буркова Е.В., Евтушенко В.Ф.

*Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк, Россия, e.v.burkova@gmail.com*

Аннотация. Проведено численное исследование совместного подобия модели объекта в виде инерционного звена первого порядка с запаздыванием и приведенного возмущения в виде белого шума в подобных системах управления. Получены условия совместного подобия таких объектов и воздействий, которые в том числе обеспечивают подобие систем с такими объектами и воздействиями.

Ключевые слова: совместное подобие, подобие систем управления, объект управления, неконтролируемые возмущения, численное исследование, подобные системы управления.

Abstract. A computational investigation of a first-order liner plant and its influences as a white noise is conducted. Joint similarity conditions of plants and its disturbances are proposed in the paper. The conditions can be used such as systems similarity conditions.

Keywords: joint similarity, similarity of control system, plant, uncontrolled disturbances, computational investigation, similar control systems.

При решении задач исследования подобия систем управления возникает необходимость оценивать не только их подобие в целом, но и совместное подобие объектов управления и их внешних воздействий [1]. На значения показателей качества функционирования систем управления немаловажное влияние оказывают как динамические характеристики каналов преобразования изменений входных воздействий управляемых объектов, так и свойства самих этих воздействий [2].

В [3] сформулированы утверждения, которые определяют условия совместного подобия на конечном интервале времени в виде соотношений, отражающих в общем виде точное или приближенное равенство эффектов влияния изменений входных воздействий на изменения выходных воздействий объекта управления. В частности, для объектов управления (ОУ) это условие может быть записано через дисперсии выходных переменных ОУ, тогда подобными будут считаться объекты, для которых выполняется условие

$$\left| \sigma_{yl}^{n^2} - \sigma_{yj}^{n^2} \right| \leq 0,05, \quad (1)$$

где $\sigma_{yl}^{n^2}$ и $\sigma_{yj}^{n^2}$ – нормированные значения дисперсий выходных переменных объектов, при действующих на их вход возмущениях; значение 0,05 характеризует допустимый уровень неопределенности для совместно подобных объектов и воздействий.

На практике для оперативного оценивания совместного подобия объектов и воздействий удобно использовать более простые соотношения (критерии), выраженные, в

* Работа поддержана грантом РФФИ по проекту №15-07-02231

частности, через значения параметров динамических моделей преобразующих каналов объектов управления и свойств их воздействий [4 – 6].

В сообщении представлены условия и результаты численных исследований для оценивания совместного подобия объектов регулирования и входных воздействий в подобных системах автоматического регулирования (САР) по отклонению, которые проведены по аналогии с [7]. Объект регулирования был представлен в виде одномерного объекта, функционирующего в условиях неконтролируемых возмущений, которые при моделировании представлены в виде приведенных к регулирующему входу [8] (рисунк 1).

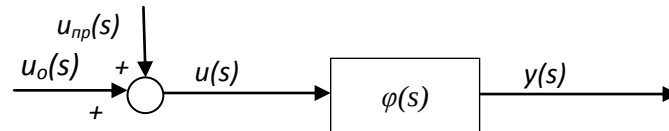


Рисунок 1 – Структура объекта регулирования

$$y(s) = \varphi_o \{u(s)\}; \quad (3)$$

$$u(s) = u_o(s) + u_{np}(s), \quad (4)$$

где $u_o(s)$ – опорный уровень управляющего воздействия;
 $u_{np}(s)$ – приведенное к управляющему входу эквивалентное возмущение;
 $u(s)$ – управляющее воздействие;
 $y(s)$ – выходное воздействие объекта управления;
 $\varphi(s)$ – оператор объекта управления.

Математическая модель канала преобразования регулирующих воздействий представлена в виде последовательного соединения инерционного звена первого порядка и звена запаздывания

$$\varphi(s) = \frac{k}{Ts + 1} e^{-\tau s}, \quad (4)$$

где k – коэффициент передачи объекта;
 T – постоянная времени;
 τ – запаздывание.

Приведенные к регулирующему входу объекта возмущения были представлены в виде стационарного временного ряда – белого шума с нормальным распределением, заданным математическим ожиданием m_{np} и постоянной дисперсией σ_{np}^2 .

Численные исследования проводили при выполнении следующих условий:

1) значения характеристики динамического ряда приведенных ко входу возмущений находились в пределах: $1 \leq \sigma_{np} \leq 10$. Значение параметра σ_{np} меняли с шагом $\Delta\sigma_{np} = 1$;

2) диапазон изменения характеристик объекта: $1 \leq T \leq 500$, с шагом дискретизации ΔT , $1 \leq k \leq 10$, с шагом дискретизации $\Delta k = 1$;

3) интервал моделирования $I = 25000$ с.

Для численных исследований использовали следующее выражение для расчета дисперсии выходной переменной объекта

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [y(i) - \bar{y}]^2, \quad (5)$$

где N – интервал моделирования;
 $\bar{y}$ – среднее значение выходной переменной.

Исследование проводили в два этапа по аналогии с [7]. На первом оценивали условия (критерий) совместного подобия объектов регулирования, модели которых представлены выражением (4), и приведенных к регулируемому входу возмущений.

В процессе исследований определяли совокупность соотношений, при которых выполняется условие совместного подобия (1). Для исследования совместного подобия модельных объектов (4) и возмущений в виде белого шума были проведены эксперименты с различными значениями параметров объекта и характеристик приведенных возмущений.

Полученные результаты исследования совместного подобия объектов и приведенных возмущений можно представить в виде следующих соотношений

$$\left\{ \begin{array}{l} |k_l \sigma_{np_l} - k_j \sigma_{np_j}| \leq 0,05, \\ |T_l - T_j| \leq 0,05, \\ \left| \frac{\tau_l}{T_l} - \frac{\tau_j}{T_j} \right| \leq 0,05. \end{array} \right. \quad (6)$$

Для модели объекта (4) и возмущения в виде стационарного динамического ряда с экспоненциально спадающей автокорреляционной функцией (АКФ)

$$r_{np}(\theta) = \sigma_{np}^2 \cdot e^{-\alpha|\theta|}, \quad (7)$$

где θ – время сдвига между сечениями ряда приведенных возмущений;
 σ_{np}^2 – дисперсия приведенного возмущения;
 α – коэффициент АКФ,

были получены следующие условия совместного подобия объектов и воздействий [7]

$$\left\{ \begin{array}{l} |k_l \sigma_{np_l} - k_j \sigma_{np_j}| \leq 0,05, \\ |T_l \alpha_l - T_j \alpha_j| \leq 0,05, \\ \left| \frac{\tau_l}{T_l} - \frac{\tau_j}{T_j} \right| \leq 0,05. \end{array} \right. \quad (8)$$

Совместное подобие модельных объектов (4) и приведенных возмущений в виде белого шума оказывается возможным в случаях одинаковой динамики каналов преобразования и выполнения условий приближенного равенства произведений коэффициента передачи на среднеквадратическое отклонение (СКО) приведенных возмущений. В то время как для других типов возмущений, в частности с экспоненциальным спадом АКФ, кроме СКО на совместное подобие оказывает влияние еще и показатели АКФ приведенного возмущения.

Второй этап исследования проводили по следующей схеме. Было отобрано множество подобных систем автоматического регулирования (САР), в которых объект регулирования был представлен моделью (4), приведенные к регулирующему входу возмущения – в виде белого шума с нормальным распределением, заданным математическим ожиданием m_{np} и постоянной дисперсией σ_{np}^2 . Структура САР представлена на рисунке 2.

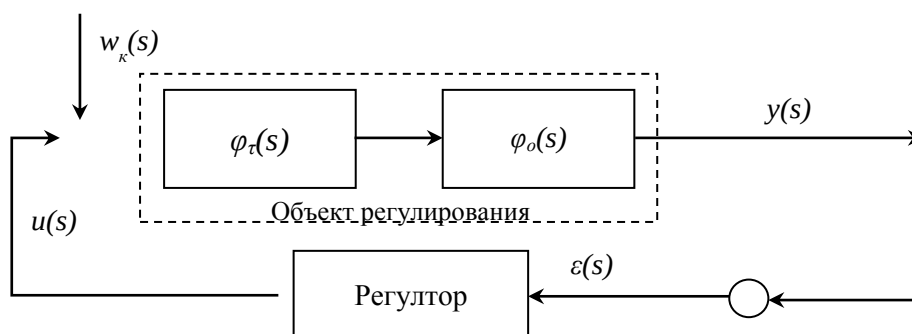


Рисунок 2 – Структура САР по отклонению

На схеме приняты следующие обозначения: $u(s)$ – регулирующее воздействие, $w_k(s)$ – приведенные ко входу объекта контролируемые возмущения, $y(s)$ – выходное воздействие, $y^*(s)$ – задающее воздействие, $\varepsilon(s)$ – ошибка регулирования, $\varphi_\tau(s)$ – оператор звена запаздывания, $\varphi_o(s)$ – оператор канала преобразования объекта управления без запаздывания.

Закон регулирования для модели объекта (4)

$$f_{ПИ}(s) = k_{II} + \frac{k_I}{s}; \quad (9)$$

$$k_{II} = \frac{T}{k \cdot \tau}, \quad k_{II} = \frac{k_{II}}{T}, \quad (10)$$

где k_{II} и k_I – коэффициенты при пропорциональной и интегральной части регулятора [9].

Среднеквадратичный критерий точности регулирования

$$q = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [y^*(i) - y(i)]^2, \quad (11)$$

где N – интервал моделирования.

Приближенное равенство целевых критериев эффективности подобных САР выражается соотношением

$$|q_j^n - q_l^n| \leq 0,05; \quad j \neq l; \quad j, l = \overline{1, L}, \quad (12)$$

где j, l – номер САР;

L – количество САР;

надстрочный индекс «н» означает нормированное значение.

Условия подобия САР исследованной структуры

$$\left\{ \begin{array}{l} |k_l \sigma_{np_l} - k_j \sigma_{np_j}| \leq 0,05, \\ \left| \frac{\tau_l}{T_l} - \frac{\tau_j}{T_j} \right| \leq 0,05, \\ k_{\Pi_j} = \frac{k_l \tau_l T_j}{k_j \tau_j T_l} k_{\Pi_l}, \\ k_{\Pi_j} = \frac{k_l \tau_l}{k_j \tau_j} k_{\Pi_l}; \end{array} \right. \quad (13)$$

Для каждой САР, входящей в это множество, проверяли в соответствии с выражениями (6) совместное подобие объектов регулирования и приведенных возмущений. Классифицировали САР по признаку выполнения и не выполнения условия (6) совместного подобия объектов и воздействий. Для каждой системы фиксировали значения параметров модели k , T , τ , приведенных возмущений σ_{np}^2 , а также нормированные значения среднеквадратических критериев точности регулирования q_j и q_l и нормированных значений дисперсий $\sigma_{yl}^{H^2}$ и $\sigma_{yj}^{H^2}$ выходных переменных объектов управления.

Численные исследования были проведены в отмеченных выше диапазонах условий моделирования.

Для подобных САР, определяемых соотношением (13), совместное подобие объектов и воздействий выполняется лишь при соблюдении дополнительного условия, связанного с приближенным равенством значений постоянных времени объектов.

Библиографический список

1. Исследование систем управления с применением физических моделей / Евтушенко В.Ф., Мышляев Л.П., Ивушкин К.А., Макаров Г.В., Буркова Е.В. // Труды Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве, AS'2015». – Новокузнецк: СибГИУ, 2015. – С.159-165.
2. Применение физических моделей в задачах испытания и настройки систем управления (на примере установки сжигания водоугольного топлива) / Л.П. Мышляев, А.А. Ивушкин, В.Ф. Евтушенко, В.Н. Бурков, Г.В. Макаров, Е.В. Буркова // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сборник научных статей Международной конференции. – Новокузнецк: СибГИУ, 2015. – Т.2 – С.211–218.
3. Понятия и условия подобия систем управления / Л.П. Мышляев, В.Ф. Евтушенко, Д.Г. Березин, Г.В. Макаров, К.А. Ивушкин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2012, №12, – С. 58-60.
4. Исследования совместного подобия объектов управления и внешних воздействий / Евтушенко В.Ф., Ивушкин К.А., Мышляев Л.П., Макаров Г.В., Буркова Е.В. // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сборник научных статей Международной конференции. – Новокузнецк: СибГИУ, 2014. – Т.1. – С.195-201.
5. Исследования совместного влияния свойств возмущений и динамики объектов на эффективность системы регулирования (на примере установки сжигания водоугольного топлива) / Евтушенко В.Ф., Макаров Г.В., Мышляев Л.П., Ивушкин К.А. Буркова Е.В. // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов: Сборник научных статей. – Новокузнецк, 2013. – С. 189-193.
6. Буркова Е.В. Исследования совместного влияния свойств возмущений и динамических характеристик объекта на качество регулирования системы. / Буркова Е.В., Ма-

каров Г.В. // Сборник научных трудов международного форума-конкурса молодых ученых «Проблемы недропользования». – Санкт-Петербург, 2013. – С. 274.

7. Буркова Е.В. Оценивание совместного подобия объектов и воздействий в подобных системах управления / Е.В. Буркова, В.Ф. Евтушенко, А.В. Бурлаченко // Труды Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве, AS'2015». – Новокузнецк: СибГИУ, 2015. – С.501-504.

8. Барковский В.В. Методы синтеза систем управления / В.В. Барковский, В.Н. Захаров, А.С. Шаталов. – М.: Машиностроение, 1969. – 385 с.

9. Ротач В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.

УДК 004.942:622.33

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОНОСНОГО ГЕОМАССИВА

Цветков А.Б., Павлова Л.Д.

Сибирский государственный индустриальный университет
г. Россия, Новокузнецк, atsvet@mail.ru

Аннотация. Для анализа результатов численного моделирования геомеханического состояния угленосного массива, поле напряжений которого формируется под воздействием природных и техногенных факторов разработан программный комплекс в системе символьной математики. Функциональное назначение комплекса программ основано на обобщенной нелинейной математической модели. На комплекс программ получено регистрационное свидетельство, которое подтверждает его новизну и приоритетность.

Ключевые слова: вычислительный эксперимент, геомассив, комплекс программ, математическая модель, напряженно-деформированное состояние, численное моделирование.

Abstract. To ensure analysis of the results of numerical modeling of geomechanical state coal rock mass, the stress field is formed under the influence of natural and technogenic factors developed software complex system of symbolic mathematics. The functional purpose of complex programs based on generalized nonlinear mathematical model. On the set of programs received a registration certificate, which confirms its novelty and priority.

Keywords: computational experiment, geomassiv, complex programs, mathematical model, the stress-deformed state, numerical modeling.

Для обеспечения безопасности угледобычи необходимо прогнозирование предаварийных ситуаций посредством системного анализа результатов численного моделирования геомеханического состояния угленосного массива, поле напряжений которого формируется под воздействием природных и техногенных факторов. В этой связи актуальной является разработка нелинейной модели и программного обеспечения для исследования параметров напряженно-деформированного состояния газоносного угленосного массива.

Для изучения совокупного кооперативного эффекта совместного воздействия внутреннего давления газа, гравитационных и геотектонических сил на напряженно-деформированное состояние газоносного геомассива, описываемого нелинейными уравнениями, разработан комплекс проблемно-ориентированных программ [1,2].

Программный комплекс реализует численное решение системы разрешающих уравнений методом конечных элементов в командах символьной математики [2] и позволяет выполнять все этапы вычислительного эксперимента с помощью разработанных модулей: «Препроцессор», «Расчетный модуль» и «Постпроцессор» (рисунок 1).

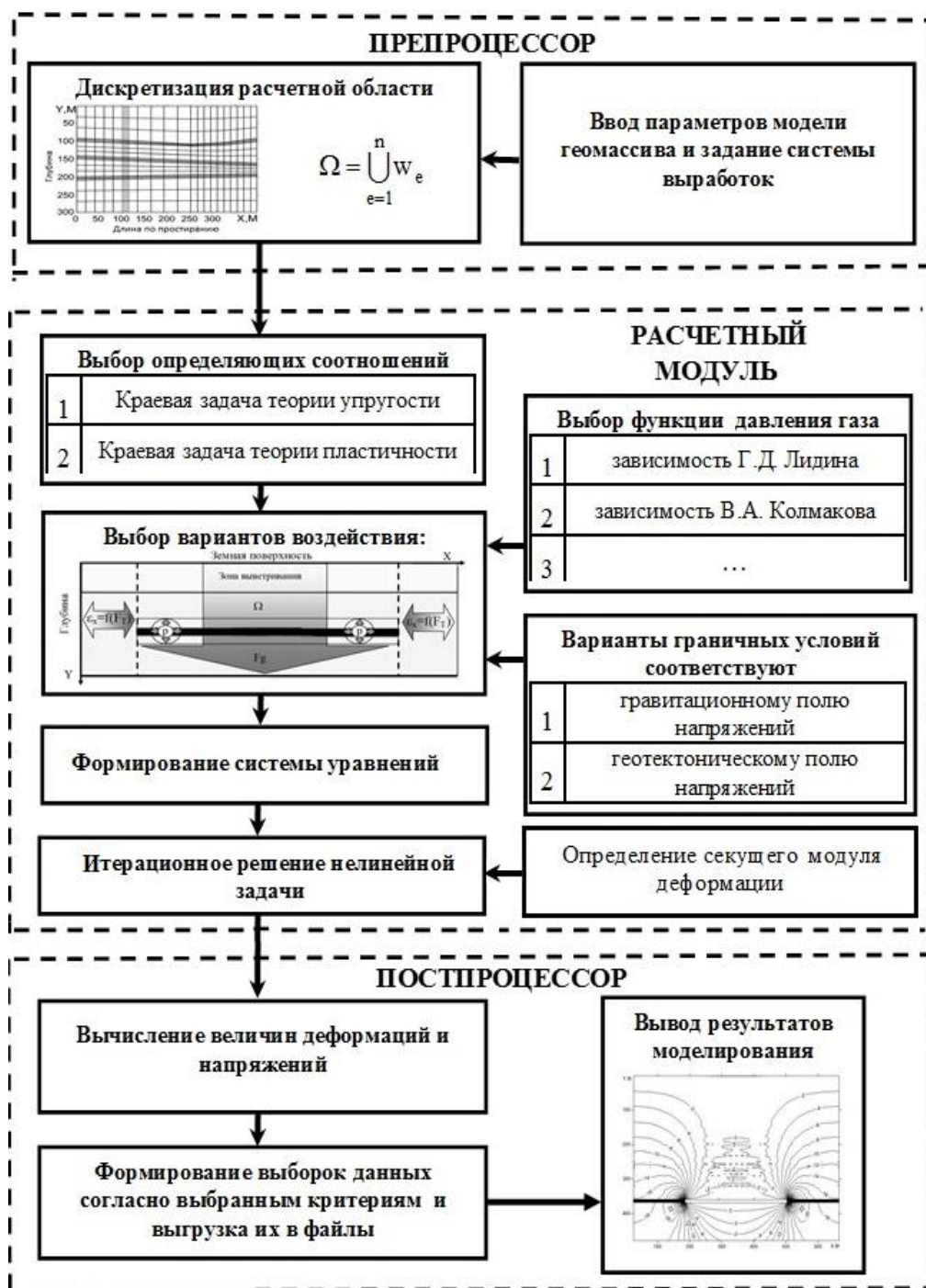


Рисунок 1 – Структура разработанного комплекса программ

Вычислительный эксперимент выполняется на основе разработанного программного комплекса в несколько этапов. Для реализации первого этапа разработан препроцессор, который позволяет выполнять дискретизацию расчетной области с использованием исходных данных о геометрических параметрах геомассива, свойствах породных слоев и угольных пластов. В результате его работы формируется конечно-элементная модель, представленная файлами, содержащими координаты узлов и соответствующие конечным элементам физико-механические свойства, которые являются входными данными для расчетного модуля. В препроцессоре также предусмотрена возможность загрузки исходных данных из внешних приложений.

Для реализации следующего этапа разработан расчетный модуль, который после выбора пользователем определяющих соотношений (линейная или нелинейная модель),

граничных условий и функции давления газа, производит сведение математической модели к дискретной посредством аналитических преобразований функциональных зависимостей.

Полученная дискретная модель представляет собой систему уравнений в алгебраической форме, для решения которой применяются разработанный алгоритм определения текущего модуля деформации. В результате работы расчетного модуля формируется массив узловых перемещений.

На завершающем этапе для обработки результатов вычислительного эксперимента разработан постпроцессор, который позволяет вычислять по найденным перемещениям величины деформаций и напряжений. Результаты вычислительного эксперимента могут выгружаться в файлы или, при необходимости, предусмотрена возможность средствами пакета построить графики.

Функциональное назначение комплекса проблемно-ориентированных программ основано на обобщенной нелинейной математической модели [3], которая позволяет строить семейство математических моделей для изучения геомеханического состояния массива при воздействии гравитационных, геотектонических сил и внутреннего давления газа.

Комплекс программ может применяться для решения задач математического моделирования, связанных с:

- разработкой математических моделей напряженно-деформированного состояния углепородного массива для изучения кооперативного эффекта совместного воздействия гравитационных, геотектонических сил и внутреннего давления газа;

- проведением вычислительных экспериментов для оценки геомеханического состояния в окрестности очистного выработанного пространства с учетом законов деформирования пород в зонах влияния горной выработки;

- определением области газового коллектора в геомассиве с системой выработок и вычислением объема, поступающего в выработанное пространство метана;

- прогнозированием предаварийных ситуаций при подземной угледобыче.

Рекомендуемые требования к аппаратному и программному обеспечению для установки и функционирования комплекса программ:

- процессор – Intel Core i5;

- оперативная память – 8 Gb;

- свободное место на жестком диске – 10 Gb;

- операционная система – Microsoft Windows 8 и выше;

- пакет символьной математики – Mathematica 8;

- пакет для запуска программ на других компьютерах, написанных в пакете Mathematica – Wolfram CDF Player Pro.

Результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния в окрестности очистной выработки с использованием разработанного комплекса программ приведены на рисунке 2. Сплошными изолиниями показаны результаты вычисления горизонтальных напряжений, полученных при совместном воздействии гравитационных и геотектонических сил, а пунктирными – гравитационных, геотектонических сил и давления газа (знак минус соответствует сжимающим напряжениям).

Из анализа рисунка 2 следует, что распределение горизонтальных напряжений в окрестности очистной выработки не зависит от давления газа вследствие дегазации пород в ее окрестности. По мере удаления от очистной выработки воздействие внутреннего давления газа в пластах приводит к увеличению горизонтальных сжимающих напряжений в их окрестности.

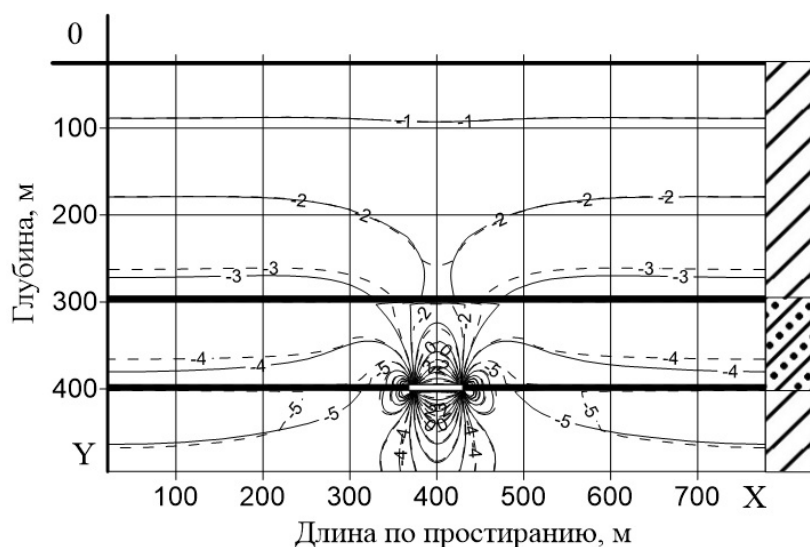


Рисунок 2 – Изолинии распределения горизонтальных напряжений, вызванные совместным воздействием гравитационных, геотектонических сил и давления газа в зоне влияния очистной выработки, МПа

Разработка комплекса программ поддержана грантом СибГИУ №2Д-14 «Разработка математической модели нелинейного деформирования пород и комплекса программ для численного моделирования геомеханического состояния газоносного геомассива». На комплекс программ получено регистрационное свидетельство, которое подтверждает его новизну и приоритетность [4].

Таким образом, разработан комплекс проблемно-ориентированных программ, который позволяет исследовать математические модели напряженно-деформированного состояния газоносного углепородного массива, подверженного совместному воздействию геофизических сил в условиях различной сопротивляемости пород растяжению и сжатию.

Библиографический список

1. Цветков А.Б. Численное моделирование проявлений совместного воздействия гравитационных и геотектонических сил / А.Б. Цветков, Л.Д. Павлова // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сборник научных статей. – Новокузнецк, 2014. – С. 110 – 113.
2. Цветков А.Б. Адаптация алгоритма метода конечных элементов к системе символьной математики / А.Б. Цветков, Л.Д. Павлова // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сборник научных статей. – Новокузнецк, 2015. – С. 121-125.
3. Цветков А.Б. Нелинейная математическая модель геомеханического состояния углепородного массива / А.Б. Цветков, Л.Д. Павлова, В.Н. Фрянов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 1. – С. 365–370
4. Цветков А.Б. Пакет программ NDSolver V1.0 для математического моделирования напряженно-деформированного состояния газоносного геомассива. Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 19867 от 10.01.2014 – Объединенный фонд электронных ресурсов «Наука и образование».

Секция 2. Моделирование и наукоемкие информационные технологии в металлургии, добыче сырья и обогащении

ТЕХНОЛОГИЯ И ПРОГРАММНЫЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ИНФОРМАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩИХ СИСТЕМ ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ОАО «ММК»*

Лавров В.В.¹, Спирин Н.А.¹, Бурыкин А.А.¹, Рыболовлев В.Ю.²,
Истомин А.С.¹, Гурин И.А.¹, Бякова М.В.¹

¹ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
г. Екатеринбург, Россия, v.v.lavrov@urfu.ru

²ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»
г. Магнитогорск, Россия

Аннотация. Рассмотрены требования, структура и архитектура АРМ «Технолог доменного цеха», компьютерной системы поддержки принятия решений MES-уровня, внедренной в АСУП доменного производства ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Представлено краткое описание основных модельных подсистем, а также допущения, принятые в процессе математического моделирования. Использование разработанной системы позволяет инженерно-технологическому персоналу оперативно проводить анализ производственных ситуаций доменного цеха, решать ряд технологических задач по управлению тепловым, газодинамическим и шлаковым режимами доменной плавки, а также расчет оптимального состава доменной шихты, что в конечном итоге обеспечивает повышение технико-экономических показателей работы доменного производства.

Ключевые слова: доменное производство, автоматизированная система управления производством, MES-система, анализ производственных ситуаций, решение технологических задач.

Abstract. Requirements, structure and architecture of an automated workplace «The technologist of domain shop», computer system of support of decision-making of the MES-level, introduced in АСУП blast furnace plant OJSC «Magnitogorsk Iron and Steel Work» are considered. The short description of the basic modelling subsystems, and also the assumptions accepted in the course of mathematical modelling is presented. Use of the developed system allows engineering-technological to the personnel to carry out operatively the analysis of industrial situations of domain shop, to decide a number of technological problems on management thermal, gas dynamic and slag modes of domain fusion, and also calculation of optimum structure iron-ore materials, that finally provides increase of technical and economic indicators of work of domain manufacture.

Keywords: blast furnace production, automated process control system for blast furnaces, MES-system, the analysis of industrial situations, the decision of technological problems.

Современная тенденция развития науки и техники характеризуется развитием, внедрением и широким использованием компьютерных систем поддержки принятия решений в АСУП, в основу которых положены методы математического моделирования [1–5]. Роль алгоритмов и компьютерных программ для решения комплекса технологических задач в области металлургии MES-уровня (Manufacturing Execution Systems – системы управления технологией, производственными процессами) современных автоматизированных информационных систем крупнейших металлургических предприятий России в настоящее время становится все более очевидной [1; 2].

Это определяет потребность в разработке информационно-моделирующих систем, основу которых составляет комплекс математических моделей, учитывающих как физику процесса, основы теории тепло- и массообмена, законы сохранения энергии, так и особенности влияния технологических и стандартных характеристик сырья на показатели производственного процесса. Особое место в этом комплексе технологических операций

* Работа выполнена при финансовой поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.А03.21.0006.

The work was supported by Act 211 Government of the Russian Federation, contract № 02.А03.21.0006

получения металлопродукции отводится доменному переделу как самому энергоёмкому и сложному, на долю которого приходится до 50 % топлива, используемого в чёрной металлургии.

В докладе отражены результаты создания и внедрения автоматизированной системы анализа и прогнозирования производственных ситуаций доменного цеха на ОАО «ММК».

Построение системы основано с учетом следующих требований:

1) система должна решать комплекс взаимосвязанных технологических задач. Инженерно-технологический персонал доменного цеха с помощью программного комплекса должен иметь возможность оперативно производить анализ работы металлургических агрегатов, оценивать текущее состояние хода технологического процесса, производить изучение и анализ наметившихся отклонений ключевых показателей, выявлять причины, повлёкшие эти отклонения и разрабатывать мероприятия по повышению эффективности металлургического производства;

2) обязательным требованием к системе является обеспечение простоты и лёгкости её использования, поскольку большинство пользователей являются не специалистами в области информационных технологий и моделирования доменного процесса;

3) непосредственную работу с системой осуществляют специалисты различных служб комбината, каждый из которых решает свои производственные задачи. В этой связи обязательным условием является наличие в системе модуля администрирования, разделения прав и категорий пользователей;

4) для выполнения заложенных функций система взаимодействует с другими информационными системами комбината (АСУ ТП, КИС). Поэтому реализованы возможность автоматического наполнения данными и передачи данных между подсистемами, а также средства её интеграции в корпоративную сеть предприятия;

5) в процессе эксплуатации системы предполагается её непрерывное развитие (добавление новых показателей в отчёты, возможность их сопоставления, уточнение моделей и настройка их параметров на условия работы топливно-сырьевой базы комбината и пр.).

На основе вышеназванных принципов разработана структура системы, представленная на рисунке 1. Основными подсистемами являются:

– «Сбор и хранение данных», основной функцией которой является заполнение базы данных фактическими отчётными производственными показателями работы доменного производства;

– «Визуализация среднесменных и среднесуточных данных о работе доменных печей», которая обеспечивает построение графических трендов по выбранным пользователем параметрам в любой комбинации за указанный временной период;

– «Формирование технического отчёта о работе доменных печей и цеха», предназначенная для формирования технического отчёта о работе печей и цеха в целом за заданные периоды работы печей и цеха;

– «Сопоставление отчётных показателей работы доменных печей и цеха», которая обеспечивает возможность сравнения показателей работы цеха или печи по комплексу выбранных параметров за заданный временной период;

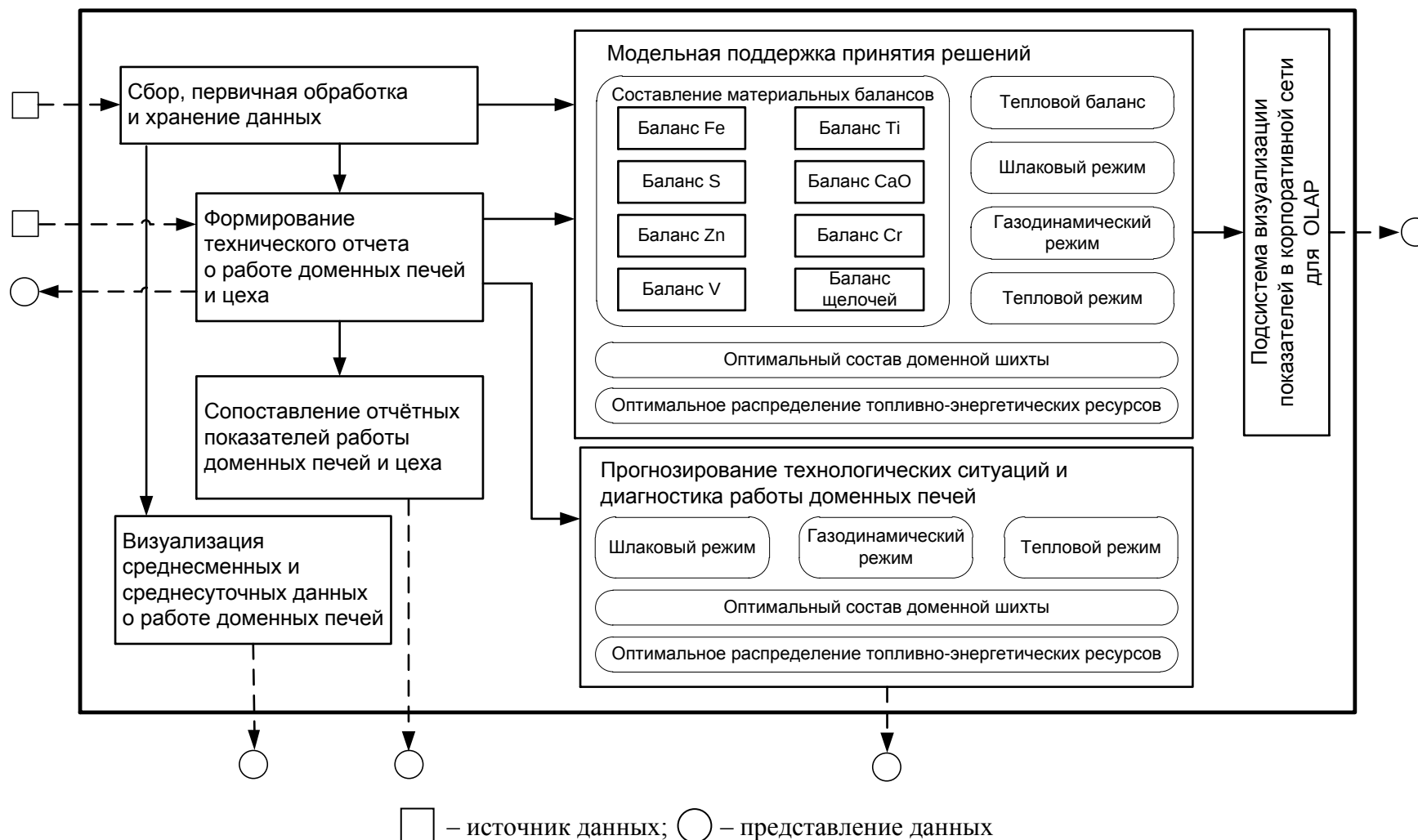


Рисунок 1 – Структура АИС анализа и прогнозирования производственных ситуаций доменного цеха

– «Модельная поддержка принятия решений, прогнозирование технологических ситуаций и диагностика работы доменных печей». В основу реализации подсистемы положены алгоритмы расчёта с использованием математических моделей доменного процесса для выбранного пользователем периода работы отдельных печей или цеха в целом [1; 2]. Анализ доменного процесса позволяет констатировать, что эта подсистема должна включать следующие взаимосвязанные подсистемы более низкого уровня декомпозиции: составление материальных балансов и теплового баланса доменной плавки; шлакового режима; газодинамического режима; теплового режима; оптимального распределения топливно-энергетических ресурсов; оптимального выбора состава доменной шихты, а также диагностики хода доменной плавки. Каждая из этих подсистем взаимодействует с другими блоками параметров, подсистемами и внешней средой;

– «Визуализация показателей работы доменного производства для OLAP» обеспечивает уполномоченным пользователям доступ ко всей отчётной информации по доменному производству в корпоративной сети предприятия.

Разработка системы выполнена на основе принципов модульного программирования с учётом современных технологий и средств программной реализации.

В частности, применен Agile-метод, гибкая методология разработки программного обеспечения, ориентированная на использование интерактивной разработки, динамическое формирование требований и обеспечение их реализации в результате постоянного взаимодействия с заказчиками (пользователями) системы. Для управления отдельными задачами (подзадачами) в ходе разработки использована система JIRA.

В ходе проектирования системы потребовалась детальная проработка функциональности отдельных подсистем. С этой целью разработана обобщённая функциональная модель, в основу которой положены идеи и нотации методики структурного анализа и проектирования IDEF0 [6]. Реализация выполнена в программе AllFusion Process Modeler (BPwin). Использование этой методики позволило создать функциональные блоки отдельных подсистем, выявить производимые ими действия и связи между этими действиями, управляющие воздействия и механизмы выполнения каждой функции. Общее количество декомпозированных блоков функциональной модели АИС АППС ДЦ составляет 152. Декомпозиция модели выполнена до третьего уровня включительно.

На основе анализа требований технологического персонала, нормативно-справочной информации доменного производства, функционального моделирования разработано математическое и алгоритмическое обеспечение, которое положено в основу программной реализации подсистемы отображения данных о работе отдельных доменных печей и цеха в целом. Структурный системный анализ и проектирование блоков математических моделей выполнены на основе процедурно-ориентированного подхода. Основой данного подхода является использование диаграмм потоков данных (DFD, Data Flow Diagrams) – информационной модели, основными компонентами которой являются потоки данных, переносящие информацию от одного модуля к другому [6]. Нотация метода DFD предполагает разбиение математической модели на отдельные функциональные компоненты (процессы) и представление их в виде сети, связанной потоками данных.

Программная реализация информационно-моделирующего комплекса «Автоматизированное рабочее место технолога доменного цеха» выполнена в среде Microsoft Visual Studio (язык программирования C#) [7]. Согласно подходу Agile-метода [8], реализация функциональных возможностей системы проводилась постепенно, в различных версиях программного обеспечения и в соответствии с приоритетными требованиями пользователей. Контроль и управление версиями осуществлялось на платформе Bitbucket.

На рисунке 2 продемонстрирована архитектура программного обеспечения комплекса, в которой выделены основные компоненты. Центральным звеном является структура хранения данных [9], которая формируется на сервере базы данных информационно-вычислительного центра доменного производства (ИБЦ ДЦ). Источниками ее наполнения являются аппаратно-программное обеспечение АСУ доменного цеха, корпоративной

информационной системы (КИС) и центральной диспетчерской комбината (ЦДК). В зависимости от требований отдельных подсистем возможно реализовать различные периоды усреднения данных в базе с помощью механизмов СУБД.

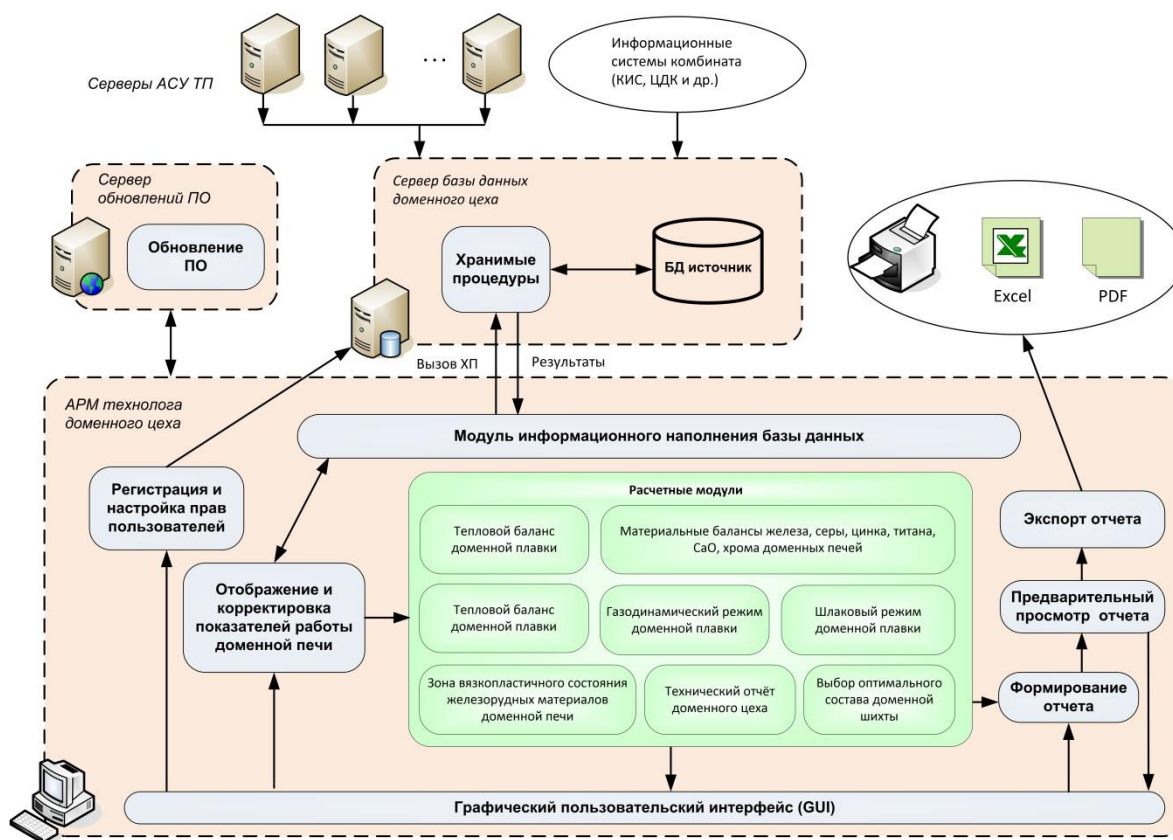


Рисунок 2 – Архитектура программного комплекса «Автоматизированное рабочее место технолога доменного цеха»

Представленная на рисунке 2 архитектура обеспечивает заданную функциональность, выполнение требований предметной области, относительно простое расширение и изменение системы, возможность автономной реализации отдельных программных модулей и их независимость от структуры хранения данных. Перечень расчетных программных модулей:

- «Тепловой баланс доменной плавки» производит автоматический расчет и отображение приходных и расходных статей теплового баланса доменной плавки на основе среднемесячных отчетных данных о работе доменного цеха за указанный пользователем период;

- «Материальные балансы железа, серы, цинка, титана, СаО, хрома доменных печей» осуществляет автоматический расчет и отображение материальных балансов железа, серы, цинка, титана, СаО, хрома доменных печей на основе среднемесячных отчетных данных о работе доменного цеха за указанный пользователем период;

- «Газодинамический режим доменной плавки» производит автоматический расчет и отображение показателей газодинамического режима доменной плавки на основе среднемесячных отчетных данных о работе доменного цеха за указанный пользователем период;

- «Шлаковый режим доменной плавки» выполняет автоматический расчет и отображение показателей шлакового режима доменной плавки на основе среднемесячных отчетных данных о работе доменного цеха за указанный пользователем период;

– «Выбор оптимального состава доменной шихты» позволяет решать технологические задачи выбора оптимального состава доменной шихты на основе среднемесячных отчетных данных о работе доменного цеха за указанный пользователем период;

– «Зона вязкопластичного состояния железорудных материалов доменной печи» осуществляет автоматический расчет и отображение показателей, характеризующих форму и положение зоны вязкопластичного состояния железорудных материалов доменной печи на основе среднемесячных отчетных данных о работе доменного цеха за указанный пользователем период;

– «Технический отчет доменного цеха» производит отображение показателей технического отчета доменного цеха за календарный месяц, а также с начала года до указанного пользователем месяца.

Программное обеспечение предназначено для инженерно-технологического персонала, входит в состав автоматизированной информационной системы анализа и прогнозирования доменного цеха ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Интегрированный программный комплекс выполнен в виде отдельного клиентского приложения, установленного на компьютер пользователя путем инсталляции загрузочного файла. Исходными данными для работы являются среднемесячные отчетные данные о работе доменного цеха. При этом программа осуществляет автоматическое извлечение среднемесячных отчетных показателей о работе доменных печей и цеха за указанный пользователем период работы и расчет комплекса параметров, характеризующих технологические режимы доменной плавки. В качестве источника отчетных данных выступает централизованная база данных АСУ доменного цеха. Комплекс имеет широкий выбор интерактивных настроек для удобства восприятия и минимизации рутинных действий пользователя. Результаты модельных отчетов представляются в табличной и графической пользовательских формах, предусмотрено формирование отчета с возможностью его предварительного просмотра и экспорта в другие форматы.

После регистрации пользователя в программе и загрузки главной формы на экране будут отражены отчетные данные для базового (фактического отчетного за календарный месяц) периода работы доменной печи, которые автоматически считываются из базы данных центра АСУ «ММК» за календарный месяц. Отображение данных на главной форме возможно для двух периодов: базового и сравнительного. Сравнительный период служит для сопоставления фактических отчетных показателей работы доменной печи с аналогичными показателями в базовом периоде за календарный месяц.

Для удобства быстрого восприятия технологической ситуации и тенденций изменения отчетных показателей работы доменной печи в базовом и сравнительном периодах пользователю предоставлена возможность отображения данных по отдельным категориям: «Режимные параметры»; «Конструктивные размеры печи»; «Характеристика кокса»; «Параметры и расход шихты»; «Дутьевые параметры»; «Колошниковый газ»; «Жидкие продукты плавки: чугун»; «Жидкие продукты плавки: шлак»; «Тепловой баланс»; «Баланс Fe»; «Баланс S»; «Баланс Zn»; «Баланс Ti»; «Баланс CaO»; «Баланс Cr»; «Первичный шлак»; «Конечный шлак»; «Газодинамика». После загрузки сравнительного периода пользователь с помощью кнопки «Сопоставить» может увидеть отклонения всех величин в сравнительном периоде от соответствующих показателей базового периода (рисунок 3).

АРМ «Технолог доменного цеха» помимо предоставления данных для текущего анализа отчетных показателей и оценки производственных ситуаций позволяет решать также ряд технологических задач по управлению тепловым, газодинамическим и шлаковым режимами доменной плавки, а также расчет оптимального состава доменной шихты.

В результате с использованием современной технологии разработки и программных инструментальных средств [6–9] создана и внедрена в опытно-промышленную эксплуатацию система анализа и прогнозирования производственных ситуаций доменного цеха ОАО «ММК», которая предоставляет в распоряжение инженерно-технологического

персонала современный инструмент оперативного анализа отчётных показателей работы [10; 11]. Использование разработанной системы позволяет инженерно-технологического персоналу оперативно проводить анализ производственных ситуаций доменного цеха, решать задачи управления технологией доменной плавки, что в конечном итоге обеспечивает повышение технико-экономических показателей работы доменного производства.

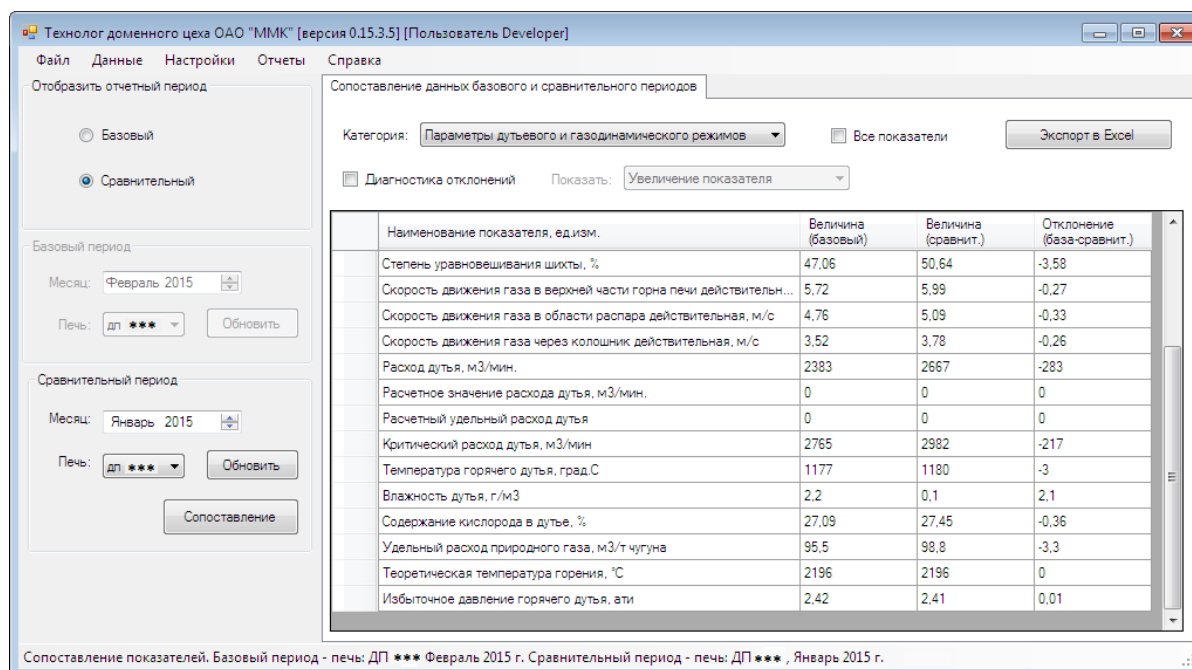


Рисунок 3 – Отображение сопоставления показателей базового и сравнительного периодов на форме АРМ «Технолог доменного цеха»

Библиографический список

1. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки металлургии / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев [и др.]; под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 462 с.
2. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О.П.Онорин, Н.А.Спирин, В.Л. Терентьев [и др.]; под ред. Н. А. Спирина. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. – 301 с.
3. Feng Q., Wang L. Blast furnace hoist charging control system based on ActiveX technology // WIT Transactions on Information and Communication Technologies; Wuhan; China; 7 May 2013 through 8 May 2013. Vol. 46 V.2, 2014. P. 1853–1858.
4. Dimitrov B.H., Nenov H.B., Marinov A.S. Comparative analysis between methodologies and their software realizations applied to modeling and simulation of industrial thermal processes // 36th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, MIPRO 2013; Opatija; Croatia; 20 May 2013 through 24 May 2013. Article number 6596383. P. 891–895.
5. New process-control computer-system for the blast-furnace plant of an integrated iron and steel works / Bartels R., Dohl Kw., Uhde H., Schroder A., Stumpe W. // Stahl Und Eisen. 1994. Vol. 114. Issue 6. P. 75–79.
6. Одинцов И.О. Профессиональное программирование. Системный подход. 2-е изд. перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 624 с.
7. Троелсен Э. Язык программирования C# 5.0 и платформа .NET 4.5. 6-е изд. – М.: Вильямс, 2013. – 1311 с.

8. Agile! Прекрасный, ужасный, шумный / Бертран Мейер; пер. с англ. и ред. В. Биллига. – Москва, Тверь: НАУ «ИНТУИТ» – ЗАО НИИ ЦПС, 2015. – 248 с.
9. Дейт К. Дж. Введение в системы баз данных. 8-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – 1328 с.
10. Complex of model systems for supporting decisions made in managing blast-furnace smelting technology / Spirin N. A., Lavrov V. V., Burykin A. A., Rybolovlev V. Yu., Krasnobaev A. V., Kosachenko I. E. Metallurgist, 2011, Vol. 54, No. 9–10. P. 566–569.
11. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП: учебное пособие / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев [и др.]; под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – 558 с.

УДК 669.187.25

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ В ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ НАУКОЕМКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Дорофеев Г.А., Янтовский П.Р., Степанов Я.М., Барсукова Е.Ю.

Группа компаний «Ферро-Технолоджи»
г. Тула, Россия, sintikom@mail.ru

Аннотация. Выполнен анализ перспектив использования синтетических композиционных материалов на основе системы Fe-O-C в электродуговых печах. Показано, что объединение в одно целое компонентов, применяемых обычно в свободном виде, существенно изменяет их металлургические свойства и повышает их эффективность. Это открывает возможность полной утилизации железосодержащих отходов и создаёт предпосылки для более широкого применения в электропечах железорудного сырья природного происхождения.

Ключевые слова: синтетические композиционные материалы, электродуговая печь, синтиком, брикеты.

Abstract. Performed an analysis of prospects for using of synthetic composite materials which based on the system Fe-O-C in electric arc furnaces. Shown that integrating of components in the whole, which used usually separately in free form significantly changes its properties and increases efficiency. It opens up possibilities for full utilization of iron-containing wastes and creates the preconditions for a wider using of iron-ore raw natural origin in electric arc furnace.

Keywords: synthetic composite materials, electric arc furnace, synticom, briquettes

Резервы дальнейшего совершенствования конструкций печей и технологии выплавки стали в электропечах на базе существующих подходов близки к пределу. С этих позиций можно ожидать усиления внимания к применению предварительно подготовленных материалов, наделенных высокими технологическими возможностями и способных взять на себя решение целого ряда функциональных обязанностей, лежащих в настоящее время на конструкциях сталеплавильных агрегатов и технологии выплавки. Одним из потенциальных резервов дальнейшего совершенствования технологии выплавки стали является применение новых синтетических композиционных материалов, изготавливаемых из техногенного и природного сырья [1 – 4]. Данные материалы разработаны в России и получили название и товарный знак «синтиком» [2, 4].

Наибольший интерес среди них для сталеплавильного производства представляют железо- и углеродсодержащие компоненты, охватывающие базовые для металлургии элементы Fe – C – O. Указанные компоненты включают в себя вторичные отходы металлургического производства, в том числе окалину, шламы, плавильную пыль, коксовую мелочь, а также материалы природного происхождения, в частности рудную мелочь, отсев мелочи агломерата, окисленных окатышей и железа прямого восстановления, железорудные концентраты и их смеси. Особую роль в производстве материала типа синтиком

занимает жидкий перепелый чугун, используемый для получения особого вида синтика с металлической основой [2, 4].

Соответственно этому можно выделить три основные разновидности синтика: композита с литой основой из перепелого чугуна и твердого окислителя, распределенного в объеме чугуна; композита с дисперсной основой, состоящего в базовом варианте из смеси железорудных окислителей различного типа и науглероживателя; композита промежуточного состава, включающего в себя одновременно дисперсные частицы окислителя, науглероживателя и железоуглеродистого сплава или железа прямого восстановления. Принцип их получения базируется на объединении в единый монолит методом окускования различных компонентов, используемых при выплавке стали, как правило, по отдельности – в свободном виде [2 – 4].

Синтетические композиционные материалы на основе $Fe - C - O$ имеют одинаковую форму, размеры, массу, физико-химические свойства и относятся к материалам нового поколения, являясь единственным видом металлошихты с заранее программируемыми свойствами. Принципиальной технологической особенностью их является способность к эффективному самоокислению углерода собственным кислородом оксидов железа, заложенных в него на стадии изготовления, и к одновременному восстановлению железа. Благодаря этому синтиком является первым в истории металлургии материалом, обеспечивающим окисление углерода – главной реакции сталеварения, барботажа – перемешивание металла и шлака на протяжении всей плавки в сочетании с карботермическим процессом восстановления железа. Данные материалы значительно расширяют арсенал возможностей управления и регулирования ходом электроплавки.

К настоящему времени отсутствует глубокое понимание сущности физико-химических процессов, протекающих в предварительно подготовленных материалах во время нагрева и плавления. Такое положение справедливо в отношении как синтика на металлургической основе, так и синтика в виде брикетов, содержащих оксиды железа и углеродсодержащие вещества. Между тем это имеет важное значение, поскольку данные материалы кардинально изменяют течение физико-химических процессов в сталеплавильной ванне. Эти материалы благодаря наличию в их составе и окислителя, и восстановителя (соответственно оксидов железа и углерода) обладают двойственной природой, сочетая в себе противоположные качества – окислительный и восстановительный потенциал, который проявляется в ходе плавки.

Окислитель и восстановитель обладают максимальной контрастностью свойств в исходном состоянии, что придает синтику повышенную неравновесность. Чугун представляет собой железо, восстановленное из его оксидов и насыщенное углеродом. Углерод присутствует преимущественно в атомно-дисперсной форме (раствор углерода в железе), а также в виде ультрадисперсных частиц графита (углерод в свободном состоянии). Концентрация углерода в чугуне близка к пределу насыщения при соответствующей температуре и составляет в среднем 4,5 %. По сути чугун – это своеобразное «перевосстановленное железо», в котором предельно высокое содержание железа является своеобразной платой за применение углерода в качестве восстановителя и теплоносителя в доменной печи.

Полной противоположностью чугуну и науглероживателю в синтике являются оксиды железа, составляющие основу твердого окислителя – до 90 – 98 % его общей массы. По составу и назначению твердые окислители находятся на противоположном конце металлургического процесса, продуктом которого является чугун-полуфабрикат для выплавки стали, представляющий собой восстановитель. Еще более противоположными свойствами обладают компоненты в оксидоугольных брикетах, один из которых служит типичным восстановителем (углерод), а другой – типичным окислителем (кислород оксидов железа).

Столь существенные различия твердого чугуна, углеродистого восстановителя и твердого окислителя, объединенных на основе окускования в слитки или брикеты, не мо-

гут не сказаться на поведении этих материалов при превращении в сталь. Такое объединение обеспечивает создание между составляющими компонентами высокоразвитой поверхности реагирования. Последняя на несколько порядков превосходит площадь раздела шлака и металлической ванны, состоящей из жидкого чугуна в конвертере или высокоуглеродистого расплава в электродуговых печах. Эта поверхность в значительной степени определяет кинетику физико-химических реакций в сталеплавильной ванне, в том числе происходящих между углеродом и другими элементами чугуна и кислородом, поступающим в зону реакции. Этот параметр также определяет в целом скорость процессов тепломассопереноса в сталеплавильной ванне, включая реакцию обезуглероживания.

Поверхность реагирования начинает «работать» с момента ввода слитка или брикета в сталеплавильный агрегат, закладывая тем самым основу для ускоренного протекания соответствующих физико-химических реакций на стадии производства стали. Максимальное приближение окислителя к границе с высокоуглеродистым сплавом – чугуном, выполняющим роль металлической основы композита, исключает стадию доставки кислорода. Аналогичное явление наблюдается и в оксидоугольных брикетах, где восстановитель и окислитель смешаны до начала реакции и тем самым подготовлены к реакции между углеродом и кислородом. При нагреве и расплавлении кусков синтикома наблюдается переход чугуна, науглероживателя и окислителя в жидкофазное состояние. Для чугуна температура этого перехода составляет 1200 °С, а для твердого окислителя – 1400 °С, что существенно ниже по сравнению со стальным ломом. В области температур выше 1400 °С кислородный потенциал оксидов железа, составляющих основу твердого окислителя, резко увеличивается и во много раз превосходит соответствующий показатель атмосферы печи и, что особенно важно, чистого газообразного кислорода.

По своей величине кислородный потенциал оксидов железа, выражаемый через упругость диссоциации Fe_2O_3 , достигает $25 \cdot 10^5$ Па (25 атм.) Большая величина этого показателя значительно усиливает химическое сродство кислорода оксидов железа к углероду, имеющемуся в металлической основе синтикома – чугуне и науглероживателе. В результате увеличения вследствие диссоциации Fe_2O_3 объема выделяющихся газов поверхность реагирования возрастает на три порядка, ускоряется взаимодействие углерода и оксидов железа. Удельная скорость восстановления железа из его оксидов при этом на два порядка превышает аналогичный показатель для доменных и шахтных печей, достигая 20 кг/(м³ · с). Скорость окисления углерода в синтикоме с литой основой составляет 0,2 – 0,6 % С/мин. Это отвечает скорости обезуглероживания ванны в кислородных конвертерах, имеющих максимум среди всех сталеплавильных агрегатов. Для синтикома в виде оксидоугольных брикетов скорость окисления углерода достигает значений порядка 5 % С/мин.

Столь кардинального изменения в режиме обезуглероживания не наблюдалось с 1950-х годов, когда был создан и начал развиваться кислородно-конвертерный процесс. В этом процессе скорость окисления углерода возросла на два порядка по сравнению с классическим мартеновским процессом. Это достижение во многом определило ход развития черной металлургии. Можно ожидать, что способность синтикома к формированию нового фронта окисления углерода стали приведет к ее кардинальному изменению. В частности, одним из следствий этого является возможность ведения технологии с непрерывным обезуглероживанием по ходу электроплавки – от начала плавления до выпуска металла. С этих позиций особую роль приобретают высокие газотворные свойства синтикома, основанные на образовании больших количеств монооксида углерода, выполняющего роль донного дутья.

Один из видов синтикома – брикеты окислителя и науглероживателя – прошел апробацию на ряде российских (ОАО «ОМК-Сталь», ОАО «НСММЗ» и др.) и зарубежных заводов. Изготовление и поставка материалов на основе окалины и коксовой мелочи были осуществлены ООО «НПП «Инновационные технологии и материалы» (г. Тула), входящем в ГК «Ферро-Технолоджи». Выполненные исследования показали, что приме-

нение данных материалов обеспечивает повышение выхода железа, образование непосредственно в ДСП жидкого передельного чугуна и снижение расхода на плавку товарного передельного чугуна, имеющего, как правило, повышенную стоимость, утилизацию всех железосодержащих отходов производства в собственных электропечах и улучшение экологических условий, в том числе снижение пылеобразования.

В результате применения технологии выплавки стали с использованием синтикома достигаются:

- прямое получение в ДСП непосредственно из брикетов дополнительного количества железа;
- образование из брикетов по ходу плавки жидкого передельного чугуна, замещающего товарный передельный чугун в шихте;
- сокращение удельного расхода металлошихты и повышение выхода жидкого железа;
- снижение экологической нагрузки за счет полной утилизации всех железосодержащих отходов, включая окалину, пыль газоочисток, дисперсных металлических частиц, извлекаемых из шлама, и др.;
- сокращение образования пыли в процессе плавки;
- повышение насыпной плотности завалки и отказ от подвалки;
- снижение износа футеровки шлакового пояса ДСП.

Выполненный комплекс работ показал, что новые материалы типа синтикома найдут широкое применение при выплавке стали в ДСП. По мере совершенствования состава синтикома, технологии изготовления и энерготехнологических режимов плавки расход материала на плавку может возрасти до 15 – 17 % и более. В результате данные материалы могут стать компонентом шихты – вторым по значению после металлолома.

Применение в электродуговых печах материалов нового поколения, наделенных высоким технологическим потенциалом и дополняющих традиционные виды металлошихты – металлолом, чугун, железо прямого восстановления, кардинально изменяет технологию выплавки стали, расширяя возможности печи и улучшая технико-экономические показатели. На базе проведенных исследований разработана и запатентована новая технология выплавки стали в электродуговых печах, продолжается международное патентование [5]. Дуговая печь получает новый арсенал влияния на ход плавки. Это выражается в формировании нового дополнительного фронта окисления углерода, очагами которого служат сами куски композита и к которым переходит основная регулирующая и управляющая роль, придавая технологии ведения плавки значительно более активный характер по сравнению с существующим уровнем.

Для изготовления синтикома в виде брикетов могут использоваться как вторичное сырье техногенного происхождения, так и природное минеральное сырье, особенно находящееся в дисперсном состоянии, что затрудняет его использование. Это закладывает основу для массового производства и применения разработанных материалов и снижения их себестоимости, а также сводит к минимуму возможные риски производства. Учитывая актуальность задачи совершенствования современного электросталеплавильного производства, ООО «Ферро-Технолоджи» приняло решение о строительстве в России нового производства мощностью 90 – 130 тыс. т синтикома в год и аналогичных предприятий за рубежом.

Подводя итоги выполненного анализа, приходим к выводу, что синтиком в отличие от составляющих его компонентов представляет собой качественно новый материал, обладающий особыми технологическими свойствами, которые отсутствуют в других видах металлошихты, представляющих собой мономатериалы. К ним относится возможность выбора состава материала с учетом специфики сталеплавильного агрегата. Поэтому синтиком может быть отнесен к продуктам хайтек и «умным» материалам.

Заключение

Объединение компонентов техногенного и природного происхождения, обычно применяемых при выплавке стали в раздельном виде, в единое целое – окускованный материал – существенно изменяет механизм их реагирования и улучшает кинетику взаимодействия, повышая тем самым эффективность применения. Это открывает широкие возможности для создания и применения новых видов окускованного металлургического сырья типа синтиком. В настоящее время начата работа по созданию фабрики для массового производства материалов типа синтиком производительностью до 130 тыс. т/год. Можно ожидать, что в ближайшей перспективе использование новых материалов получит широкое распространение. Это позволит решить задачу полной утилизации всех железосодержащих отходов производства, и одновременно создает предпосылки для более широкого применения в ДСП железорудного сырья природного происхождения.

Библиографический список

1. Шалимов А. Г., Семин А. Е., Галкин М. П., Косырев К. Л. Инновационное развитие электросталеплавильного производства. – М. : Металлургиздат, 2014. – 308 с.
2. Шахпазов Е. Х. , Дорофеев Г. А. Новые синтетические композиционные материалы и технология выплавки стали с их использованием. – М. : Интерконтакт Наука, 2008. – 272 с.
3. Бондарев Ю. А., Еланский Г. Н., Лемякин В. П. и др. Опыт проведения плавов в электрических печах с использованием оксидоугольных брикетов / Труды пятого конгресса сталеплавателей. – М. : Черметинформация, 1999. С. 218 – 219.
4. Дорофеев Г. А. ,Афонин С. З., Шевелев Л. Н. Энерготехнологические особенности использования синтикома при выплавке стали в электродуговых печах. – Тула : изд-во ТулГУ, 2013. – 112 с.
5. Пат. 2539890 РФ, (51)МПК C21C 5/52 Способ выплавки стали в электродуговой печи и электродуговая печь. Авторы: Дорофеев Г.А., Янговский П.Р., Смирнов К.Г. и др.; опубл. 27.01.2015, Бюл. № 3.

УДК.669.041

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА И МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ ОБЖИГА ИЗВЕСТНЯКА ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

Ансимов А.А.¹, Крахт Л.Н.¹, Королькова Л.Н.¹, Харламов Д.А.², Меркер Э.Э.¹

¹*Старооскольский технологический институт им. А.А.Угарова (филиал)*

НИТУ «МИСУС»

г. Старый Оскол, Россия, ansimow@yandex.ru

²*Белгородский государственный технологический университет (БГТУ) им. В.Г. Шухова,*

Губкинский филиал

г. Губкин, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются результаты исследования режима обжига известняка во вращающейся печи с использованием результатов расчетов критериев лучистого и конвективного теплообмена и влияния на них характеристик топливного факела. В работе представлены данные по разработке метода и использованию компьютерной системы управления режимом сжигания топлива на вращающихся печах обжига известняка. Анализ опытных данных свидетельствует об эффективности и надежности применения этой системы для оптимизации режима сжигания топлива во вращающихся печах.

Ключевые слова: вращающаяся печь, режим обжига, известь, известняк, температура, метод, алгоритм, модель.

Abstract. The article discusses the results of a study of the mode of limestone calcination in a rotary kiln using the results of calculations of the criteria of radiant and convective heat transfer and the characteristics of the fuel torch. The paper presents data on the development of the method and the use of a computer system for controlling the mode of combustion in rotary kilns of limestone calcination. Analysis of experimental data demonstrates the effectiveness and reliability of using this system to optimize the mode of combustion of fuel in rotary kilns.

Keywords: rotary kiln, the regime of kilning, lime, limestone, temperature, method, algorithm, model.

Основные показатели работы печи, такие как производительность по извести, удельный расход топлива, расход сырья и другие определяются [1,2] условиями теплообмена [3] и параметрами обжига, т.е. температурами обжига материала ($T_{м.(обж.)}$, °C), уходящих газов ($T_{ух.г.}$, °C), выгружаемой из печи извести ($T_{изв.(к)}$, °C), а также скоростью и давлением (разряжением) газов, химическим составом газов и известняка. При постоянной производительности печи качество обожженного известняка определяется [2,3] развитием теплообмена в рабочем пространстве агрегата, т.е. существует зависимость между качеством обожженного сырья и параметрами тепловой работы печи.

Исследования проводили на вращающихся печах обжига известняка [1] для получения промышленной извести [2], необходимой в металлургическом производстве [3]. В технологии обжига во вращающейся печи [1,2] известняк нагревают до температуры 900-1300°C, при которой происходит термическая диссоциация по реакции $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \uparrow$ и для полного разложения карбоната кальция с получением 1 кг CaO теоретически потребуется $100,09/56,08=1,786$ кг $CaCO_3$. Причём для разложения 1 кг $CaCO_3$ необходимо иметь 1780 кДж теплоты, а для получения 1 кг CaO требуется $1780 \times 1,786=3185$ кДж тепла.

Для изучения условий теплообмена [3] и характера изменения параметров температурного режима [2] обжига сыпучего материала (известняка) в печи использовали [4,5] следующую критериальную зависимость:

$$Bo = (W \times \overline{C} \times m_{cp} \times G) / (\sigma_0 \times \varepsilon \times T_0^3 \times F), \quad (1)$$

где Bo – критерий лучистого (аналог числа Больцмана) теплообмена;

G – производительность печи, кг/ч;

σ_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, кДж/м²×ч×К⁴;

ε – приведенная степень черноты;

T_0 – теоретическая температура горения, °C;

F – поверхность теплообмена, м²;

$\overline{C}$ – средняя теплоемкость материала в печи, кДж/(кг×К);

m_{cp} – средний удельный расход известняка в печи, кг/кг извести;

W – критерий характеризующий соотношение между падением температуры отходящих газов (после факела) и подъемом температуры материала.

Между конечным содержанием (CaO , %) в извести и критериальными числами Bo и W достоверных взаимосвязей не установлено, учитывая, что конвективная составляющая процесса оказывает меньшее влияние на зону обжига, где излучательная способность факела велика. В этом случае представляется целесообразным ввести критерий качества обжига известняка в виде $K_{CaO} = T_{м(обж.)} / T_{м(опт.)}$, представляющий из себя отношение текущей температуры обжига материала (известняка) к оптимальной по технологии температуре ($T_{м(опт.)}$, °C) известняка в зоне обжига печи, причем при $T_{м(обж.)} / T_{м(опт.)} > 1$ наступает процесс пережога материала, а при $T_{м(обж.)} / T_{м(опт.)} < 1$ имеет место недопал (недожог). Критерий « W » представляет собой величину, характеризующую соотношение между падением температуры отходящих газов (после факела) и подъемом температуры материала ($T_{м(обж.)} \rightarrow \max$) при противотоке в печи.

Из анализа выражения (1) следует, что при сужении зоны обжига в печи, повышении m_{cp} и T_0 критериальное число $W \rightarrow \max$, что повышает значение Bo , а это обстоятельство способствует увеличению параметров q_m и G при работе печи. Обработка опытных данных [2,3] по обжигу известняка во вращающейся печи в ЦОИ ОАО «ОЭМК» позволила получить следующую критериальную зависимость:

$$\frac{T_{m(обж.)}}{T_{эф}} = Bo \times W^{-1,73}. \quad (2)$$

При этом осуществляется подогрев воздуха для горения топлива при данном коэффициенте расхода воздуха, а также учитывается нагрев известняка отходящими газами в подогревателе с возвратом технологической пыли в печь [1]. Из приведенного критериального выражения (2) следует, что зная действительную (эффективную) температуру ($T_{эф}$, °C) в зоне горения факела [2] представляется возможным определять усредненную температуру ($T_{m(обж.)}$, °C) известняка в зоне обжига печи.

Эффективную (действительную) температуру ($T_{эф}$, °C) в зоне обжига известняка в печи находили по уравнению в виде:

$$T_{эф} = ((\eta_{к.п.д.} \times T_{кал.}^2 + T_{м.}^2)(T_{ух.г.}^2 - T_{м.}^2))^{0,25}, \text{ °C}, \quad (3)$$

где $\eta_{к.п.д.}$ – значение к.п.д. печи;

$T_{ух.г.}$ – температура уходящих из зоны обжига газов, °C;

$T_{м.}$ – температура известняка на входе в печь, °C.

Для оценки возможностей повышения к.п.д. ($\eta_{кпд}$) и экономии топлива в печах после расчета всех статей теплового баланса используем уравнение:

$$\eta_{к.п.д.} = \frac{q_{дис.}^{\Sigma}}{B_g \cdot Q_H^P + q_{ф.}^{\Sigma}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $q_{дис.}^{\Sigma} = q_{дис.} + q_{и.в.}$ – суммарная полезная теплота, затраченная на диссоциацию известняка $q_{дис.}$ ($CaCO_3$ и $MgCO_3$) и на испарение влаги $q_{и.в.}$ сырья (известняка), кДж/м³, которые определяются [3] расчетами материального и теплового баланса процесса обжига материала в агрегате;

B_g – расход газа на горелку в печи, м³/ч;

Q_H^P – низшая теплота сгорания топлива, кДж/м³;

$q_{ф.}^{\Sigma} = q_{ф.}^{в.} + q_{ф.}^{м.}$ – суммарная физическая теплота воздуха и материала (известняка), поступающих в печь, кДж/м³.

Калориметрическую температуру горения топлива в факеле печи находили [3] по известному выражению:

$$T_{кал} = \frac{Q_H^P + q_{ф.}^{\Sigma}}{V_{CG} \times C_0^t}, \text{ °C} \quad (5)$$

где $\overline{C_0^t}$ – средняя теплоемкость продуктов сгорания, кДж/(м³×град).

При этом объем продуктов сгорания ($V_{с.г.}$, м³/м³) в печи определяем по выражению:

$$V_{CG} = V_{RO_2}^л + 0,79 \times V_0 + \frac{N_2^T}{100} \times (\alpha_g - 1) \times V_0, \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ топлива}, \quad (6)$$

где V_0 – теоретический расход воздуха на горение топлива, $\text{м}^3/\text{м}^3\text{топлива}$;
 N_2^T – содержание азота в топливе, % (об.);
 α_{ϕ} – коэффициент расхода воздуха на горение топлива.

$$\text{Значение } V_{RO_2}^{\phi} = 0,01(CO_2^T + CO^T + H_2S^T + CH_4^T + \dots), \text{ м}^3/\text{м}^3\text{топлива}, \quad (7)$$

где $CO_2^T + CO^T + H_2S^T + CH_4^T$ и др. – содержание этих газов в топливе, % (об.).
 Для расчета V_0 при сжигании природного газа в печи приемлемо уравнение:

$$V_0 = 0,0476(2CH_4^T + 3,5C_2H_6^T + 3C_2H_4^T + 4,5C_3H_8^T + 0,5H_2^T + 0,5CO^T + 6C_4H_8^T + 6,5C_4H_{10}^T + 8C_5H_{12}^T + 1,5H_2S^T - O_2^T), \text{ м}^3/\text{м}^3, \quad (8)$$

где CH_4^T , $C_2H_6^T$ и другие – данные химического анализа топлива.

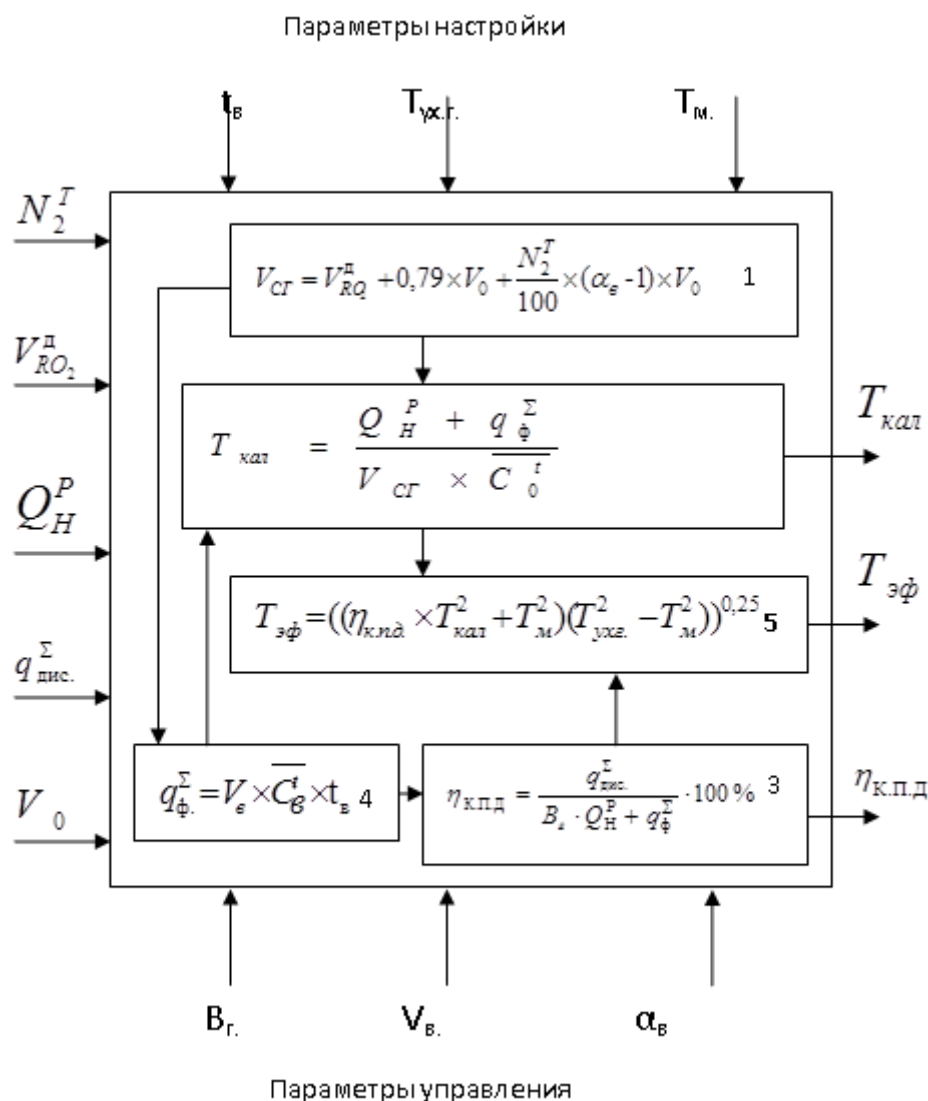
Приведенные выражения составляют математическое описание структуры алгоритма для расчета эффективной (действительной) температуры (рисунок 1) в соответствии с уравнением (3). Входные переменные, параметры настройки и управления позволяют осуществлять расчет основных показателей ($V_{с.з.}$, $T_{кал.}$, $\eta_{к.п.д.}$, $q_{\Sigma\phi}^{\Sigma}$) процесса для определения усредненной эффективной температуры ($T_{эф}$, °C) поверхности факела над слоем движущегося материала (известняка) в зоне обжига печи.

В системе факел-известняк-футеровка печи [1,3] результирующий паток излучения факела Q_{ϕ} , кВт на поверхность материала в зону обжига печи имеет вид:

$$Q_{\phi} = \begin{cases} Q_n^P + \varepsilon_{np} \times \sigma \times \left(\frac{\varepsilon_{\phi}}{a_{\phi}} (T_{эф} + 273)^4 - (T_m + 273)^4 \right) \times \frac{F_{y.\phi}}{1000}, & \text{при} \\ \varepsilon_{np} = 1 / \left[(1/a_{\phi}) + (((1/\varepsilon) - 1) \times F_{y.\phi}) / F_n \right] \text{ и } a_{\phi} = 1 - e^{-K_2 \cdot \delta_{i.c}}, & \end{cases} \quad (9)$$

где K_2 – коэффициент поглощения при температуре стенки 1/м;
 $\delta_{i.c} = 1,8R_{\phi}$ – эффективная толщина излучающего слоя, м;
 R_{ϕ} – радиус турбулентной струи, м;
 ε – степень черноты внутренней поверхности стенки печи (F_n , м^2);
 ε_{ϕ} – степень черноты факела;
 a_{ϕ} – поглощательная способность факела;
 $F_{y.\phi}$ – расчетная поверхность малого участка факела, м^2 ;
 F_n – внутренняя поверхность стенки печи, м^2 ;
 ε_{np} – приведенная степень черноты;
 σ – $5,67 \cdot 10^{-8}$ постоянная Стефана-Больцмана Вт/($\text{м}^2 \times \text{K}^4$).

Результаты расчета величины Q_{ϕ} используются для определения значения удельного расхода тепла $q_T = \frac{3,6Q_{\phi}}{G}$ (кДж/кг) с целью оценки критериев теплообмена (уравнение 1 и 2), позволяющих характеризовать параметры тепловой работы печи и определять температуру материала в зоне обжига печи, оценивать температуру конечной извести ($T_{изв(к)}$, °C) на выходе из печи в зависимости от $T_{м(обж)}$ по экспериментально установленному уравнению вида: $T_{изв(к)} = 0,395 \times T_{м(обж)} + 322,17$, $R^2 = 0,68$. Установленная связь достоверна, а среднеквадратичное отклонение между ними не превышает 15 °C.



V_0 – расход воздуха на горение топлива, $\text{м}^3/\text{ч}$, $\overline{C}_\epsilon^t$ – средняя теплоемкости воздуха,
 α – коэффициент расхода воздуха; $t_\text{в}$ – температура нагретого воздуха, $^\circ\text{C}$

Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма определения эффективной (действительной) температуры газового факела над зоной обжига известняка во вращающейся печи для производства извести

Обобщенный алгоритма модели [2,3] расчета показателей температурного режима обжига известняка приведена на рисунке 2. Для оценки эффективности режима обжига известняка в печи использовали показатель $K_{CaO} = T_{\text{м(обж)}} / T_{\text{м(онм)}}$, характеризующий качественный показатель системы управления температурным режимом обжига известняка и $K_{\text{и}} = T_{\text{изв(к)}} / T_{\text{изв(онм)}}$ – температурный показатель качественной оценки получения промышленной извести во вращающейся печи.

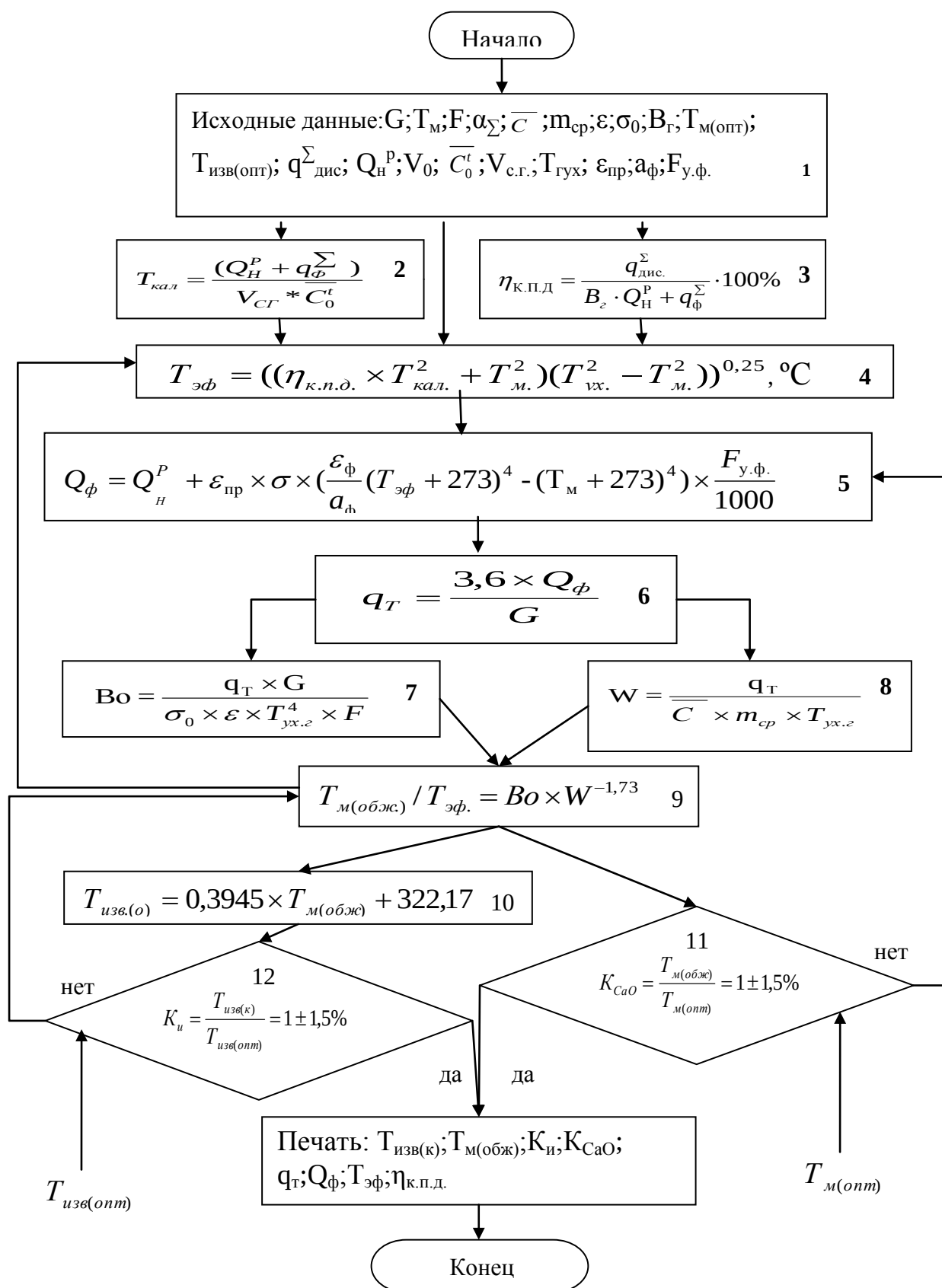


Рисунок 2 – Функциональная схема метода, структура его математического описания и обобщенного алгоритма оценки параметров теплового состояния в зоне обжига известняка во вращающейся печи для производства извести

Системный анализ (рисунок 2) алгоритма управления параметрами теплового состояния вращающейся печи предусматривает расчеты: 1 – в блоке сбора исходных и оценки данных показателей тепловой работы печи; 2 – в блоке оценки калориметрической температуры горения природного газа в факеле печи с учетом предварительных данных по объему сухих продуктов сгорания $V_{с.г.}$, м³/м³; 3 – в блоке расчета к.п.д. печи с учетом предварительных данных по $q_{дис}^{\Sigma}$ и $q_{ф}^{\Sigma}$; 4 – в блоке оценки эффективной (действительной) температуры факела над поверхностью материала (известняка) в зоне обжига печи; 5 – в блоке определения усредненного теплового потока над поверхностью движущегося материала (известняка) в зоне обжига печи, кВт; 6 – в блоке установления удельного расхода тепла в зоне воздействия факела на сырьевой поток в печи, кДж/кг; 7 – в блоке оценки эффективности лучистого потока на изменяющийся слой известняка; 8 – в блоке оценки критериального числа W , характеризующего соотношение между падением температуры отходящих газов (после факела) и подъемом температуры материала ($T_m \rightarrow \max$) при противотоке в печи; 9 – в блоке определения температуры известняка в зоне обжига по данным $T_{эф}$, Bo и W ; 10 – в блоке оценки конечной температуры известня на выходе из печи, °С; 11 – в блоке управления показателем температурного режима в зоне обжига; 12 – в блоке управления показателем температурного режима производства известня во вращающейся печи. Принцип оценки качественной эффективности производства известня (блок 11) основан на необходимости достижения показателя качества известня $K_{CaO} \rightarrow 1$, что обеспечивается необходимостью повышения или снижения температуры материала ($T_{м(обж)}$) до требуемой оптимальной температуры ($T_{м(онм)}$) по технологии обжига известня в печи путем воздействия на параметры теплового потока факела (Q_f – блок 5).

Установление требуемой эффективности температурного режима в зоне обжига печи (блок 12) с обеспечением требуемой по технологии температуры известня ($T_{изв(к)}$) достигается при условии, что $K_u \rightarrow 1$, то есть текущая (расчетная) температура известня ($T_{изв(к)}$) на выходе из печи приводится в соответствии с $T_{изв(онм)}$ путем воздействия на параметры $T_{м(обж)}$ и $T_{эф}$ в блоках (9) и (4) последовательно.

Таким образом, можно полагать, что оптимизация показателей K_{CaO} и K_u по алгоритму (рисунок 2) обеспечивает требуемые значения [2,3] для температурного режима обжига известня в печи с достижением [1] удовлетворительных показателей по качеству известня.

Выводы: На основе установленных закономерностей влияния параметров тепловой работы печи на основные тепловые и технологические процессы обжига известня при производстве промышленной известня разработаны метод и структура математической модели оценки эффективности управления процессом обжига в печи. Получены критериальные выражения для оценки теплового состояния вращающейся печи и показателей качества известня. Математическое описание процессов в печи представлено в виде модели, алгоритма и программы расчета параметров теплового состояния агрегата, позволяющее осуществлять эффективное управление качественными показателями обжига известня (K_{CaO}) и получения известня (K_u).

Библиографический список

1. Антонов Г.Л. Особенности эксплуатации коротких вращающихся печей обжига известня / [Антонов Г.Л. и др.] // Сталь. - №9. - 2008. - С.97-99.
2. Меркер Э.Э. Совершенствование методики контроля параметров режима сжигания топлива во вращающихся печах / Меркер Э.Э., Харламов Д.А., Ансимов А.А. // ОАО «Черметинформация», Бюл. НТИ «Черная металлургия». – 2011. - №7. - С.78-81.
3. Трубаев П.А. Методы компьютерного моделирования горения и теплообмена во вращающихся печах / Трубаев П.А., Кузнецов В.А., Беседин П.В. – Белгород: БГТУ БИЭИ, 2008. - 230 с.
4. Меркер Э.Э. Тепловые и технологические процессы во вращающихся обжигочных печах / Меркер Э.Э., Харламов Д.А., Ансимов А.А. -Старый Оскол. ТНТ, 2014.-296 с.

5. Ансимов А.А. Разработка метода и алгоритма оценки эффективности управления режимом обжига известняка во вращающейся печи / Ансимов А.А., Крахт Л.Н., Меркер Э.Э. Научно-технический прогресс в металлургии. Материал II Международной научно-технической конференции (7-9 октября 2015г.) - Череповец – ВГБОУ ВПО «ЧерГУ», 2015. - С.226-230.

УДК 669.184.001.57

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ ВЛИЯЮЩИХ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ВСПЕНЕННОГО ШЛАКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ ФРАКТАЛОВ И ПЕРКОЛЯЦИИ

Кожухов А.А., Мельников Е.Н., Шаталов Н.Н., Парахин Я.О.

Старооскольский технологический институт (филиал) НИТУ МИСиС
г. Старый Оскол, Россия, kosuhov@yandex.ru

Аннотация. В рамках теории протекания и фрактальной геометрии выполнена оценка факторов, влияющих на устойчивость вспененного шлака, а именно среднего радиуса пузырьков и величины поверхностного натяжения.

Ключевые слова: вспененный шлак, фрактал, теория протекания.

Abstract. Within the theory of course and fractal geometry the assessment of the factors influencing stability of the made foam slag, namely average radius of bubbles and size of a superficial tension is executed.

Keywords: the made foam slag, fractal, the theory of course.

Сегодня большое внимание уделяется изучению процесса вспенивания сталеплавильного шлака и его устойчивости по ходу выплавки стали в дуговых сталеплавильных печах. Наиболее важные результаты в этом направлении, являющиеся актуальными в настоящее время, получены при исследовании процесса вспенивания шлака в кислородных конвертерах и мартеновских печах.

Эти результаты можно перечислить в виде следующих положений:

1) вспененный шлак является термодинамически неустойчивой системой, поскольку при переходе от плотной жидкости с поверхностным натяжением σ к пене необходима затрата энергии $\sigma\Delta S$ (ΔS – разность величин поверхностей контакта единицы веса плотного и вспененного шлака с газом). Формирование вспененного шлака и его длительное существование обусловлены кинетическими факторами, замедляющими процессы всплывания и исчезновения пузырьков газа в той степени, которая позволяет при определённой скорости поступления газа в шлак образовывать пену соответствующей высоты. После прекращения поступления газа в шлак пена, через какое-то время спадает и превращается в слой плотного шлака [1-4];

2) фактором, способствующим формированию пены, является повышенная вязкость шлака, обусловленная как свойствами гомогенного расплава, так и присутствием в нём твёрдых частиц. Повышение вязкости шлака в диапазоне вязкостей, обеспечивающих металлургические свойства шлаков, способствует «застреванию» в нём пузырьков газа, снижению плотности шлакового покрова и повышению высоты шлакового покрова [1-4];

3) при определённых условиях шлак с низким поверхностным натяжением и наличием поверхностно активных компонентов (ПАВ) вспенивается лучше. Действительно, образующийся газ может увеличить межфазную поверхность ΔS , при меньшей удельной поверхностной энергии на поверхности контакта «шлак»-«газ» σ . Кроме того, при малом значении σ , невелик и выигрыш в энергии при спонтанной осадке пены вследствие стремления шлака к минимальному запасу энергии. Однако, для шлаков, т.е. сред, имеющих высокие поверхностные натяжения ($400\div 600$ мДж/м²), трудно предполагать устойчивость пены по аналогии с органическими пенами или вообще низкотемпературными

пенами. Если растворы мыла в воде имеют поверхностное натяжение $1 \div 10$ мДж/м², то естественно, что увеличение концентрации мыла, приводящее к снижению поверхностного натяжения на $1 \div 2$ мДж/м², заметно повышает вспениваемость раствора и устойчивость пены. В случае шлаков даже выталкивание на межфазную границу слабого иона PO_4^{3-} , приводящее к понижению межфазного натяжения, например, на 100 мДж/м² не меняет качественно картины – шлаковая пена остаётся неустойчивой системой. Поэтому увеличение способности шлаков пениться, происходящее при понижении их поверхностного натяжения, не связано с абсолютными значениями поверхностного натяжения. Скорее всего, влияние на вспениваемость шлаков оказывает адсорбция ПАВ на поверхности газовых пузырьков, приводящая к упрочению их стенок на некоторое время (эффект Меренгони, «расклинивающий» эффект);

4) при прочих равных условиях снижение размера пузырей вспенивающего газа приводит к повышению высоты пены. По-видимому, мелкие пузырьки газа $\{CO\}$ не обладают достаточной энергией и не могут «пробить» слой шлака, застревают в нём и всплывают с маленькой скоростью. Это также связано с вязкостью шлака косвенно [1-4].

Обобщая сказанное, можно предположить причину противоречий в выводах о влиянии характеристик промышленных шлаков на их вспениваемость [5]. В реальных условиях плавки шлаки гетерогенны и характеризуются большими значениями вязкости. Практически все компоненты шлаков, понижающие поверхностное натяжение, способствуют уменьшению вязкости за счёт гомогенизации SiO_2 , P_2O_5 , Fe_2O_3 и т.д., а также за счёт дополнительного снижения вязкости гомогенного расплава CaF_2 , Na_2O и т.д. Поэтому введение этих компонентов в промышленные шлаки приводит к снижению их вспениваемости, так как влияние вязкости в производственных условиях является определяющим. Однако устойчивость образующегося вспененного шлака определяется именно поверхностным натяжением.

В связи с этим, выполним оценку факторов, влияющих на устойчивость вспененного шлака, а именно среднего радиуса пузырьков и величины поверхностного натяжения.

Согласно фрактально-перколяционной модели оценим влияние среднего размера пузырька на уровень вспенивания сталеплавильного шлака. Для этого воспользуемся формулой [6]:

$$\Delta H_n = \frac{k_1 \cdot \sigma_{жс}}{2,5 \cdot r_0 \cdot \rho_{жс} \cdot g} \cdot \sqrt{K} - \frac{2 \cdot \sigma_{жс}}{\rho_{жс} \cdot g \cdot r_0} \cdot \left[1 - \frac{\cos(\theta/2)}{0,48 \cdot 2^n} \right], \quad (1)$$

где k_1 – коэффициент пропорциональности, учитывающий структуру вспененного шлака;

γ – объёмная плотность вспененного шлака;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

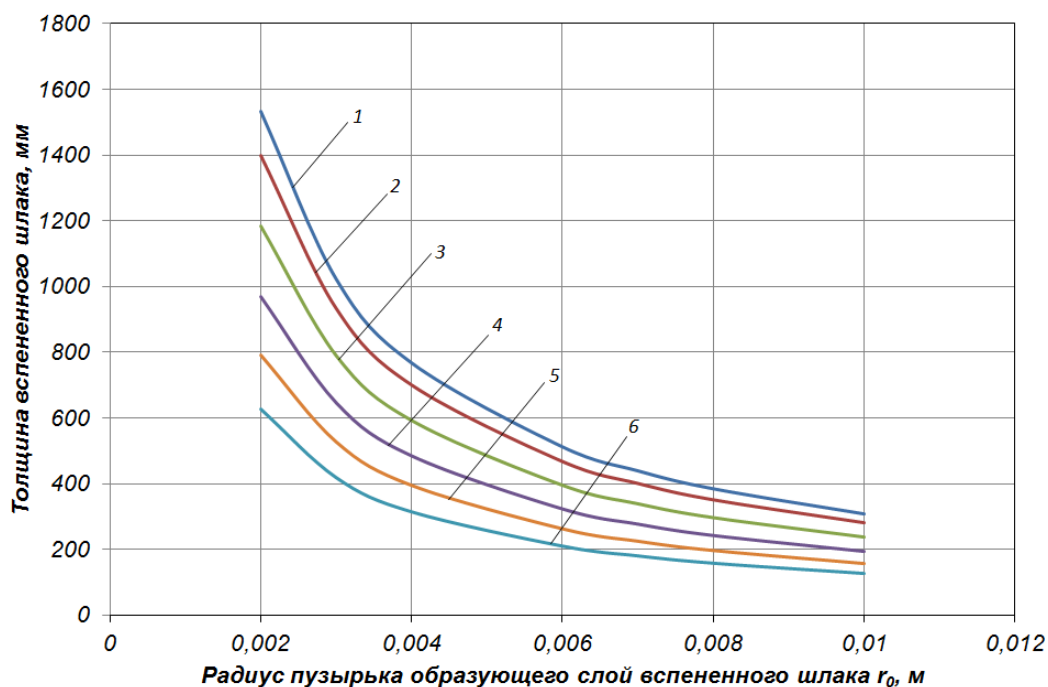
n – уровень фрактального дерева.

Выполним расчет предельной высоты вспенивания сталеплавильного шлака при различных значениях среднего размера пузырьков, образующих вспененный шлак.

Результаты расчетов представлены на рисунке 1.

Анализ данных рисунка 1 показывает, что при увеличении приведенного расхода газа и в результате уменьшения среднего размера пузырьков, можно достичь более высокого уровня вспенивания сталеплавильного шлака. Это можно объяснить, используя закон Стокса. Согласно этому закону, уменьшение размера пузырьков приводит к уменьшению скорости их всплытия, и соответственно к увеличению времени их пребывания в объеме вспененного шлака. Из лабораторных данных следует, что уменьшение времени пребывания пузырьков в шлаке при неизменной величине приведенного расхода приводит к увеличению высоты вспененного шлака и повышению степени его газосодержания.

Таким образом, для обеспечения более устойчивого вспенивания шлака необходимо обеспечить условия для образования мелких пузырьков в его объеме.



1 – величина приведенного расхода равна $20,5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{мин}$; 2 – величина приведенного расхода равна $17 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{мин}$; 3 – величина приведенного расхода равна $12 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{мин}$; 4 – величина приведенного расхода равна $8,2 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{мин}$; 5 – величина приведенного расхода равна $3,4 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{мин}$; 6 – величина приведенного расхода равна $5,4 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{мин}$

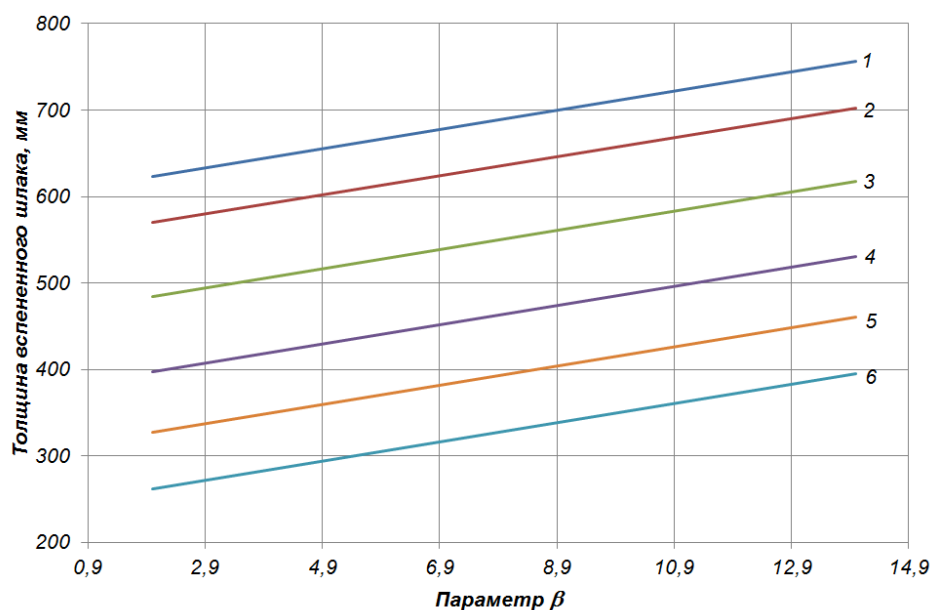
Рисунок 1 – Зависимость толщины вспененного шлака от радиуса пузырьков образующих слой вспененного шлака

Для оценки величины поверхностного натяжения шлака на устойчивость вспененного шлака воспользуемся предлагаемой в рамках фрактально-перколяционной модели формулой, которая учитывает влияние концентрации поверхностно-активных веществ [6]:

$$\Delta H_n = \frac{k_1 \cdot \sigma_{\text{жс}}(C)}{2,5 \cdot r_0 \cdot \rho_{\text{жс}} \cdot g} \cdot \sqrt{K} - \frac{2 \cdot \sigma_{\text{жс}}(C)}{\rho_{\text{жс}} \cdot g \cdot r_0} \cdot \left[1 - \frac{\beta \cdot \cos(\theta/2)}{0,48 \cdot 2^n} \right]. \quad (2)$$

Согласно фрактально-перколяционной модели наличие в шлаке поверхностно-активных веществ в первую очередь приведет к появлению некоторой доли особо прочных рёбер у фрактального дерева, тем самым вспененный шлак окажется более устойчивым к разрушению. Показателем устойчивости вспененного шлака во фрактальной модели является параметр β входящий в формулу (2), который характеризует отношение характеристической нагрузки прочных рёбер, к характеристической нагрузке непрочных рёбер, причем β должен быть больше 1 [6].

Результаты расчета влияния параметра β на эффективность вспенивания шлака представлены на рисунке 2.



1 – величина приведенного расхода равна $20,5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{мин}$; 2 – величина приведенного расхода равна $17 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{мин}$; 3 – величина приведенного расхода равна $12 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{мин}$; 4 – величина приведенного расхода равна $8,2 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{мин}$; 5 – величина приведенного расхода равна $3,4 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{мин}$; 6 – величина приведенного расхода равна $5,4 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{мин}$

Рисунок 2 – Зависимость толщины вспененного шлака от величины параметра β

Анализ полученных данных можно сказать, что при увеличении приведенного расхода газа и параметра β , происходит увеличение высоты вспененного шлака. Известно, что основным фактором устойчивости пен стабилизированных поверхностно-активными веществами является структурно-механический фактор. Исходя из этого, можно объяснить полученные на рисунке 2 зависимости, так повышение параметра β приводит к повышению устойчивости процесса вспенивания шлака, за счет упрочнения стенок газовых пузырьков образующих слой вспененного шлака. Это связано с тем, что на поверхности пузырьков происходит адсорбция поверхностно-активных веществ, которая и приводит к упрочнению их стенок на какой-то период времени (эффект Меренгони). Анализируя выше сказанное можно сказать, что параметр определяет прочность пленок образующихся на поверхности пузырьков, и чем он выше, тем выше будет прочность пленок. То есть параметр β характеризует структурно-механический фактор устойчивости вспененного шлака.

Это позволяет объяснить факт, связанный с увеличением способности шлаков пениться при снижении величины поверхностного натяжения шлака. Анализируя выражение (2) можно сказать, что увеличение уровня вспенивания шлака при наличии в шлаке поверхностно-активных веществ связано не столько со снижением величины поверхностного натяжения, сколько с увеличением прочности пленок, образующихся на поверхности пузырьков. Это в свою очередь приводит к возникновению более прочного каркаса, образующегося из прочных шлаковых пленок, что и приводит к возрастанию уровня вспенивания шлака.

С использованием фрактально-перколяционной модели также представляется возможным объяснить причину улучшения процесса вспенивания сталеплавильного шлака при его гетерогенизации. Наличие в шлаке твердых частиц (CaO или MgO) приводит к снижению поверхностной энергии слоя вспененного шлака за счет выхода частиц на поверхность пузырьков газа, образующих слой пены. При этом происходит снижение поверхностного натяжения шлака. Возрастание концентрации твердых частиц видимо при-

водит к увеличению вязкости и напряжению сдвига в слое пены. Коагуляция твердых частиц приводит к снижению поверхностной энергии слоя шлака, за счет частичного насыщения поверхностных сил в зоне контакта частиц с поверхностью пузырька. Поэтому устойчивость такого вспененного шлака также обеспечивается прочностью дисперсной среды. Это и объясняет хорошую вспениваемость гетерогенных шлаков.

Таким образом, в рамках фрактальной-перколяционной модели можно оценить не только предельную высоту вспенивания шлака, но и объяснить влияние различных факторов на его устойчивость.

Библиографический список

1. Охотский В.Б. Физико-химическая механика сталеплавильных процессов. – М.: Металлургия, 1993 – 150 с.
2. Белов И.В. Тепло- и массообменные процессы в ваннах сталеплавильных агрегатов. М.: Металлургиздат, 1975 – 367 с.
3. Баптизманский В.И. Механизм и кинетика процессов в конвертерной ванне. Металлургиздат. 1960. – 253 с.
4. Явойский В. И., Левин С. Л, Баптизманский В. И. и др. Металлургия стали. М.: Металлургия, 1973.
5. Охотский В.Б. Содержание металлической фазы в шлако-металлической эмульсии сталеплавильной ванны. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1998. № 3. С. 19-22
6. Шевнина Т.Е. Фрактально-перколяционный механизм разрушения пены дис. ... канд. техн. наук: 02.00.04 / Шевнина Татьяна Евгеньевна. – Тюмень, 2004. – 132 с

УДК 669.1:681.3

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКОЙ СЭР

Красноперов С.Ю., Падалко А.Г.

*Сибирский государственный индустриальный университет
Новокузнецк, Россия, sergeyKrasn@gmail.com*

Аннотация: Рассматриваются вопросы разработки и применения автоматизированной системы контроля и управления, реализованной на крупномасштабной опытной установке применительно к условиям ЕВРАЗ ЗСМК. Приводится объектно-ориентированное представление процесса и агрегата непрерывного получения металла.

Ключевые слова: установка СЭР, автоматизированная система, контроль, управление, объектно-ориентированное представление.

Abstract: The problems of development and implementation of an automated control system, implemented on a large-scale pilot plant for the conditions EVRAZ ZSMK. We present an object-oriented representation of the process, and the continuous production of the metal unit.

Keywords: jet-emulsion reactor, automated system, monitoring, control, object-oriented representation.

В настоящей работе рассматривается разработанная и реализованная на объекте система контроля, управления и автоматизированного эксперимента крупномасштабной опытной установкой нового непрерывного металлургического процесса, построенной в ККЦ № 2 ЕВРАЗ ЗСМК, которая позволяет осуществлять отладку различных вариантов технологий. Подробно технологическая схема опытной установки рассмотрена в работе в работе [1].

Система контроля и управления автоматизированного эксперимента включает подсистемы: управления технологическим оборудованием; контроля и управления технологическим процессом.

Система является двухуровневой: первый уровень выполняет функции управление технологическим оборудованием, а второй – управление технологическим процессом и экспериментом.

Обмен информацией между системами верхнего и нижнего уровней осуществляется посредством взаимодействия между соответствующими информационными базами данных.

На логическом уровне в объектной модели выделены следующие категории классов – модули:

- визуализации оперативной информации и ведения диалога с оператором-технологом;
- оценивания текущего состояния технологического процесса и формирования управляющих воздействий;
- обмена информацией с устройствами системы управления нижнего уровня;
- ведения протокола эксперимента по управлению технологическим процессом.

Взаимодействие подсистем верхнего и нижнего уровней организовано в соответствии с принципами взаимодействия открытых систем. Согласно этим принципам функции взаимодействия разделяются по уровням. Эталонная модель взаимодействия открытых систем OSI (Open System Interconnection) является наиболее распространенным способом описания сетевой среды или прохождения данных между физическим соединением с сетью и конечным приложением.

Механизм функционирования системы контроля и управления представлен на рисунке 2. Каналы связи соответствуют каналному уровню, протокол соответствует сетевому уровню модели OSI. Элементы диаграммы *сбор информации, агрегат и устройство управления* являются элементами подсистемы анализа состояния и синтеза управления.

Посредством драйверов RS 232 осуществляется связь ЭВМ верхнего уровня с техническими средствами локальных систем: Ш711 – многоканальное измерение температуры; Ремиконт – контроль и регулирование; МикроДАТ – управление оборудованием агрегата.

Модуль обмена информацией с устройствами нижнего уровня включает подмодули протоколы и драйверы (рисунок 3).

Модуль ведения протокола хода процесса реализует функцию записи содержания информационной базы верхнего уровня в базу данных, где хранится вся первичная информация о состоянии оборудования, параметрах входных потоков и реактора, поступающая с датчиков и вводимая в диалоге.

Модуль визуализации и ведения диалога реализует функции: представления информации в наглядной форме о состоянии технологического оборудования и процесса; отображения условий возникновения аварийных ситуаций с выдачей рекомендаций оператору-технологу. Данный модуль состоит из многооконного интерфейса, технологических схем и экранных форм.

Виды обеспечения автоматизированной системы включают в себя математическое, алгоритмическое и программное обеспечение модулей системы.

Математическое обеспечение. При реализации функций системы применены экспериментально-статистические методы обработки данных и планирования эксперимента, методы оценивания параметров и процедуры допускового и логического контроля.

При создании баз данных следует использовать методы проектирования баз оптимальных логических структур.

В состав алгоритмического обеспечения входят алгоритмы автоматического управления системой шихтоподачи, запуска и остановки технологического процесса в реакторе, аварийного останова процесса, распознавания аварийных ситуаций [3].

Программное обеспечение (ПО) системы включает базовое, поставляемое с техническими средствами, и специальное.

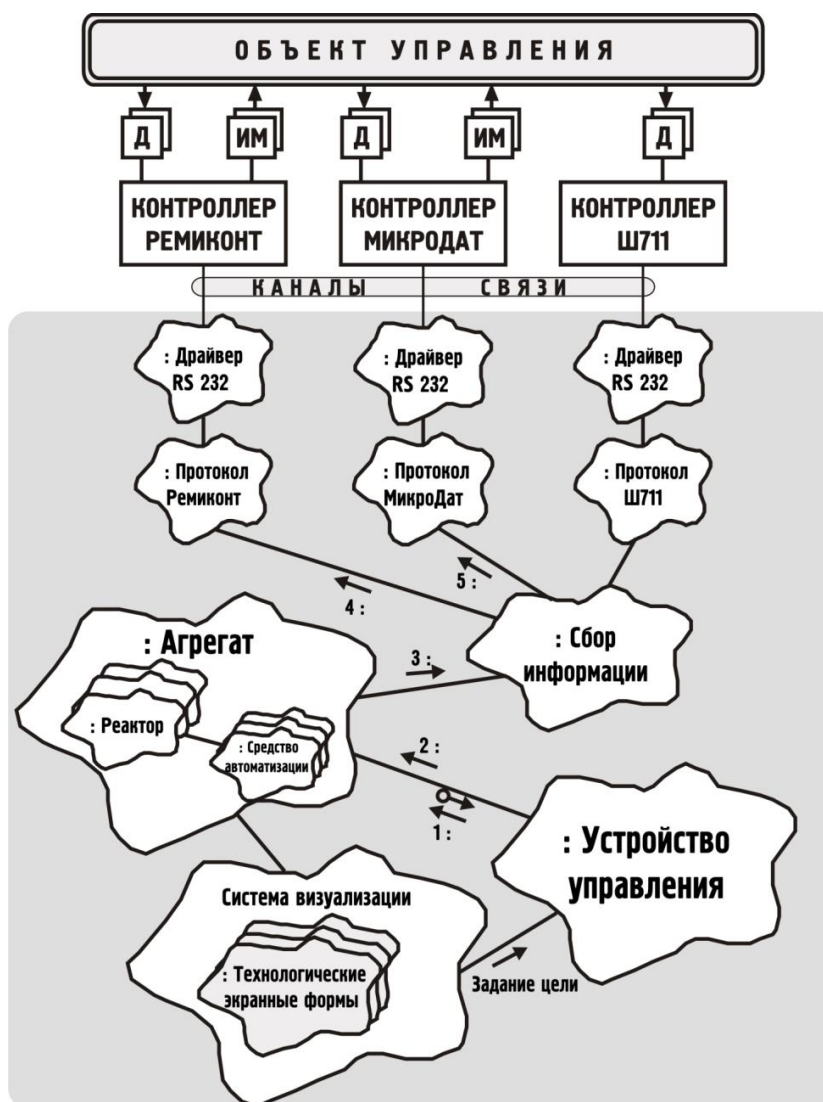


Рисунок 2 – Механизм функционирования системы контроля и управления

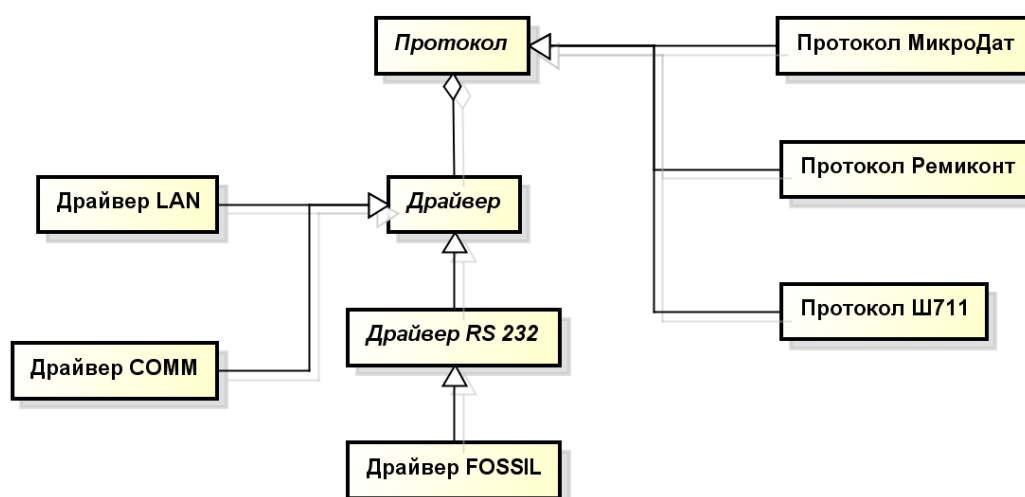


Рисунок 3 – Подсистема обмена информации

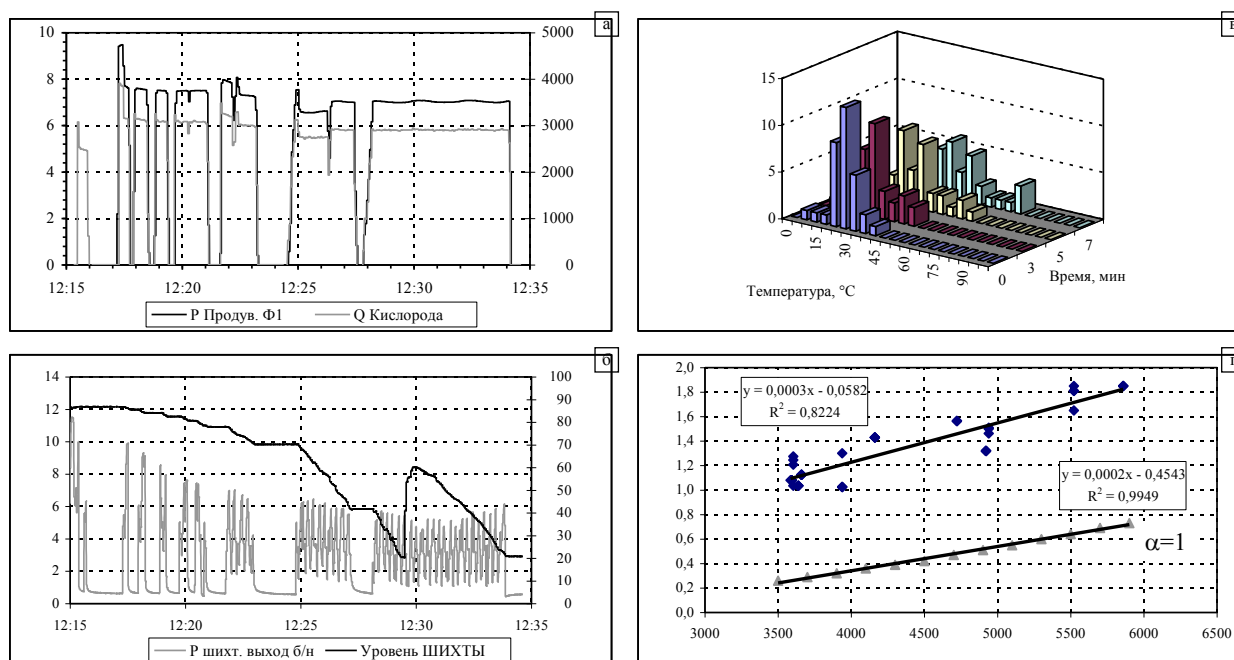
Основными компонентами базового ПО вычислительных комплексов являются операционные системы, инструментальные системы и системы программирования.

Важное требование предъявляется к программно-техническому комплексу по программированию и отладке подсистем нижнего уровня на базе программируемых контролеров. Технология программирования должна обладать свойствами и способностью быстрой отладки и корректировки ПО непосредственно на объекте в ходе испытаний системы.

Специальное ПО выполняет: основные функции системы в реальном времени; функций системы в режиме диалога; информационный обмен между средствами системы по каналам машинных связей; формирование цветных графических картинных форм, мнемосхем, графиков и символов; создание и ведение баз данных; формирование и печать выходных документов.

При осуществлении экспериментальной проверки на опытной установке практической реализуемости вариантов технологий непрерывного получения металла в струйно-эмульсионных агрегатах показаны большие преимущества и удобства, представляемые автоматизированной системой контроля и управления экспериментом, с помощью которой удалось зафиксировать все поддающиеся изменению параметры в темпе с очень быстротечным процессом и представить информацию в наглядной форме; показана хорошая управляемость процесса и возможность реализации режимов как автоматизированного, так и автоматического управления [3].

На рисунке 4 а,б показаны графики изменения расхода кислорода и давления во время эксперимента № 23, на рисунке 4в – изменение температуры в точках поверхности реактора по ходу эксперимента № 14. На рисунке 4г показана полученная экспериментальная зависимость давления в реакторе от расхода кислорода.



а, б – эксперимент № 23; в, – эксперимент № 14; г – зависимость давления от расхода кислорода

Рисунок 4. Некоторые результаты экспериментов

Библиографический список

1. Цымбал В.П. Мочалов С.П., Рыбенко И.А., И.А., Айзатулов Р.С., Соколов В.В., Падалко А.Г., Кожемяченко В.И., Красноперов С.Ю., Шакиров К.М., Калашников С.Н., Ермакова Л.А., Оленников А.А., Огнев А.М., Щипанов С.В., Рыбушкин А.А., Суз-

дальцев Е.В.. Процесс СЭР – металлургический струйно-эмульсионный реактор – М: «Металлургиздат», 2014. – 488 с.

2. Автоматизированный эксперимент на опытно-промышленной установке нового непрерывного металлургического процесса восстановления типа СЭР./С.Ю. Красноперов, А.Г. Падалко, С.П. Мочалов, В.П. Цымбал//Металлургия России на рубеже XXI века Сб. науч. тр. Международной научно-практической конференции./Под общей редакцией Е.В. Протопопова: Науч. тр. науч. конф.-Новокузнецк: СибГИУ, 2005. – С. 66-69.

3. Красноперов С.Ю. Разработка и применение систем моделирования и управления сталеплавиными процессами на основе объектно-ориентированного подхода: Дисс. канд. техн. наук: 05.13.06. – Новокузнецк, 1999. – 145с.

УДК 621.643 : 628.147.22

К ВОПРОСУ О МОДЕЛИРОВАНИИ ВНУТРЕННЕГО КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА ТРУБОПРОВОДОВ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

Чапаев Д.Б., Оленников А.А., Баклушина И.В.

Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк, РФ, chapaev.denis@gmail.com

Аннотация. Кратко описан механизм равномерного коррозионного износа, протекающего на внутренней поверхности трубопроводов тепловых сетей, выполненных из углеродистой стали, для случая, когда окислителем является кислород. На основании разработанной модели процесса представлены расчетные зависимости по определению скорости внутреннего равномерного коррозионного износа. Предложен способ расчета растворимости магнетита в теплосетевой воде.

Ключевые слова: коррозионный износ, коррозия, надежность трубопроводов, растворимость магнетита, тепловые сети.

Abstract. Mechanism of the uniform corrosive wear which flows on the inner surface of pipelines of heat networks made of carbon steel, in the case where the oxidant is oxygen, is briefly described. On the basis of the developed process model the calculated dependencies on the definition of the rate of internal uniform corrosive wear are shown. The method of calculation of the solubility of magnetite in the thermal grid water is offered.

Keywords: corrosive wear, corrosion, pipeline reliability, solubility of magnetite, heat networks.

Проблема малой надежности тепловых сетей по причине внутренней коррозии теплопроводов достаточно хорошо известна. Средняя удельная повреждаемость теплосетей по городам России из-за внутренней коррозии составляет не менее $0,125 \text{ (км}\cdot\text{год)}^{-1}$ при максимальной для одного объекта $0,94 \text{ (км}\cdot\text{год)}^{-1}$. В настоящее время еще нет подробной теории коррозионного износа теплосетевых труб из-за сложности процессов, протекающих на поверхности корродирующего металла, в образующейся на поверхности пленке из продуктов коррозии и на границе «оксидная пленка – окружающая среда». В целом результаты этих процессов зависят от множества параметров. Сложность задачи связана с флуктуацией концентрации химических реагентов коррозии, электрических токов, химического состава материала труб и т.д. Учет многих параметров в теории затруднителен, но можно построить несколько частных моделей, которые в дальнейшем могут быть объединены в систему, позволяющую получить численные данные о коррозионном износе.

При разработке математической модели внутреннего коррозионного износа стальных трубопроводов нами учитывались следующие допущения: окислителем является растворенный в сетевой воде кислород; процессы коррозии под действием углекислотных ионов, а также сульфат- и хлорид-ионов пренебрежимо малы.

В результате внутренней коррозии в потоке теплоносителя на поверхности металла труб образуется два слоя магнетита Fe_3O_4 : 1) внутренний слой, прочный и плотный, образующийся прямо на металле (составляющий долю χ от продуктов внутренней коррозии);

2) наружный, рыхлый и пористый, состоящий из отдельных кристаллов гидроксидов железа. Внутренний слой магнетита является защитным слоем, препятствующим проникновению коррозионных агентов к поверхности металла из теплоносителя. Однако и этот слой имеет некоторую пористость θ . Поэтому на анодных участках поверхности металла через него происходит диффузия ионов железа Fe^{2+} к теплоносителю. На катодных участках происходит встречная диффузия электронов, превращающих молекулу O_2 и 2 молекулы H_2O в 4 иона OH^- (кислородная деполяризация). Ионы Fe^{2+} , проникающие к теплоносителю, соединяются с ионами OH^- и образуют рыхлый наружный слой водонасыщенного магнетита $FeO+Fe_2O_3+Fe(OH)_2$, часть которого уносится потоком теплоносителя. При концентрациях кислорода в теплоносителе, заметно превышающих норматив для теплосетей (20 мкг/кг; $pH=9,2$), этот рыхлый внешний слой магнетита может преобразоваться в гематит Fe_2O_3 .

Внутренний коррозионный износ сталей в теплосетевой воде является совокупностью процессов: 1) начальная реакция чистого железа с окислителем; 2) отток доли $(1 - \chi)$ железосодержащих веществ путем диффузии от поверхности стали к теплоносителю; 3) массоперенос доли $(1 - \chi)$ железосодержащих веществ в поток теплоносителя.

Перечисленные выше процессы определяют массовую скорость внутреннего равномерного коррозионного износа, которую, исходя из предложенной в [1] модели, с площади поверхности трубы 1 м^2 можно рассчитать по формуле, кг/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$):

$$\frac{dm}{d\tau} = q \frac{\theta C_{Fe}}{\frac{1}{k} + (1 - \chi) \left(\frac{h}{D} + \frac{1}{h_D} \right)}, \quad (1)$$

где m – масса прокорродировавшего и унесенного потоком металла трубы;
 τ – время эксплуатации трубы;
 q – поправочный коэффициент, безразмерная величина;
 θ – пористость пленки магнетита, безразмерная величина;
 C_{Fe} – равновесная концентрация (растворимость) магнетита Fe_3O_4 , кг/м³;
 k – константа скорости реакции коррозии на границе «металл-оксид», определяемая по формуле Аррениуса, м/с;
 χ – доля магнетита в продуктах коррозии (для нормируемой концентрации кислорода в теплоносителе обычно $\chi = 0,5$), безразмерная величина;
 h – толщина плотного слоя магнетита, м (в среднем $h = 1 \cdot 10^{-5}$ м);
 D – коэффициент диффузии соединений железа в порах оксида с границы «металл-оксид» на границу «оксид-теплоноситель», м²/с;
 h_D – коэффициент их массопереноса с границы «оксид-теплоноситель» в однофазный поток теплоносителя при турбулентном течении, м/с.

В числителе формулы (1) в качестве движущей силы продуктов коррозии в порах оксида задана разность концентраций продуктов коррозии между равновесной C_{Fe} на границе «металл-оксид» и практически нулевой их концентрацией в ядре потока теплоносителя. В знаменателе формулы (1) представлена сумма сопротивлений износу: $1/k$ – сопротивление начальной реакции чистого железа с окислителем; h/D – сопротивление диффузии продуктов коррозии в порах оксида; $1/h_D$ – сопротивление массопереносу продуктов коррозии в поток теплоносителя.

Методика расчета значений θ , k , D , h_D изложена в [1].

С целью получения адекватных результатов расчета, в модель (1) предложено ввести эмпирический коэффициент q , определяемый в ходе сопоставления результатов расчета скорости износа с результатами натурных измерений в действующих городских тепловых сетях конкретного теплосетевого района. Так, например, для города Новокузнецка

по результатам натурных измерений, представленных в [2]: $q = 210d_g + 1,4$, где d_g – начальный внутренний диаметр трубы, мм.

Если предположить отсутствие проскоков кислорода в трубопровод, то интенсивность износа по мере удаления от начального участка трубы должна снижаться вследствие снижения концентрации кислорода в потоке. В работе [3] предложена зависимость падения скорости внутреннего коррозионного износа, протекающего с диффузионным контролем, от x – расстояния по ходу теплоносителя, мм, проложенного от начала трубопровода до расчетного участка:

$$\frac{(dm/d\tau)_x}{(dm/d\tau)_{x=0}} = \exp \left\{ -0,16\sqrt{\lambda} \frac{x}{d_g} Sc^{\frac{3}{4}} \right\}, \quad (2)$$

где $(dm/d\tau)_{x=0}$ – максимальная скорость износа на начальном участке, т.е. когда $x = 0$;

λ – коэффициент сопротивления трению;

d_g – начальный внутренний диаметр трубы, мм;

Sc – число подобия Шмидта.

Результаты расчета относительной скорости износа в теплопроводе по формуле (2), представленные на рисунке 1, показывают падение этого значения практически до нуля на расстоянии от источника тепловой сети до рассматриваемого участка, равном 1 км, что противоречит данным натурных исследований трубопроводов теплосетей. Для приближения к реальным условиям эксплуатации теплосетей в расчете рекомендуется учитывать снижение скорости износа по длине трубы на участке не более 30 м. Зависимость (2) требует доработки.

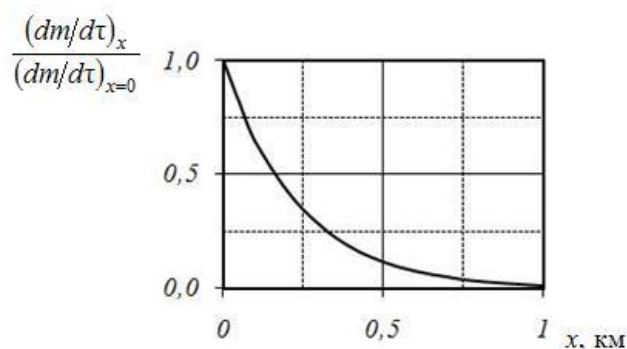


Рисунок 1 – Снижение интенсивности износа по мере удаления от источника (при отсутствии проскоков кислорода в теплосеть) – зависимость требует доработки

Путем соответствующих преобразований получаем формулу по расчету глубинного показателя внутреннего равномерного коррозионного износа Π , мм/год:

$$\Pi = 3,6 \cdot 10^6 \cdot q \frac{\tau_p}{\rho_m} \cdot \frac{\theta C_{Fe}}{\frac{1}{k} + (1-\chi) \left(\frac{h}{D} + \frac{1}{h_D} \right)} \cdot \exp \left\{ -0,16\sqrt{\lambda} \frac{x}{d_g} Sc^{\frac{3}{4}} \right\}, \quad (3)$$

где τ_p – время эксплуатации трубы, в часах;

ρ_m – плотность металла трубы, кг/м³.

В случае проскоков кислорода в сеть значения Π следует определять при $x = 0$.

Одним из определяющих факторов, влияющих на интенсивность внутреннего коррозионного износа, является растворимость магнетита.

Для удобства выполнения расчетов на ПЭВМ данные по растворимости магнетита C_{Fe} в диапазоне температур $40^{\circ}\text{C} \leq t \leq 300^{\circ}\text{C}$ и водородного показателя $8 \leq pH \leq 10$, представленные в [4] в виде отдельных опытных точек, нами аппроксимированы и найдено уравнение поверхности $C_{Fe}(t, pH)$, кг/м³:

1) а) при $pH \leq 9,25$ поверхность представляет собой ограниченный секущими плоскостями эллиптический параболоид:

$$C_{Fe}(t, pH) = \rho(m t^2 - n t + p) 10^{-9}, \quad (4)$$

где ρ – плотность теплоносителя, кг/м³;

t – его температура, °C;

множитель $(10^{-9} \cdot \rho)$ переводит мкг магнетита / кг воды (результат, получаемый в скобках) в кг/м³;

m, n, p – коэффициенты, определяемые по формулам:

– при $40^{\circ}\text{C} \leq t \leq 150^{\circ}\text{C}$: $m = 0,00823 pH^2 - 0,157 pH + 0,748$,

$n = 1,129 pH^2 - 21,53 pH + 102,5$, $p = 140,4 pH^2 - 2675 pH + 12730$;

– при $150^{\circ}\text{C} \leq t \leq 300^{\circ}\text{C}$: $m = 0,004253 pH^2 - 0,0806 pH + 0,3815$,

$n = 2,8672 pH^2 - 54,495 pH + 258,68$, $p = 477,38 pH^2 - 9101,6 pH + 43344$;

2) при $pH > 9,25$ поверхность является плоскостью:

$$C_F(t, pH) = \rho(0,0099 pH \cdot t - 0,103t - 8,357 pH + 84,84) 10^{-9}. \quad (5)$$

Плотность $\rho(t)$ теплоносителя – воды в диапазоне температур $40^{\circ}\text{C} \leq t \leq 300^{\circ}\text{C}$ в вычислительном алгоритме нами предлагается определять по уравнению, кг/м³:

$$\rho(t) = 1001,3 - 0,0026t^2 - 0,1569t,$$

где t – температура теплоносителя, °C.

Результаты расчета $C_{Fe}(t, pH)$ для удобства считывания значений представлены на рисунке 2 в виде изолиний. На графике маркерами показаны опытные данные из [4], сплошными линиями – расчетные значения $C_{Fe}(t, pH)$, найденные по (4), (5).

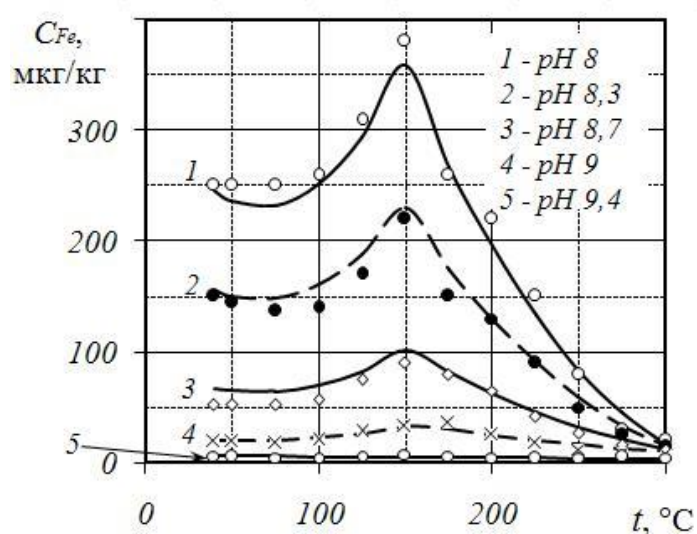


Рисунок 2 – Растворимость магнетита $C_{Fe}(t, pH)$ в воде тепловых сетей

Из рисунка 2 видно, что при температуре теплоносителя 150°C меняется знак температурного коэффициента растворимости магнетита, что связано с перестройкой его кристаллической структуры. При $pH > 9,25$ значения $C_{Fe}(t, pH)$ почти не зависят от температуры теплоносителя.

Значения глубинного показателя внутреннего равномерного коррозионного износа Π рассчитаны для прямолинейного участка трубопровода теплосетей г. Новокузнецка по формуле (3) (с учетом методики [1] по определению значений θ, k, D, h_D) при $x = 0$ для следующих исходных данных: $\tau_p = 8760$ часов (один год эксплуатации трубопровода); $d_s = 50$ мм; $\rho_m = 7800$ кг/м³; расход воды в трубе $2 \cdot 10^4$ кг/час. Результаты расчета для характерных в системах теплоснабжения значений pH – на рисунке 3.

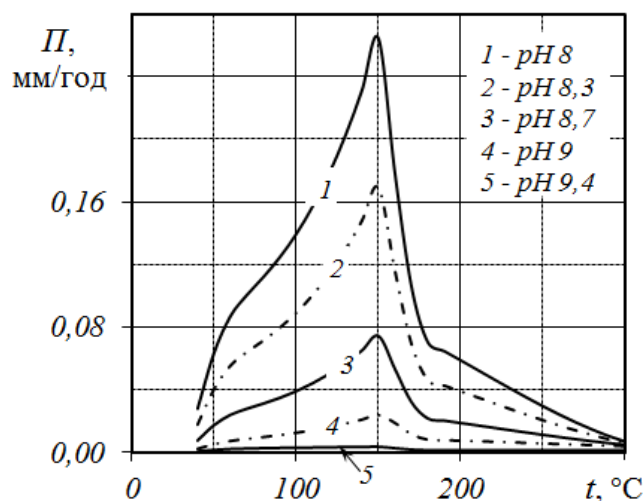


Рисунок 3 – Глубинный показатель износа $\Pi(t, pH)$

В диапазоне температур 40÷150°C наблюдается экспоненциальный характер зависимости $\Pi(t)$. Скорость износа в этом диапазоне температур определяется скоростью реакции коррозии на границе «металл-оксид». Резкое снижение значения Π при дальнейшем повышении температуры до 180°C (степенная зависимость) связано со сменой знака температурного коэффициента растворимости C_{Fe} и усилением диффузионного контроля. При увеличении температуры выше 180°C износ протекает с диффузионным контролем. При $pH > 9,4$ скорость износа минимальна и почти не зависит от температуры.

Кроме того, рисунок 3 показывает целесообразность (с точки зрения коррозионного износа) применения в городских системах теплоснабжения теплоносителя с температурой не более 100 градусов Цельсия, что также является предпочтительным и с энергетической точки зрения [5].

Значения глубинного показателя Π для теплосетей г. Новокузнецка, представленные на рисунке 3, вполне согласуются с данными натурных измерений [2]. Однако следует заметить, что в данной модели рассматривается равномерная коррозия внутренней поверхности труб. Учет локального характера коррозии труб из углеродистой стали, транспортирующих высокотемпературный теплоноситель, выполненный в [1], требует дальнейшего исследования.

Анализ модели показывает, что основными факторами, влияющими на интенсивность внутреннего равномерного коррозионного износа, являются температура теплоносителя и его водородный показатель, скорость и геометрия потока.

Библиографический список

1. Чапаев, Д. Б. Расчет скорости внутренней коррозии трубопроводов водяных тепловых сетей из углеродистых сталей / Д. Б. Чапаев, А. А. Оленников // Известия вузов. Черная металлургия. – 2012. – № 4. – С. 33–36.
2. Чапаев, Д. Б. Характеристики внутренней коррозии и надежности тепловых сетей крупного города: дис....канд. техн. наук: 05.23.03: защищена 16.02.04: утв. 09.07.04. / Д. Б. Чапаев – Новосибирск, 2004. – 178 с.
3. Зайчик, Л. И. Определение скорости коррозии металла в условиях внешне-диффузионного режима / Л. И. Зайчик, Б. И. Нигматулин, В. А. Першуков // Теплоэнергетика. – 1995. – № 7. – С. 12–15.
4. Кристенсен, Оле. Новые датские стандарты водоподготовки / Оле Кристенсен, Свен Андерсен // Водоочистка. – 2008. – № 6. – С. 56–60.
5. Баймачев, Е. Э. Оптимизация температурного графика централизованного теплоснабжения по критерию минимума затрат эксергии / Е. Э. Баймачев, Л. М. Манзарханова, М. В. Туфанова, А. И. Левицкий // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 6. – С. 68–72.

УДК 622.831:519.6

СИНТЕЗ 2D И 3D МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗА УСТОЙЧИВОСТИ НЕОДНОРОДНЫХ ЦЕЛИКОВ НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

Домрачев А.Н., Риб С.В.

Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк, Россия, seregarib@yandex.ru

Аннотация. В данной работе предложен подход к решению задачи прогноза устойчивости неоднородных угольных целиков с помощью синтеза 2D и 3D моделей. Описана область применения метода конечных элементов. С помощью численного исследования методом конечных элементов решена задача оценки состояния горных выработок. В качестве объекта моделирования приняты две горные выработки, проводимых по пласту угля мощностью 2,5 м с оставлением между ними целика шириной 20 м. Для выполнения расчетов использован программный комплекс Aurora Z88v3.

Ключевые слова: модель, метод конечных элементов, комплекс программ, неоднородный целик, геомеханические процессы, смещения.

Abstract. In this paper we propose an approach to the solution of heterogeneous coal pillars prediction problem of stability with the help of 2D and 3D models of synthesis. It describes the scope of the finite element method. A numerical study using finite element method solved the problem of assessing the state of mine workings. As the object of modeling two mine workings accepted conducted on a layer 2.5 m thick coal leaving between pillar width of 20 m. To perform the calculations used software package Aurora Z88v3.

Keywords: model, finite element method, complex programs, heterogeneous pillar, geomechanical processes, displacement.

При ведении подземных горных работ приоритетными являются составляющие безопасности и эффективности. Отличительной особенностью подземного способа разработки угольных месторождений является постоянное перемещение рабочего места в пространстве и во времени, что сопряжено с часто меняющимися горно-геологическими и горнотехническими условиями ведения работ. В связи с этим одной из важных и достаточно трудных для решения задач является своевременное обнаружение изменений геомеханической обстановки. Особое внимание следует уделять зонам опорного давления, повышенного горного давления (ПГД), зонам геологических нарушений и др. Попадая в эти зоны горные выработки, охраняемые неоднородными угольными целиками, испытывают деформации пород приконтурного массива, с возможными геодинамическими явлениями. Вопрос прогнозирования геомеханических параметров массива горных пород в изменчивых горно-геологических условиях был и остается актуальным.

В практике нашли применение несколько методов оценки напряжённо-деформированного состояния массива горных пород: лабораторные, шахтные и математические.

Шахтные исследования трудоёмки и достаточно затратны, а иногда практически невозможны ввиду специфики поставленных задач [1].

В основе лабораторных методов лежат законы динамического и кинетического подобия геомеханических процессов. Для широкого круга задач геомеханики применяется метод физического моделирования эквивалентными материалами на исследовательских стендах. Однако недостатками физического моделирования являются: неполное соответствие физико-механических свойств и условий эксперимента реальным условиям, невозможность учесть некоторые горно-геологические и горнотехнические факторы, а также неоднозначность выбора и реализации критериев подобия [2].

Математическое моделирование позволяет: сократить сроки исследований и получения результата, многократно и быстро их повторить или уточнить. Разработка и обоснование математических моделей, отражающих основные закономерности происходящих в массиве геомеханических процессов, и создания эффективных численных алгоритмов их решения вызваны необходимостью решения актуальных задач горной геомеханики. Широкое распространение получили численные методы, из них наиболее применяемым является метод конечных элементов (МКЭ). С помощью МКЭ моделируется массив горных пород с учётом его состава и строения, трещиноватости и параметров геологических нарушений, формы сечения горных выработок, различного рода неоднородностей, выработанного пространства, скважин, горной крепи.

Развитию численного исследования методом конечных элементов для решения задач горного производства посвящена данная работа.

В качестве объекта моделирования приняты две горных выработки, проводимых по пласту угля мощностью 2,5 м с оставлением между ними целика шириной 20 м.

Реализация МКЭ осуществляется с помощью комплексов программ, разработанных на кафедре геотехнологии [3,4,5]. Комплекс проблемно-ориентированных программ CoalPillar [6] для двумерного численного моделирования состояния неоднородных целиков методом конечных элементов позволяет получить картину распределения напряжений и смещений в окрестностях горных выработках на разном расстоянии от подготовительных забоев. Полученные данные о состоянии пород (напряжения, коэффициент концентрации напряжений) являются исходными данными для пространственной модели (3D).

Для выполнения расчетов использован программный комплекс Aurora Z88v3 [6,7,8]. В качестве объемного конечного элемента принят hexahedron (шестигранник) № 1, который обеспечивает вычисление деформации и напряжения в пространстве, используя линейные и нелинейные функции формы (shape functions). Данный элемент является трансформируемым; следовательно, он может иметь форму клина или даже косоугольную форму. Использование процедуры meshing позволило увеличить число конечных элементов и повысить точность моделирования, однако здесь необходимо учитывать ограничения по производительности используемой вычислительной техники (особенно при использовании модели Мизеса). На рисунке 1 приведен скриншот выбора материалов и модели среды. В связи с ограниченными возможностями используемого компьютера расчеты были выполнены только по модели Гука (геометрическая нелинейность).

На объёмную модель создана нагрузка 48 МПа, что соответствует коэффициенту концентрации напряжений 3. Такая концентрация напряжений возможна при воздействии на целик временного опорного давления от очистного забоя, перемещающегося навстречу проводимым выработкам. К рассмотрению был принят массив, включающий слои кровли мощностью 20 м, слои почвы мощностью 10 м и слои пород в боках выработки на расстоянии 10 м от контура. Размеры выработок составили: ширина – 5 м; высота – 2,5 м. Все геометрические параметры загружены в модель в реальных значениях, что позволяет уй-

ти от масштабирования, неизбежного в физических моделях. Свойства пород (модуль упругости, коэффициент Пуассона и плотность) заданы на основе справочных данных, однако существует возможность использования результатов непосредственных испытаний образцов. Результаты моделирования приведены на рисунках 2 и 3. Визуализация результатов моделирования с произвольным масштабом позволяет наглядно отобразить проявление деформации (рисунок 4).

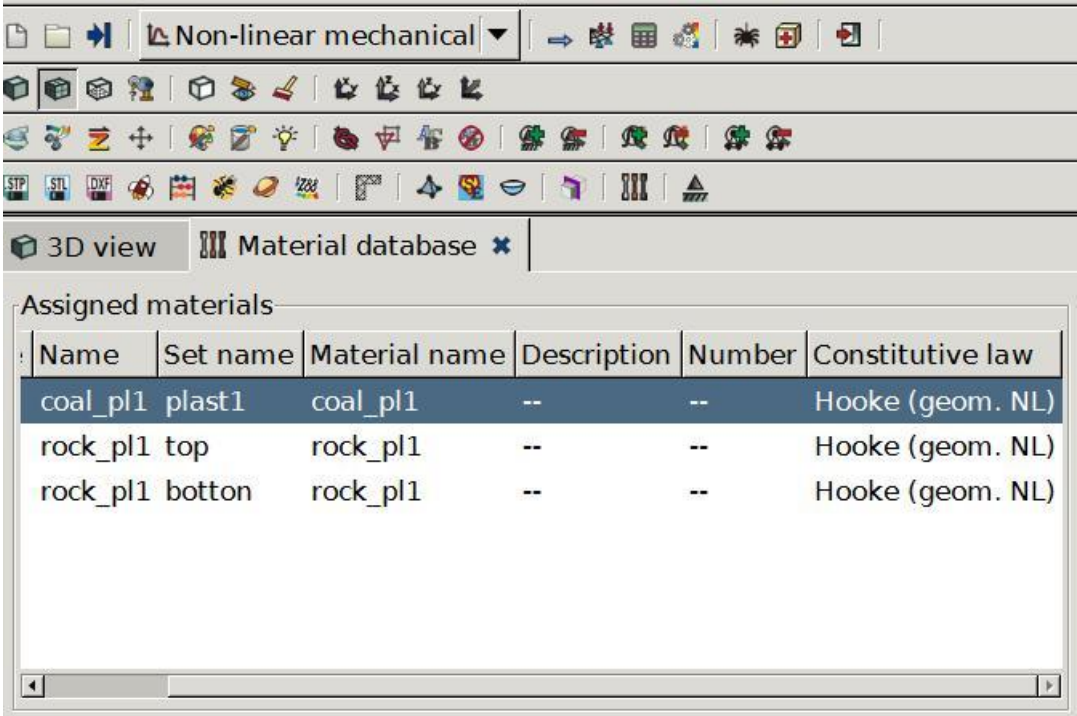


Рисунок 1 – Выбор материалов и модели среды

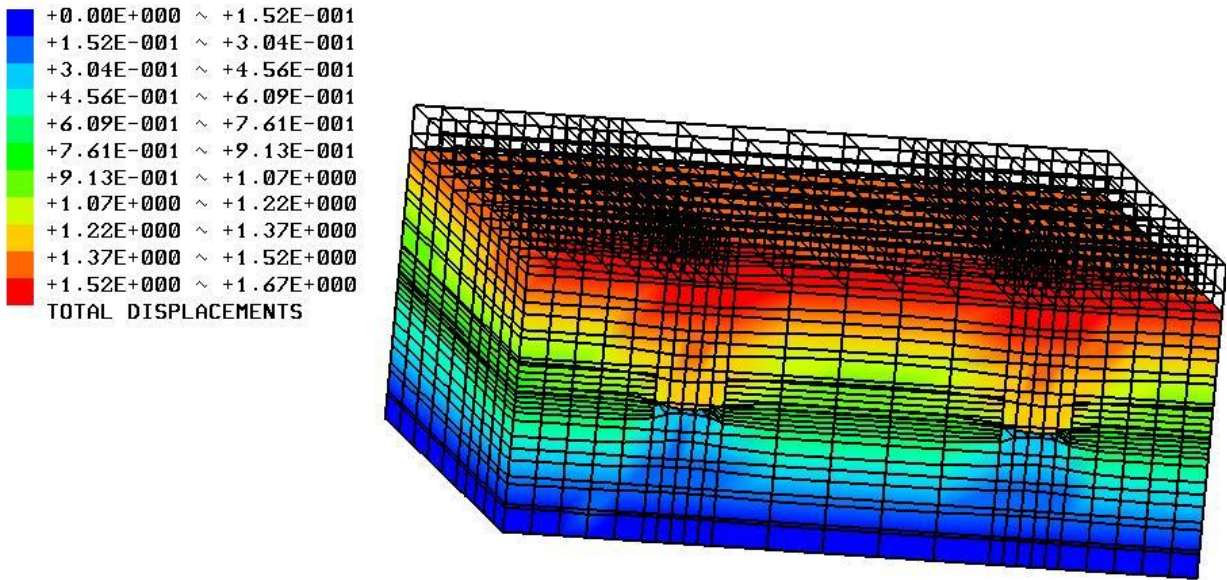


Рисунок 2 – Результат моделирования смещений на контуре выработок и в массиве горных пород

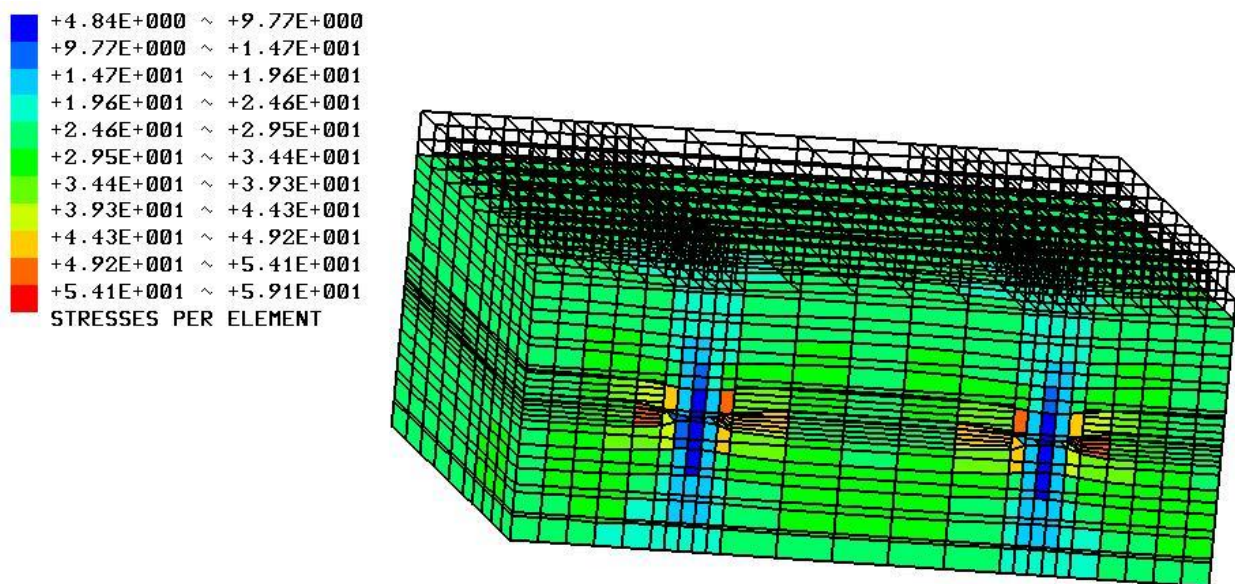


Рисунок 3 – Результат моделирования напряжений в массиве горных пород

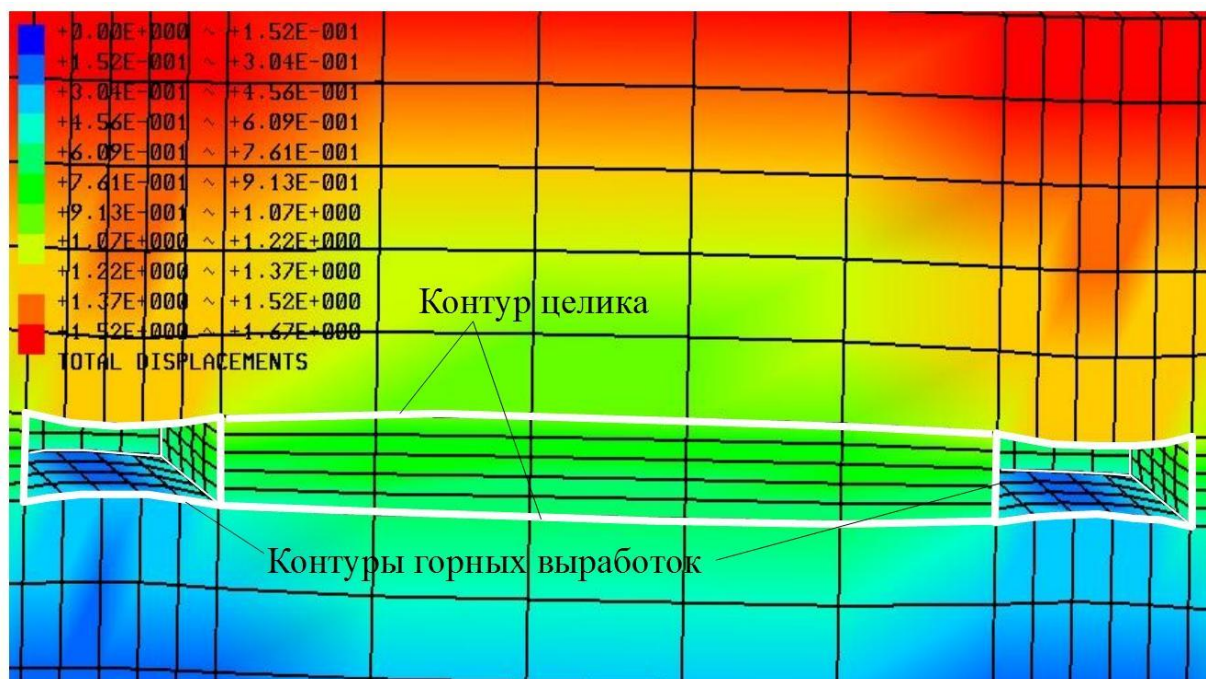


Рисунок 4 – Визуализация деформации объектов моделирования

По результатам моделирования было установлено, что даже в зоне ПГД наибольшие смещения ожидаются со стороны кровли и почвы выработки, что позволяет отказаться от крепления боков выработки непосредственно у забоя и выполнять эти работы с отставанием на 20-30 м в ремонтно-подготовительную смену. Такой подход в свою очередь позволяет сократить длительность проходческого цикла, ускорить проведение выработок и сократить период нахождения подготовительных забоев в зоне ПГД.

Библиографический список

1. Курленя М.В. Расчет напряженного состояния массива пород с использованием натуральных данных о деформировании / М.В. Курленя, В.Е. Миренков, А.В. Шутов // ФТПРПИ. – 1999. – № 3. – С. 27 – 35.
2. Геомеханика - Учеб. пособие / П.В. Егоров, Г.Г. Штумпф, А.А. Ренев, Ю.А. Шевелев и др. –/ Кузбас. гос. техн. ун-т. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2002. – 339 с.
3. Никитина А.М. К вопросу определения закономерностей распределения напряжений в породах кровли горной выработки, закрепленной по различным схемам анкерования [Текст] / А.М. Никитина, С.В. Риб, Д.М. Борзых // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. Труды Международной научно-практ. конф. - Новокузнецк: СибГИУ, 2012. – С. 80-84.
4. Говорухин Ю.М. Методика разработки исходных данных для моделирования геомеханических процессов, происходящих в выработанном пространстве [Текст] / Ю.М. Говорухин // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. Труды Международной научно-практ. конф. - Новокузнецк: СибГИУ, 2011. – С. 112-115.
5. Риб С.В. Численное моделирование упругопластического деформирования неоднородных угольных целиков в зоне влияния очистного выработанного пространства/ С.В. Риб, В.Н. Фрянов // Краевые задачи и математическое моделирование : сб. науч. ст. – Новокузнецк, 2014. – С. 62–67.
6. Разработка алгоритма оценивания напряжённо-деформированного состояния неоднородного угольного целика с использованием двух- и трёхмерной реализации метода конечных элементов / С.В. Риб, А.Н. Домрачев // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: Труды X Всероссийской научно-практической конференции. / под общ. редакцией С.М. Кулакова, Л.П. Мышляева; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2015. – С. 465–469.
7. Z88 AURORA User Manual - [Электронный ресурс], URL: ftp://ftp.uni-bayreuth.de/pub/uni-bayreuth/LS-CAD/Z88AuroraV1/manual_Z88AuroraV1/userguide.pdf.
8. Z88 AURORA Theory Manual - [Электронный ресурс], URL: <http://www.z88.de/z88aurora/download/theoryguide.pdf>

УДК 669.046.56

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ПРОЦЕССА ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЯ МЕТАЛЛА В ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Меркер Э.Э., Крахт Л.Н., Черменев Е.А.

Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
г. Старый Оскол, Россия, merker@inbox.ru

Аннотация. В статье рассмотрены особенности процесса обезуглероживания металла при электроплавке металлизированных окатышей в условиях их непрерывной подачи в ванну дуговой печи. Показана роль составляющих скорости окисления углерода в общем режиме обезуглероживания сталеплавильной ванны. Предложена математическая модель обезуглероживания металла при электроплавке железорудных металлизированных окатышей в ванне дуговой печи.

Ключевые слова: дуговая печь, электроплавка стали, окатыш, обезуглероживание металла.

Abstract. Features of a decarburizing process of metal at an electric smelting of pellets in the conditions of their continuous delivery in an arc furnace bosh are viewed. The role of components of an oxidising rate of carbon in a general regime of decarburization of a steel-smelting bosh is shown. The mathematical model of decarburization of metal at an electric smelting of DRI pellets in an arc furnace bosh is offered.

Keywords: the arc furnace, steel electric smelting, pellets, decarburization of metal.

Процесс обезуглероживания металла в дуговой сталеплавильной печи (ДСП) при электроплавке железорудных металлизированных окатышей (ЖМО) имеет ряд особенностей [1,2]. Непрерывная подача и плавление ЖМО приводит к постоянному увеличению массы расплава в печи и сопровождается восстановлением оксидов железа углеродом и кипением ванны [3,4]. Подачей кислорода и углеродистого порошка на шлак через топливно-кислородные горелки (ТКГ), так же влияют на процесс обезуглероживания. При этом сложность и многофакторность высокотемпературных процессов, своеобразное проявление свойств реагирующих фаз затрудняют изучение и прогнозирование динамики сталеплавильных процессов в ДСП [5-7].

На основе известных теоретических положений и экспериментальных данных по обезуглероживанию металла в ванне дуговой печи [5-7] с учетом особенностей развития окислительных процессов при обезуглероживании металлической ванны переменной массы [4] разработали математическую модель и алгоритм расчета процесса окисления углерода в ванне ДСП с учетом его составляющих.

Известно, что кинетика процесса обезуглероживания может быть представлена следующим обобщенным уравнением: $d[C](\tau)/d\tau = v_C$, где $v_C = v_{C,1} + v_{C,2} + v_{C,3} - v_{C,4}$, %[C]/мин; здесь v_C – обобщенная скорость изменения содержания углерода в ванне печи при электроплавке ЖМО включающая следующие составляющие [4,8]: $v_{C,1}$ – скорость окисления углерода в объеме металла на поверхности пузырьков CO; $v_{C,2}$ – на границе раздела шлак-металл; $v_{C,3}$ – кислородом дутья от ТКГ; $v_{C,4}$ – скорость поступления углерода (науглероживания) металла за счет подачи ЖМО в ванну печи. После расшифровки составляющих обобщенная скорость v_C примет следующий вид:

$$v_C = \begin{cases} -v_{C,1} = 12/16\beta_O([O] - [O]_{p.c.}) \frac{60S_{пуз}}{V_{me}\xi} - \\ -v_{C,2} = 12/16\beta_O([O]_{p.ш.} - [O]) \frac{60S_{ш.м.}}{V_{me}\xi} - \\ -v_{C,3} = \rho_{O_2} a_{O_2} x_{O_2} I_{O_2} \eta_C 100 / M_{me} + \\ + v_{C,4} = v_{ок} ([C]_{ок} - [C]_{реакц}) / M_{me}; \%[C] / мин, \end{cases} \quad (1)$$

где V_{me} и M_{me} – объем (m^3) и масса (кг) металла в печи;
 β_O – коэффициент массопереноса кислорода, ($10^{-3} \div 10^{-5}$ м/с);
 $S_{пуз}$ и $S_{ш.м.}$ – площадь поверхности пузырьков CO и поверхности шлак-металл, m^2 ;
 $[O]$, $[O]_{p.c.}$ и $[O]_{p.ш.}$ – содержание кислорода текущее в металле, равновесное с углеродом металла и равновесное со шлаком, %;
 η_C – доля кислорода, идущая на окисление углерода [6];
 ρ_{O_2} – плотность кислорода, ($1,42 \cdot 10^{-3}$ кг/ m^3);
 a_{O_2} – коэффициент усвоения кислорода ванной (для ДСП-100 $a_{O_2} = 0,8$);
 I_{O_2} – интенсивность подвода технического кислорода, m^3 /мин;
 x_{O_2} – доля кислорода в дутье (для технического кислорода равна 0,995);
 $v_{ок}$ – скорость подачи окатышей в печь, кг/мин;
 $[C]_{ок}$ и $[C]_{реакц} = 12/16[O]_{ок}$ – содержание углерода в окатышах и углерод окатышей идущий на довосстановление оксидов железа содержащихся в них, %;
 ξ – коэффициент учитывающий накопление кислорода в металле:

$$\xi = 1 + 0,75 \frac{p_{CO} \cdot 10^{-5}}{K_{[C]} [C]^2} \left(1 + \frac{0,22 M_{шл}}{\gamma_{(FeO)} L_O M_{me}} \right), \quad (2)$$

где $M_{шл}$ – масса шлака, кг;
 p_{CO} – внешнее давление на пузырьки CO , Па;
 $\gamma_{(FeO)}$ – коэффициент активности FeO в шлаке [7].

Интегрирование выражения $v_C = d[C]/d\tau$ дает зависимость концентрации углерода от времени, $v_C = \Delta[C]/\Delta\tau = ([C] - [C]_{нач})/(\tau - \tau_0)$. Учитывая изменение массы металла в ванне [2,4] имеем:

$$[C] = ([C]_{нач} - v_C(\tau - \tau_0))M_{me,0} / M_{me}, \quad (3)$$

где τ_0 , и τ – время начала и окончания окислительного процесса;
 $[C]_{нач}$ и $[C]$ – начальная и конечная концентрации углерода, %;
 $M_{me,0}$ – начальная масса металла, кг.

Для нахождения равновесного с $[C]$ содержания кислорода в металле ($[O]_{p.c.}$) использовали методику авторов работы [7]. Содержание кислорода в жидком металле при равновесии его со шлаком:

$$[O]_{p.ш.} = a_{(FeO)} / L_O. \quad (4)$$

При расчете образования (FeO) в шлаке используем теорию регулярных растворов [9]. Коэффициент распределения кислорода:

$$L_O = 10^{\frac{6320}{T} + 0,734}. \quad (5)$$

Активность (FeO) в окислительном шлаке зависит от его состава и температуры. Для определения воспользуемся уравнениями модели регулярного ионного раствора [6].

Скорость образования $\Sigma(FeO)$ за счет подачи газообразного кислорода от ТКГ:

$$v_{(FeO),1} = 72/16 \rho_{O_2} a_{O_2} x_{O_2} I_{O_2} \eta_{Fe}, \text{ кг/мин}, \quad (6)$$

где η_{Fe} – доля кислорода, идущая на окисление железа [6].

Скорость образования $\Sigma(FeO)$ при окислении углерода:

$$v_{(FeO),2} = -72/12 v_C M_{me} / 100, \text{ кг/мин}. \quad (7)$$

При плавлении ЖМО происходит довосстановление оксидов железа FeO , содержащихся в окатышах. В случае если содержание углерода в окатышах меньше стехиометрического ($[C]_{ок} < [C]_{реакц}$), то часть FeO из окатышей переходит в шлак. Скорость поступления $\Sigma(FeO)$ в шлак за счёт загрузки окатышей равна:

$$v_{(FeO),3} = v_{ок} 72/16 ([O]_{ок} - 16/12 [C]_{ок}) / 100, \text{ кг/мин}. \quad (8)$$

Тогда суммарная скорость образования $\Sigma(FeO)$:

$$v_{(FeO)} = v_{(FeO),1} + v_{(FeO),2} + v_{(FeO),3}. \quad (9)$$

Накапливающаяся масса шлака ($M_{шл}$), исходя из непрерывной подачи окатышей и шлакообразующих [2,4], с учетом образующегося (FeO) рассчитывается по формуле:

$$M_{шл} = M_{шл,0} + (v_{ок} B/100 + v_{(FeO)} + v_{изв})(\tau - \tau_0), \quad (10)$$

где B – содержание пустой породы в окатышах (CaO и SiO_2), %;

$v_{изв}$ – скорость подачи извести в печь, кг/мин.

Текущая масса металла, с учетом подачи окатышей, образующегося FeO и скорости обезуглероживания, рассчитывается по формуле:

$$M_{me} = M_{me.0} + (v_{ок} Fe_{ок}^{мет} / 100 - 56 / 72 v_{(FeO)} - v_C M_{me.нач} / 100) (\tau - \tau_0). \quad (11)$$

Следовательно, фактическое содержание $\Sigma(FeO)$ в шлаке находим по формуле:

$$\Sigma(FeO) = (\Sigma(FeO)_{нач} M_{шл} / 100 + v_{(FeO)} (\tau - \tau_0)) 100 / M_{шл.0}, \quad (12)$$

где $\Sigma(FeO)_{нач}$ – начальное содержание FeO в шлаке, %.

Концентрация кислорода в металле в период окислительного рафинирования занимает промежуточное положение между равновесными с углеродом и со шлаком. Если принять, что эти величины отличаются только по разностям концентраций и величинам реакционных поверхностей, то исходя из закона сохранения масс можно записать $([O]_{p.c.} - [O])(S_{пuz} + S_{ш.м.}) + ([O]_{ш.м.} - [O])S_{ш.м.} = 0$, откуда выводим:

$$[O] = \frac{[O]_{p.c.} (S_{пuz} + S_{ш.м.}) + [O]_{ш.м.} S_{ш.м.}}{S_{пuz} + 2S_{ш.м.}}. \quad (13)$$

В исследованиях [1,8] отмечается, что при чистом кипении ванны металла в электропечи зарождение пузырьков CO возможно лишь на шероховатой твёрдой поверхности, т.е. в порах подины размером от 0,1 до 1 мм, не смачиваемых металлом и заполненных газом, данный процесс подробно рассматривается в [9]. Хотя пузырьки и зарождаются только на подине, реакция $[C] \rightarrow \{CO\}$ протекает во всем объёме металла [4], причем более энергично в верхних его слоях, так как при всплывании пузырька его объём и поверхность непрерывно увеличивается [8], а по мере снижения ферростатического давления столба металла уменьшается равновесное $[O]_{p.c.}$ и растёт сверхравновесное $[O] - [O]_{p.c.}$ содержание кислорода. Внешнее давление на пузырьки:

$$p_{CO} = p_{вн.} = p_{атм.} + (H_{me} \rho_{me} + H_{шл} \rho_{шл}) g, \quad (14)$$

где $p_{атм.}$ – атмосферное давление, Па;

g – ускорение земного притяжения, м/с²;

$H_{me}, H_{шл}$ – высота слоя металла и шлака над пузырьком, м;

ρ_{me} – плотность металла (~ 6600 кг/м³);

$\rho_{шл}$ – плотность шлака (~ 3000 кг/м³).

Ванна ДСП в упрощенном виде представляет собой усечённый конус с углом $\alpha = 45^\circ$, направленный вниз, высотой $H_{ван.}$ Радиус большего основания конуса равен радиусу ванны печи ($R_{ван.}$). Тогда радиус пода равен $R_{под} = R_{ван.} - H_{ван.} / \tan \alpha$. Исходя из формулы объема конуса высоту слоя расплава можно определить по формуле:

$$H = \left(\sqrt[3]{3V / (\pi \tan \alpha)} + R_{под}^3 - R_{ван.}^3 \right) \tan \alpha, \text{ м.} \quad (15)$$

Для определения площади поверхности металл-шлак использовали данные расчетов авторов [1,8]:

$$S_{ш.м.} = S_{з.в} + 0,1 S_{пuz} \text{ и } S_{пuz} = S N_{пuz}, \quad (16)$$

где $N_{пуз}$ – количество пузырей CO в кипящей ванне печи;
 $S_{з,в}$ – площадь зеркала ванны, m^2 ;
 S – поверхность пузырька ($S = 4\pi r^2$), m^2 .
 Радиус пузырька r можно рассчитать по формуле [9]:

$$r = \sqrt{2\sigma / (\rho g)}, \quad (17)$$

где σ – поверхностное натяжение расплава, Дж/м².

Одним из основных факторов вспенивания шлака [8] является выделение пузырьков CO в ванне агрегата. Количество пузырей:

$$N_{пуз} = V_{CO,в} / V_{пуз}, \quad (18)$$

где V_{CO} – объём CO в ванне, m^3 ;
 $V_{пуз}$ – объём пузырька CO ($V_{пуз} = 4/3\pi r^3$), m^3 .
 Скорость всплытия газовых пузырьков [9]:

$$w_{CO} \approx \sqrt{4/3rg}. \quad (19)$$

Объём образующегося CO в ванне ДСП:

$$V_{CO} = \frac{28/12((v_{C,1} + v_{C,2} + v_{C,3})M_{ме} + v_{ок}[C]_{реакт})}{60 \cdot 100\rho_{CO}}, \quad (20)$$

где ρ_{CO} – плотность CO , кг/м³.

Объём CO в ванне определяли по выражению:

$$V_{CO,в} = V_{CO}\tau_{под} = V_{CO}H / w_{CO}. \quad (21)$$

Тепловой эффект от протекания реакций:

$$q_{v_c} = (q_{C,1}v_{C,1} + q_{C,2}v_{C,2} + q_{C,3}v_{C,3} + q_{C,4}v_{C,4})M_{ме} / 100, \quad (22)$$

$$q_{v_{(FeO)}} = q_{(FeO),1}v_{(FeO),1} + q_{(FeO),2}v_{(FeO),2}, \quad (23)$$

где q – теплоты реакций соответственно:

$q_{C,1}$, $[C] + [O] \rightarrow \{CO\}$; $q_{C,2}$, $[C] + (FeO) \rightarrow [Fe] + \{CO\}$; $q_{C,3}$, $[C] + 1/2O_2 \rightarrow \{CO\}$;

$q_{C,4}$, $C_{ок} \rightarrow [C]$; $q_{(FeO),1}$, $[Fe] + 1/2O_2 \rightarrow (FeO)$; $q_{(FeO),2}$, $[Fe] + [O] \rightarrow (FeO)$.

Потери тепла с уходящими газами при этом составят:

$$Q_{yx,газ} = c_{CO}V_{CO}t_{CO}\Delta\tau / \rho_{CO}. \quad (24)$$

В результате скорость нагрева шлако-металлического расплава от обезуглероживания рассчитываем по выражению:

$$v_{t,C} = \frac{q_{v_c} - q_{yx,газ}}{M_{ме}c_{ме} + M_{шл}c_{шл}}. \quad (25)$$

Выражения (1)-(25) составляют основу структуры алгоритма расчета и математической модели окислительно-восстановительных процессов обезуглероживания металли-

ческого расплава в ванне ДСП, которая учитывает отдельные составляющие суммарной реакции окисления углерода (v_C), распределение кислорода на окисление, формирование пузырьков, содержание углерода, параметры теплового состояния ванны и другие технологические факторы плавания ЖМО в печи по ходу плавки стали [1-4].

Особенностью алгоритма расчета процесса обезуглероживания и программы на его основе заключается в том, что расчет начинается с определения концентраций кислорода в металле, равновесных с содержанием углерода $[O]_{p.c.}$ и со шлаком $[O]_{m.ш}$ с учетом параметров образования пузырей в ванне. Затем задавая нулевое приближение величин поверхностей пузырей в металле и раздела шлак-металл находим отдельные составляющие обезуглероживания и науглероживания металла. По полученным данным определяем объем выделяющегося CO и новое приближение величин поверхностей пузырей в металле и раздела шлак-металл. Если погрешность полученных значений меньше заданной, то производим расчет текущего содержания углерода $[C]$, содержания $\Sigma(FeO)$ в шлаке, и тепловые эффекты в результате протекания всех реакций. Далее повторяем расчет для следующего промежутка времени, до завершения процесса. После чего выводим конечные данные и завершаем расчет.

Программа расчета позволяет определять по ходу электроплавки концентрацию углерода $[C]$, содержания $\Sigma(FeO)$ в шлаке, и оценивать тепловые эффекты в результате обезуглероживания. Определяя v_C (1) и скорость нагрева металла по выражению (25) представляется возможным осуществлять контроль соотношения процессов нагрева (v_b , °C/мин) и обезуглероживания (v_C , %[C]/мин) металла с тем, чтобы оптимизировать ход электроплавки ЖМО [3] и обеспечить снижение расхода электроэнергии ($N_{эл}$, кВт·ч/т) и повысить производительность печи (P , т/мин) [1,4].

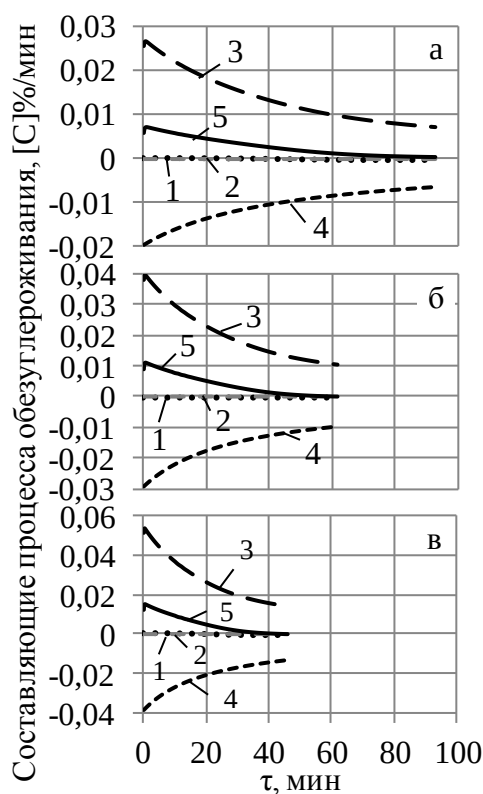
Адекватность модели проверяли путем сравнения результатов расчета с данными текущих плавов для 150т ДСП, разброс при этом не превышал 5%, что свидетельствует об её адекватности и о возможности практического использования алгоритма и программы для расчета обезуглероживания металла в при электроплавке ЖМО в ДСП.

Результаты моделирования параметров обезуглероживания при постоянной скорости подачи окатышей ($v_{ок} = 20; 30; 40$ кг/с) и количестве кислорода ТКГ на плавку в ванне 150т ДСП от начала загрузки ($M_{мел.нач} = 50$ т.) до достижения массы металла в печи 150т. приведены на рисунках 1 и 2. Из рисунка 1 следует, что максимальная скорость окисления углерода (кривая 3) вызвана подачей кислорода на шлак от ТКГ. Эти данные подтверждают решающий вклад кислорода от ТКГ в обезуглероживание расплава. При этом скорости $v_{C,1}$, $v_{C,2}$ являются незначительными, но оказывают свое влияние на вспенивание шлака [2,3]. Общий вид кривых совпадает с опытными данными [4].

Как следует из данных рисунка 2 при постоянном количестве извести и кислорода на расчетный период, кривые содержания углерода в металле (поз. а) имеют вид экспоненциальной зависимости. В начальный период $[C]$ практически линейно зависит от времени, затем при $[C] = 0,2 \pm 0,05$ % скорость изменения уменьшается и на конечном отрезке практически неизменна.

Окисленность шлака (рисунок 2, б) в конечный период растет быстрее, так как при снижении содержания углерода ниже $[C] = 0,2 \pm 0,05$ % доля кислорода идущего на его окисление уменьшается, а на окисление железа соответственно увеличивается, что может увеличить потери железа со шлаком.

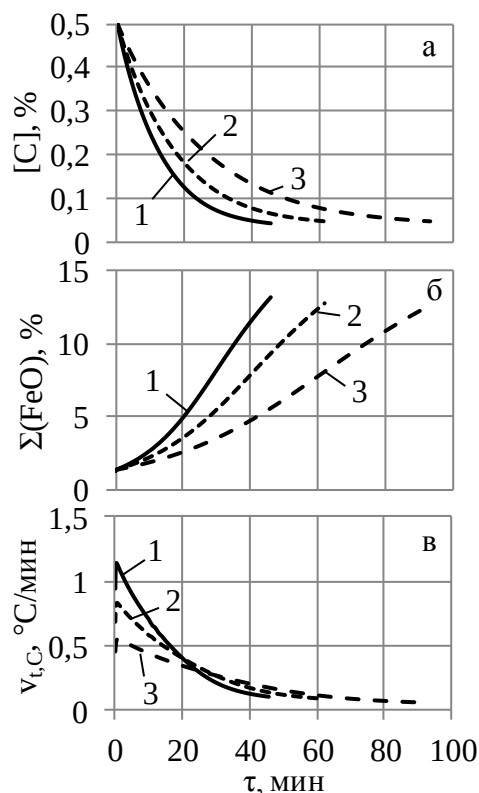
Кривые скорости нагрева шлако-металлического расплава от обезуглероживания металла (рисунок 2, в) имеют вид экспоненциальной зависимости, максимальны в начальный период и непрерывно снижаются в связи с постоянным увеличением массы шлако-металлического расплава.



1,2,3,4,5 – $v_{C,1}$, $v_{C,2}$, $v_{C,3}$, $v_{C,4}$ и v_C , %[C]/мин
а – $v_{ок} = 20$ кг/с; б – $v_{ок} = 30$ кг/с; в – $v_{ок} = 40$ кг/с

Рисунок 1 – Зависимость скоростей окисления углерода для различных составляющих режима обезуглероживания сталеплавильной ванны в 150т дуговой печи при непрерывной загрузке ЖМО

Выводы: На основе проведенных исследований разработана математическая модель процессов обезуглероживания металла в ДСП. Из анализа данных моделирования процесса обезуглероживания металла в ДСП следует что, применение алгоритма и программы математической модели позволяет рассчитывать текущее содержание углерода в ДСП, окисленность шлака и скорость нагрева металла от обезуглероживания в течение расчетного периода плавки стали с учетом непрерывной загрузки ЖМО и подачи кислорода через ТКГ. Это позволяет использовать данную модель, ее алгоритм и программу для осуществления управляемого окислительного рафинирования при непрерывной загрузке и плавлении окатышей в ванне ДСП с достижением высоких технико-экономических показателей производства.



1 – $v_{ок} = 40$ кг/с; 2 – $v_{ок} = 30$ кг/с; 3 – $v_{ок} = 20$ кг/с

Рисунок 2 – Характер изменения содержания углерода в металле (а), окислов железа в шлаке (б) и скорости нагрева шлако-металлического расплава от обезуглероживания (в) по ходу плавки при непрерывной загрузке ЖМО

Библиографический список

1. Меркер Э.Э., Черменев Е.А. Электроплавка металлизированных окатышей в дуговой печи: монография / Э.Э. Меркер, Е.А. Черменев. – Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 320 с.
2. Трахимович В.И., Шалимов А.Г. Использование железа прямого восстановления при выплавке стали. – М.: Metallurgy, 1982. – 248 с.
3. Меркер Э.Э. Энергосберегающие условия плавления металлизированных окатышей в ванне дуговой печи // Бюллетень «Черная металлургия». – 2008. – Вып. 1(1297). – С. 35–39.
4. Бартенева О.И., Меркер Э.Э. Исследование процессов нагрева и обезуглероживания металла в 150-т дуговой печи с переменной массой ванны // Известия Вузов. Черная металлургия. – 2001. – №9. – С. 65–66.
5. Филиппов С.И. Теория процесса обезуглероживания стали. – М.: Metallurgizdat, 1956. – 166 с.
6. Падерин С.Н., Падерин П.С., Кузьмин И.В. Термодинамическое моделирование окислительных процессов при обезуглероживании стали // Известия Вузов. Черная металлургия. – 2003. – №5. – С. 6–11.
7. Падерин С.Н., Падерина Е.П. Термодинамика и расчеты процесса глубокого обезуглероживания стали // Известия Вузов. Черная металлургия. – 2005. – №10. – С. 19–24.
8. Хмелева, С.Л., Падалко А.Г. Математическое моделирование процесса обезуглероживания в электродуговой печи // Тр. Всероссийской научно-практической конференции «Моделирование, программное обеспечение и наукоёмкие технологии в металлургии». – Новокузнецк: СибГИУ, 2011. – С. 347–355.
9. Григорян В.А., Белянчиков Л.Н., Стомахин А.Я. Теоретические основы электроплавильных процессов. – М.: Metallurgy, 1987. – 272 с.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ НЕФТЕДОБЫЧИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ШТАНГОВЫХ ГЛУБИННЫХ НАСОСОВ (ШГН)

Баус С.С.

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет
г. Томск, Россия, stanislav.baus@gmail.com*

Аннотация. Актуальность данной обусловлена рассмотрением принципов и средств моделирования процессов нефтедобычи с применением штанговых глубинных насосов, различных режимов моделирования работы сложной системы, рабочие состояния. Данное программное обеспечение повысит качество и эффективность сложных технологических процессов не только на этапе функционирования, но и на этапе проектирования.

Ключевые слова: моделирование, штанговые глубинные насосы, нефтедобыча, эффективность, автоматизация, режимы работы, сложные технологические системы.

Abstract. The relevance of this is due to the consideration of the principles and tools for modeling processes of oil production using the shtangovy deep PUMPS (SDP), various modes of simulation of a complex system operating states. This software will improve the quality and efficiency of complex processes not only during the operation, but also in the design phase.

Keywords: modeling, shtangovy deep pumps (SDP), oil production, efficiency, automation modes, complex technological systems.

В наш век инновационных технологий, когда информатизация проникла в все сферы жизни современного общества, необходимо отчетливо понимать, что без применения автоматизированных и информационных технологий для моделирования невозможно организовать четкую слаженную производственную или добывающую техническую систему, которая будет соответствовать международным стандартам качества, снизить себестоимость производства или добычи, а также быть конкурентоспособным на международном рынке. Ведь именно рынок углеводородов в настоящее время является одной из самой глобальной площадкой. Данное направление является стратегическим для РФ. Поэтому необходимо постоянное развитие и усовершенствование деятельности вслед за изменяющимися требованиями рынка. Предприятия, занимающиеся добычей нефти и газа, сталкиваются с такими сложными задачами, как получение нефти при минимальных затратах, оптимизация добычи на всём фонде добывающих скважин, управление расходами. Зачастую эти задачи приходится решать в условиях дефицита квалифицированных кадров.

В ходе данных научных изысканий был сформирован и разработанный алгоритм, и методологический аппарат для автоматизации объектов нефтедобычи. Данное программное решение представляет собой передовую, проверенную систему средств автоматизации и программного обеспечения на основе беспроводного решения Smart Wireless, совместно с контроллерами и системами телемеханики. Все данные будут выводиться на монитор главного инженера и контроллера, что существенно облегчит и ускорит весь технологический процесс.

Разработанное комплексное решение для систем механизированной нефтедобычи с применением штанговых глубинных насосов (ШГН) обеспечивает эффективную эксплуатацию скважины, позволяя операторам осуществлять дистанционный мониторинг, управление и анализ данных, собранных при помощи контроллеров скважины на поверхности [3].

Различные серии контроллеров скважины позволяют управлять работой скважины и установленного на ней оборудования. В зависимости от проекта программное обеспечение контроллеров позволяет адаптивно контролировать дебит скважины для поддержания оптимального темпа добычи, а все необходимые защитные функции при этом встроены.

ны в контроллер. Большой набор интерфейсов позволяет подключать различные датчики, КИПиА и иное скважинное оборудование сбора и обработки данных.

Авторы считают, что необходимо широкое внедрение идей синергетики в теорию и практику сложных систем. Как говорил Н. Винер, «важные исследования задерживаются из-за того, что в той или иной области неизвестны результаты, уже давно ставшие классическими в смежной области. Это – не результат эклектичной «разбросанности» авторов, а желание убедить читателя в эффективности синергетики как универсального средства для моделирования и выработки стратегии управления. Усложнение физического содержания моделей за счет учета нелинейности, неравновесности и неоднородности, присущих реальным системам, приводит к выявлению новых синергетических эффектов (усиление, потеря устойчивости с возникновением колебаний, образование упорядоченных структур и т. д.), наличие которых подтверждается специально поставленными экспериментами и позволяет предложить новые методы контроля и управления сложными природными системами.

Графическая интерпретация соответствующих поверхностных или забойных динамограмм, построенных в SCADA-приложении для визуализации. SCADA-система для визуализации представляет собой современное решение по мониторингу, управлению и сбору данных, созданное на основе интернет-технологий. Благодаря этому для SCADA-системы визуализации не требуется установка программы-клиента: достаточно любого интернет-браузера. Это позволяет передавать промысловые данные везде, где имеется Интернет-соединение: машиной-клиентом может служить персональный компьютер, планшетный компьютер или смартфон. Благодаря развитому графическому интерфейсу с интуитивно ясными меню и средствами визуализации, поддающимися доработке с учетом нужд каждого клиента, визуализация SCADA является дружественной к пользователю системой, идеально соответствующей конкретной задаче и несложной в применении.

Позволяет получать информацию об эффективности работы ШГН и обнаруживать потенциальные проблемы [1]. Регистрация динамограмм производится с помощью либо датчиков, либо бессенсорных средств расчета, встроенных в частотные преобразователи скорости.

Частотные преобразователи скорости разработаны с расчетом на максимальную производительность и эффективность [4]. Это – непревзойденное решение по автоматизации процессов нефтедобычи при помощи электрических насосов. Применение частотных преобразователей скорости обеспечивает максимально гибкое регулирование насосной системы в идеальном соответствии с конкретными рабочими условиями, что позволяет в точности согласовать производительность скважинного подъемника с продуктивностью скважины. Прочный корпус, сертифицированный для установки вне помещения, компактные габариты, широкий диапазон возможных дополнительных опций, встроенные функции управления и защиты – все это делает частотные преобразователи скорости идеальным решением для большинства насосных систем.

Применение развитых средств диагностики позволяет исключить преждевременные отказы и продлить срок службы насосов. Это дает возможность производить капитальный ремонт и замену оборудования по состоянию, а не через заданные промежутки времени, и тем самым свести к минимуму простой скважин и повысить продуктивность работы. Решение обеспечивает следующие функции оптимизации и защиты процессов механизированной добычи нефти при помощи электропогружных насосов (ESP):

- повышение дебета низкопродуктивных скважин;
- мониторинг и защиту погружного оборудования;
- сведение к минимуму ухода электропогружных насосов в левую и правую зоны напорной характеристики;
- поддержание кпд насоса на максимальном уровне;
- предотвращение проблем, связанных с присутствием газа, песка и парафинов;

– предотвращение перегрева при низком массовом расходе.

Комплексное решение для систем механизированной нефтедобычи с применением штанговых глубинных насосов (ШГН) обеспечивает эффективную эксплуатацию скважины, позволяя операторам осуществлять дистанционный мониторинг, управление и анализ данных, собранных при помощи контроллеров скважины на поверхности. Графическая интерпретация соответствующих поверхностных или забойных динамограмм, построенных в SCADA-приложении, позволяет получать информацию об эффективности работы ШГН и обнаруживать потенциальные проблемы. Регистрация динамограмм производится с помощью либо датчиков, либо бессенсорных средств расчета, встроенных в частотные преобразователи скорости.

Данное алгоритмическое и технологическое решение позволяет избежать дорогостоящих отказов за счет своевременных оповещений о потенциальной неисправности. В состав решения входят средства распознавания отклонения форм динамограмм от стандартных и рекомендации по регулированию и защите ШГН при различных возможных рабочих условиях:

- 1) повышенное трение;
- 2) удар плунжера насоса по жидкости;
- 3) утечка через нагнетательный или всасывающий клапан глубинного насоса;
- 4) попадание в насос газа;
- 5) недостаточный приток;
- 6) поток через насос;
- 7) высокий уровень флюида;
- 8) механические проблемы;
- 9) загрязнение песком или парафинами;
- 10) газовые пробки или одновременная добыча фонтанным и механизированным способом;
- 11) сочетание условий.

В заключении хочется отметить, что внедрение данного решения не требует огромных финансовых решений, оно легко в обращении, не требует специализированной подготовки персонала, даже человек, который мало знаком с современными компьютерными технологиями, имеет все шансы успешно освоить данный программный продукт. Реализация данных идей по автоматизации данного технологического процесса существенно эффективна для добычи данным способом с применением штанговых глубинных насосов, сократит аварийные ситуации на месторождении, что в свою очередь будет характеризоваться качественной бесперебойной работой, сам процесс мониторинга технологии станет намного проще и наглядней, тем самым ускорит сам технологический процесс.

Библиографический список

1. Глубинные штанговые насосы [электронный ресурс], 2015. <http://neftemash.ru/products/21/137/index.htm>.
2. С. А. Дорохов, Н. С. Александров. Автоматизация нефтедобывающей промышленности. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012.
3. П. Р. Кулешов. Автоматизированные системы в промышленности – М: Изд-во МЭИ, 2014.
4. Штанговые насосные установки [электронный ресурс], 2015. http://prodcp.ru/referaty_po_geologii/referat_shtangovye_nasosnye_ustanovki.htm
5. В.Н. Ивановский, В.И. Дарищев. Скважинные насосные установки для добычи нефти / Учебное пособие. – М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2002. – 824 с.
6. Дашевский А.В. Справочник инженера по добыче нефти. – М: Изд-во НФП, 2003.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ ОБШИВОК СУДОВ

Веревкин В.И.¹, Калашников С.Н.², Веревкин С.В.³

¹Калининградский государственный технический университет

²Сибирский государственный индустриальный университет

³Балтийский федеральный университет имени Э. Канта

Аннотация. Представлен метод математического моделирования электрохимической коррозии обшивок судов, вызываемый термоэлектродвижущей силой в их сварных соединениях. Метод может быть использован для проектирования и экспериментального подбора химсоставов соединяемых листов.

Ключевые слова: математическая модель, уравнение, электрохимическая коррозия, сварное соединение, лист обшивки судна, химический состав листа, зона сварки, термоэлектродвижущая сила.

Abstract. The method of mathematical modeling of electrochemical corrosion sheathing of ships, called thermoelectric power in their welded joints. The method can be used for the design and selection of experimental hemostasis of the connected sheets.

Keywords: mathematical model, equation, electrochemical corrosion, the sheet plating of the vessel, the chemical composition of the sheet, the weld zone, thermoelectric power.

Известно, что по разрушительности своего воздействия на металлы и сплавы электрохимическая коррозия не имеет себе равных. Главными причинами электрохимической коррозии являются протекающие по деталям электрические токи, которые возникают под действием термоэлектродвижущей силы (ТЭДС) в образующихся между отдельными элементами деталей гальванических парах.

Характер коррозионных разрушений наружных обшивок морских судов показывает, что скорость коррозии сварных швов и околошовной зоны примерно в 10 раз выше, чем материала листов корпусов судов [1].

Поскольку различие химических составов свариваемых листов (либо сварного шва и основного металла – материала листов обшивки судна) зачастую оказывается наибольшим, то при тех же температурных условиях ТЭДС, в зоне сварки, становится весьма значительной. Возникающее на таких термopарах напряжение падает на электрической цепи зоны сварного соединения, имеющей очень малое электрическое сопротивление. Режим работы образованных термopар – практически режим короткого замыкания. Это обстоятельство приводит к возникновению большой силы тока.

Поскольку две детали, даже выполненные из одной и той же стали, обязательно отличаются химическими составами, а зональная температура морской воды почти всегда несколько отличается от температуры внутри корпуса судна, то в результате сваривания этих деталей образуется термopар. На ее концах возникает постоянное напряжение, приводящее к возникновению электрического тока от одного электроотрицательного электрода к другому электроположительному через электропроводящую морскую воду.

Коррозионные способности можно проанализировать по ряду напряжений металлов: $Li < K < Rb < Cs < Ba < Ca < Na < Mg < Al < Mn < Cr < Zn < Fe < Cd < Co < Ni < Sn < Pb < H_2 < Cu < Ag < Hg < Pt < Au$. Металлы, находящиеся левее Fe (например, Zn), легче отдают свои электроны, чем металл справа (например, Cu). При попадании в электролит (морскую воду) указанные электроды образуют гальваническую пару. Так более активный металл (стоящий левее) Zn заряжается положительно, а менее активный Cu – отрицательно.

Для экспериментального изучения поведения сварных соединений обшивок судов в морской воде на ОАО «Янтарь» г. Калининграда была изготовлена партия из 40 образцов различных сталей листовых корпусных конструкций. В исследованиях использовали выходной контроль продукции, включенный в сертификат соответствия.

В ходе исследования микровольтнаноамперметром Ф-136 измеряли напряжения, создаваемые в термопарах, изготовленных из различных пар электродов.

Для разрезания исходных образцов на тонкие пластины использовали фрезерные станки. Образцы были распущены на 237 электродов – пластин в ширину, равную толщине исходных образцов, при одинаковой толщине, равной шагу разрезания 4 мм. Из вырезанных полос (электродов) сваривались термопары. Для сварки использовалась ацетилено-кислородная сварка в специальном кондукторе.

Таблица 1 – Примеры судостроительных сталей, использованных в эксперименте

№ п/п	Марка стали	Химический состав стали, % x 100									
		<i>Si</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>C</i>	<i>Mo</i>	<i>Ti</i>	<i>Al</i>	<i>V</i>
1	D40S	95	89	52	43	79	14	-	0,7	3	0,4
2	D40S	93	87	51	42	75	12	-	1	2,6	0,3
3	E36	21	4	3	6	98	9	2	3	34	22
4	E32	20	3	3	2	121	15	<1	<5	33	<5
5	A36	24	4	2	4	91	9	2	3	29	26

Газовая сварка позволила надежно соединить электроды без разбавления зоны соединения посторонним материалом (материалом плавящегося электрода, как, например, при электрической дуговой сварке плавящимся электродом).

В качестве инструментальной основы установки принят сварочный аппарат для сварки полипропиленовых труб марки FoxPlastic 1800. Он снабжен регулятором температуры, который с высокой точностью поддерживает заданную температуру двух насадок. Одна из насадок (максимального диаметра – на трубу диаметром 63 мм) заполнена спеченным порошком алунда (Al_2O_3), замешанном на жидком стекле. Перед спеканием внутрь смеси помещалась термопара. Температура свободных концов измерялась термометром и соответствовала температуре окружающего воздуха. Свободные концы термопары подсоединялись к микровольтнаноамперметру Ф-136, включенному в режим измерения микронапряжения. На каждом свободном электроде устанавливался радиатор – металлическая пластинка 100 x 100 x 10 мм – для демпфирования случайных колебаний температуры свободного конца.

В условиях известных химических составов электродов термопар и результатов измерений их ТЭДС при известном перепаде температур между рабочим спаем и свободными концами этих термопар строили регрессионное уравнение связи между химсоставом электродов и ТЭДС. После чего уравнение перестраивали на типовой перепад температур в 20 °С:

$$u, \text{ мВ} = -0,046 + 0,184\Delta Si - 0,064\Delta C + 0,035\Delta Al - 0,003\Delta Mn, \quad (1)$$

где ΔSi , ΔC , ΔAl , ΔMn – разности химсоставов, соответственно, кремния, углерода, алюминия и марганца двух сваренных электродов термопары (в %).

Перед обработкой результатов измерений по критерию Стьюдента производилась отбраковка сомнительных опытов. В результате отбраковки сформировалась выборка опытов, включающая пригранично большие значения разностей химсоставов корпусных сталей. Именно для этой группы опытов в конечном счете и построено уравнение (1). Оно адекватно, прежде всего, для судовых корпусных сталей, в сформированных термопарах из которых $\Delta Si \in [0,65; 0,75]\%$, $\Delta C \in [0,03; 0,07]\%$, $\Delta Al \in [0,25; 0,35]\%$, $\Delta Mn \in [0,15; 0,50]\%$. Коэффициенты при других линейных членах уравнения (1) оказались незначимыми.

При перепаде температур между рабочим спаем и свободными концами термопары $\Delta t = 54\text{ }^{\circ}\text{C}$ значение напряжения u лежало в пределах от 0,180 до 0,240 миллиВольт. Указанным условиям соответствует и свободный член уравнения регрессионного уравнения. В результате исследования установлено, что зависимость ТЭДС изученных термопар от разностей химсоставов их электродов носит существенно нелинейный вид. Снижение численных значений разностей химсоставов ведет к понижению чувствительности ТЭДС термопар к колебанию химсоставов свариваемых сталей. В связи с этим меняется и свободный член регрессионного уравнения.

Во всех проделанных опытах значения ТЭДС, развиваемых термопарами сварных швов оболочек обшивок судов в типовых условиях, не превышало долей миллиВольта. В то же время, в литературе приводятся данные о разности потенциалов между электродами в оболочке судна, достигающей 30 мВ [2]! Для сравнения отметим, что термопара «хромель-копель», обладающая максимальной чувствительностью в диапазоне низких температур, при перепаде температур в $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ выдает ТЭДС в размере 1,951 мВ. И только при максимально допустимой для данной термопары разности температур между рабочим спаем и свободными концами в $690\text{ }^{\circ}\text{C}$ ТЭДС составляет 57,859 мВ. Естественно, что сварной шов в контакте с листом обшивки в морской воде находится в условиях малых перепадов температур (за базовый перепад обычно принимают упомянутые $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ – это разность температур между морской водой и внутренней частью судна). Кроме того, отличие химсоставов электродов исследуемых термопар (составленных из сваренных листов обшивки) оказывается пренебрежительно меньшим, чем в специально подобранной паре электродов термопары «хромель-копель».

В качестве возможных причин значительного несовпадения измеренных ТЭДС с известной из литературы можно указать следующие:

- известные измерения проводились для специально подобранных пар электродов, один из которых, например, сталь обшивки судна, другой – материал протектора (магний, цинк). Между ними в морской воде возникает гальванический элемент, значение напряжения на котором может значительно превышать ТЭДС термопары, составленной из нами испытанных материалов;

- наличие на сварном шве окалины, которая по литературным сведениям многократно увеличивает значение разности потенциалов.

По данным [2] оксидная пленка не представляет собой изоморфное и единообразное тело. Это есть группы последовательно соединенных по нормали к поверхности изделия достаточно обособленных элементов. Каждый такой элемент в условиях электролита представляет собой электрическую гальваническую пару. При последовательном соединении их напряжения складываются;

- в [3] показано, что карбидные цепочки до 1000 раз ускоряют процесс коррозии. По-видимому, в этом случае образуются цепочки последовательно соединенных элементов (термопар, гальванических элементов), которые многократно увеличивают итоговую разность потенциалов.

Как известно, наиболее сильными раскислителями при производстве корпусных сталей являются дефицитные редкоземельные металлы – церий и лантан. Раскислительная способность кремния также весьма высока и лишь немного ниже, чем у углерода. В то же время, обеспечиваемая им степень ликвации углерода в металле значительно выше. Поэтому раскисляя одним кремнием, получить здоровый слиток спокойной стали нельзя; интенсивная ликвация углерода приводит к взаимодействию его с кислородом с выделением пузырьков оксида углерода. Вследствие этого для получения плотного слитка одновременно применяют и более сильные раскислители, чем кремний (чаще других – алюминий).

Элементы, активней углерода, характеризующиеся меньшей раскислительной способностью, не могут предотвратить реакцию окисления углерода. Однако в процессе кри-

сталлизации при низкой температуре жидкого металла они взаимодействуют с кислородом, уменьшая интенсивность окисления углерода. Это используется при производстве кипящей стали, куда для регулирования кипения обычно вводят марганец.

Таким образом, кремний, алюминий и марганец являясь не только легирующими, но и вместе с углеродом – основными раскисляющими элементами, оказывают и главное влияние на ТЭДС формируемых в сварных соединениях листов обшивки термопар. При этом на основной раскислитель – кремний падает около 2/3 всего воздействия элементов на формируемую ТЭДС.

Выводы:

1) Основное влияние на ТЭДС, возникающих в местах сварки листов обшивок судов, оказывают раскислители стали и сам углерод.

2) На основной раскислитель – кремний падает около 2/3 всего воздействия элементов листов обшивки судна на формируемую ТЭДС.

3) Снизив, прежде всего, содержание кремния в корпусных сталях можно добиться резкого понижения склонности сварных швов обшивок судов к наиболее разрушительной электрохимической коррозии.

4) Выводы 1-3 относятся и к другим объектам из конструкционных сталей, подверженным электрохимической коррозии (трубопроводам, строительным металлоконструкциям, железнодорожным вагонам и т.п.).

Библиографический список

1. Андреев, Н.Т. Ремонт судов [Текст]: монография / Н.Т. Андреев, О.А. Борчевский, В.Г. Луговых [и др.]. - Л.: Судостроение, 1972. - 568 с.
2. Розенфельд, И.Л. Коррозия и защита металлов [Текст]. - М: Металлургия, 1969. - 448 с.
3. Виды и особенности коррозионных разрушений сварных соединений posiyans@yandex.ru

УДК 621.791.92.001.57

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯ ПОТЕНЦИАЛОВ ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ ОБШИВОК СУДОВ

Веревкин В.И.¹, Калашников С.Н.², Веревкин С.В.³

¹*Калининградский государственный технический университет*

²*Сибирский государственный индустриальный университет*

³*Балтийский федеральный университет имени Э. Канта*

Аннотация. Представлен метод и результаты математического моделирования поля потенциалов при электрохимической коррозии обшивок судов, вызываемый термоэлектродвижущей силой в их сварных соединениях. Метод может быть использован для изучения и выработки средств эффективной борьбы с электрохимической коррозией обшивок судов.

Ключевые слова: математическая модель, уравнение, электрохимическая коррозия, сварное соединение, лист обшивки судна, зона сварки, термоэлектродвижущая сила, электрический потенциал, эквипотенциальная кривая.

Abstract. Presents method and results of mathematical modeling of field potentials in electrochemical corrosion sheathing of ships, called thermoelectric power in their welded joints. The method can be used for the study and development of effective means of combating electrochemical corrosion sheathing of ships.

Keywords: mathematical model, equation, electrochemical corrosion, welded joint, the sheet plating of the vessel, the weld zone, thermoelectric power, electrical potential, equipotential curve.

Контакт разнородных листов обшивки судна образует термопару, которая при не совпадении температур наружной и внутренней поверхностей обшивки порождает термоэлектродвижущую силу (ТЭДС). Она является главной причиной самой разрушительной

электрохимической коррозии обшивки. Основной величиной, определяемой при исследовании процессов электрохимической коррозии и расчетах систем электрохимической защиты металлов, является потенциал в коррозионной среде u . По нему можно определить скорость коррозии и эффективность электрохимической защиты (потенциал электрода φ ; величину анодной и катодной поляризации металла η_a и η_k ; плотность тока на поверхности металла j_s). Ниже остановимся на математическом моделировании поля потенциалов и распределения электрического тока в сварном соединении, подверженном электрохимической коррозии. За математическую основу взяты известные разработки [1,2]. Основное внимание в работе уделили отсутствующим в литературе постановке задачи и специфике задания граничных условий по ТЭДС.

Проводимость коррозионной среды есть величина, обратная её электрическому сопротивлению: $q = \frac{1}{R}$. Она измеряется в Сименсах: $C_m = \frac{1}{O_m}$. Удельная электрическая проводимость среды $\gamma = \frac{1}{\rho}$ измеряется в $\frac{C_m}{m} = \frac{1}{O_m \cdot m}$.

Обозначим через S площадь поверхности металла, подверженной коррозии, m^2 .

Тогда γ_s – удельная электрическая проводимость коррозионной среды на площади S (величина электрической проводимости, приходящаяся на единицу площади корродируемой поверхности) – определится как $\gamma_s = \frac{\gamma}{S}$. Она измеряется в $\frac{1}{O_m \cdot m^3} = \frac{A}{m^3}$, т.к. $\frac{B}{O_m} = A$.

Плотность тока на поверхности металла

$$j_s = -\gamma \left(\frac{\partial u}{\partial n} \right)_s, \text{ измеряется в } \frac{A}{m^2}. \text{ Причем } \frac{A}{m^2} = \frac{1}{O_m \cdot m} \cdot \frac{B}{m}, \quad (1)$$

где n – нормаль к поверхности металла s . Она измеряется в м.

Потенциал в стационарной однородной по проводимости среде, не содержащей источников тока, удовлетворяет дифференциальному уравнению Лапласа, которое в прямоугольной системе координат x, y, z имеет вид:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0. \text{ Размерность: } \frac{B}{m^2}. \quad (2)$$

В более сложном варианте – при наличии в однородной коррозионной среде сосредоточенных источников тока (например, точечных источников, заменяющих протекторы, аноды, а также действие термоЭДС) – потенциал удовлетворяет дифференциальному уравнению Пуассона, источниковый член которого может быть представлено, например, через дельта-функции:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = - \left[\sum_{m=1}^M i_m \delta(x - x_m) \cdot \delta(y - y_m) \cdot \delta(z - z_m) \right] / \gamma, \quad (3)$$

где i_m – объёмный ток m -го источника, т.е. ток m -го сосредоточенного (точечного) источника, отнесенный к единице объема коррозионной среды. Иначе говоря, объёмная плотность m -го источника. Её размерность: $\frac{A}{m^3}$; Каждый такой источник действует в определенной и заранее известной точке на поверхности объекта коррозии;

x_m, y_m, z_m – координаты m -го источника. Их размерность – м;

M – общее число известных сосредоточенных источников тока в коррозионной среде;

$\delta(x - x_m), \delta(y - y_m), \delta(z - z_m)$ – типовые безразмерные δ -функции, которые обладают следующими классическими свойствами:

$$a) \delta(f - f_m) = \begin{cases} 0 & \text{при } f \neq f_m \\ \infty & \text{при } f = f_m \end{cases}; \quad б) \int_{-\infty}^{\infty} \delta(f) df = 1.$$

где f – одна из декартовых координат (x, y, z).

Размерность уравнения (3): слева знака равенства – $\frac{B}{M^2}$. Размерность справа знака равенства: $\frac{A}{M^3} \cdot OM \cdot M = \frac{A}{M^3} \cdot \frac{B}{A} \cdot M = \frac{B}{M^2}$.

Уравнения Лапласа и Пуассона имеют множество частных решений. Для выбора решения, характеризующего искомое распределение потенциала на поверхности соприкосновения коррозионной среды с металлом (s_m), задают граничные условия.

В наиболее общем случае граничное условие для потенциала на поверхности соприкосновения коррозионной среды с металлом имеет вид:

$$u_{s_m} + \eta(j) - \Delta u_{s_m} = u_{эфф}, \quad (4)$$

где u_m – потенциал металла, определяемый из условия электронейтральности любой рассматриваемой системы электродов. Измеряется в В. Это неизменный в течение всего периода моделирования и одинаковый для всех точек потенциал рассматриваемого участка коррозирующей среды (системы, состоящей из металла, его приповерхностной пленки, а также участвующего в процессе коррозии объема морской воды). Например, потенциал, приложенный к моделируемой системе извне для создания катодной защиты. В этом случае от специального генератора постоянного тока в рассматриваемую систему по проводу подается отрицательный потенциал u_m . Можно условно считать, что этот потенциал одинаков для всех точек рассматриваемой системы;

$\eta(j)$ – поляризация. Измеряется в В. Она связана с наличием на поверхности соприкосновения коррозионной среды по отношению к металлу (т.е. на очень тонкой приповерхностной плёнке) дополнительной разности потенциалов, обусловленной выделением газов на этой плёнке, развитию диффузионных процессов, выделением на металле других металлов и пр. Поляризация возникает из-за электролизных, химических, диффузионных процессов, адгезии и когезии и т.п. Это повышает потенциал одного участвующего в коррозии электрода и понижает потенциал другого;

$u_{эфф} = u_m - \varphi$ – эффективный потенциал электрода. Измеряется в В;

φ – стационарный и неизменный в течение всего времени моделирования электродный потенциал. Это общий стационарный потенциал. В него входит не только потенциал от катодной защиты, но и от протекторной защиты. Он также обусловлен наличием вихревых и блуждающих токов на поверхности обшивки судна. Измеряется в В;

Δu_{s_m} – падение напряжения на поверхности соприкосновения коррозионной среды с металлом от тока, порождаемого термоЭДС. Измеряется в В.

$$\Delta u_{s_m} = \rho_\eta \cdot j_s, \quad (5)$$

где ρ_η – удельное поверхностное (переходное) сопротивление Ом.м²;
 j_s – плотность тока на поверхности металла. Согласно уравнению (5):

$$j_s = -\gamma(\partial u / \partial n)_s, \text{ измеряется в } \frac{A}{m^2}. \quad (6)$$

Подставим (5) и (6) в (4):

$$u_{s_m} + \eta(j) - \rho_\eta \gamma(\partial u / \partial n)_{s_m} = u_{эфф}. \quad (7)$$

Размерность третьего члена уравнения слева от знака равенства $\rho_\eta \gamma(\partial u / \partial n)_{s_m}$:
 $Ом \cdot м^2 \cdot \frac{A}{м^2} = \frac{В \cdot м^2 \cdot A}{А \cdot м^2} = В$.

Для получения математических моделей, справедливых для целых классов коррозионных систем, уравнения (2) и (3) приводятся к безразмерному виду. Так уравнение (3) приобретает вид:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} = -\frac{l_0^2}{\gamma \Delta \varphi_0} \cdot \sum_{m=1}^M i_m \delta(X - X_m) \cdot \delta(Y - Y_m) \cdot \delta(Z - Z_m), \quad (8)$$

где l_0 – масштаб длины, равный характерному размеру рассматриваемой системы;
 $\Delta \varphi_0$ – масштаб потенциала, принимаемый равным разности стационарных потенциалов каких-либо двух металлов, входящих в рассматриваемую систему;

$X = \frac{x}{l_0}; Y = \frac{y}{l_0}; Z = \frac{z}{l_0}$ – безразмерные координаты;

$U = \frac{u}{\Delta \varphi_0}$ – безразмерный потенциал.

В системе «Первый лист-второй лист-морская вода», как и в системе «Лист-сварной шов-морская вода» источник – ТЭДС термопары – задавался граничным условием первого рода (рисунок 1). При этом устанавливалось, что ТЭДС возникает в районе, приграничном с переходом металла одного листа с другим, либо листа обшивки со сварным швом. Наши измерения, проведенные в указанных коррозионных системах с помощью микровольтнаноамперметра Ф-136 показали, что потенциал того и другого перехода по нормали к нему меняется зигзагообразно, причем нулевой потенциал проходит непосредственно по самой границе. Максимум положительного потенциала наблюдается на расстоянии до 3 мм от линии границы по одну ее сторону, а максимум отрицательного потенциала – на таком же расстоянии по другую сторону границы. При удалении от максимума и границы потенциал снижается по псевдоэкспоненциальному закону.

Для решения задачи моделирования поля потенциалов в описываемой системе в численной форме добавлялись граничные условия (рисунок 1). В частности, по источнику – ТЭДС термопары – в виде соответствующих отрезков прямых максимума и минимума в безразмерной форме. Значения максимума и минимума на указанных прямых не постоянны. Они меняются в зависимости от расстояния Z от рассматриваемой точки на данной прямой.

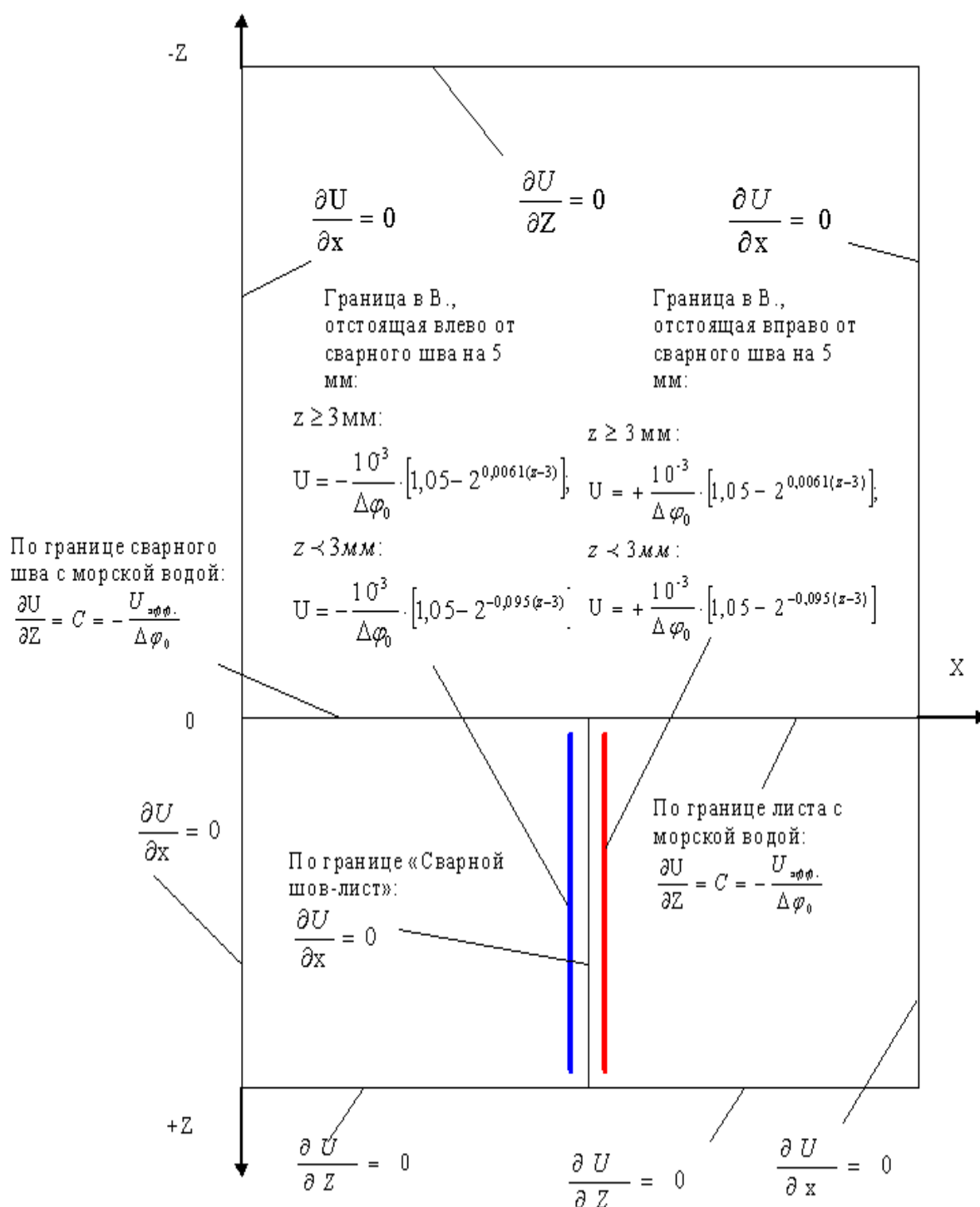


Рисунок1 – Граничные условия задачи. Поляризуемость мала в силу низкого потенциала ТЭДС и малых токов в системе «Лист-сварной шов-морская вода». Покртия отсутствуют

Исходные данные для расчета:

1) Масштаб длины – расстояние от границы стыка листов обшивки (либо сварного шва с листом обшивки) до максимума значения ТЭДС термопары: $l_0 = 3 \text{ мм} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

2) Масштаб потенциала – ТЭДС термопары, составленной из двух листов обшивки, либо сварного шва с листом обшивки при типовой разности содержаний элементов электродов термопары и перепаде температур в $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$: $\Delta \varphi_0 = 0,23 \cdot 10^{-3} \text{ В}$.

3) Удельная электрическая проводимость коррозионной среды – морской воды:

$$\gamma = \frac{1}{\rho_{\text{мс}}} = \frac{1}{0,2336} = 4,2808 \frac{\text{См}}{\text{м}}.$$

4) Удельная электрическая проводимость стали:

$$\gamma_{\text{ст}} = \frac{1}{\rho_{\text{ст}}} = \frac{1}{13 \cdot 10^{-8}} = 7,6 \cdot 10^6 \frac{\text{См}}{\text{м}}.$$

5) Эффективный потенциал электрода $u_{\text{эфф.}} = u_{\text{м}} - \varphi = 0 \text{ В}$.

Пример моделирования поля потенциалов и токов зоны сварного соединения обшивки судна в морской воде приведен на рисунке 2.

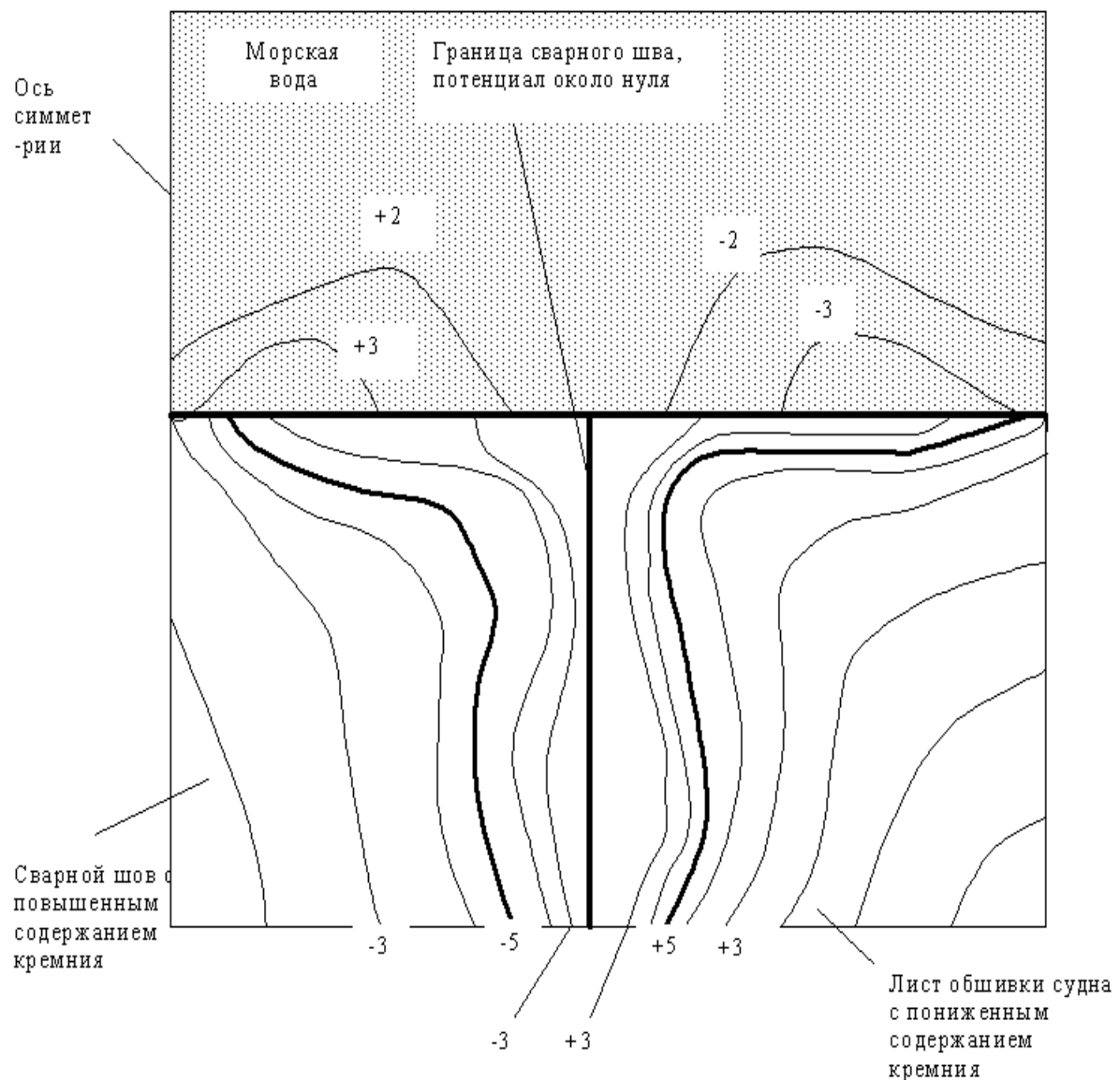


Рисунок 2 – Поле потенциалов зоны сварного соединения в морской воде, $\times 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ В}$, при обогащенном сварном шве

Библиографический список

1. Кайдриков, Р.А. Методы, алгоритмы и примеры коррозионных расчетов [Текст]: учеб. пособие / Р.А. Кайдриков, Б.Л. Журавлев. – Казань: Казан. гос. технол. ун-т., 2006. – 207 с.
2. Гнусин, Н.П. Основы теории расчета и моделирования электрических полей в электролитах [Текст] / Н.П. Поддубный, АИ. Маслий. – Новосибирск: Наука, 1972. – 276 с.

УДК 621.771

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОКАТКИ ТРАМВАЙНЫХ РЕЛЬСОВ В ЧЕТЫРЕХВАЛКОВЫХ КАЛИБРАХ

Перетягтько В.Н.¹, Сметанин С.В.², Филиппова М.В.¹

¹ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет»
г. Новокузнецк, Россия, kafkshp@sibsiu.ru

²АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»
г. Новокузнецк, Россия, Sergey.Smetanin@evraz.com

Аннотация. В статье приведены результаты компьютерного моделирования и промышленных экспериментов с оценкой распределения полей интенсивности деформаций, интенсивности напряжений и усилий прокатки в четырехвалковых рельсовых калибрах. Получены значения усилий прокатки от вертикальных валков и определены математические зависимости по их нахождению. Произведена оценка адекватности математического моделирования посредством сравнения данных с промышленными результатами.

Ключевые слова: четырехвалковый калибр, трамвайный рельс, интенсивность деформаций, интенсивность напряжений, усилие прокатки.

Abstract. In article results of computer simulation and industrial experiments with an estimation of distribution of fields of intensity of deformations, intensity of pressure and efforts rolling rinks four-roll rail gauge are resulted. Schedules of distribution of efforts rolling rinks from vertical roller are received and mathematical dependences on their finding are defined. The estimation of adequacy of mathematical simulation by means of comparison of the data with industrial results is made.

Keywords: four-roll gauge, tram rails, metal deformation, intensity of deformation, stress intensity, energies rolling.

Цель работы – разработка энергоэффективной технологии прокатки трамвайных рельсов в четырехвалковых калибрах на основе результатов теоретических и промышленных исследований напряженно-деформированного состояния металла и оценки распределения усилий прокатки от вертикальных валков.

При прокатке в четырехвалковых рельсовых калибрах со стороны вертикальных валков, формирующих подошву и головку профиля, действуют различные усилия прокатки, что приводит к осевому смещению валков [1]. Это неблагоприятно сказывается на стабильности прокатываемого профиля, с точки зрения позиционирования горизонтальных валков, сопровождающееся дополнительными настройками калибра, и неэффективном использовании мощности привода клетки, которая расходуется на деформацию опорных узлов горизонтальных валков по направлению, соответствующему большему деформирующему усилию [2].

Проведенные исследования по изучению захвата раската и напряженно-деформированного состояния металла в четырехвалковых калибрах показали, что при разрезке головки трамвайных рельсов, металл идет не только на вытяжку, но и на уширение, причем слои металла дают определенное сопротивление и в связи с этим, часть объемов деформируемого металла смещается в зону отстаивания.

Предлагается способ прокатки, в котором величина обжатия металла по головке и подошве профиля подобрана таким образом, чтобы возникающие усилия прокатки от

вертикальных валков, со стороны головки P_z и подошвы P_n профиля были равны между собой $P_z = P_n$. Причем профиль раската подобран таким образом, чтобы из предшествующего калибра в последующий калибр металл обжимался на столько, чтобы раскат из калибра в калибр обеспечивал равенство усилий прокатки со стороны головки и подошвы профиля. Предлагаемый способ прокатки рельсов позволяет исключить осевые усилия на горизонтальные валки, а четырехвалковый калибр является уравновешенным по усилиям прокатки в горизонтальном направлении.

Задачей данного исследования является изучение особенностей напряженно-деформированного состояния металла при образовании желоба с учетом равенстве усилий прокатки от вертикальных валков.

Исследование предлагаемой технологии прокатки проводили с использованием математического компьютерного моделирования в программном комплексе Deform 3D, в соответствии с основами механики сплошных сред. Образование желоба осуществляется за 4 прохода, которые распределены по клетям UR и UF. Калибры четырехвалковые с двумя горизонтальными приводными валками диаметром 1200 мм и двумя вертикальными не приводными валками, диаметром 800 мм, при скорости прокатки 3,5 м/с. Материал – сталь Э76 по ГОСТ Р 55941-2014.

При моделировании были приняты следующие допущения:

- рассматриваемый процесс – изотермический, при температуре 1000 °С;
- валки несжимаемые;
- материал раската – однородный, изотропный;
- деформируемая среда – вязкопластическая;
- трение по закону Зибеля, коэффициент трения задавали постоянным и равным 0,5.

Были проведены расчеты по нахождению оптимальных геометрических параметров заготовки при каждом проходе в клетях UR (UR1, UR3, UR4) и UF, причем величины обжатий со стороны головки и шейки по существующей технологии признаны оптимальными, а корректированию поддавалась величина обжатия по опорной части подошвы профиля.

В связи с тем, что более 55% при разрезке головки профиля приходится на первый пропуск, поэтому результаты исследований приведены для калибра UR1.

Как известно, основным фактором, определяющим ключевое направление для разработки технологии прокатки любого профиля, является исследование деформированного состояния металла в калибрах. Наиболее наглядным показателем, определяющим объемное деформированное состояние металла, является анализ распределения значений интенсивности деформаций в поперечном сечении раската.

В случае несжимаемой среды интенсивность деформации равна:

$$\varepsilon_e = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_2^2}.$$

Как видно по рисунку 1, в целом распределение полей и значений интенсивности деформаций сосредоточены в области разрезки тела головки рельса. Элемент раската, который в первую очередь вступают в контакт с валками – это головка профиля с разрезным гребнем вертикального валка, после чего начинается образование желоба. При разрезке желоба поверхностные слои металла испытывают наибольшую деформацию. Отчетливо просматривается зона усиленного роста полей интенсивности деформаций, которая располагается по оси разрезного гребня в вершине разрезаемого желоба и соответствует наибольшим перемещениям объемов металла. Значения интенсивности деформаций в поперечном сечении достигают $\varepsilon_e = 3,5$. За счет значительной местной деформации металла при разрезке, наблюдается вынужденное уширение металла по границам желоба. Значения интенсивности деформаций в поверхностных слоях металла по всему пе-

риметру желоба больше единицы, что указывает на значительные обжатия. Обжатие по подошве в проходе UR1 составляет 4,5 мм, что на 1мм больше относительно существующей технологии, при этом значения интенсивности деформаций составляют $\varepsilon_e \approx 0,35$. Увеличение обжатия на 1 мм по подошве не дает каких либо принципиальных изменений в значениях интенсивности деформаций. Также отмечают две зоны с интенсивной деформацией $\varepsilon_e = 0,7 \dots 1,4$ в местах сопряжения шейки с головкой профиля.

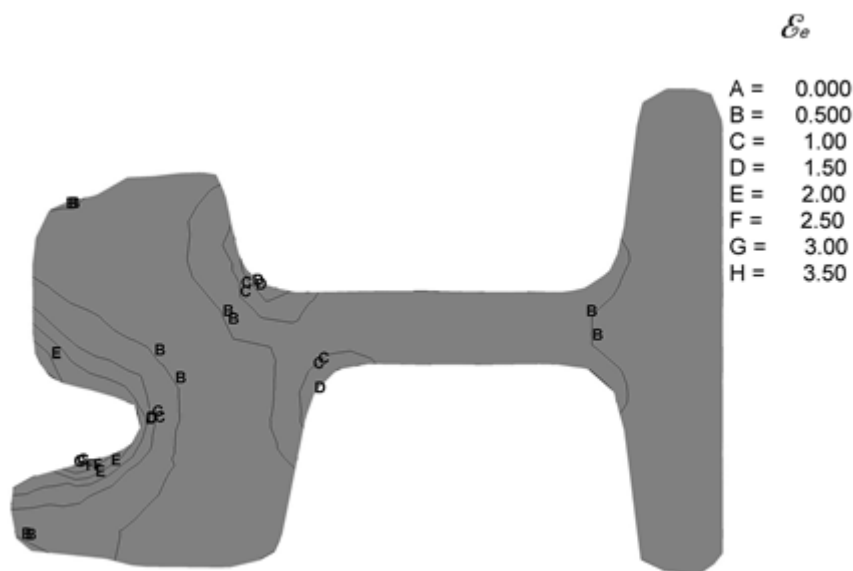


Рисунок 1 – Распределение значений интенсивности деформаций по предлагаемой технологии

Наряду с касательными октаэдрическим напряжением применяют другую инвариантную величину – интенсивность напряжений, или эквивалентное напряжение σ_e , которое отличается от октаэдрического касательного напряжения только постоянным множителем:

$$\sigma_e = \frac{3}{\sqrt{2}} \tau_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}.$$

Распределение полей интенсивности напряжений в поперечном сечении имеет крайне неравномерную картину – это обусловлено геометрическими факторами калибра, вызываемые особенностями профиля желобчатого рельса. При рассмотрении полей интенсивности напряжений по предлагаемой технологии (рисунок 2), по подошве наблюдается перераспределение полей интенсивности напряжений со значениями $\sigma_e = 160$ МПа с центральных к краевым участкам подошвы профиля, что является более благоприятным условием. Зоны с минимальным значением интенсивности напряжений соответствуют головке профиля в верхней и нижней ее части относительно оси желоба на некотором удалении от разрезного и горизонтальных валков. С удалением от поверхностных слоев, в зоне контакта разрезного вала, значения интенсивности напряжений уменьшаются, такая же закономерность наблюдалась при анализе распределения полей интенсивности деформаций.

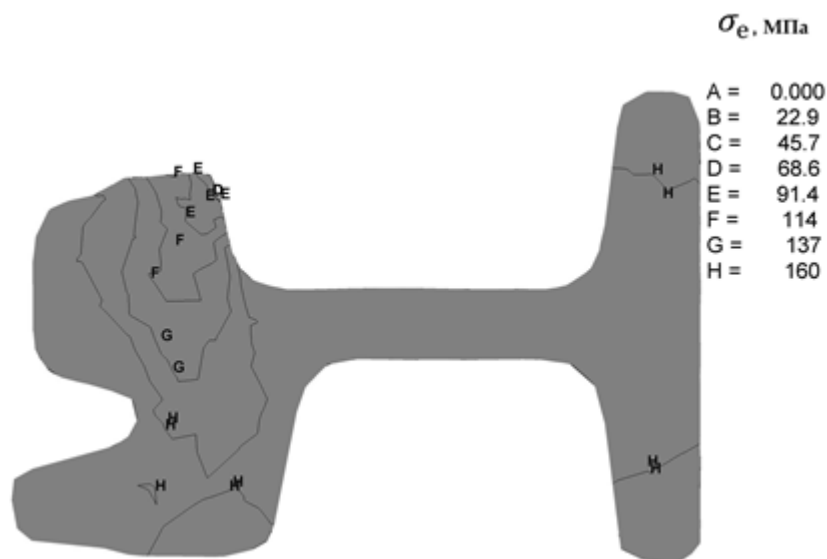


Рисунок 2 – Распределение интенсивности напряжений в поперечном сечении раската по предлагаемой технологии

Сила прокатки определяется как произведение среднего контактного нормального напряжения p_{cp} на горизонтальную проекцию контактной поверхности F_k полосы с валком:

$$P = p_{cp} F_k.$$

Рассматривая первоначальную технологию прокатки трамвайных рельсов, в первом проходе среднее действительное усилие прокатки в клети UR1 на горизонтальных валках находится в интервале $P = 2-2,6$ МН. К концу полосы усилие прокатки возрастает, что объясняется разностью температур по длине раската. Усилие прокатки от вертикального валка по подошве в среднем составляет $P_n = 1,05-1,25$ МН. Усилие прокатки от разрезного валка по головке составляет $P_z = 1,5-1,8$ МН. Из проведенных исследований усилий прокатки по первоначальной технологии установлено, что в горизонтальной плоскости от обжатий вертикальными валками существует значительная неравномерность усилий прокатки. Различие в усилиях прокатки между разрезным валком со стороны головки и гладким валком со стороны подошвы достигает 30-35%, что объясняется значительной разностью по обжатиям элементов профиля.

По предложенной технологии с рациональным распределением усилий прокатки в горизонтальной плоскости были получены значения усилий от вертикальных валков. Установлено, что при входе раската в калибр, первым начинается деформация по головке со стороны разрезного валка с большой интенсивностью. При установившемся процессе прокатки и при выходе раската из калибра, значения усилий прокатки практически равны. Различие в средних значениях усилий прокатки от вертикальных валков составляет 13%, что обусловлено динамическими процессами входа раската в калибр. Распределение усилий прокатки в предлагаемом четырехвалковом калибре, в сравнении с первоначальной технологией, показано в таблице 1.

Таблица 1 – Расчетные и фактические значения усилий прокатки

Валки Различие усилий	Усилие прокатки по первоначальной технологии, МН		Усилие прокатки по предлагаемой технологии, МН
	расчетные	фактические	расчетные
горизонтальные валки	2,4	2,3	2,4
вертикальный валок P_{Γ}	1,5	1,65	1,5
вертикальный валок P_{Π}	1,1	1,15	1,3
различие усилий на вертикальных валках, %	27	30	13

По соотношению приведенных результатов стоит отметить, что погрешность в расчетах моделирования от фактических данных не превышает 10%, что говорит о хорошей сходимости результатов.

Получены уравнения регрессии по нахождению усилий прокатки от вертикальных валков по предложенной технологии, Н:

– от вертикального валка со стороны головки рельса

$$P_{\Gamma} = 260\,540\,027,95x^6 - 878\,627\,626,26x^5 + 1\,091\,822\,702,89x^4 - 603\,478\,163,95x^3 + 130\,996\,205,47x^2 - 739\,696,47x - 38\,272,31; R^2 = 0,95;$$

– от вертикального валка со стороны подошвы рельса

$$P_{\Pi} = 109\,215\,121,27x^6 - 425\,314\,258,13x^5 + 601\,442\,208,05x^4 - 383\,897\,603,63x^3 + 104\,034\,429,32x^2 - 4\,742\,079,29x - 30\,513,19; R^2 = 0,92,$$

где x – величина обжатия вертикальным валком, мм.

Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод о том, что проведенное моделирование является адекватным, результаты которого возможно использовать в дальнейшем для исследования процессов прокатки рельсовых профилей.

По результатам проведенных компьютерных моделирований и промышленных экспериментов, получены данные о распределении интенсивности напряжений, интенсивности деформаций, а также получены математические зависимости по определению усилий прокатки трамвайных желобчатых рельсов в группе клеток Тандем по предлагаемой технологии, которая обеспечивает равенство усилий прокатки от вертикальных валков.

Выводы:

– при разрезке головки профиля и образовании желоба наблюдается очень сложное течение металла на уширение, в зону отстаивания и на вытяжку, которое не подчиняется законам плоских сечений;

– во всех пропусках чистовой группы клеток существует значительная неравномерность по напряженному и деформированному состоянию металла;

– углубленное изучение деформаций металла в четырехвалковых калибрах с оптимальным использованием энергосиловых параметров прокатки, за счет рационального использования резервных сил привода прокатных клеток, является перспективным направлением;

– предложена новая энергоэффективная технология прокатки трамвайных желобчатых рельсов в четырехвалковых разрезных калибрах с рациональным использованием мощности привода клеток основанная на равенстве усилий прокатки в горизонтальной

плоскости от вертикальных валков. Полученные значения усилий прокатки по предложенной технологии удовлетворяют условию $P_n = P_z$.

Библиографический список

1. П.И.Полухин, Ю.В.Грдина. Прокатка и термическая обработка рельсов// М.: Металлургиздат, 1963г. – 510 с.
2. В.Н. Перетятко, С.В. Сметанин, М.В.Филиппова. Исследование технологии прокатки трамвайных рельсов в рельсобалочном цехе ОАО «НКМК» [Текст] / Сибирский государственный индустриальный университет // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии : сборник научных трудов – Вып. 21 – М. ; Новокузнецк, 2008. – С. 78 - 82.

УДК 532.546

РАБОТА СОВЕРШЕННОЙ СКВАЖИНЫ В ОРТОТРОПНОМ КУСОЧНО-ОДНОРОДНОМ ПЛАСТЕ ГРУНТА

Лекомцев Д.Г.

Орловский государственный университет

г. Орел, Россия, lekomtcevdg@yandex.ru

Аннотация. В статье поставлена задача о работе скважины в кусочно-анизотропном пласте грунта. Проницаемость пористой среды характеризуется тензором второго ранга, в общем случае, не симметричным. Получено аналитическое решение задачи о работе совершенной скважины, в ортотропной кусочно-однородной среде, когда компоненты тензора проницаемости симметричны относительно главной диагонали. Изучено влияние анизотропии грунта на дебит скважины. Анизотропия грунта может сильно изменять дебит скважины по отношению к дебиту в изотропном случае.

Ключевые слова: скважина, анизотропия, дебит, тензор проницаемости, ортотропный пласт.

Abstract. The article posed the problem of the hole in the piecewise-anisotropic formation of soil. The permeability of the porous medium is characterized by a tensor of the second rank, in general, not symmetric. An analytical solution of the problem of the perfect wells in orthotropic piecewise homogeneous medium, when the components of the permeability tensor symmetric with respect to main diagonal. The influence of the anisotropy of the soil on the production rate. Anisotropy of soil can strongly change the production rate with respect to the production rate in the isotropic case.

Keywords: well, anisotropy, debit, tensor of penetrability, orthotropic layer.

1. Совершенная эксплуатационная скважина дебита Q расположена в горизонтальном пласте постоянной толщины. Течение происходит в областях D_1 и D_2 плоскости $z = x + iy$. Грунт пласта недеформируемый, анизотропный и кусочно-однородный, постоянной проницаемости K_1 и K_2 ($K_v = k_v K$, $k_v > 0$ – постоянные, $v = 1, 2$). K – тензор второго ранга (вообще говоря, несимметричный). В предположении плоскопараллельности задачи $K = (K_{ij})$, $i, j = 1, 2$. Компоненты (K_{ij}) – постоянные.

Работу скважины моделируем стоком мощности Q , который расположен в начале точки z_0 (рисунок 1). Контур скважины σ_C – окружность радиуса R_C , пласт не ограничен по простираанию. Прямая σ_L : $x = -d$, $y \in (-\infty, \infty)$ разделяет физическую плоскость z на области D_1 и D_2 .

Полагаем, что жидкость несжимаемая и ее течение стационарное. Обобщенный потенциал ϕ и скорость фильтрации $\vec{v}$ течения как функции точки $z = (x, y)$, удовлетворяют обобщенному закону Дарси [1]:

$$\vec{v} = K \cdot \nabla \phi \left(\phi = -\frac{p + \rho l l}{\mu} \right), \quad (1.1)$$

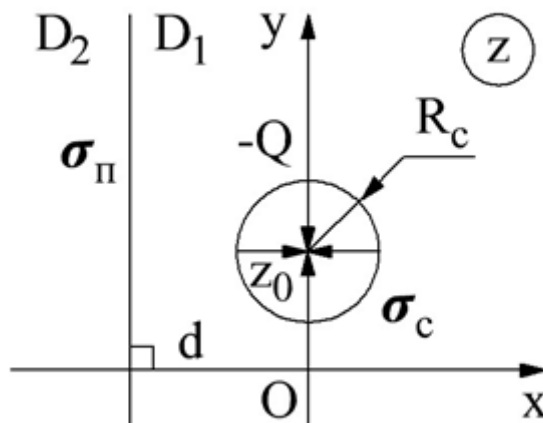


Рисунок 1 – Скважина σ_c и прямолинейная граница раздела сред σ_{Π} на физической плоскости Oxy

и уравнением неразрывности:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0, \quad (1.2)$$

где Π – потенциал массовой силы – силы тяжести;

p – давление;

μ и ρ – вязкость и плотность жидкости.

Уравнения (1.1) и (1.2) записаны в безразмерных величинах [1].

Из (1.1) и (1.2) следует, что обобщенный потенциал $\phi(z)$ удовлетворяет всюду в областях D_1 и D_2 , (за исключением изолированных особых точек $\phi(z)$) уравнению [2]

$$\nabla \cdot (K \cdot \nabla \phi(z)) = 0, \quad z \in D_1 \cup D_2. \quad (1.3)$$

Это уравнение относится к эллиптическому типу, если компоненты тензора проницаемости $K = (K_{ij})$ удовлетворяют условиям [3]:

$$K_{11} > 0, \quad D(K_S) = K_{11}K_{22} - \left(\frac{K_{12} + K_{21}}{2} \right)^2 > 0, \quad (1.4)$$

где $D(K_S)$ – определитель симметричной части $K_S = (K + K^T)/2$ тензора $K = (K_{ij})$, $KT = (K_{ji})$.

Напорная фильтрация жидкости к скважине происходит под действием разности давлений, заданных на контуре скважины σ_c и контуре питания, удаленном в бесконечность (действием силы тяжести можно пренебречь). Полагаем, что давления на этих контурах постоянные, равные, соответственно, $C = 1$ и $C_0 = 0$.

2. Трудность решения поставленной задачи обусловлена сложным видом уравнения (1.3). Ее исследование значительно упрощается, если уравнение (1.3) привести к каноническому виду. Для этого перейдем на вспомогательную плоскость $\zeta = \xi + i\eta$, используя гомеоморфные (аффинные) преобразования координат (прямое и обратное) [1]:

$$\begin{aligned} \xi &= (1+a)x + by, \quad \eta = bx + (1-a)y, \\ x &= \frac{(1-a)\xi - b\eta}{1-\mu_0^2}, \quad y = \frac{(1+a)\eta - b\xi}{1-\mu_0^2}, \end{aligned} \quad (2.1)$$

где $a = \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1 + 2\sqrt{\alpha - \beta^2}}$, $b = -\frac{2\beta}{\alpha + 1 + 2\sqrt{\alpha - \beta^2}}$, $\mu_0^2 = a^2 + b^2$, $\alpha = \frac{K_{22}}{K_{11}} > 0$, $\beta = \frac{K_{12} + K_{21}}{2K_{11}}$, $\gamma = \frac{K_{12} - K_{21}}{2K_{11}}$, $\beta^2 < \alpha$.

Согласно преобразованию (2.1) граница раздела в плоскости $O\xi\eta$ – прямая σ'_{II} :

$$(1-a)\xi - b\eta + d(1-\mu_0^2) = 0 \quad (2.2)$$

которая наклонена под углом δ к оси $O\xi$ ($\operatorname{tg}\delta = (1-a)/b$ при $b \neq 0$; $\delta = \pi/2$ при $b = 0$). Кратчайшее расстояние от прямой σ'_{II} до начала координат (центра скважины) равно [4]

$$d' = \frac{d(1-\mu_0^2)}{\sqrt{(1-a)^2 + b^2}}. \quad (2.3)$$

Контур скважины σ'_C на плоскости ζ находим, используя уравнение окружности $x^2 + y^2 = R_C^2$ и обратное преобразование из (2.1). Имеем для σ'_C уравнение эллипса

$$[(1-a)^2 + b^2]\xi^2 - 4b\xi\eta + [(1+a)^2 + b^2]\eta^2 - R_C^2(1-\mu_0^2)^2 = 0.$$

Приведем это уравнение к каноническому виду, введя на вспомогательной плоскости ζ новую систему координат $\zeta_1 = \xi_1 + i\eta_1$, новые координаты ξ_1, η_1 , связанные с ξ, η следующими формулами

$$\xi = \xi_1 \cos \omega - \eta_1 \sin \omega, \quad \eta = \xi_1 \sin \omega + \eta_1 \cos \omega.$$

Выбираем угол ω из равенства $\operatorname{tg} 2\omega = b/a$, следующего из обращения в нуль коэффициента, стоящего перед произведением $\xi_1\eta_1$. Имеем каноническое уравнение эллипса σ'_C с большой A'_C и малой B'_C полуосями [4]:

$$\frac{\xi_1^2}{A_C'^2} + \frac{\eta_1^2}{B_C'^2} = 1, \quad (A'_C = R_C(1+|\mu_0|), B'_C = R_C(1-|\mu_0|)).$$

Размеры контура σ'_C незначительны в сравнении с характерным размером d' области фильтрации $D'_1 \cup D'_2$. Контур скважины σ'_{II} – эллипс с полуосями $A'_C = R_C(1+|\mu_0|)$ и $B'_C = R_C(1-|\mu_0|)$ заменим на окружность $\tilde{\sigma}'_C$ «эффективного» радиуса R'_C такого, что площади круга радиуса R'_C и эллипса равновеликие (равные): $\pi R_C'^2 = \pi A'_C B'_C$. Отсюда $R'_C = \sqrt{A'_C B'_C}$ или, как показано в [4]:

$$R'_C = R_C \sqrt{1 - |\mu_0|^2}. \quad (2.4)$$

3. Используя теорему сопряжения на прямой [1] комплексный потенциал течения в области D_1 запишем в виде:

$$W_1(z) = \frac{Q}{2\pi} \left(\frac{(\sqrt{D(K_S)} + i\sqrt{D(K_a)})}{D(K_S) + D(K_a)} \ln(\zeta_1 - \zeta_{01}) + \frac{\lambda_k(\sqrt{D(K_S)} - i\lambda_k\sqrt{D(K_a)})}{D(K_S) + \lambda_k^2 D(K_a)} \ln(\zeta_1 - \bar{\zeta}_{01}) \right), \quad z \in D_1 \quad (3.1)$$

где $D(K_A) = (K_{12} - K_{21})^2 / 4$ – определитель антисимметричной части тензора проницаемости $K = (K_{ij})$, $\lambda_k = (k_1 - k_2) / (k_1 + k_2)$.

Из (3.1), учитывая, что $\zeta_1 - \zeta_{01} = re^0$ и $\zeta_1 - \bar{\zeta}_{01} = r_* e^0$ найдем обобщенный потенциал течения.

$$\varphi = \frac{Q}{2\pi\sqrt{D(K_S)}} \left(\ln r + \frac{\lambda_k(D(K_S) - \lambda_k D(K_a))}{D(K_S) + \lambda_k^2 D(K_a)} \ln r_* + \frac{\lambda_k \sqrt{D(K_S)} \sqrt{D(K_a)} (1 + \lambda_k)}{D(K_S) + \lambda_k^2 D(K_a)} \theta \right). \quad (3.2)$$

Результаты предыдущих исследований [5-8] показывают, что компоненты K_{11} и K_{22} тензора проницаемости $K = (K_{ij})$ осуществляют основное воздействие на дебит скважины в анизотропной среде. Далее положим, что среда является ортотропной, тензор проницаемости в случае двумерной среды примет вид [9]:

$$K = \begin{pmatrix} K_{11} & 0 \\ 0 & K_{22} \end{pmatrix}. \quad (3.3)$$

Из (3.3), следует, что $D(K_a) = 0$, $\beta = 0$, $\gamma = 0$. Далее полагая $R'_C \ll d'$, $r = R'_C$, $r_* = 2d'$, из (3.2) получим формулу для расчета дебита скважины в ортотропной кусочно-однородной среде.

$$Q = \frac{2\pi\sqrt{D(K_S)}(C - C_0)}{\ln \frac{(2d')^{-\lambda_k}}{R'_C}}. \quad (3.4)$$

С целью изучения влияния анизотропии грунта на дебит Q введем величину (относительный дебит) [4]:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_0} - 1, \quad (3.5)$$

где Q_0 – дебит скважины радиуса R_C с прямолинейным контуром питания в случае изотропного грунта, рассчитываемый по формуле

$$Q_0 = \frac{2\pi(C - C_0)}{\ln \frac{2d}{R_C}}, \quad (3.6)$$

где $C = 1$ и $C_0 = 0$ – постоянные давления на контурах скважины и питания.

На рисунке 2 представлена зависимость относительного дебита скважины ε от коэффициентов α , который отражает вклад диагональных компонентов тензора проницаемости, и λ_k , который характеризует различную проницаемость областей D_1 и D_2 . В предельном случае $k \rightarrow \infty$ ($\lambda_k \rightarrow -1$), σ_{II} граница раздела областей D_1 и D_2 представляет собой линию постоянного давления, т.е. контур питания. В этом случае область D_2 представляет собой бассейн свободной жидкости, а D_1 – область фильтрации. Далее полагая $\lambda_k \rightarrow -1$ и $D(K_S) = 1$ (в области D_1 среда изотропна), получим предельный переход (3.4) в (3.6). В предельном случае $k_2 \rightarrow 0$ ($\lambda_k \rightarrow 1$), σ_{II} граница раздела областей D_1 и D_2 представляет собой линию тока, т.е. непроницаемую границу. В этом случае область D_2 представляет собой непроницаемую среду. При $\lambda_k = 0$ получаем безграничную среду. На рисунке 2 линия $\lambda_k \rightarrow -1$ кривая отражает работу одиночной совершенной скважины с прямолинейным контуром питания в анизотропном пласте грунта, результат совпадает с [4,10]. Видно, что анизотропия грунта может сильно воздействовать на дебит Q (может его увеличивать или уменьшать по отношению к Q_0). В частном случае изотропной среды ($\alpha = 1$) график соот-

ветствующий $\lambda_k \rightarrow -1$ проходит через точку $\varepsilon = 0$, т. е. в случае изотропной среды результат даваемый системой (3.4) совпадает с результатом получаемым по формуле (3.6).

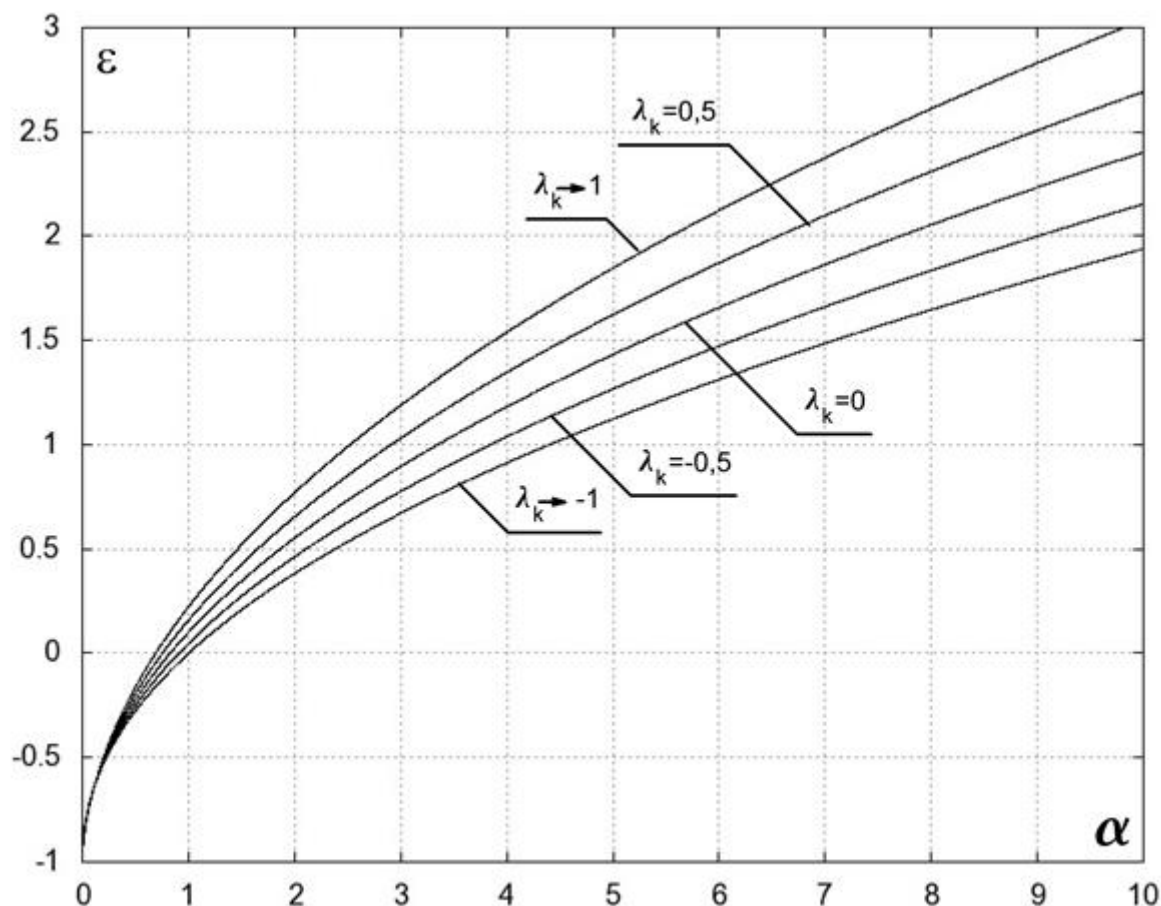


Рисунок 2 – Зависимости относительного дебита ε от коэффициентов α и λ_k , $\beta = 0$, $\gamma = 0$, $d = 1$, $d = 10^3 R_C$

Библиографический список

1. Пивень В.Ф. Математические модели фильтрации жидкости. Орел: Издательство ФГБОУ ВПО «Орловский государственный университет». ПФ Картуш, 2015. 408 с.
2. Пивень В.Ф., Костин О. В., Лекомцев Д.Г. Стационарные и нестационарные граничные задачи двумерной фильтрации в анизотропно-неоднородной пористой среде // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: Сборник докладов, Казань, 20-24 августа 2015 г. – Казань: Издательство Казанского (Приволжского) федерального университета, 2015. - С. 2995-2997.
3. Пивень В.Ф. Исследование граничных задач плоскопараллельных течений жидкости в анизотропной пористой среде // Дифференциальные уравнения. -2009. – Т. 45, №9. – С. 1286-1297.
4. Пивень В.Ф., Лекомцев Д.Г. Математическое моделирование работы совершенной скважины с прямолинейным контуром питания в анизотропном пласте грунта // Ученые записки Орловского государственного университета. – 2012. - №3. – С.69-74.
5. Пивень В.Ф., Лекомцев Д.Г. Исследование работы совершенной скважины в анизотропном однородном пласте грунта // Ученые записки Орловского государственного университета. – 2014. - №3. – С.83-88.

6. Лекомцев Д.Г. Сравнение математических моделей работы совершенной скважины с круговым контуром питания в анизотропном грунте // Вестник Херсонского национального технического университета. - 2014. - № 3. - С. 336-340.

7. Лекомцев Д.Г. Сравнение математических моделей работы совершенной скважины с эллиптическим контуром питания в анизотропном грунте // Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий «ПМТУКТ-2014»: Сборник трудов VII международной конференции, Воронеж, 14-21 сентября, 2014 г. – Воронеж: Издательство «Научная книга», 2014. - С. 223-225.

8. Лекомцев Д.Г. Дебит совершенной скважины, эксцентрично расположенной в круговом контуре питания, в анизотропной среде // Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий «ПМТУКТ-2015»: Сборник трудов VIII международной конференции, Воронеж, 21-26 сентября, 2015 г. – Воронеж: Издательство «Научная книга», 2015. - С. 205-207.

9. Басниев К.С., Дмитриев Н.М., Розенберг Г.Д. Нефтегазовая гидромеханика: Учебник для вузов. - М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. - 480 с.

10. Лекомцев Д.Г. Математическое моделирование работы батареи совершенных скважин в анизотропном грунте // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. - 2015. - № 1. - С. 94-102.

УДК 621.771.25

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА*

Инатович Ю.В., Куделин С.П., Челнокова В.Д.

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
г. Екатеринбург, Россия, kudelinsp@mail.ru

Аннотация. В Уральском федеральном университете разработана ЭС для анализа и проектирования технологии сортовой прокатки, которая может быть использована при оптимизации действующих и проектировании новых технологических процессов сортовой прокатки. Для функционирования ЭС созданы базы знаний о предметной области. Комплексная математическая модель расчета калибровок валков и технологических режимов прокатки, позволяет рассчитывать полный комплекс технологических и энергосиловых параметров моделируемого процесса. Программное обеспечение ЭС разработано для операционной системы Windows с использованием среды визуального программирования Borland C++ Builder.

Ключевые слова: моделирование, экспертная система, база знаний, база данных, наборы правил, сортовая прокатка, калибровка валков, математическое моделирование, оптимизация.

Abstract. At the Ural Federal University ES developed for analysis and design technologies bar rolling, which can be used in the optimization of existing and design of new processes bar rolling. For the operation of the ES created a knowledge base about the subject area. A comprehensive mathematical model of calculation of rolling passes and technological rolling allows the calculation of a full range of technological and energy-power parameters of the simulated process. Software ES is developed for operational system Windows using the visual programming environment of Borland C++.

Keywords: modeling, Expert system, knowledge base, database, rule sets, bar rolling, rolling passes, mathematical modeling, optimization.

Решение задач автоматизированного проектирования технологических режимов прокатки возможно на основе применения методов искусственного интеллекта, одним из проявлений которого являются экспертные системы (ЭС), находящие все большее приме-

* Работа выполнена при финансовой поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.А03.21.0006.

The work was supported by Act 211 Government of the Russian Federation, contract № 02.А03.21.0006

нение в различных предметных отраслях [1-4 и др.]. В Уральском федеральном университете разработана ЭС для анализа и проектирования технологии сортовой прокатки.

Разработанная нами ЭС технологии сортовой прокатки предназначена для оперативного анализа и экспертной оценки технологических процессов прокатки сортовых профилей на станах с непрерывным и последовательным расположением рабочих клетей. Она позволяет решать широкий круг задач моделирования, диагностики и оптимизации действующих и проектируемых технологических процессов, определения параметров настройки прокатных станов при реализации рассчитанных технологических режимов.

В частности, специалисту-пользователю система предоставляет возможность:

- рассчитывать полный комплекс технологических параметров прокатки заданного профиля и проводить их экспертную оценку;
- определять влияние температуры нагрева заготовки на технологические параметры и нагруженность оборудования стана;
- моделировать влияние скоростного режима прокатки на изменение технологических параметров и условия работы прокатных клетей;
- определять влияние марки прокатываемой стали на заполнение калибров и параметры силовой загрузки оборудования;
- определять возможность прокатки заданной марки стали в условиях действующей калибровки валков прокатного стана;
- находить причины поломок оборудования рабочих клетей;
- прогнозировать точность прокатки заданного профиля на стане с заданной жесткостью рабочих клетей;
- выявлять резервы совершенствования технологии по различным показателям;
- проводить оптимизацию и рационализацию действующих и проектируемых технологических процессов по различным критериям;
- определять установочные межвалковые зазоры в рабочих клетях при прокатке заданного профиля по запроектированным технологическим режимам.

Для функционирования ЭС технологии сортовой прокатки были созданы базы знаний о предметной области, основанные на теоретических и экспериментальных исследованиях, а также обобщения опыта производства сортовых профилей на действующих станах.

Декларативные знания (характеристика прокатных станов, сортамент прокатываемых профилей, калибровки валков и режимы прокатки, требования к качеству и точности профилей и т.п.) представлены в виде 5-ти реляционных баз данных (БД).

Для представления процедурных (формализованных) знаний о технологических процессах сортовой прокатки допустимо использовать различные математические модели. В ЭС мы применили математическую модель формоизменения и энергосиловых параметров, разработанную в УрФУ на основе использования вариационных принципов теории пластичности и статистического обобщения действующих калибровок валков [5].

Для обработки комплекса формализованных знаний с целью принятия решения применили продукционные модели.

Структурная схема ЭС технологии сортовой прокатки приведена на рисунке 1. В ее состав входят 13 основных модулей.

Функционирование системы начинается с формирования исходной информации в модуле 1. При этом необходимые для решения задачи параметры вызываются из соответствующих баз данных (БД) и записываются в специальные файлы-таблицы. В разработанную ЭС включены следующие БД:

- по составу прокатных станов, работающих на отечественных металлургических заводах, и сортаменту прокатываемых на них профилей (БД «Заводы, станы, сортамент»);
- по технической характеристике прокатных станов (БД «Техническая характеристика стана»);



Рисунок 1 – Структурная схема экспертной системы технологии сортовой прокатки

– по калибровкам валков и режимам деформации при прокатке характерных профилей (БД «Калибровка валков»);

– по требованиям стандартов к точности прокатываемых профилей (БД «Требования к точности»);

– по коэффициентам для определения сопротивления деформации различных сталей и сплавов (БД «Сопротивление деформации»).

Если анализируемый прокатный стан и технологический режим в БД отсутствуют, то информация о технической характеристике этого стана, калибровке валков и технологических режимах прокатки предварительно вводится в соответствующие БД. Таким образом, накопление информации в БД создает возможность проектирования технологии прокатки новых профилей по аналогам.

Сформированная исходная информация подвергается диагностике на предмет выявления ошибок (см. модуль 2). Предусмотрено графическое изображение анализируемых или проектируемых калибров и задаваемых в них полос на экране монитора (модуль «Графическое отображение»).

На основе сформированной исходной информации в блоке 4 производится расчет полного комплекса технологических и энергосиловых параметров моделируемого процесса.

Комплексная модель расчета калибровок валков и технологических режимов прокатки позволяет рассчитывать формоизменение металла и энергосиловые параметры для любой системы калибров простой формы в зависимости от следующих безразмерных параметров однозначно характеризующих форму и размеры очага деформации при прокатке по любой системе калибров, например, по системе овал–овал: приведенный диаметр валков $A = D_*/H_1$; коэффициент обжатия $1/\eta = H_0/H_1$; отношение сторон задаваемого раската $a_0 = H_0/B_0$ и калибра $a_k = B_k/H_1$; степень заполнения предыдущего по ходу прокатки калибра $d_0 = H_0/H'_0$; для ящичных калибров, кроме перечисленных параметров, – выпуск ящичного калибра $tg\varphi$. Условия трения на контактной поверхности характеризуются показателем трения $\psi = \tau/\tau_s$, определяемым в зависимости от температуры металла и схемы прокатки (τ – напряжения трения, τ_s – предел текучести металла на сдвиг).

С учетом данных параметров рассчитывают следующие характеристики формоизменения металла:

– коэффициент уширения

$$\beta = 1 + C_0 \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right)^{C_1} A^{C_2} a_0^{C_3} a_k^{C_4} \delta_0^{C_5} \psi^{C_6} tg\varphi^{C_7} \left[1 + 0,6 \left(\frac{\sigma_{s_i}}{\sigma_{s_6}} - 1 \right)^{0,544} \right];$$

– ширину полосы $B_1 = B_0\beta$;

– степень заполнения калибра $\delta_1 = B_1/B_k$;

– площадь поперечного сечения раската $\omega_1 = H_1^2 f(\delta_1, a_k, tg\varphi)$;

– коэффициент вытяжки $\lambda = \omega_0/\omega_1$,

где $C_0, C_1, C_2, \dots, C_7$ – коэффициенты, принимающие численные значения в зависимости от схемы прокатки, σ_{s_i} и σ_{s_6} – сопротивление деформации прокатываемой (σ_{s_i}) и базовой низкоуглеродистой стали (Ст3) определяемое по методу термомеханических коэффициентов А.А.Третьякова-В.И.Зюзина, Л.В.Андреюка-Г.Г.Тюленева или каким-либо другим методам [6,7].

Энергосиловые параметры рассчитывают по формулам:

– среднее контактное давление $p = 1,15n_\sigma\sigma_s$;

– сила прокатки $P = pF$;

– крутящий момент деформации $M_{вал} = 0,287\sigma_s H_1^3 A^2 n_{вал}$;

– мощность прокатки $N_{np} = 2M_{вал}H_1U/A$,

где n_σ – коэффициент напряженного состояния, учитывающий влияние контактного трения и жестких концов;

F – контактная площадь;

$n_{вал}$ – коэффициент мощности прокатки;

U – скорость прокатки.

Коэффициенты n_σ , $n_{вал}$ и контактную площадь определяют в зависимости от схемы прокатки по формулам [5].

Для схем прокатки, включающих калибры, форма которых отличается от обычной формы калибров простой формы, система расчетов предусматривает определение энергосиловых параметров, при этом фасонные калибры и раскаты заменяются соответственными прямоугольными.

Скорости прокатки U_i в каждой i -ой клетке непрерывного и последовательного стана рассчитываются с учетом условия постоянства секундных объемов: $U_i = U_{i-1} \cdot \lambda_i$. Одновременно рассчитываются минимально и максимально допустимые скорости прокатки U_{mini} и U_{maxi} в зависимости от предельной частоты вращения и катающего диаметра валков каждой клетки.

Для расчета температуры раската по проходам в системе предусмотрены две математические модели:

- с учетом потерь тепла за счет лучеиспускания и разогрева металла от деформации (две статьи теплового баланса);
- с учетом потерь тепла за счет лучеиспускания, конвекции, теплопроводности и разогрева металла от деформации (четыре статьи теплового баланса).

В результате расчетов формируются таблицы расчетных данных (модуль «Таблицы результатов»). Предусмотрена возможность представления расчетных параметров в виде графиков изменения их по проходам. С этой целью в состав системы включен модуль «Графики».

Полученная расчетная информация подвергается экспертной оценке с проверкой всех ограничений, рассчитываются критерии качества проектируемого процесса (блоки 7 и 8).

В ЭС предусмотрены различные ограничения режимов прокатки в каждом i -ом проходе: по степени заполнения калибров, по условиям захвата металла валками и устойчивости полос в калибрах, по прочности оборудования рабочих клетей и др.

Для оценки качества и оптимизации анализируемых и проектируемых технологических процессов в системе предусмотрено использование следующих критериев:

- производительность прокатного стана, рассчитываемая в зависимости от такта T_T или конечной скорости прокатки U_K ;
- расход электроэнергии на прокатку $W_э$;
- расход топлива W_T , контролируемый по температуре нагрева металла t_0 ;
- степень заполнения калибров δ_1 , влияющая на качество формоизменения металла;
- степень нагруженности оборудования рабочих клетей стана.

Результаты оценки системы ограничений приводятся к безразмерному виду и формируются в виде алфавита.

Продукционные модели базы знаний (блок 9) содержит набор правил, обобщающих опыт специалистов-экспертов по улучшению качества технологических процессов. Знания хранятся с использованием таблиц целей, выводов, правил, условий и фактов.

В зависимости от решаемой задачи (поставленной цели) предусмотрено несколько наборов (таблиц) правил, представляющих собой цепочку логических рассуждений, основанных на применении продукций вида [2,3] «ЕСЛИ... ТО» (условие P действие). В указанной конструкции правил между условием и действием располагаются факты, в качестве которых используются полученные расчетные данные и их экспертные оценки.

Например:

«ЕСЛИ $\alpha / [\alpha] > 1,05$, ТО необходимо уменьшить коэффициент обжатия $1/\eta$ »;

«ЕСЛИ степень загрузки электродвигателя $k_{\partial в}$ равна или меньше 0,4, ТО рекомендуется увеличить коэффициент вытяжки λ »;

«ЕСЛИ $k_p > 1$, ТО возможна поломка оборудования клетки, необходимо перераспределить обжатия» и т.п.

Наряду с этим используются правила типа AUBUA&B и преобразования Де Моргана [3].

Применяя соответствующий набор правил последовательно для каждого прохода, система определяет резервы улучшения технологического процесса и формирует в блоке 10 (Машине вывода) решение по изменению режима деформации металла, выдавая его в виде сообщения на экран монитора. Пользователю предоставляется возможность согласиться с этим решением или внести в него коррективы, изменить соответствующим образом исходные данные и произвести повторные расчеты. Путем такого диалога с компьютером пользователь добивается получения оптимального решения поставленной задачи. Параметры рассчитанного технологического процесса заносят в БД с целью накопления информации.

Программное обеспечение описанной ЭС разработано для операционной системы Windows с использованием среды визуального программирования Borland C++ Builder [8], БД основаны на использовании таблиц Paradox.

Указанные программные и технические средства обеспечивают достаточно простой и удобный интерфейс пользователя с компьютером посредством использования современных средств и методов разработки.

Программный комплекс «Экспертная система технологии сортовой прокатки зарегистрирован» в РОСПАТЕНТе [9].

Вывод. Разработана ЭС технологии сортовой прокатки, которая может быть использована в НИИ и на металлургических заводах при совершенствовании действующих и проектировании новых технологических процессов сортовой прокатки.

Библиографический список

1. Джексон П. Введение в экспертные системы: Учеб. пособие / П. Джексон М.: Вильямс, 2001. 624 с.
2. Егоров Н.В. Диагностические информационно-экспертные системы / Н. В. Егоров, А. Г. Карпов. С.-Петербург.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2002. 470 с.
3. Ручкин В.Н., Фулин В.А. Универсальный искусственный интеллект и экспертные системы / В.Н.Ручкин, В.А.Фулин. СПб.: BHV-Санкт-Петербург, 2009. 240 с.
4. Джексон П. Введение в экспертные системы. 3-е издание / П.Джексон. М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. 411 с.
5. Смирнов В.К. Калибровка прокатных валков / В.К.Смирнов, В.А.Шилов, Ю.В.Инарович. М.: Теплотехник, 2010. 490 с.
6. Зюзин В.И., Третьяков А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением: Справочник. - Челябинск: Металл, 2000. 368 с.
7. Никитин Г.С. Теория непрерывной продольной прокатки / Г. С. Никитин М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. 399 с.
8. Шилдт Г. Теория и практика C++ / Г. Шилдт. СПб: BHV-Санкт-Петербург, 2001. 412 с.
9. Программный комплекс «Экспертная система технологии сортовой прокатки» / С.П.Куделин, В.К.Смирнов, В.А.Шилов, Ю.В.Инарович // Свидетельство №2001610602 от 25 мая 2001 г.

УДК 669.162.263

ПРИМЕНЕНИЕ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ*

Онорин О.П., Спирин Н.А., Истомин А.С., Гурин И.А.

*ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
г. Екатеринбург, Россия, Pyfhon@live.com*

Аннотация. Представлен анализ ряда переходных процессов доменной плавки. Рассмотрены зависимости изменения газодинамического сопротивления слоя шихты от состава шихтовых материалов, а также зависимости изменения состава продуктов плавки от параметров дутья. На основе анализа рассмотренных ситуаций приведены рекомендации по определенным аспектам доменного производства.

Ключевые слова: доменная плавка, переходный процесс, газодинамическое сопротивление слоя шихты.

* Работа выполнена при финансовой поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.А03.21.0006.

The work was supported by Act 211 Government of the Russian Federation, contract № 02.А03.21.0006

Abstract. An analysis of a number of blast furnace transient processes is presented. Change dependencies of blast furnace burden layer gas-dynamic resistance from burden mixture and change dependencies of melting products composition from blast conditions is considered. Recommendations on certain aspects of blast furnace production are presented based on the analysis of the considered situations.

Keywords: blast-furnace smelting, transient process, blast furnace burden layer gas-dynamic resistance.

Исследование переходных процессов доменной плавки осуществляется использованием аналитических, теоретических моделей, описывающих закономерности тепло- и массообмена с учетом кинетики протекающих в объеме печи химических реакций; методами пассивного и активного экспериментов, но данным нормальной эксплуатации печи с применением статистических методов, а так же на основе результатов специально поставленных экспериментов или путем отбора характерных периодов нормальной работы печи, содержащие входные сигналы желаемого типа. Каждое из этих направлений имеет очевидные преимущества и недостатки, широко освещенные в научной литературе [1–5].

Аналитические модели, построенные на основе физики процессов, позволяют теоретически оценивать характер динамических характеристик процессов в любых условиях доменной плавки при отсутствии помех [3–5]. Однако ввиду сложности процессов доменной плавки, проблематичности полного описания процессов, сложности математического решения системы дифференциальных разработанные динамические модели не учитывают в полной мере все особенности протекания процессов, а информация по реально используемым в промышленности динамическим моделям этого класса за последние 10–летия практически отсутствует.

Перспективным для решения рассматриваемых задач по нашему мнению является натурно-математический подход, разработанный в Сибирском государственном индустриальном университете [6]. Однако основой динамических моделей остаются фундаментальные, физические представления о процессах доменной плавки [7–8]. Расчеты выполняются параллельно для двух вариантов – в базовом и прогнозном вариантах.

Динамика изменения газодинамического сопротивления слоя шихты при изменении доли окатышей

Поскольку температурный интервал плавления окатышей больше, чем у офлюсованного агломерата, то увеличение доли железорудных окатышей в шихте доменных печей будет сопровождаться возрастанием газодинамического сопротивления зоны когезии.

График переходного процесса при загрузке шихты с увеличенной долей железорудных окатышей в шихте доменной печи № 10 ММК в прогнозном периоде показана на рисунке 1.

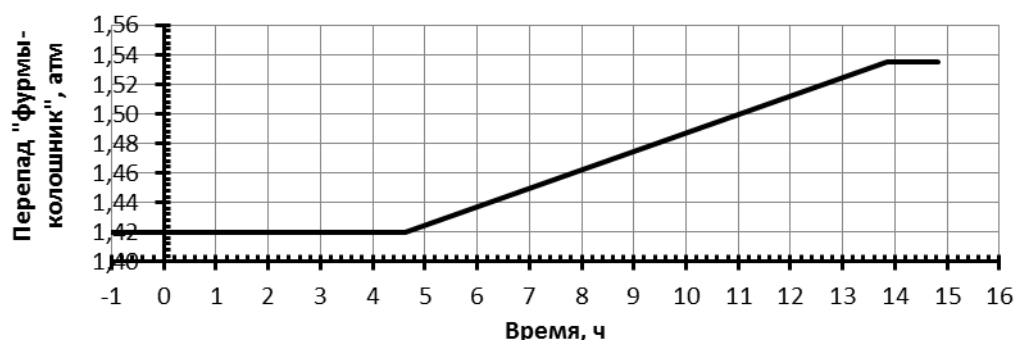


Рисунок 1 – Динамика изменения общего перепада давления газа по высоте слоя шихты при увеличении доли окатышей в железорудной части шихты с 0,342 т/т до 0,541 т/т

Начало (по времени) изменения перепада давления газа будет наблюдаться при подходе к зоне шлакообразования измененной шихты, т.е. примерно через один оборот

шихты будет происходить в течение переходного периода, равного (по времени) смене 2х оборотов шихты.

Влияние содержания мелочи в агломерате на газодинамическое сопротивление слоя шихты в печи

График переходного процесса при загрузке в печь шихты с повышенным содержанием мелочи (фр. 0–5 мм) в агломерате показана на рисунке 2.

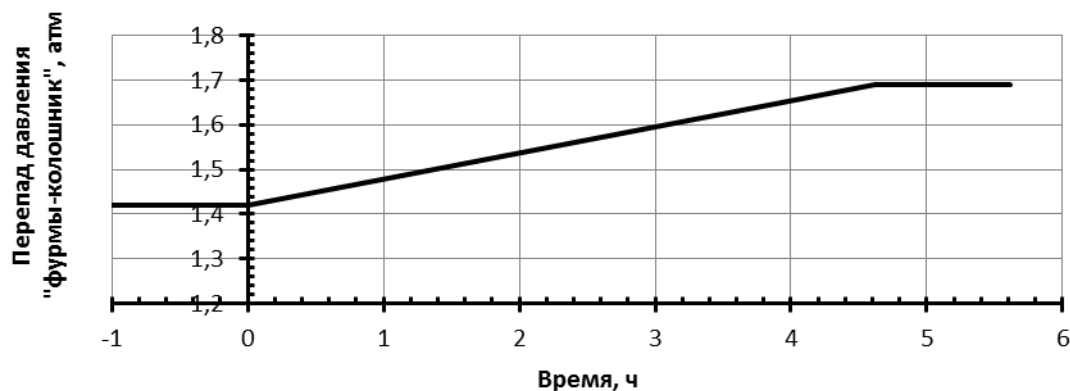


Рисунок 2 – Динамика изменения общего перепада давления газа по высоте слоя шихты в печи № 10 ММК при увеличении мелочи в агломерате (фр. 0–5 мм) с 6,1 до 10,8 %

Ввод в шихту агломерата с повышенным содержанием мелочи будет сопровождаться возрастанием общего перепада давления газа по высоте слоя. Возрастание верхнего перепада давления газа, а вместе с этим и рост общего перепада, будет наблюдаться сразу после загрузки в печь шихты с увеличенной долей мелочи в агломерате и будет продолжаться вплоть до прихода этой шихты в зону шлакообразования, т.е. через время проплавки одного объема печи.

Воздействие изменения рудной нагрузки на содержание кремния в чугуне

Начало изменения в производительности печи по времени соответствует смене одного объема шихты в печи; время переходного периода примерно равно этому же периоду. Изменение в нагреве продуктов плавки, характеризуемое содержанием кремния в чугуне, начинается через время переходного периода, длительность которого составляет один оборот шихты в печи, а общая продолжительность переходного процесса до установления нового значения кремния составляет 3–3,2 оборота шихты (рисунок 3).

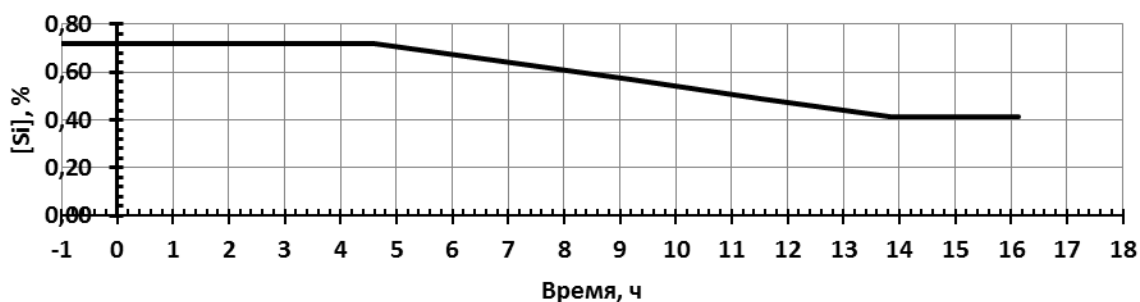


Рисунок 3 – Изменение содержания кремния в чугуне в процессе переходного периода при увеличении рудной нагрузки с 3,76 до 3,86 т/т

Коэффициент передачи по каналу «рудная нагрузка-содержание кремния в чугуне» составляет 0,37 % [Si]/0,1 рудной нагрузки. Установлено, что с повышением уровня воз-

мущения, т.е. когда рудная нагрузка возрастает более, чем на 0,2 т/т, коэффициент передачи практически не меняется.

Динамика изменения содержания кремния в чугуна при изменении расхода природного газа

Изменение расхода природного газа (без корректировки других дутьевых параметров – изменение температуры дутья, содержание в дутье кислорода, влажности дутья) вызывает знакопеременный характер изменения содержания кремния в чугуна (см. рисунок 4).

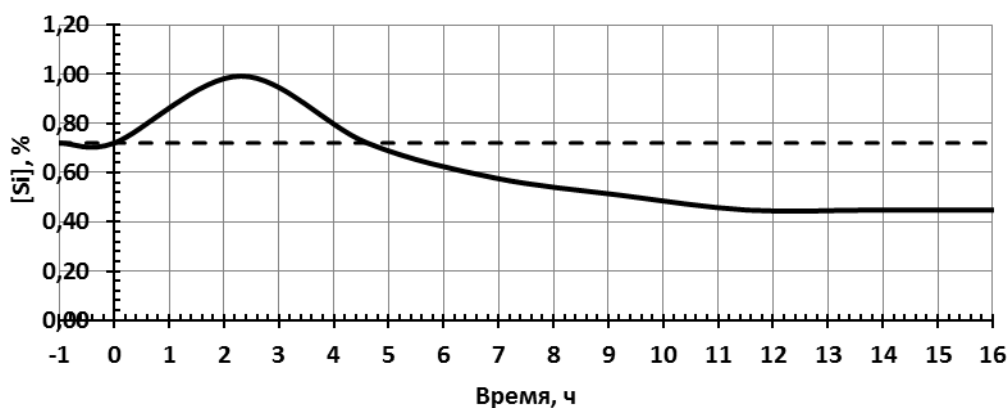


Рисунок 4 – Динамика изменения содержания кремния в чугуна при сокращении расхода природного газа на 10 м³/т чугуна

Это обусловлено безынерционным действием изменения теплового уровня в горне печи и инерционным воздействием интенсивности плавки и протеканием восстановительных процессов. В начальный момент времени снижения расхода газа в результате повышения температуры в горне, связанной со снижением затрат тепла на разложение природного газа содержание кремния в чугуна возрастает, но по истечении времени, равного времени одного оборота шихты в печи шихта начинает холодеть.

Динамика изменения содержания кремния в чугуна при изменении содержания кислорода в дутье

Кривая изменения содержания кремния в чугуна в этом случае имеет знакопеременный характер. В первоначальный момент времени после увеличения содержания кислорода в дутье из-за роста температуры в горне печи в течение прохождения одного оборота шихты происходит повышение концентрации кремния в чугуна (см. рисунок 5).

Однако в дальнейшем из-за снижения температуры в шахте печи и увеличения степени прямого восстановления оксидов железа наблюдается снижение нагрева нижней зоны печи и понижение содержания кремния.

Динамика изменения параметров доменной плавки при изменении влажности дутья

Динамика изменения содержания кремния в чугуна при снижении влажности дутья представлена на рисунке 6.

При снижении влажности дутья происходит повышение теоретической температуры горения за счет понижения затрат тепла на разложение паров воды и снижения объема горновых газов, а также повышение физического и химического нагрева продуктов плавки. Через 2,5 часа после нанесения возмущения повышение теплового уровня горна печи прекращается и начинается небольшой разогрев низа печи.

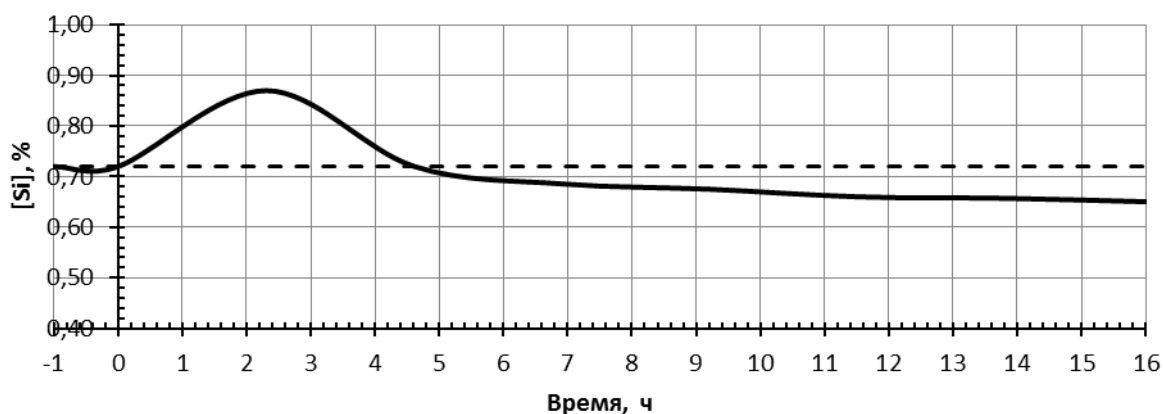


Рисунок 5 – Динамика изменения содержания кремния в чугуна при увеличении концентрации кислорода в дутье с 27,5 до 28,5 %

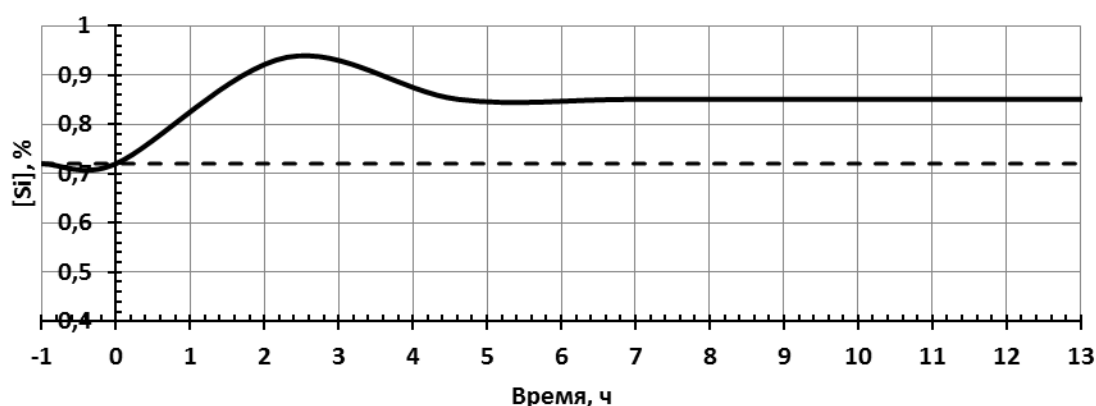


Рисунок 6 – Динамика изменения содержания кремния в чугуна при снижении влажности дутья с 9,0 до 4,0 г/м³

Динамика изменения кремния в чугуна при изменении основности шлага

При увеличении основности шлага (CaO/SiO_2) наблюдается снижение концентрации кремния в чугуна. Это связано с тем, что ввод в шлаг основного оксида – CaO сопровождается связыванием оксида кремния в шлаке в прочное соединение – силикат кальция ($CaO \cdot SiO_2$), восстановление кремния из которого требует гораздо больших затрат в сравнении с его восстановлением из «чистого» кремнезема. Результаты анализа по выявлению зависимости кремния в чугуна от основности шлага для условий ОАО «НТМК», представлены на рисунке 7.

При расчете динамики изменения кремния в чугуна при внесении возмущения по изменению основности шлага принимается, что начало изменения концентрации кремния в чугуна начинается через время смены одного оборота шихты в печи, а длительность переходного периода составляет по времени также смену одного оборота шихты. На рисунке 8 представлена динамика изменения содержания кремния в чугуна при увеличении основности шлага.



Рисунок 7 – Взаимосвязь содержания кремния в чугуне и основности шлака

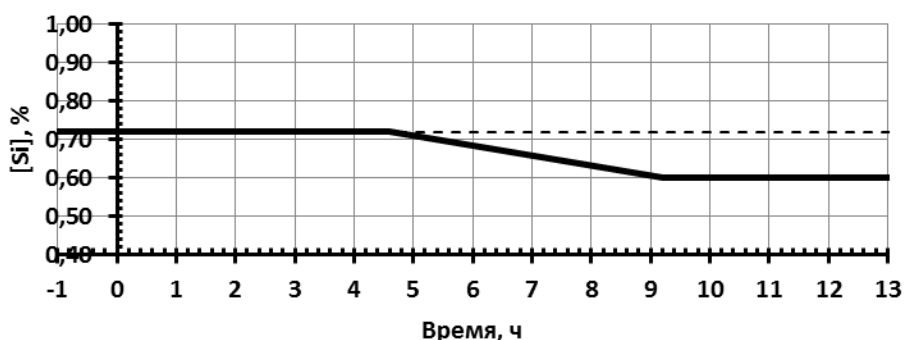


Рисунок 8 – Динамика изменения содержания кремния в чугуне при увеличении основности шлака с $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 0,98$ до $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,04$

Выводы:

1) колебательный переходный процесс в доменной печи наблюдается в том случае, если после нанесения возмущения оно будет оказывать противоположное влияние на тепловое состояние нижней и верхней ступеней теплообмена. Величина перерегулирования при этом будет тем больше, чем существеннее по величине и по знаку это различие;

2) наиболее предсказуемыми параметрами, влияющими на концентрацию кремния в чугуне, являются изменение рудной нагрузки, влажности дутья, а также основности шлака.

3) изменение концентрации кислорода в дутье и расхода природного газа нельзя использовать в качестве параметров для регулирования содержания кремния в чугуне. Это связано со знакопеременным характером влияния этих параметров на тепловой режим плавки. Принятие необоснованных решений по установлению параметров расхода природного газа и концентрации кислорода в дутье для регулирования содержания кремния в чугуне может привести к результату противоположному ожидаемому.

Библиографический список

1. Товаровский И.Г. Доменная правка. Монография – Днепропетровск, ПОРОГИ, 2009. – 768 с.
2. Китаев Б. И. Теплотехника доменного процесса / Б. И. Китаев, Ю. Г. Ярошенко, Е. Л. Суханов, Ю. Н. Овчинников, В. С. Швыдкий // М.: Металлургия, 1978. 248 с.
3. Мойкин В.И. Динамические характеристики доменной печи по результатам математического моделирования / В.И.Мойкин, Н.М.Бабушкин, Б.А.Боковиков // Вопросы производства чугуна в доменных печах: Темат. сб.научн.тр. / МЧМ СССР (ИЧМ). – М.: Металлургия, 1984. С. 46–52.

4. Jian Xu. Numerical simulation on dynamic and static holdups of powder inside pre-reduction shaft furnace / Jian Xu, Sheng-li Wu, Xin-ying Guo, Kai-ping Du. Technical contribution to the 6th International congress on the science and technology of ironmaking – ICSTI, 42nd International Meeting on ironmaking and 13th International Symposium on Iron Ore, October 14th to 18th, 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brazil. Pp. 414– 424.

5. Овчинников Ю. Н. Нестационарные процессы и повышение эффективности доменной плавки / Ю. Н. Овчинников, В. И. Мойкин, Н. А. Спирин, Б. А. Боковиков // Челябинск: Металлургия, 1989. 120 с.

6. Емельянов С.В. Теория и практика прогнозирования в системах управления / С.В.Емельянов, С.К.Коровин, Л.П.Мышляев, А.С.Рыков, В.Ф.Евтушенко, С.М.Кулаков, Н.Ф.Бондарь – Кемерово; М.: Издат. объединение «Российские университеты»: Кузбассвуиздат – АСТШ, 2008. 487 с.

7. Спирин Н.А. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев и др. Екатеринбург: Ур-ФУ, 2011. –462 с.

8. Спирин Н.А. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н.А.Спирин, В.В.Лавров, В.Ю.Рыболовлев и др. Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2014. – 558 с.

УДК 669.162.263

РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ОТКЛОНЕНИЯ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ ОТ НОРМАЛЬНОГО РЕЖИМА *

Спирин Н.А., Истомин А.С., Онорин О.П., Лавров В.В.

*ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
г. Екатеринбург, Россия, Pyshon@live.com*

Аннотация. Представлено описание компьютерной системы, которая позволяет диагностировать наличие отклонения хода доменной плавки от нормального режима, а также вид этого отклонения. Рассмотрены этапы разработки данной системы, среди которых разработка функциональной модели и проектирование архитектуры программного обеспечения. Описаны функциональные возможности и результаты испытаний на ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Ключевые слова: компьютерная система, ход доменной плавки, разработка программного обеспечения.

Abstract. A computer system, which enable to diagnose the deviations presence of smelting progress from normal mode, as well as the type of this deviation, is described. The stages of development of this system, including the development of a functional model and design of the software architecture are considered. The features and the results of tests at OJSC Magnitogorsk iron and steel works are described.

Keywords: computer system, blast furnace smelting process, software development.

Современный процесс выплавки чугуна в доменной печи подвержен влиянию многих переменных контролируемых и неконтролируемых факторов, которые вызывают нарушения хода печи и ее теплового состояния и требуют высокой квалификации технологического персонала при управлении доменной плавкой.

Одним из способов диагностики и управления ходом доменной печи в настоящее время является использование экспертных систем, включающих в себя как детерминированные знания о процессе, так и формализованный практический опыт специалистов-

* Работа выполнена при финансовой поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.А03.21.0006.

The work was supported by Act 211 Government of the Russian Federation, contract № 02.А03.21.0006

доменщиков. В общем случае такие системы должны иметь навыки суждений о ходе доменной плавки по различным признакам, правильно анализировать их и помогать производственному персоналу своевременно предупреждать возможные отклонения от нормального режима, применяя различные технологические приемы воздействия на ход доменной плавки. Для этих целей существует множество математических моделей, но, в большинстве случаев, их основной проблемой является недостоверность значений входящих в них параметров. До сих пор актуальными остаются вопросы создания информационно-логической системы распознавания вида отклонения доменной плавки от нормального режима. Логические основы распознавания вида отклонения от нормального режима доменной плавки изложены в работах [1–9].

Для анализа данных, необходимых для выявления расстройств хода печи, необходимо в комплексе рассмотреть показатели плавки, и работу печи в целом. Делая вывод на основе данных о химическом составе газа, качестве материалов, тепловом состоянии печи и другими сведениями об условиях плавки, необходимо выявить основные факторы и увязать их с изменениями технологических параметров.

Целью контроля над ходом доменной печи, является своевременное принятие мер для установления причин расстройства печи и восстановления нормального хода в максимально короткие сроки. Поэтому главной задачей является предупреждение нарушений и наиболее быстрое восстановление нормальной работы печи, в случае их возникновения.

Разработанный программный продукт проводит анализ работы печи по таким параметрам как: температура периферийных газов, температура газов по газоотводам печи, параметры дутья, колошниковога газа и перепады давления, а также распределение температур по диаметру колошника и состав продуктов доменной плавки. На основе значений этих параметров, проводится расчет, результатом которого является вывод о состоянии хода печи и в случае отклонения – о возможной причине нарушения хода.

Программа предназначена для оперативного предоставления производственному персоналу полного объема информации о ходе процесса плавки. Ее использование позволит упростить управление технологическим процессом, повысить эффективность производства, уменьшить вероятность простоев оборудования и аварий.

Первым этапом в разработке программного продукта было создание функциональной модели. Ее разработка была выполнена в программе AllFusion Process Modeler (BPwin) по стандарту IDEF0 (Integrated computer aided manufacturing DEFinition) [10]. Использование методики IDEF0 позволило создать функциональную структуру программного комплекса, выявить производимые им действия и связи между этими действиями, управляющие воздействия и механизмы выполнения каждой функции, что, в конечном итоге, позволило на ранней стадии проектирования предотвратить возможные ошибки.

Общее количество декомпозированных блоков функциональной модели составляет 90. Фрагмент диаграммы 1-го уровня функциональной модели подсистемы прогнозирования возникновения отклонений в ходе доменной плавки, представленный на рисунке 1, включает следующие функции:

– «*Осуществить сбор и первичную обработки данных*» (A1) обеспечивает автоматическое наполнение системы данными из АСУ ТП и корпоративной информационной системы (КИС). Сбор первичных данных производится в строго регламентированные моменты времени, которое установлено согласно требованиям инженерно-технологического персонала доменного цеха. Выходная информация служит источником для всех других подсистем;

– «*Выявление признаков нормальной работы доменной печи*» (A2) обеспечивает пересчет и анализ признаков отклонения параметров: отклонение расхода дутья; отклонение давления дутья; отклонение температуры дутья; отклонение общего перепада давления; отклонение нижнего перепада давления; отклонение верхнего перепада давления; окружная неравномерность температуры газа; распределение температуры колошниковога газа; отклонение усредненной температуры колошниковога газа; отклонение содержа-

ния Si в чугуне; отклонение содержания CO_2 колошникового газа; отклонение температуры чугуна; отклонение основности шлака;

– «*Определить признаки отклонения от нормального режима доменной плавки*» (A3) обеспечивает пересчёт и анализ таких отклонений как: периферийный газовый поток; центральный газовый поток; горячий ход плавки; холодный ход плавки; тугой ход плавки; верхние подвисание шихты; нижние подвисания шихты; количество срабатываемых подач;

– «*Формирование рекомендаций по технологиям ведение доменной плавки*» (A4) на основании выявленных отклонений, происходит формирование рекомендации по корректировке ведения плавки.

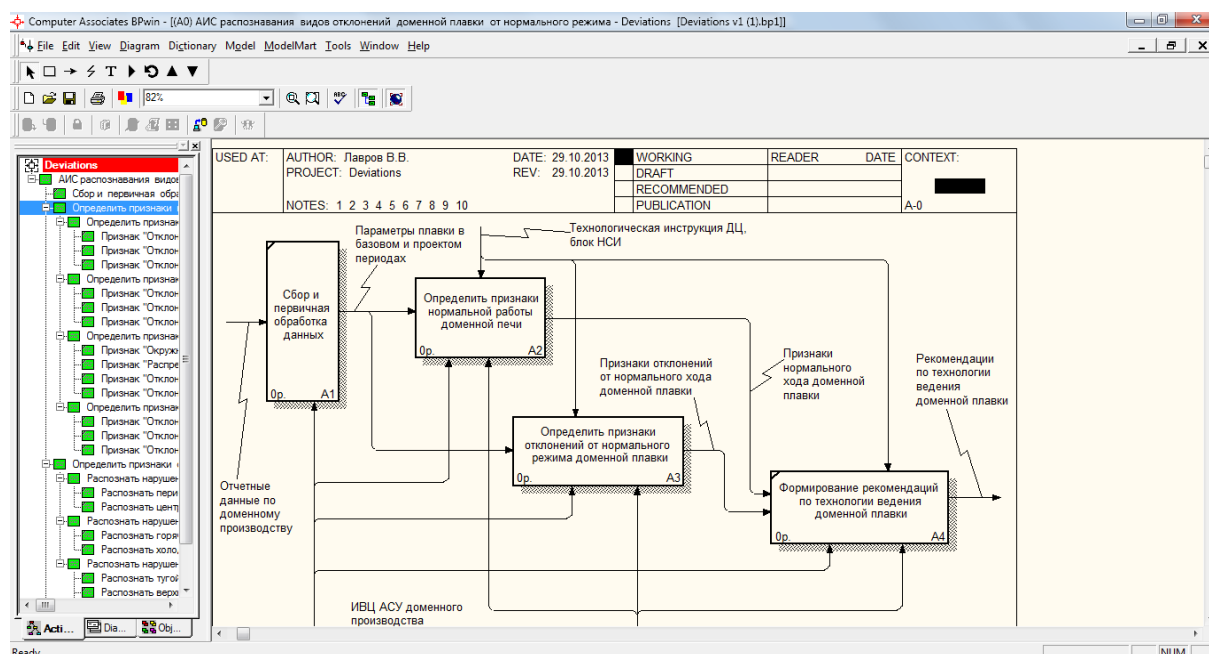


Рисунок 1 – Первый уровень функциональной модели информационной системы по распознаванию видов отклонений доменной плавки

Результаты функционального моделирования позволили в дальнейшем перейти к следующим этапам разработки системы – созданию архитектуры и реализации программного обеспечения системы.

На рисунке 2 продемонстрирована архитектура программного обеспечения информационной системы, в которой выделены основные компоненты ее программной реализации.

Архитектуру программного продукта условно можно разделить на несколько частей, первая представляет собой математическую библиотеку на основе проведенных и формализованных расчётов. Используя предварительно обработанный набор данных, расчётный модуль выполняет начальную стадию вычислений, суть которой заключается в том, чтобы проанализировать максимум возможных параметров, влияющих на возможность того или иного нарушения процесса плавки, а затем выполняет финальный расчет, на основании которого можно будет сделать вывод о наметившейся тенденции к определенному типу отклонения хода плавки.

Используя предварительно обработанный набор данных, расчётный модуль выполняет начальную стадию вычислений, суть которой заключается в том, чтобы проанализировать максимум возможных параметров, влияющих на возможность того или иного нарушения процесса плавки, а затем выполняет финальный расчет, на основании которого можно будет сделать вывод о наметившейся тенденции к определенному типу откло-

нения хода плавки. Вторая часть – это модуль, ответственный за работу с базой данных; он решает такие задачи как обеспечение приложения данными в режиме реального времени, фильтрацию данных, их усреднение и предоставление в том виде, в котором их можно было бы использовать в алгоритме. Другая часть представляет собой пользовательский интерфейс, который включает в себе основные функции для слежения за состоянием хода доменной печи. На текущий момент эта часть реализована в виде настольного приложения, однако благодаря такому архитектурному подходу в любой момент презентационная логика может быть легко реализована, например, в виде web-приложения или службы, уведомляющей о состоянии печи посредством мобильных устройств.

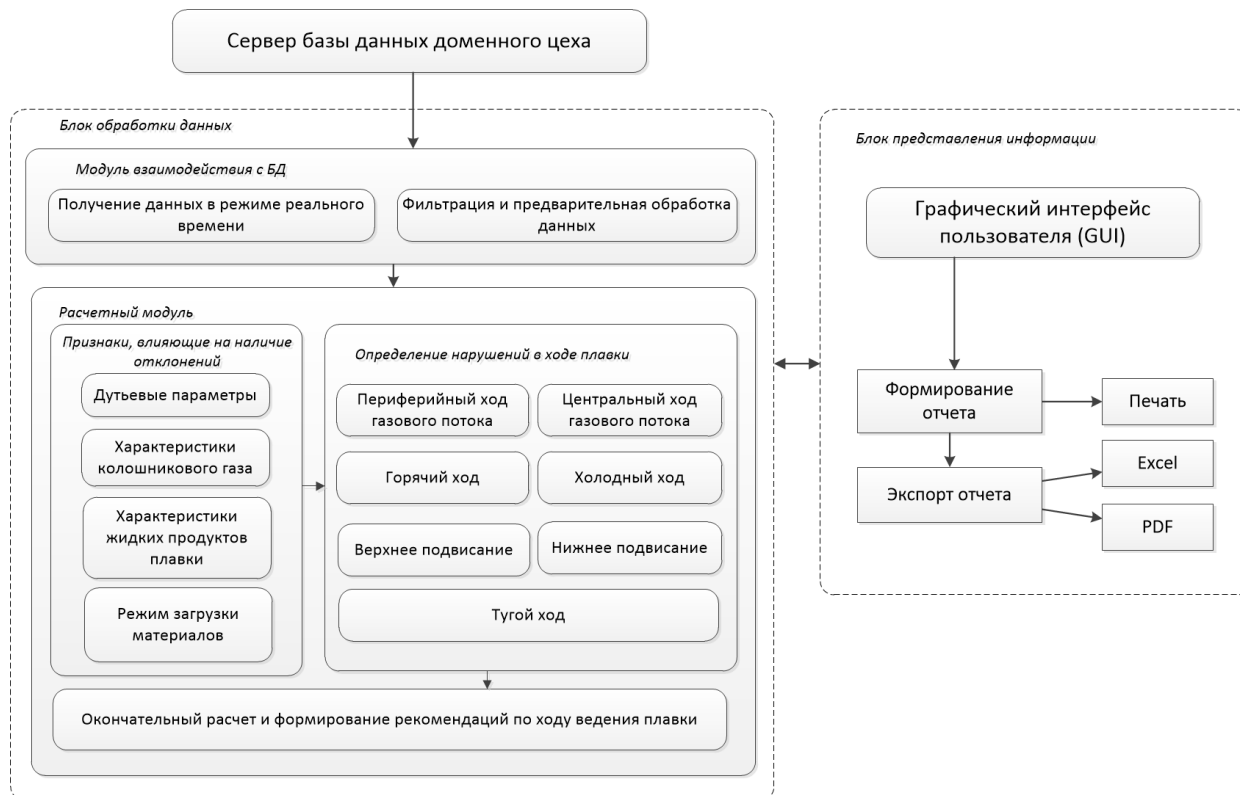


Рисунок 2 – Архитектура программного обеспечения

Программное обеспечение «Распознавание вида отклонений доменной плавки» разработано в соответствии с современными принципами построения прикладных программ (функциональность, расширяемость, интеграция с базами данных, интуитивно-понятный пользовательский интерфейс, безопасность, оценивание информации). Программный модуль является частью системы оптимизации технологического процесса доменной плавки, входит в состав автоматизированной информационной система анализа и прогнозирования производственных ситуаций доменного цеха ОАО «ММК» и предназначен для инженерно-технологического персонала.

В основе программной реализации лежит технология .NET, что дает дополнительную свободу при выборе платформы, а также языка программирования. Программный продукт написан на языке C# с использованием среды разработки Microsoft Visual Studio 2012.

Программный продукт производит следующие действия. Сначала программа загружает из базы данных значения параметров, используемых в расчёте, в частности температуру газов по газоотводам печи, температуру периферийных газов, параметры дутья, параметры колошникового газа и перепады давления, распределение температур по диаметру колошника, состав жидких продуктов доменной плавки. Далее используется со-

зданная математическая библиотека, с помощью которой пересчитываются и анализируются значения признаков и весовых функций.

Для удобства использования рассматриваемые признаки объединены в следующие группы:

- признаки, характеризующие дутьевые параметры;
- колошниковый газ;
- жидкие продукты плавки;
- режим загрузки материалов.

Программа производит расчёт весовых функций для распознавания вероятности:

- нормального режима работы доменной печи;
- нарушения устойчивости газового потока (наличие периферийного или центрального газового потока);
- нарушение теплового режима доменной плавки (горячий или холодный ход);
- нарушение ровного схода шихты в доменной печи (тугой ход, верхнее или нижнее подвисание шихты).

Результат вычисления весовых функций, свидетельствующий о вероятности наличия или отсутствия соответствующих отклонений в ходе доменной плавки, предоставляется пользователю в численном и графическом виде.

В качестве примера на рисунке 3 представлено главное окно программы, в котором отражено состояние работы доменной печи. При анализе учитываются три типа нарушений: нарушения теплового режима, нарушения газового хода и нарушения режима схода шихты. Для каждого из отклонений указано его состояние, а также есть возможность предоставления подробной информации по отклонению. На форме, изображенной на рисунке 3, в виде графиков показана информация о параметрах, влияющих на вероятность возникновения определенного отклонения.

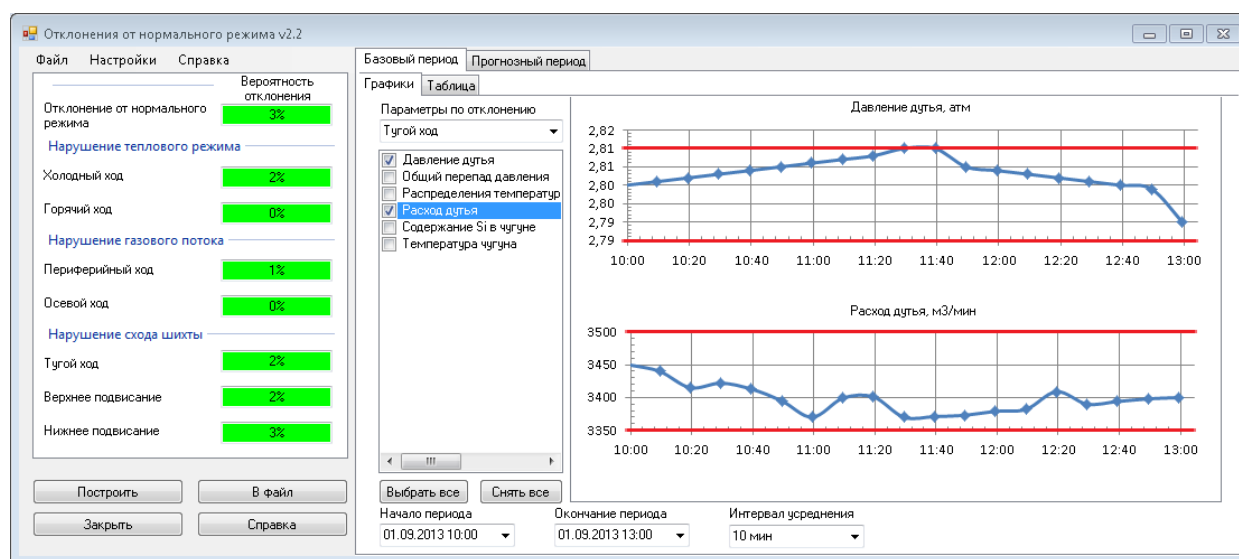


Рисунок 3 – Фрагмент окна программного обеспечения для распознавания вида отклонений доменной плавки от нормального режима

Разработанный программный продукт позволяет пользователю оперативно выявлять наличие отклонения от нормального хода плавки и определять его тип по фактическим данным работающей печи, предоставляет ему возможность в любой момент просмотреть графическую информацию по каждому из параметров, используемых при расчете отклонений. Использование информационно-логической системы помогает производственному персоналу осуществлять диагностику хода печи в режиме реального времени, а также решать оперативные задачи управления технологией доменной плавки.

Библиографический список

1. Логические основы распознавания вида отклонения доменной плавки от нормального режима / О.П. Онорин, Н.А. Спирин, А.В. Павлов, В.В. Лавров, А.С. Истомин. Известия вузов. Черная металлургия, 2014, № 8. С. 8–12.
2. Спирин Н.А., Лавров В.В., Рыболовлев В.Ю., Краснобаев А.В., Онорин О.П., Косаченко И.Е. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки металлургии / Под ред. Н. А. Спирина. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 462 с.
3. Онорин О.П., Спирин Н.А., Терентьев В.Л. [и др.] Компьютерные методы моделирования доменного процесса / Под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. – 301 с.
4. Спирин Н.А. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н.А.Спирин, В.В.Лавров, В.Ю.Рыболовлев [и др.]. Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2014. – 558 с.
5. Юсфин Ю.С. Металлургия чугуна / Под ред. Ю. С. Юсфина. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с.
6. Power D. J. Web-based and model-driven decision support systems: concepts and issues. Americas Conference on Information Systems, Long Beach, California, 2000.
7. Recent progress and future perspective on mathematical modelling of blast furnace / S. Ueda, S. Natsui, T. Ariyama, H. Nogami, J.I. Yagi // ISIJ International, 2010. Vol. 50, No. 7. Pp. 914–923.
8. Development of mathematical model of blast furnace / S. Matsuzaki, T. Nishimura, A. Shinotake, K. Kunitomo, M. Naito, T. Sugiyama // Nippon steel technical report, July 2006. No. 94. Pp. 87–95.
9. Modeling of metallurgical continuous processes in the blast furnace / P. Hera, F. Birlan, I. Oprescu, E.-M. Alexandru, M. Hera // U.P.B. Scientific Bulletin, Series B, 2011. Vol. 73. Iss. 4. Pp. 171–182.
10. Дубейковский В.И. Эффективное моделирование с СА ERwin Process Modeler (BPwin; AllFusion Process Modeler) / В.И. Дубейковский. – М.: Диалог-МИФИ, 2009. – 384 с.

РАЗВИТИЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

Швачка А.И.¹, Бородулин А.В.²

¹ГВУЗ «УГХТУ» г. Днепропетровск, Украина

²ИЧМ НАНУ г. Днепропетровск, Украина

Аннотация. Теплоэнергетическая модель доменной плавки на данном этапе развития является многозонным балансово-статистическим методом расчета, основанном на энергетических параметрах. В развитие модели предложены информационные методы. Поиск перспективных энергосберегающих режимов связан с оценкой компромиссов по основным показателям плавки. Дополнительная информация по расходу кокса может быть получена в результате учета внешних тепловых потерь. Эффективность принятых решений в базовых режимах определяется устойчивостью в системе подачи дутья с учетом принципа стабилизации.

Ключевые слова; энергосбережение, доменная печь, теплоэнергетическая модель, нелинейность, неопределенность, базовый режим, комбинированное дутье, топливные добавки, тепловые потери.

Abstract. Heatenergy model blast furnace at this stage of development is a multi-zone balance-statistical method of calculation, based on the energy settings. The development model proposed information practices. Search Advanced power saving modes associated with the assessment of trade-offs by major melting parameters. Additional information about the consumption of the coke can be obtained by accounting for external heat loss. The effectiveness of the decisions made in the basic mode is determined by the stability of the system feeding the blast, taking into account the principle of stabilization.

Keywords: energy efficiency, blast furnace, heat power model, nonlinearity, uncertainty, basic mode, combined blast, fuel additives, heat loss.

Введение. Основные идеи теплоэнергетической модели доменной плавки восходят к работам Н. Е. Скаредова, получившим логическое завершение применительно к мартеновским, нагревательным и другим печам в работах И. Д. Семикина [1]. При этом степень прямого восстановления железа определяет эмерджентные свойства системы, объединения энергетические параметры и позволяет рассчитать показатели плавки. Компактная форма модели отражена зависимостями производительности и удельного расхода тепла топлива во взаимосвязи с энергетическими параметрами:

$$P = \frac{M_{\text{общ}} \cdot \eta - Q_{\text{ПП}}}{\Delta J}, \quad T_{\text{уд}} = \frac{\Delta J}{\eta} + \frac{Q_{\text{ПП}}}{P \cdot \eta},$$

где P – производительность, т чугуна/час;
 $M_{\text{общ}}$ – общая тепловая мощность, МВт;
 η – коэффициент использования топлива, доля ед.;
 ΔJ – тепловой дефицит, МДж/т чугуна;
 $Q_{\text{ПП}}$ – внешние тепловые потери рабочего пространства печи, МВт;
 $T_{\text{уд}}$ – удельный расход теплоты на выплавку чугуна, МДж/т чугуна.

Представленные зависимости можно трактовать по терминологии Н.Н. Моисеева как минимальную энергетическую модель доменного процесса. Она дает достаточно полное представление о закономерностях доменного процесса, а также обеспечивает более широкие функциональные возможности по сравнению с аналогичными моделями.

Величиной первого ранга в рассматриваемой модели [2] является общая тепловая мощность, определяющая производительность доменной печи, а также степень использования кислорода. Ее переменный характер определяет возмущение на процесс и снижение прогнозной способности модели. Необходимо изучение влияющих на указанный показатель параметров плавки, а также обеспечения постоянства ее величины.

Показателем эффективности распределения газового потока являются внешние тепловые потери в системе водяного охлаждения, которые определены как зависимые в модели и учету которых не уделяется должного внимания. По данному показателю исходные данные задают диапазоном значений или они имеют вероятностный характер, поскольку их величину относят к разности приходных и расходных статей баланса [1].

Постановка задачи. Разработать информационные методы повышения эффективности теплоэнергетической модели доменной плавки на основании инструментального измерения тепловых потерь с учетом требований к формированию дутьевого режима, синтеза результатов моделирования и вычислительного эксперимента.

Основная часть. На основании теплоэнергетической модели доменной плавки была сформулирована оптимизационная модель топливоиспользования с учетом вдувания комбинированного дутья как задача нелинейного программирования по определению экстремума одного из показателей плавки (P – производительность, K – удельный расход кокса, $T_{\text{усл}}$ – удельный расход условного топлива) при ограничениях, обеспечивающих текущие и перспективные режимы плавки [3]. Варианты расчета [4] оптимизационных задач представлены в таблице 1.

Ни одна характеристика комбинированного дутья не дает такого эффекта как комбинированное их использование. Решения задачи согласуются с данными исследований под руководством З.И. Некрасова, Н.Н. Бабарыкина и др., полученными методом перебора вариантов и обеспечивает учет переменных условий режима плавки.

Таблица 1 – Прогнозируемые показатели плавки в условиях ДП № 9 ПАО «АМКР»

Показатели плавки	Критерии эффективности								
	P→max			K→min			T _{всл} →min		
$T_{фз(max)}^*$, °C	1900	2100	2300	1900	2100	2300	1900	2100	2300
Расчетные параметры комбинированного дутья									
t_{dm} , °C	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
O_2 , %	31	31	31	31	31	31	21	21	21
V_{ne} , м ³ /м чуг	95	42	0	95	95	95	48	0	0
$G_{пгт}$, кг/м чуг	149	142	128	149	149	149	139	132	69
Оптимальные показатели доменной плавки									
P , м чуг/час	395	413	429	395	395	395	290	303	309
K , кг/м чуг	347	392	436	347	347	347	382	422	483
$T_{всл}$, кг/м чуг	631	603	579	631	631	631	596	570	558
rd , %	41,62	51,25	58,91	41,62	41,62	41,62	49,89	58,56	59,73
$t_{кз}$, °C	305	233	157	305	305	305	373	313	244
$T_{фз}$, °C	1900	2100	2300	1900	1900	1900	1900	2100	2300
η (КИТ), д.е.	0,27	0,31	0,34	0,27	0,27	0,27	0,32	0,35	0,36
*) $T_{фз}$ – температура фурменной зоны (max – верхнее ограничение); t_{dm} – температура дутья; O_2 – содержание кислорода в дутье; V_{ne} – удельный расход природного газа; $G_{пгт}$ – удельный расход пылеугольного топлива; η (КИТ) – коэффициент использования теплоты топлива; rd – степень прямого восстановления железа по М.А. Павлову; $t_{кз}$ – температура колошниковых газов; $P, K, T_{всл} = f(t_{dm}, O_2, m, n)$ – полиномы 2-й ст.; $m(n)$ – доля углерода природного газа- ПГ (пылеугольного топлива-ПУТ) от общего количества углерода, сгораемого на фурмах.									

Отсутствие исходной информации по внешним потерям теплоты вносит возмущение на процесс плавки. Величины тепловых потерь печей одинакового объема отличаются и зависят от длительности кампании, профиля и тепловой мощности, состояния ограждения и футеровки, газораспределения, температурно-теплого режима, марки чугуна. Зависимость расхода кокса на потери от удельной его величины представлена на рисунке 1. Анализ показателей плавки в зависимости от объема печи (рисунок 2) показал величину экономии кокса за счет новой техники и технологии загрузки, подготовки шихты и составляет 10–12 кг/т чуг, т.е. половина общего эффекта. Другая половина – сокращение потерь теплоты ДП с увеличением объема до 5000 м³. Т.е., имеются резервы выхода на оптимальный газодинамический режим и тепловую работу печи.

Для снижения влияния неопределенности исходной информации по тепловым потерям на показатели плавки предложен метод платежной матрицы [5]. Его сущность заключается в оценке совокупных эффектов влияния вариантов дутьевого режима при фиксированном значении потерь диапазона (0 – 75) МВт. Нижняя граница диапазона определяет адиабатический режим, верхнее значение – теоретические возможные значения. Преимущественные значения параметра находятся внутри диапазона, закон их распределения неизвестен. В результате расчетов показателей плавки составлены платежные матрицы и рассчитаны характерные оценки. Сущность оценок заключается в различных подходах к расчету затрат на производство. К ним относится функция риска (таблица 2), которая представляет собой перерасход, который будет иметь место в случае выбора варианта дутьевого режима вместо варианта, рассчитанного по данному методу.

На основании характерных оценок сформулированы критерии принятия решения. Метод позволяет получить несколько рациональных вариантов, что определило необходимость перехода к инструментальным измерениям потерь.

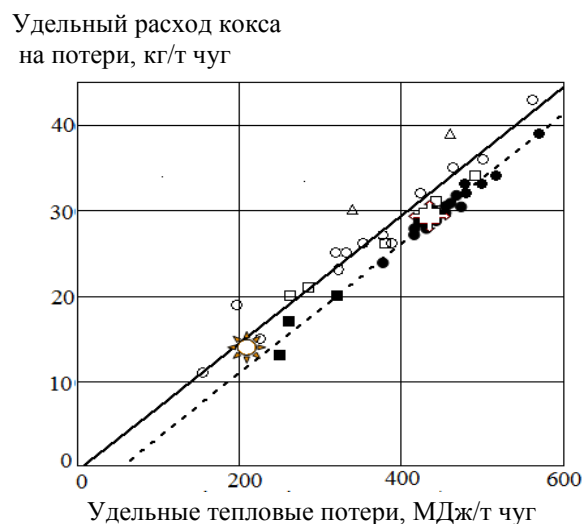


Рисунок 1 – Зависимость расхода кокса на покрытие внешних потерь теплоты (K_{nm}) от величины удельных потерь теплоты (q): статистическая обработка информации по печам различного объема (—), в том числе по ДП объемом:
 (- -) – 5000 м³; (□) – 1000м³; (○) – 2000м³; (Δ) – 250м³; (■) – 5000м³(2007г.);
 (●) – 5000м³ (2011г.); (★) – 3200м³(2012г.); (⬢) – 4300м³ (2012г.)



Рисунок 2 – Влияние объема ДП на производительность (—) и расхода кокса (Δ) – по И. Ф. Курунову. Изменение расхода кокса на внешние потери теплоты доменных печей по В. Г. Воскобойникову и Ю. И. Гофману – (O), А. В. Бородулину в 1986 г. (◇) и в 1974 г. (□), И. Г. Товаровскому, З. И. Некрасову и Я. М. Ободану в 1977 г. (●), инструментальные замеры теплотехников ИЧМ НАНУ (▲)

Таблица 2 – Потери ресурсов по производству (ΔP) и расходу коксу (ΔK) без контроля потерь

Дутье	Отклонение показателей плавки							
$t_{dm}, ^\circ C$	ΔK_1^*		ΔK_2		ΔK_3		ΔK_4	
	Кг/т чугу	%	кг/т чугу	%	Кг/т чугу	%	кг/т чугу	%
1000	31	9	33	9	34	9	38	9
1100	15	4	16	4	17	4	19	5
1200	0	0	0	0	0	0	0	0
$t_{dm}, ^\circ C$	ΔP_1		ΔP_2		ΔP_3		ΔP_4	
	т чугу/час	%	т чугу/час	%	т чугу/час	%	т чугу/час	%
1000	20	5	18	4	20	5	21	6
1100	10	2	9	2	10	3	9	2
1200	0	0	0	0	0	0	0	0

^{*)} - нижний индекс определяет величину внешних тепловых потерь соответствующего варианта расчета:
1 – 0МВт, 2 – 25МВт, 3 – 50 МВт, 4 – 75МВт

Выполнены измерения потерь теплоты калориметрическим методом на основании замеров температуры входящей и исходящей воды в системе охлаждения, расхода воды и обобщен экспериментальный опыт (таблица 3). Тепловых потерь изменяются почти в 2 и более раз. А удельные тепловые потери, по данным теплотехнической лаборатории ИЧМ НАНУ, для ДП №3, 4 ОАО «ММК им. Ильича» а также ДП №3 ОАО «Северсталь» такого же объема изменялись практически в 5 раз. Нестабильность тепловых нагрузок указывают на нестабильность теплового и газодинамического режима работы печи, а также на неустойчивость гарнисажа, износ футеровки и системы охлаждения, что определяют необходимость развития центрального газораспределения. Актуальными остаются вопросы затрат энергии при похолодании, особенно при авариях доменных печей. Это касается крупнейшей аварии на 5000-й печи сопровождавшейся потерями 50% производства и увеличением расхода кокса на компенсацию потерь до 53 кг/т чугу. Учет внешних тепловых потерь позволяет повысить точность расчета показателей плавки на 2-10%.

Таблица 3 – Внешние потери ($Q_{прп}$) и расход кокса на их покрытие (K_{nm}) печей 1000-2000 м³

Показатель плавки	Результаты измерения					
	ПАО «ДКМД»		«ОХМК»	ОАО «Северсталь»		
№ печь, объем, м ³	1, 1000	8, 1000	1, 1000	1, 1007	1, 1007	2, 1033
Дата	1972	1972	2001	1960	1996	1965
P^* , т чугу/сутки	1548	941	510	1845	2012	2302
Q_m (МВт)/(МДж/т чугу)	15/857	10/897	14/2372	11/490	9/380	7/262
K_{nm} кг/т чугу	63	70	239	34	26	20
Показатель плавки	ПАО «АМК»		ОАО «Северсталь»		ПАО «ММКИ»	
	3, 1386	4, 1386	3, 2000	3, 2000	4, 2000	4, 2000
№ печь, объем, м ³	3, 1386	4, 1386	3, 2000	3, 2000	4, 2000	4, 2000
Дата	2010	2010	1972	1965	2007	2007
P , т чугу/сутки	1728	1671	4536	4152	3984	2712
Q_m (МВт)/(МДж/т чугу)	6/275	10/517	20/388	8/155	23/501	22/710
K_{nm} кг/т чугу	20	38	26	11	36	51
Показатель плавки	ПАО «АМКР»					
	5, 2000		6, 2000		7, 2000	
№ печь, объем, м ³	5, 2000	5, 2000	6, 2000	6, 2000	7, 2000	7, 2000
Дата	25.06.07	31.08.07	24.07.07	22.10.07	26.05.07	18.07.07
P , т чугу/сутки	3932	3816	3798	4098	3904	3901
Q_m (МВт)/(МДж/т чугу)	17/369	13/299	22/489	14/285	17/370	22/492
K_{nm} кг/т чугу	27	22	37	22	28	38

Для поддержания постоянной величины тепловой мощности печи, как показывает анализ теплоэнергетической модели, необходимо обеспечить постоянство характеристик

дутья. Это определяет актуальность исследования колебаний в системе подачи дутья «турбовоздуходувка – доменная печь» («ТВД–ДП») по модели В.В. Казакевича [6].

В случае вдувания природного газа (рисунок 3, т.1) характеристика доменной печи пологая, газодинамический режим устойчивый. При вдувании ПУТ (рисунок 3, т.2) газодинамическое сопротивление доменной печи растет за счет увеличения содержания заки- си железа и количества первичного шлака, его вспенивания. При этом происходит пере- ход системы в автоколебательный режим. Для его исключения необходима система ста- билизации, которая обеспечит переход в область устойчивости (рисунок 3, т.3). Основные положения данной теории были реализованы в системе фирмы «ССС», США на ДП №9 ПАО «АМКР» с учетом повышения давление нагнетания и производительность ДП путём уменьшения расстояния рабочей точки ТВД от границы помпажа. Оценка влияния стаби- лизации параметров дутья на показатели работы печи рассчитана по методике расчета приведенного расхода кокса И. Г. Товаровским, определила экономию расхода кокса 3-4 кг/т чугуна [7].

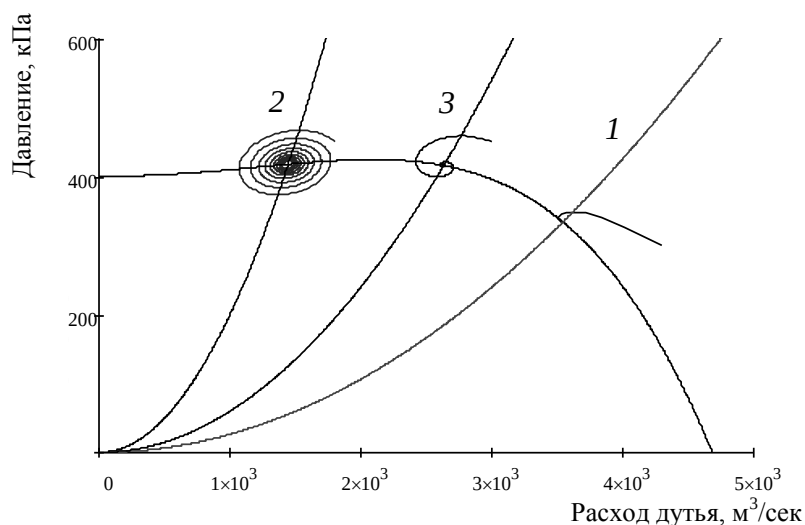


Рисунок 3 – Энергетическая характеристика ТВД при вдувании: 1 – природного газа (колебания затухающие, режим устойчивый), 2 – пылеугольного топлива (переход в автоколебательный режим), 3 – эффект автоматической стабилизации при вдувании угольной пыли (режим устойчивый, сопровождается несколькими колебаниями относительно задания)

Дальнейшим этапом развития теплоэнергетической модели, которая уже перешла в оптимизационную форму, является изменения энергетических условий плавки и оператив- ной оценки компромиссных режимов плавки на основании принципа Парето. Для техноло- гической интерпретации решение перенесено на плоскость искомых величин (рисунок 4).

Управление тепловым режимом плавки выполняется по анализу используемых ви- дов топлива (рисунок 4, а) с дальнейшим переходом на показатель производительности печи (рисунок 4, б) в плоскости показателя усвоенной тепловой мощности. Линия проек- ции (---) определила рациональный режим процесса с точки зрения энергоэффективности.

Выводы. Для совершенствования теплоэнергетической модели доменной плавки выполнена адаптация методов: платежной матрицы – для снижения влияния неопреде- ленности исходной информации, фазового пространства – для мониторинга газодинами- ческого режима доменной печи, векторной оптимизации – для поиска компромиссных показателей плавки в развитии теплоэнергетической модели. Обоснована целесооб- разность контроля тепловых потерь в системе охлаждения.

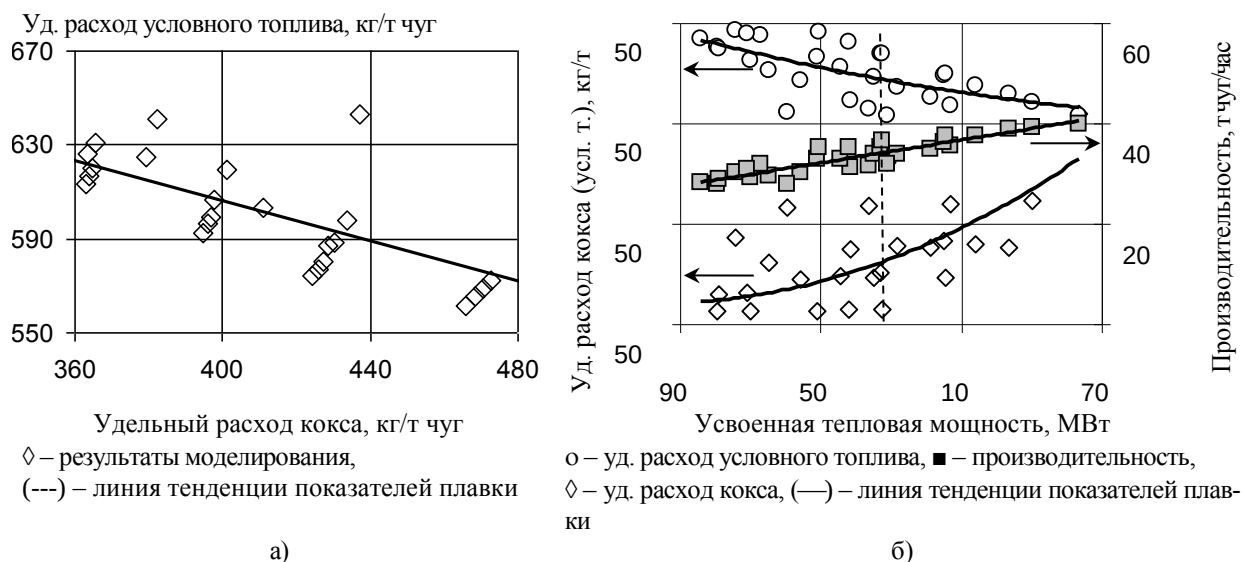


Рисунок 4 – Поиск компромиссных решений в области « $P - K - T_{\text{усл}}$ » на ДП №9 ПАО «АМКР»

Светлой памяти учителя посвящается.

Библиографический список

1. Бородулин А. В. Домна в энергетическом измерении [Текст] / А. В. Бородулин, А. Д. Горбунов, В. И. Романенко, С. П. Сушев - Днепропетровский, 2006. - 450 с.
2. Бородулин, А. В. Вклад И. Д. Семикина в теплотехнику доменного производства и его развитие [Текст] / А. В. Бородулин, И. И. Кобеза, Н. М. Можаренко // Металлургическая и горнорудная промышленность. -1998.- № 4. С. 70–74.
3. Байбуз А. Г. Об использовании методов математического программирования в расчетах показателей доменной плавки [Текст] / А. Г. Байбуз, И.А. Лукьяненко, А.А. Сохацкий, А.Л. Чайка, А.И. Швачка // Тр. III науч. – практ. конфер. «Металлургическая теплотехника: история, современное состояние, будущее. К столетию со дня рождения М.А. Глинкова». - М. : МИСиС, 2006. - С. 136 – 141.
4. Первозванский А.А. Математические модели в управлении производством [Текст] / Первозванский А. А. - М. : Наука, 1975.- 660с.
5. Швачка А. И. Моделирование режимов форсирования доменной плавки с учетом неопределенности информации. [Текст] / А.И. Швачка, И.А. Лукьяненко, В.Г. Зайцев, А.Л. Чайка, С.В. Нынь // Науч.-техн. конфер. «Информационные технологии в металлургии и машиностроении». (14-17 апреля 2008г.). – С. 105-110.
6. Казакевич, В. В. Автоколебания (помпаж) в вентиляторах и компрессорах [Текст] / В. В. Казакевич. - М. : Машгиз, 1976. – 262 с.
7. Романенко В. И. Управление дутьевым режимом в доменной печи с автоматической стабилизацией параметров дутья. [Текст] / В.И. Романенко, А.Г. Швеи, В.С. Листопадов, А.Л. Чайка, А.И. Швачка, А.В. Бородулин // Черная металлургия: Бюллетень ОАО «Черметинформация». - 2006. - №2 (1274). - С. 28 – 33.

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Арсеньева А.А., Дорофеев Г.А., Ерофеев В.А.

Тульский государственный университет

г. Тула, Россия, Silabykv@yandex.ru, imsk@List.ru, va-erofeev@mail.ru

Аннотация. Создана математическая модель для анализа сложных физико-химических явлений процесса ORIEN в электродуговой сталеплавильной печи (ДСП) непрерывного действия. При помощи численных методов решена система дифференциальных уравнений, описывающих процесс получения железа прямого восстановления. Модель позволяет выполнить полный энергетический анализ процесса ORIEN с учетом тепловыделения электрических дуг, основных химических реакций, а также тепломассопереноса расплава и паров металла.

Ключевые слова: процесс ORIEN, физико-математическое моделирование, электродуговая сталеплавильная печь, численные методы.

Abstract. A mathematical model of the analysis of complex physical-chemical phenomena in the process ORIEN in continuous arc furnace (EAF) was developed. Using numerical methods we solved the system of differential equations describing the process of obtaining direct reduced iron. This model allows realize complete energy analysis of ORIEN process taking into account the arc heat emission, which based on main chemical reactions, heat-mass transfer melt and the metal vapor.

Keywords: process ORIEN, physical-mathematical modeling, electric arc furnace, numerical methods.

Процесс ORIEN относится к новому виду энергометаллургических технологий и представляет собой процесс одновременного получения железа прямого восстановления и газификации угля. В качестве металлургического агрегата для реализации процесса ORIEN рассматривается электродуговая сталеплавильная печь непрерывного действия (ДСП) рисунок 1. Исходными материалами процесса являются железорудное сырьё в виде концентрата, порошкообразный уголь и газообразный кислород.

ДСП имеет корпус, в котором наводится металлическая и шлаковая ванны, три графитовых электрода, три донные фурмы для подачи оксида железа, три фурмы для подачи угольной пыли сквозь толщу металлической ванны, и фурма для подачи кислорода.

Так как процесс протекает во времени и пространстве, то термодинамическое состояние непрерывно изменяется вследствие выделения теплоты электрической дугой и химическими реакциями. Химический состав также непостоянен вследствие протекающих реакций и подачи элементов во время плавки. Физико-математическое моделирование процесса заключается в решении системы дифференциальных уравнений энергии и массопереноса. При описании физических явлений использована ортогональная декартова система координат.

Пространство моделирование условно разделено на области: E – область угольных электродов; D – область электрических дуг; R – область расплавленного шлака; M – область расплава металла; F – область футеровки печи; G – область газовой среды. Каждая из областей в зависимости от свойств веществ и процессов, происходящих в ней, описывается специальной системой уравнений.

Численным методом решения дифференциальных уравнений выбран метод конечных разностей на равномерной сетке численного решения. Пространство рассматривается как множество U точек, равномерно расположенных в пространстве с одинаковым шагом Δ по координатам и пронумерованных в направлении 3-х ортогональных координат $i=0\dots im, j=0\dots jm, k=0\dots km$.

$$\frac{\partial p}{\partial t} = E \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right), \quad (2)$$

где E – модуль упругости.

Значения компонент скорости течения расплава в узлах сетки $U_{i,j,k} \in M$ в зоне M вычисляется по следующим соотношениям, полученным преобразованием уравнений Навье-Стокса

$$\begin{aligned} v_{i,j,k}^x &= v_{i,j,k}^x + \frac{\tau}{\rho} \left(\frac{(p_{i+1,j,k} - p_{i-1,j,k})}{2\Delta} + \frac{\eta}{\Delta^2} (v_{i+1,j,k}^x + v_{i-1,j,k}^x + v_{i,j+1,k}^x + v_{i,j-1,k}^x + v_{i,j,k+1}^x + v_{i,j,k-1}^x - 6v_{i,j,k}^x) \right) \\ v_{i,j,k}^y &= v_{i,j,k}^y + \frac{\tau}{\rho} \left(\frac{(p_{i,j+1,k} - p_{i,j-1,k})}{2\Delta} + \frac{\eta}{\Delta^2} (v_{i+1,j,k}^y + v_{i-1,j,k}^y + v_{i,j+1,k}^y + v_{i,j-1,k}^y + v_{i,j,k+1}^y + v_{i,j,k-1}^y - 6v_{i,j,k}^y) \right) \\ v_{i,j,k}^z &= v_{i,j,k}^z + \frac{\tau}{\rho} \left(\frac{(p_{i,j,k+1} - p_{i,j,k-1})}{2\Delta} + \frac{\eta}{\Delta^2} (v_{i+1,j,k}^z + v_{i-1,j,k}^z + v_{i,j+1,k}^z + v_{i,j-1,k}^z + v_{i,j,k+1}^z + v_{i,j,k-1}^z - 6v_{i,j,k}^z) \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Значение давления $p_{i,j,k}$ в узлах разностной сетки, расположенных в расплаве $U_{i,j,k} \in M$, вычисляется по соотношению, полученному из уравнения неразрывности

$$p_{i,j,k} = p_{i,j,k} + \frac{\tau E}{\Delta} (v_{i+1,j,k}^x - v_{i-1,j,k}^x + v_{i,j+1,k}^y - v_{i,j-1,k}^y + v_{i,j,k+1}^z - v_{i,j,k-1}^z). \quad (4)$$

Графически распределение давления на поверхности расплава, рисунок 2а, определяется расположением фурм для подачи кислорода. В донной зоне, рисунок 2б, основным источником давления являются потоки порошка углерода и оксида железа [2-5].

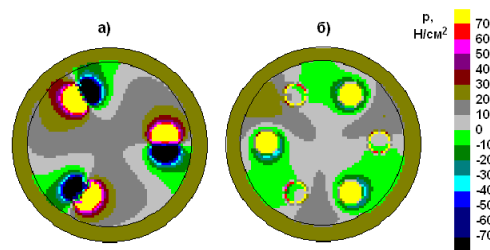


Рисунок 2 – Распределение давления в расплаве в поверхностных (а) и придонных (б) слоях расплава

Различие давлений создаёт потоки в расплаве, рисунок 3.

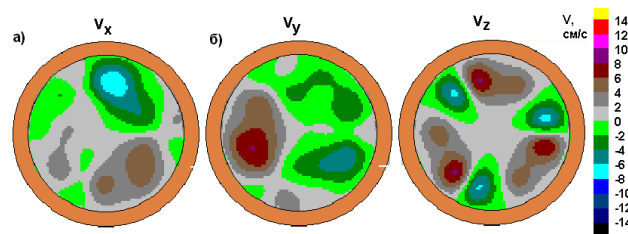


Рисунок 3 – Распределение составляющих скорости потока расплава (а – V_x ; б – V_y ; в – V_z) по ортогональным координатам в среднем поперечном сечении печи

Сумма составляющих течения в направлении ортогональных координат в плоскости поперечного сечения $v_x + v_y$ является вращательным движением расплава, обусловленным подачей струй кислорода, рисунок 3а. Подача порошка углерода и оксида железа вызывает движение расплава в виде трёх вертикальных вихрей v_z .

Уравнение концентрации. Концентрация элементов в расплаве изменяется при плавлении компонентов шихты и перехода ее элементов в расплав, химического взаимодействия элементов в расплаве и перемещения продуктов взаимодействия потоком жидкости. Изменение концентрации C всех элементов расплава описывается уравнением переноса

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial C}{\partial z} \right) \right) + v_x \frac{\partial C}{\partial x} + v_y \frac{\partial C}{\partial y} + v_z \frac{\partial C}{\partial z} + C(t), \quad (5)$$

где D – коэффициент диффузии данного элемента в жидком железе;

v_x, v_y, v_z – скорости движения расплава, определяемые из решения уравнения Навье-Стокса;

$C(t)$ – изменение концентрации вещества вследствие течения химических реакций.

Изменение концентрации двуоксида железа и углерода (рисунок 4) вследствие диффузии и движения расплава рассчитывается по двум подобным соотношениям, полученным из уравнения массопереноса

$$C_{i,j,k} = C_{i,j,k} + \frac{\tau}{\Delta^2} \left[\begin{aligned} & D_{i+\frac{1}{2},j,k} (C_{i+1,j,k} - C_{i,j,k}) - D_{i-\frac{1}{2},j,k} (C_{i,j,k} - C_{i-1,j,k}) + \\ & D_{i,j+\frac{1}{2},k} (C_{i,j+1,k} - C_{i,j,k}) - D_{i,j-\frac{1}{2},k} (C_{i,j,k} - C_{i,j-1,k}) + \\ & D_{i,j,k+\frac{1}{2}} (C_{i,j,k+1} - C_{i,j,k}) - D_{i,j,k-\frac{1}{2}} (C_{i,j,k} - C_{i,j,k-1}) \end{aligned} \right] + \\ + \frac{\tau}{2\Delta} \left[v_{i,j,k}^x (C_{i+1,j,k} - C_{i-1,j,k}) + v_{i,j,k}^y (C_{i,j+1,k} - C_{i,j-1,k}) + v_{i,j,k}^z (C_{i,j,k+1} - C_{i,j,k-1}) \right] \quad (6)$$

Концентрация углерода и оксида железа быстро убывает при удалении от подающих донных фурм. Взаимодействие этих веществ вызывает выделение монооксида углерода, которое наиболее интенсивно в областях, равноудалённых от донных фурм.

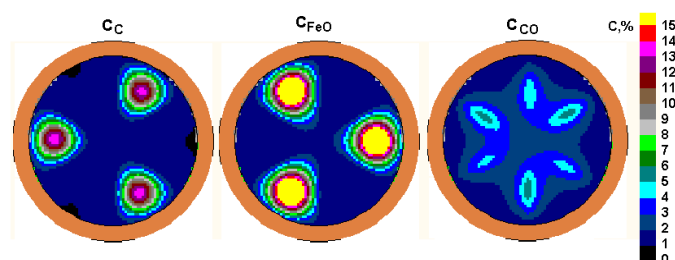


Рисунок 4 – Распределение концентрации углерода C_c , оксида железа C_{FeO} и интенсивности выделения монооксида углерода C_{CO} в среднем сечении печи

Уравнение теплопроводности. Во всех указанных областях печи протекает нестационарный термодинамический процесс, который описывается изменением энтальпии $H(t)$ множества точек пространства во времени t . Нестационарное линейное уравнение теплопроводности в декартовой системе координат x, y, z имеет вид [1]

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + v_x \frac{\partial H}{\partial x} + v_y \frac{\partial H}{\partial y} + v_z \frac{\partial H}{\partial z} + q_i, \quad (7)$$

где T – температура точек пространства;

λ – коэффициент теплопроводности среды, зависящий от координат расположения точки в пространстве, типа вещества и температуры в этой точке;

v_x, v_y, v_z – скорости движения вещества в направлении соответствующих координат;
 q_i – удельные значения мощности выделения и поглощения теплоты в данной точке пространства.

Для численного решения уравнения теплопроводности используется конечноразностный оператор, полученный преобразованием уравнения.

Воздействие дуг и реакции окисления железа в зоне подачи струй кислорода описано оператором

$$H_{i,j,Kq} = H_{i,j,Kq} + \frac{\tau q_{i,j}}{\Delta^3}, \quad (8)$$

где Kq – порядковый номер узлов, расположенных на поверхности расплава M ;

τ – шаг времени моделирования;

Δ – шаг сетки.

Теплоперенос теплопроводностью и конвекцией описан оператором

$$H_{i,j,k} = H_{i,j,k} + \frac{\tau}{\Delta^2} \left[\begin{aligned} &\lambda_{i+\frac{1}{2},j,k} (T_{i+1,j,k} - T_{i,j,k}) - \lambda_{i-\frac{1}{2},j,k} (T_{i,j,k} - T_{i-1,j,k}) + \\ &\lambda_{i,j+\frac{1}{2},k} (T_{i,j+1,k} - T_{i,j,k}) - \lambda_{i,j-\frac{1}{2},k} (T_{i,j,k} - T_{i,j-1,k}) + \\ &\lambda_{i,j,k+\frac{1}{2}} (T_{i,j,k+1} - T_{i,j,k}) - \lambda_{i,j,k-\frac{1}{2}} (T_{i,j,k} - T_{i,j,k-1}) \end{aligned} \right] + \\ + \frac{\tau}{2\Delta} [v_{i,j,k}^x (H_{i+1,j,k} - H_{i-1,j,k}) + v_{i,j,k}^y (H_{i,j+1,k} - H_{i,j-1,k}) + v_{i,j,k}^z (H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k-1})] \quad (9)$$

Поглощение теплоты реакцией восстановления железа углеродом компенсируется окислением углерода и теплотой, выделяемой электрическими дугами. Эти источники и стоки теплоты действуют в разных зонах расплава, что приводит к неравномерному распределению температуры, рисунок 5.

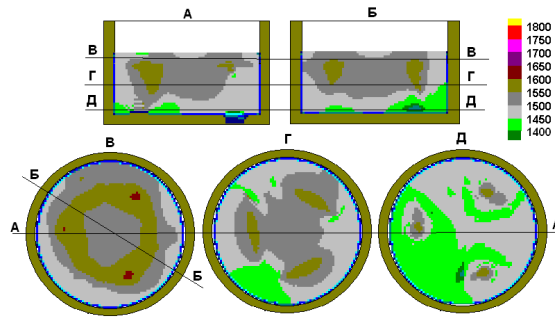


Рисунок 5 – Распределение температур в разных сечениях ДСП

Электрические дуги и окисление углерода нагревают приповерхностную область расплава, соответственно температура поверхностных слоёв выше, рисунок 5а. В придонные слои поступают холодные углерод и оксид железа, реакция взаимодействия между которыми поглощает тепло, что снижает температуру расплава, рисунок 5б. Теплоперенос осуществляется исключительно потоками расплава, которые выравнивают температуру по объёму.

Выводы:

1) разработана нестационарная нелинейная физико-математическая модель принципиально нового процесса одновременного получения железа прямого восстановления и газификации угля в электродуговой сталеплавильной печи (ДСП), основой которой является система уравнений, описывающих движение расплава, распределение концентрации

веществ и интенсивности химических реакций между ними, тепловыделение и теплоперенос в ДСП;

2) течение расплава описано уравнением Навье-Стокса, изменение концентрации описывается уравнением переноса, теплоперенос описан уравнением теплопроводности, в котором энтальпия и температура связаны нелинейными функциями;

3) численным методом решения дифференциальных уравнений выбран метод конечных разностей на равномерной сетке численного решения. Результаты численного решения представлены графически и описывают распределение давления, скоростей, концентраций и температуры в различных областях электродуговой сталеплавильной печи.

Библиографический список

1. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики /А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Наука, 1972.– 735 с.
2. Белащенко, Д. К. Компьютерное моделирование жидких и аморфных веществ /Д. К. Белащенко. – М.: МИСИС, 2005. – 408 с.
3. Modelling, Optimization and Control of an Electric Arc Furnace / Richard MacRosty. - Hamilton: McMaster University, 2005. – 160 p.

УДК 681.51

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ С РЕЦИКЛОМ*

Циряпкина А.В.¹, Мышляев Л.П.², Венгер К.Г.³, Леонтьев И.А.³

¹ООО «НИЦ СУ», г. Новокузнецк, Россия, asya1990_90@mail.ru

²ФГБОУ ВПО «СибГИУ», г. Новокузнецк, Россия, myshlp@mail.ru

³ЗАО «Стройсервис», г. Кемерово, Россия, commerce@stroyservis.com

Аннотация. Статья посвящена исследованию объектов с рециклом. Приведена классификация объектов с выделением рециклов «по концентрации», «по массе» и «по параметрам». Для объекта с рециклом «по параметрам» представлен алгоритм управления. Даны результаты моделирования этой систем с привлечением данных функционирования тяжелосредных гидроциклонов при обогащении углей.

Ключевые слова: запаздывание по состоянию, положительная обратная связь, объект с рециклом, система управления, тяжелосредные гидроциклоны.

Abstract. The article is devoted to research of objects with positive feedback. There is a classification of objects with positive feedback: «in concentration», «in weight» and «in parameters». For an object with positive feedback «in parameters» there is a management algorithm. And also describes the results of the simulation of the system, which used heavy hydrocyclones data.

Keywords: state delay, positive feedback, objects with positive feedback, control system, heavy hydrocyclones.

Повышение эффективности технологических процессов переработки сырья, экологичности процессов, а порой и их осуществимости достигается за счет введения положительных обратных связей в объекты управления (объекты с рециклом). Примерами таких объектов могут служить водношламовые системы обогащения полезных ископаемых, процессы окомкования материалов при получении окатышей и агломерата в металлургическом производстве, социально-экономические системы при выделении материальных и финансовых ресурсов в прямой зависимости от результатов деятельности. Введение положительных обратных связей в объекты управления придает им качественно новые свойства, существенно изменяет динамику поведения и усложняет процесс управления.

* Работа поддержана грантом РФФИ по проекту №15-07-02231

Объекты с рециклом описываются моделью объектов с запаздыванием по состоянию. В общем виде модель возмущенного движения объекта с рециклом может быть представлена выражениями [1]:

$$\begin{aligned}\dot{X}(t) &= A(t) \cdot X(t - \tau_x) + B(t) \cdot U(t - \tau_u) + C(t) \cdot W(t - \tau_w), \\ Y(t) &= D(t) \cdot Y(t - \tau_y) + F(t) \cdot E(t - \tau_e),\end{aligned}$$

где X, U, W, Y, E – векторы состояний, управления, внешних воздействий, выходов и погрешностей измерений;

$\tau_x, \tau_u, \tau_w, \tau_y, \tau_e$ – соответствующие времена запаздывания;

$A(t), B(t), C(t), D(t), F(t)$ – матрицы соответствующих размерностей;

t – непрерывное время.

Управлению объектами с запаздываниями посвящены работы отечественных и зарубежных ученых: Дж. Смит, Дж. Ресвик, Р.Т. Янушевский, С.В. Емельянов, С.К. Корвин, Х. Гурецкий, У. Рей и др. Большинство из известных работ по математическому описанию и управлению объектами с рециклом посвящено объектам с так называемым рециклом «по концентрации» (по терминологии У. Рея), когда выходным воздействием объекта и выходным воздействием рецикла являются показатели качества (температура, содержание элементов и т.д.), но не количество получаемой продукции.

Значительно меньше работ, в которых за выходное воздействие объекта принимается количество продукции. И практически отсутствуют работы, где рассматривается влияние показателей рецикла на динамические свойства элементов основного контура (прямой цепи) объекта управления.

В то же время многие промышленные и социально-экономические объекты характеризуются различными видами рециклов. Классификация объектов с рециклом, синтез и исследование алгоритмов управления объектами с рециклом, а так же их испытания и внедрение представляет научную значимость и является актуальными для развития систем автоматизации управления.

Объекты с рециклом можно разделить на три класса:

1) объекты с рециклом «по концентрации» [1], когда все расходы материала фиксированы, а концентрация элементов (температура и др.) материала изменяется. В этом случае матрица $A(t)$ не зависит от состояния $X(t)$ и $D(t) = 1$;

2) объекты с рециклом «по массе», когда за выходное воздействие принимается часть материала (готовой продукции), поступающей на выход объекта, а другая часть материала поступает в цепь рецикла. Соотношение этих частей может изменяться в зависимости от внешних условий, состояний, агрегатов и т.д. и, как правило, специально не контролируется. В этом случае матрица $A(t)$ зависит от состояния $X(t)$ и $D(t) \neq 1$;

3) объекты, в которых рецикл влияет на параметры отдельных их составляющих – рецикл «по параметрам». В этом случае матрицы $B(t)$ и $C(t)$ зависят от состояния $X(t)$.

Наиболее полно отображают все классы объектов с рециклом объекты с рециклом «по параметрам». Системы с такого рода объектами менее всего исследованы и требуют всестороннего моделирования и сопоставительной оценки эффективности.

В системе управления объектом с рециклом «по параметрам» управление осуществляется по двум каналам:

- координатного управляющего воздействия по первому каналу управления, изменения которого влияют непосредственно на управляемое выходное воздействие объекта;
- параметрического управляющего воздействия по второму каналу управления, изменения которого влияют на динамические характеристики объекта.

Алгоритм управления, реализуемый координатным регулятором, строится на базе традиционно применяемых алгоритмов управления объектов с запаздыванием [2-4] и выполняет основные операции:

- 1) расчетная компенсация эффектов влияния цепи рецикла на регулируемую выходную переменную;
- 2) косвенное (расчетное) оценивание эквивалентного неконтролируемого возмущения объекта, приведенного к входу канала координатного управления;
- 3) экстраполяция траектории эквивалентного неконтролируемого возмущения;
- 4) формирование координатного управляющего воздействия с учетом экстраполированных значений эквивалентного неконтролируемого возмущения и влияния рецикла.

Алгоритм управления, реализуемый параметрическим регулятором, выполняет следующие основные функции:

- 1) расчет текущего значения критерия качества регулирования;
- 2) контроль соответствия величины критерия заданной зоне нечувствительности;
- 3) формирование параметрического управляющего воздействия, под действием которого происходит перемещение делителя потока, а значит изменение величины доли продукта, возвращаемого в цепь рецикла.

Алгоритм управления, реализуемый блоком адаптации параметров, выполняет следующие функции:

- 1) расчет коэффициента пропорциональности для стандартного регулятора, используемого в контуре координатного управления (в соответствии со стандартной методикой настройки типовых регуляторов [5]);
- 2) расчет текущих значений коэффициентов (коэффициент передачи и постоянная времени) модели канала координатного управления.

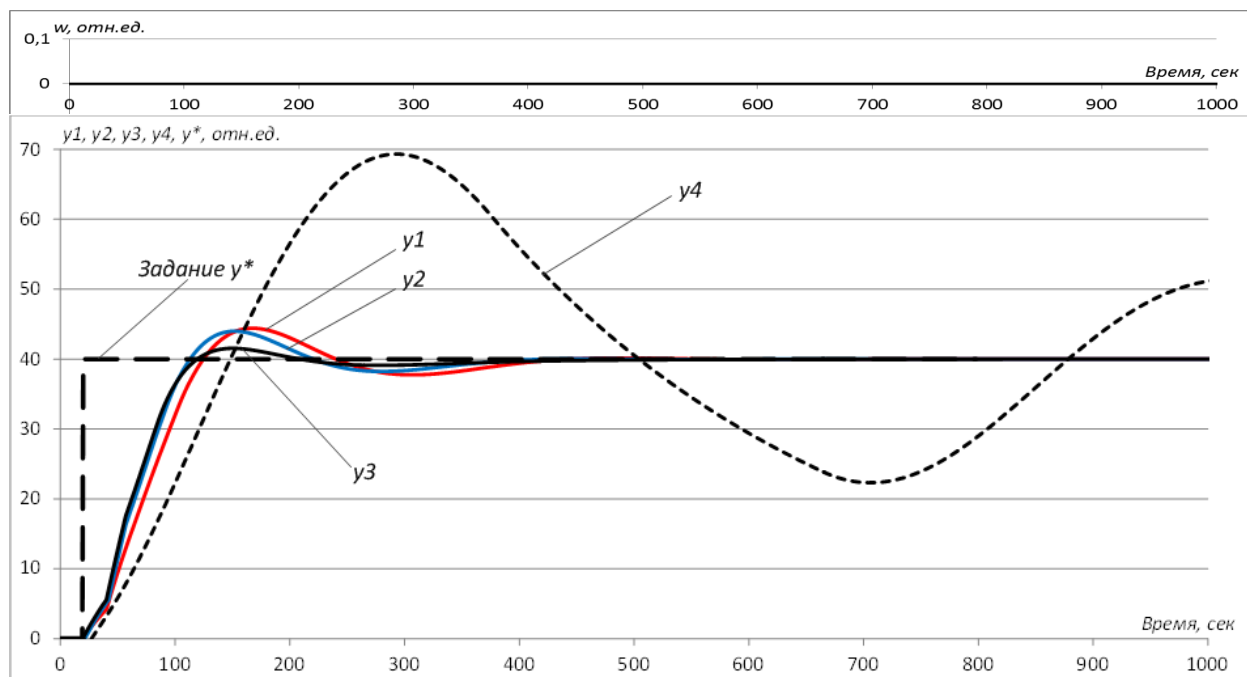
Моделирование системы управления проведено для регулирования плотности магнетитовой суспензии при обогащении рядового угля на тяжелосредних гидроциклонах. Регулируемой выходной величиной y объекта управления является плотность рабочей магнетитовой суспензии, измеряемая в кг/м^3 , подаваемой из схемы приготовления суспензии на тяжелосредние гидроциклоны. Часть рабочей суспензии возвращается по схеме циркуляции назад в схему приготовления.

Результаты моделирования представлены графиками переходных процессов под влиянием внешних ступенчатых воздействий по задающему входу $y^*(t)$ (рисунок 1) и по возмущающему входу $\omega(t)$ (рисунок 2). Сопоставляются САР с типовым законом регулирования и три варианта структуры описанной системы регулирования.

Вариант 1. При работе системы задействован только контур координатного управления. Контур параметрического управления выключен и положение делителя потока не меняется. Блок адаптации выключен и коэффициенты моделей канала преобразований координатных управляющих воздействий и первого регулирующего блока, используемые в контуре координатного управления, не корректируются.

Вариант 2. При работе системы задействованы как контур координатного управления, так и контур параметрического управления. Блок адаптации выключен и коэффициенты моделей управления не корректируются.

Вариант 3. При работе системы задействованы контуры координатного управления и параметрического управления. В блоке адаптации выполняется корректировка текущих значений коэффициентов моделей канала преобразований координатных управляющих воздействий и первого регулирующего блока, используемые в контуре координатного управления.



y_1 – график переходного процесса, соответствующий первому варианту системы управления, y_2 – второму, y_3 – третьему, y_4 – график переходного процесса для САР с типовым законом регулирования

Рисунок 1 – Переходные процессы САР объекта с рециклом «по параметрам» при $y^* = 40$

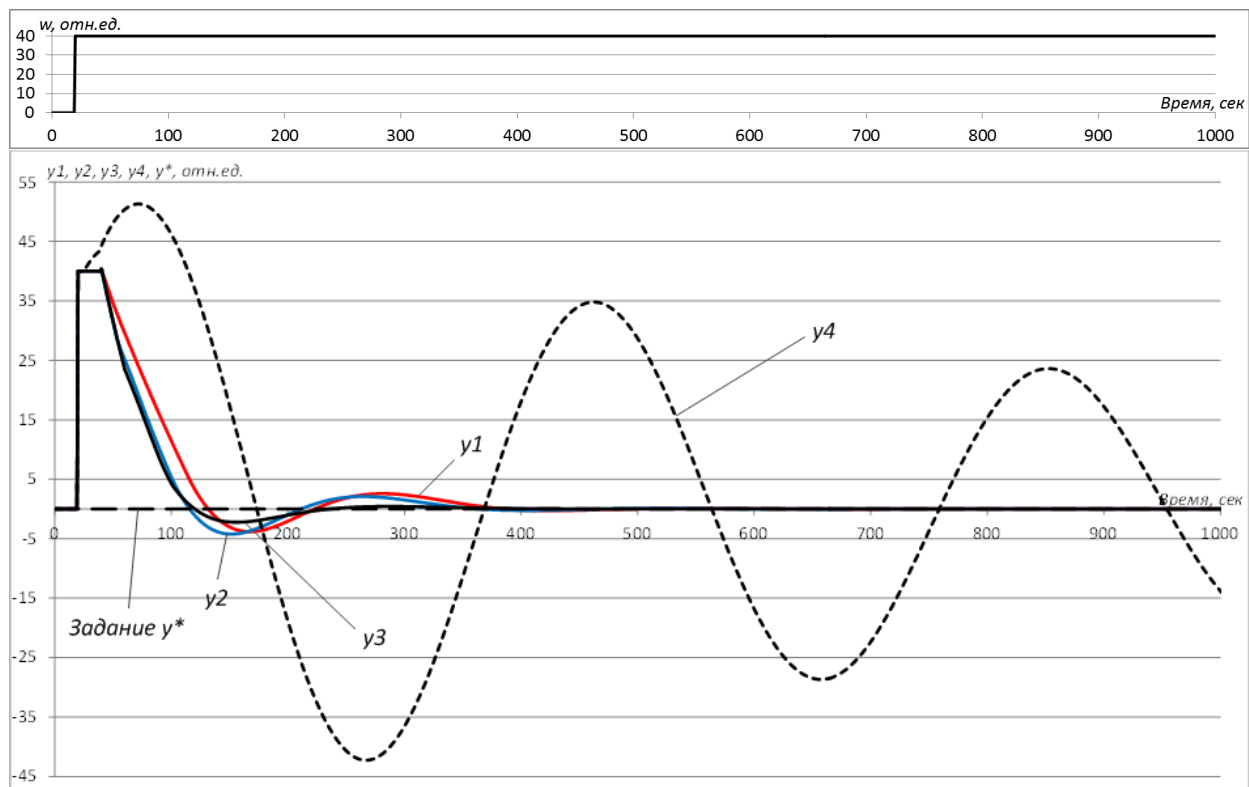


Рисунок 2 – Переходные процессы САР объекта с рециклом «по параметрам» при $\omega = 40$

Из графиков рисунков 1 и 2 видно, что введение в действие контура параметрического управления (вариант 2) в дополнение к контуру координатного управления (вариант 1) обеспечивает уменьшение длительности переходных процессов и снижение величины динамического отклонения регулируемой выходной переменной от задания под влиянием управляющих воздействий. Введение в действие блока адаптации и выполнение корректировки текущих значений коэффициентов моделей канала преобразований координатных управляющих воздействий и первого регулирующего блока, используемых в контуре координатного управления (вариант 3), приводит к дополнительному уменьшению длительности переходных процессов и величины динамического отклонения регулируемой выходной переменной. Из представленных результатов следует, что введение в систему контура параметрического управления в дополнение к контуру координатного управления с корректировкой текущих значений коэффициентов моделей регулирующего блока, используемых в контуре координатного управления, приводит к улучшению качества регулирования не менее чем на 25%.

Сопоставление величины среднемодульной ошибки регулирования для рассмотренных вариантов структур системы представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сопоставление величины среднемодульной ошибки

Вариант структуры системы	Среднемодульная ошибка регулирования, отн.ед.	
	Внешнее воздействие по задающему входу	Внешнее воздействие по возмущающему входу
Вариант 1	5,44	5,94
Вариант 2	4,50	4,50
Вариант 3	4,06	4,07
САР с ПИ-регулятором	9,4	13,98

Библиографический список

1. Рей У. Методы управления технологическими процессами / У. Рей. – М.: Мир, 1983. – 368 с.;
2. К вопросу об управлении объектами с рециклом / Венгер К.Г., Мышляев Л.П., Циряпкина А.В., Барагичев К.Е. // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: Труды VIII Всероссийской научно-практической конференции/ Сиб. гос. индустр. ун-т - Новокузнецк, 2011.- С. 137-142;
3. Численное исследование САР объектов с рециклом / Мышляев Л.П., Венгер К.Г., Циряпкина А.В. // Труды Всероссийской научно-практической конференции СибГИУ «Металлургия: технологии, управление, инновации, качество»/ Сиб. гос. индустр. ун-т – Новокузнецк, 2010.;
4. Бюллетень евразийского патентного ведомства 021192 В1, № 2011130360/08 G05B13/00 Система регулирования объекта с рециклом / Мышляев Л.П., Ивушкин А.А., Венгер К.Г., Киселев С.Ф., Циряпкина А.В., Березин Д.Г., Чичиндаев М.Г. Барагичев К.Е.
5. Проектирование систем контроля и автоматического регулирования металлургических процессов: пособие по курсовому и дипломному проектированию. / Г.М. Глинов, В.А. Маковский, С.Л. Лотман, М.Р. Шапировский; Под ред. Г.М. Глинкова. – Москва, «Металлургия», 1986. – 352 с.

СОВМЕСТНЫЙ НАГРЕВ ОКАТЫШЕЙ И АГЛОМЕРАТА С КОКСОМ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ЧАСТИ ШИХТЫ

Харченко Е.О., Сидоров М.В., Сибгатуллина М.И., Миникаев С.Р., Хасанова Д.Д.

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет
им. Г.И. Носова»

г. Магнитогорск, Россия, eo.mgtu@mail.ru

Аннотация. Совместным нагревом окатышей ССГПО, агломерата ОАО «ММК» и кокса до температуры 500-600 °С в течение 60 минут исследовали действие объемной доли железорудной части шихты (ЖРС) на прочностные характеристики окатышей и агломерата. Сопротивлению ударным и истирающим нагрузкам подвергали фракцию более 5 мм предварительно выделенную из пробы после нагрева. Увеличение объемной доли ЖРС от 5 до 80% сопровождалось ростом сопротивления удару агломерата на 9,5% и окатышей на 4,9%.

Ключевые слова: окатыши, горячая прочность, рудная нагрузка, кокс.

Abstract. The effect of the ore load ranging from 3.6 to 4.2 on the strength characteristics of the pellets was examined by joint heating of the pellets of Sokolov-Sarbai mining and processing enterprise and coke to a temperature of 500-600 °C for 60 minutes. The fraction of more than 5 mm pre-selected from the sample after heating was subjected to the resistance of impact and abrasive loads. The increase in the volume fraction of iron ore from 5 to 80% accompanied by increased resistance to shock Sinter by 9.5% and 4.9% pellets.

Keywords: pellets, hot strength, ore load, coke.

Технико-экономические показатели работы доменных печей зависят от многих факторов, в том числе от физико-механических и физико-химических свойств шихтовых материалов [1-5]. Улучшение холодной прочности способствует снижению содержания мелочи в шихтовых материалах [6,7]. Это благоприятно действует на величину выноса пыли из доменной печи и газодинамику процесса, что особенно актуально в условиях работы печи с верхней лимитирующей зоной по силовому взаимодействию потоков шихты и газа [8,9]. Увеличение горячей прочности железорудных материалов обеспечивает при прочих равных условиях снижение потерь железа с выносимой из печи пылью, уменьшение степени уравнивания шихты подъемной силой газового потока в зоне умеренных температур. Уменьшение взаимного сопротивления потоков шихты и газа положительно влияет на удельный расход кокса и производительность печи. Рост низкотемпературной прочности окатышей на 10 % снижает температуру колошниковых газов в доменной печи на 100-120 °С и увеличивает степень использования газа на 2% [10], что для условий ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» эквивалентно экономии 2,7% кокса. На 1 % повышения горячей прочности агломерата приходится снижение удельного расхода кокса на 1,01 кг/т чугуна. Уменьшению 0,05 % удельного расхода кокса способствует снижение выноса пыли на 1 кг/т чугуна.

В доменной печи на величину горячей прочности агломерата и окатышей будет действовать размещение их в локальных зонах по сечению колошника. В связи с этим провели исследования по изучению горячей прочности окатышей и агломерата после их совместного нагрева с коксом. В процессе экспериментов навеску испытуемых окатышей и агломерата в смеси с коксом при объемной доле железорудных материалов от 0 до 1 загружали в стакан из нержавеющей стали объемом 120 см³ и помещали в печь, предварительно нагретую до 500 °С в серии экспериментов 1 и до 600 °С в серии экспериментов 2. Терморегулятором поддерживали заданную температуру в течение всего времени испытания. По истечении 60 минут выдержки навеску извлекали из печи, выделяли фракцию более 5 мм и отделяли материалы друг от друга.

Прочность агломерата и окатышей оценивали по сопротивлению его ударным и истирающим нагрузкам, которым подвергается испытываемая проба во вращающейся в

вертикальной плоскости со скоростью 27 об/мин в течение 8 минут стальной гладкостенной трубе длиной 1000 мм и диаметром в свету 78,5 мм.

Показателями служили сопротивление удару ($ГП_{+5}$), и истиранию ($ГП_{-0,5}$). С целью их определения пробы после извлечения из печи последовательно рассеивали на решете с ячейками диаметром 5 мм и сите с ячейками 0,5x0,5 мм, добиваясь полного отсева подрешетного продукта, т.е. класса 0-5 мм и фракции 0-0,5 мм, обращая особое внимание на полный отсев фракции 0-0,5 мм, как трудно отсеваемой. Процентное содержание в испытанной пробе окатышей классов +5 мм и 0-0,5 мм характеризовали, соответственно, сопротивлением удару и истиранию.

Расчетное уравнение для определения этих характеристик:

$$[ГП_{+5}, ГП_{-0,5}] = \frac{[M_{+5}, M_{-0,5}]}{МП} \times 100, \% \quad (1)$$

где M_{+5} , $M_{-0,5}$ – соответственно, масса в испытанной пробе окатышей (агломерата) классов +5 и 0-0,5 мм, г;

$МП$ – общая масса испытанной пробы, полученной как сумма окатышей классов +5; 0,5-5 и 0-0,5 мм, г.

Повышение объемной доли железорудных материалов при совместном их нагреве с коксом до температуры 500 °С увеличивало сопротивление окатышей ударным нагрузкам (показатель $ГП_{+5}$) и снижало их истираемость (показатель $ГП_{-0,5}$) в соответствии с выражениями:

$$ГП_{+5} = 2 \cdot 10^{-2} О_{\kappa}^3 - 0,0044 О_{\kappa}^2 + 0,2953 О_{\kappa} + 93,568; \quad (2)$$

$$ГП_{-0,5} = -10^{-5} О_{\kappa}^3 + 0,0026 О_{\kappa}^2 - 0,1616 О_{\kappa} + 3,2539. \quad (3)$$

Уравнения зависимостей сопротивления и истирания годных окатышей удару от объемной доли железорудных материалов при совместном их нагреве до температуры, равной 600 °С имели следующий вид:

$$ГП_{+5} = 3 \cdot 10^{-5} О_{\kappa}^3 - 0,0054 О_{\kappa}^2 + 0,329 О_{\kappa} + 93,457; \quad (4)$$

$$ГП_{-0,5} = -10^{-5} О_{\kappa}^3 + 0,0027 О_{\kappa}^2 - 0,1649 О_{\kappa} + 3,2714. \quad (5)$$

При совместном нагреве окатышей и агломерата с коксом до температуры 500 °С увеличение объемной доли ЖРС от 5 до 80% обеспечило рост сопротивления агломерата и окатышей удару соответственно на 9,5 (рисунок 1) и 4,9% (рисунок 2). Истираемость окатышей уменьшилась на 2,5% согласно рисунка 3. Нагрев железорудной части шихты до температуры 500 °С без кокса способствовал понижению выхода фракции +5мм на 0,6% при увеличении класса -0,5 мм на 0,1%.

Согласно рисункам 1 и 2 наиболее интенсивный рост горячей прочности агломерата и окатышей наблюдали при увеличении содержания железорудных материалов в шихте от 5 до 20%. Зависимости указывают на меньшее разрушение окатышей в локальных зонах печи по окружности и сечению, где содержание их по отношению к коксу более высокое. Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности мероприятий по снижению удельного расхода кокса для более эффективного использования окатышей. При загрузке в доменную печь их необходимо располагать в рудном гребне, то есть на расстоянии 2/3 - 3/4 радиуса колошника, соответствующем пониженным температурам и повышенным рудным нагрузкам.

Выводы:

Увеличение объемной доли железорудных материалов от 5 до 80% в условиях совместного их нагрева с коксом до температуры 500 и 600 °С обеспечило рост сопротив-

ления окатышей удару соответственно на 4,9% и 5,2%. Это указывает на целесообразность размещения окатышей в зоне рудного гребня при загрузке их в колошниковое пространство доменной печи.

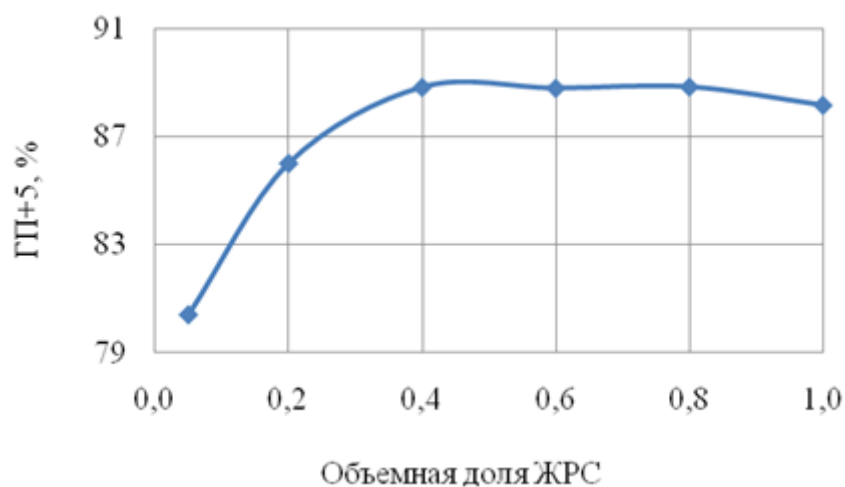


Рисунок 1 – Зависимость сопротивления годного агломерата удару от величины объемной доли железорудных материалов при температуре нагрева 500 °С

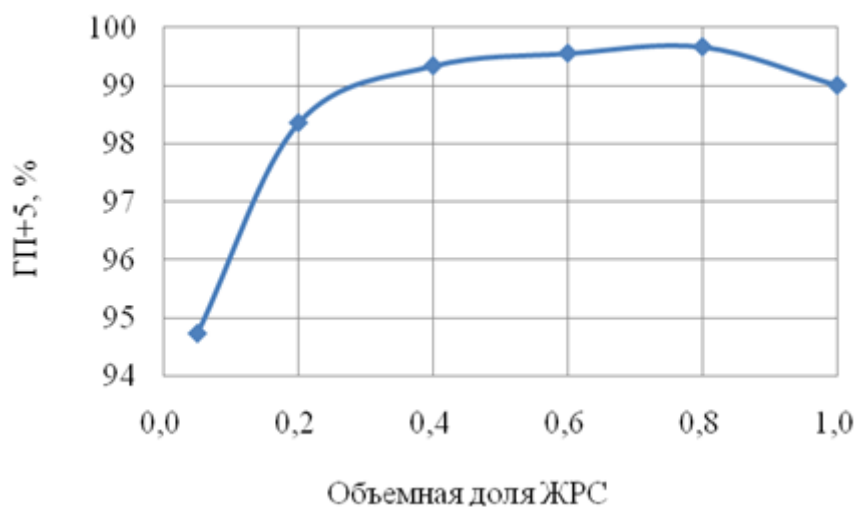


Рисунок 2 – Зависимость сопротивления годных окатышей удару от величины объемной доли железорудных материалов при температуре нагрева 500 °С

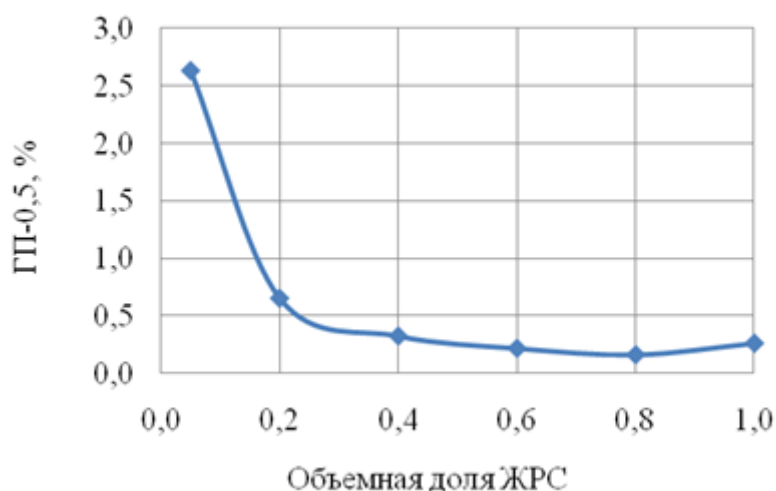


Рисунок 3 – Зависимость истирания годных окатышей удару от величины объемной доли железорудных материалов при температуре нагрева 500 °С

Библиографический список

1. Качество шихтовых материалов доменной плавки, включающих титаномагнетиты и сидериты Сибатуллин С.К., Харченко А.С. Магнитогорск, 2012. 150 с.
2. Дрожилов Л.А., Гладков Н.А., Журавлев О.М. и др. Требования к качеству железорудных окатышей для доменного производства. Черная металлургия: Бюл. НТИ. 1977. № 23. С. 41-48.
3. Burghardi O. // Berg-und Huttenmannische Monatshefte. 1974. Ив 119. № 1. PP. 41-48.
4. Сибатуллин С. К. Использование коксового орешка на доменных печах: монография/С. К. Сибатуллин, А. С. Харченко. Магнитогорск: Изд-во гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 162 с.
5. Влияние последовательности загрузки компонентов шихты в бункер бзу на равномерность их поступления в колошниковое пространство доменной печи. Сибатуллин С.К. Теплых Е.О., Харченко А.С. Теория и технология металлургического производства. 2011. № 11. С.12-16.
6. Сравнение качества коксового орешка различного вида. Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Теплых Е.О. и др. Кокс и химия. 2012. № 2. С. 29-32.
7. Прочностные характеристики коксового орешка различного происхождения Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Теплых Е.О. и др. Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 1. С. 19-21.
8. М.А. Стефанович, С.К. Сибатуллин. Д.Н. Гушин. Закономерности движения шихты и газа в доменной печи. Монография. Магнитогорск: Изд-во магнитогорск гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. – 161 с.
9. Тарасов В.П. Теория и технология доменной плавки. М.: Интермет Инжиниринг, 2007. 384 с.
10. Н.М. Можаренко, Н.А. Гладков, А.С. Нестеров и др. К вопросу о качестве железорудных материалов. Сталь. 1997. № 8. С. 3-5.

СИСТЕМА АВАРИЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДРОБИЛЬНОГО АГРЕГАТА, ИСПОЛЬЗУЮЩАЯ СОВМЕСТНУЮ ОЦЕНКУ СОСТОЯНИЯ

Никитин А.Г., Тагильцев-Галета К.В.

Сибирский государственный индустриальный университет

г. Новокузнецк, Россия, magister643@gmail.ru

Аннотация. Разработана система аварийного управления дробильного агрегата, которая позволяет, используя совместную оценку механической и электрической частей, оперативно устранять аварийные ситуации, вызванные попаданием в зону разрушения недробимых тел.

Ключевые слова: щековая дробилка, аварийная ситуация, автоматический контроль.

Abstract. A system for emergency control of the crushing unit, which allows using a joint assessment of the mechanical and electrical parts, quickly eliminate accidents caused by entering in the area of destruction of uncrushable bodies.

Keywords: jaw crusher, emergency, automatic control.

Аварийный выход из строя дробильной машины, входящей в состав дробильно-сортировочного комплекса, может быть вызван в том числе и попаданием в зону разрушения недробимого материала. Для предотвращения подобных аварий используют различные предохранительные устройства, например, распорные плиты [1], пружины и другие, не осуществляющие контроль состояния, что приводит к длительной остановке дробильной машины.

Для повышения надежности агрегата используются системы контроля на базе анализа основных параметров электропривода [2, 3], которые являются эффективными для определения параметров состояния электродвигателя, но не позволяют судить о состоянии комплекса в целом, особенно его механической части.

Для повышения надежности и оперативности диагностики предлагается подход автоматизированного контроля параметров состояния дробильного агрегата совместно с системой параметрического управления электроприводом.

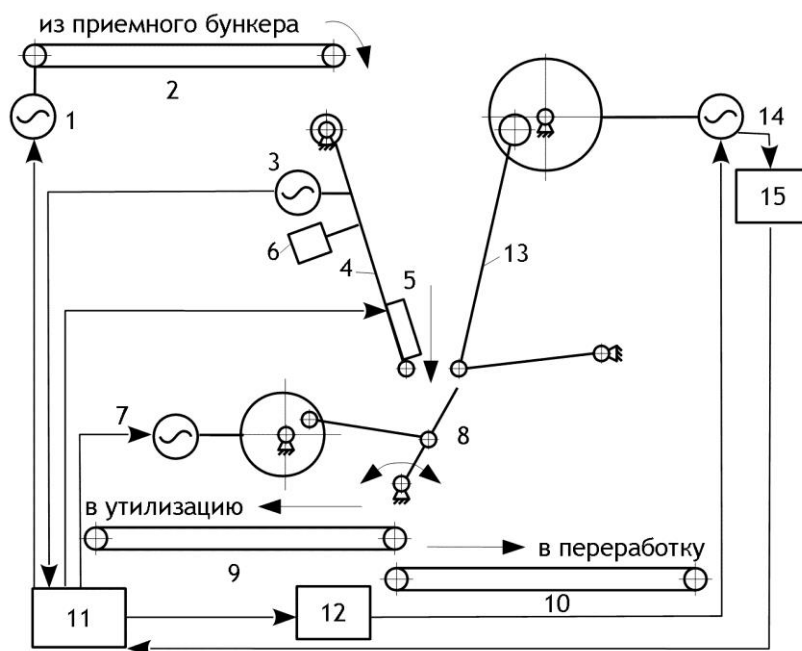
Использование совместной оценки силы тока и угла отклонения неприводной щеки повышает надежность агрегата, объединяя оперативность прямой оценки и точность косвенной [4, 5].

Принципиальная схема дробильной машины показана на рисунке 1, алгоритм работы представлен на рисунке 2.

Система функционирует следующим образом: из приемного бункера по питателю 2 сырье попадает в дробилку. В дробилке осуществляется измельчение материала сжатием приводной щеки 13 и неприводной щеки 4. Переработанный материал по направляющей 8 поступает на конвейер 10 для дальнейшей транспортировки.

При попадании в дробилку материала с прочностью, превышающую расчетную, возрастает усилие, развиваемое приводной щекой. Если материал не разрушается под действием этого усилия, оно передается на неприводную щеку. Вследствие наличия предохранительного устройства 6, неприводная щека начинает отклоняться от исходного положения, что фиксируется датчиком положения 3 или, вследствие повышения тока привода, датчиком тока 15.

Сигнал об отклонении отправляется на контроллер 11, который с помощью преобразователя частоты 12 изменяет частоту тока на приводе дробилки 14 для увеличения усилия дробления, при этом останавливая привод подачи материала 1. В этом случае возможно измельчение материала с повышенной прочностью, превышающей расчетную.



1 – привод питателя; 2 – питатель; 3 – датчик положения неподвижной щеки; 4 – неподвижная щека; 5 – фиксирующее устройство; 6 – предохранительное устройство; 7 – привод направляющей; 8 – направляющая; 9 – конвейер «в утилизацию»; 10 – конвейер «в переработку»; 11 – контроллер; 12 – частотный преобразователь; 13 – приводная щека; 14 – привод дробилки; 15 – датчик тока

Рисунок 1 – Принципиальная схема дробильной установки с совместной оценкой состояния

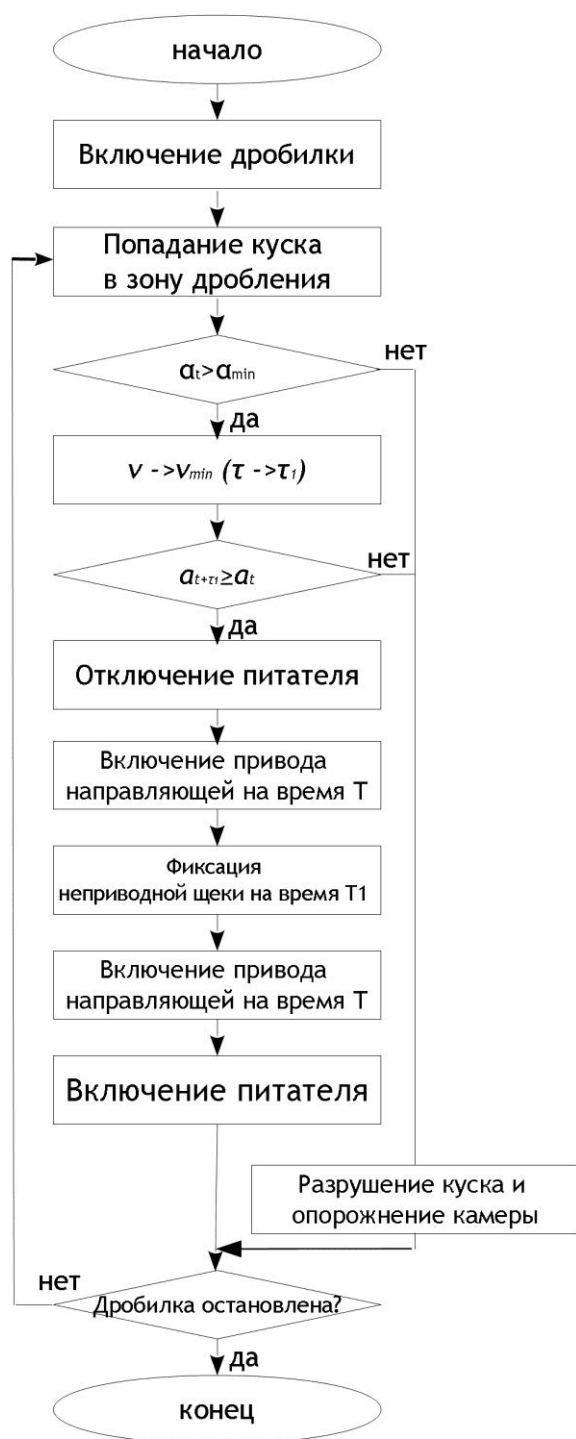
В случае если прочность дробимого материала окажется больше значения повышенной прочности, возникает заклинивание, т.е. кусок материала фиксируется щеками дробилки. При заклинивании куса неподвижная щека отклоняется на одинаковый угол [6]. При фиксации одинакового отклонения неподвижной щеки два и более раз контроллер запускает привод направляющей 7. После изменения положения направляющей 8 подается сигнал на фиксирующее устройство 5. Фиксирующее устройство запускается при достижении максимального значения угла отклонения неподвижной щеки, т.е. на рабочем ходу, что обеспечивает минимизацию усилия, развиваемого приводом фиксирующего устройства. В результате ослабляется зажатие куса и он по направляющей попадает на конвейер в утилизацию 9.

После удаления куса из камеры дробления фиксирующее устройство возвращается в исходное положение. Контроллер запускает привод направляющей, возвращая ее в исходное положение и с помощью частотного преобразователя возвращает частоту тока привода дробилки 14 к исходной. После этого запускается привод питателя и работа дробилки возвращается в штатный режим.

Особенностью предложенного способа ликвидации предаварийной ситуации является использование фиксирующего устройства, расположенного на неподвижной щеке дробильной машины, что позволяет применять его к дробильным машинам с простым, сложным и поступательным движением приводной щеки.

Выводы: предложенный способ совместной оценки параметров механической и электрической части позволяет использовать как принципы регулирования и управления с обратной связью, так и комбинированные, с коррекцией по контролируемым параметрам состояния объекта и совместному анализу измеряемых динамических сигналов с це-

лю распознавания характерных информативных сигналов, описывающих предаварийное или аварийное состояние объекта.



α_t – угол отклонения неприводной щеки в момент времени t ;
 $\alpha_{t-\tau}$ – угол отклонения неприводной щеки в момент времени $t-\tau$;
 ν – частота тока

Рисунок 2 – Алгоритм ликвидации предаварийной ситуации в дробильной установке с комплексной оценкой состояния

Библиографический список

1. Клушанцев Б. В., Косарев А. И., Муйземнек Ю. А. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
2. www.uralmash.ru/files/diagnostika.
3. Петухов В.С.. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока [Текст] / В. С. Петухов, В. А. Соколов: Новости электротехники. - № 1, 2005.
4. Никитин А. Г., Тагильцев-Галета К. В. Система аварийного управления дробильного агрегата. [Текст] / А. Г. Никитин, К. В. Тагильцев-Галета // Известия вузов. Черная металлургия – №2, 2015
5. Патент ru 2377324 МПК C22B7/04 Карпов А. А., Филиппов С. Н., Наумов Н. В., Васин Е. А., Камерцель В. Г., Колотыгин А. Т., Свистун Е. А. Заявка 2008013609/03, 27.12.2009
6. Макаров А. В., Тагильцев-Галета К. В. Анализ работы предохранительных устройств дробильных машин / А. В. Макаров, К. В. Тагильцев-Галета // Известия вузов. Черная металлургия. - №6, 2014

УДК 519.24

ВЛИЯНИЕ ОШИБОК В ПАРАМЕТРАХ ОБЪЕКТА НА ТОЧНОСТЬ ОЦЕНИВАНИЯ ВЕКТОРА СОСТОЯНИЯ

Воевода А.А., Трошина Г.В.

*Новосибирский государственный технический университет
г. Новосибирск, Россия, troshina@corp.nstu.ru*

Аннотация. В данной работе для линейной стационарной динамической системы приводятся подробные расчетные соотношения, необходимые для вычисления разности между ковариационной матрицей ошибок оценивания при неточной модели динамического объекта и ковариационной матрицей ошибок оценивания, ориентированного на точную модель наблюдаемого процесса. Отмечено, что необходимо учитывать погрешность оценки вектора состояния, которая возникает из-за неточного задания параметров объекта.

Ключевые слова: идентификация, динамическая система, фильтр Калмана, вектор состояния.

Abstract. The detailed settlement ratios necessary for calculation of a difference between the covariance matrix of estimation errors at dynamic object inexact model of dynamic object and the covariance matrix of estimation errors focused on exact model of observed process are given in this work for linear stationary dynamic system. It is noted that it is necessary to consider the state vector assessment error which arises because of an inexact task object parameters.

Keywords: identification, dynamic system, Kalman filter, state vector.

Обычно при использовании фильтра Калмана погрешности, имеющие место при задании параметров объекта, не учитывают, как не учитывают и влияние их на оценку вектора состояния. В задаче идентификации это является существенным моментом. В работах [1] – [2] этот вопрос анализировался, но, к сожалению, как в российских изданиях, так и в английских изданиях, приведены всего лишь промежуточные результаты с многочисленными опечатками, что затрудняет их использование. Ниже приведены подробные выкладки.

Пусть линейная стационарная динамическая система описывается в виде уравнений [1] – [2]

$$\dot{x} = Fx + Gw, \quad (1)$$

$$z = Hx + v, \quad (2)$$

где x – n -вектор состояния с нулевым математическим ожиданием и неотрицательно определенной ковариационной матрицей P в начальный момент времени;
 w – белый гауссовский шум с нулевым средним и неотрицательно определенной ковариационной матрицей Q ;
 F – матрица состояния размера $n \times n$;
 G – матрица возмущения размера $n \times r$;
 z – p -вектор наблюдения;
 H – матрица наблюдения размера $p \times n$;
 v – белый гауссовский шум с нулевым средним и положительно определенной ковариационной матрицей R .

Фильтр Калмана при точно известных параметрах объекта F, G, H имеет вид:

$$\hat{x} = F\hat{x} + K(z - H\hat{x}), \quad (3)$$

где матрица K определяется из уравнения

$$K = PH^T R^{-1}, \quad (4)$$

а матрица P есть решение дифференциального уравнения

$$\dot{P} = FP + PF^T - PH^T R^{-1} HP + GQG^T. \quad (5)$$

Пусть параметры объекта известны с ошибками. Обозначим соответствующие матрицы через $\bar{F}, \bar{G}, \bar{H}$. Тогда фильтр Калмана будет следующий:

$$\dot{\hat{x}} = \bar{F}\hat{x} + \bar{K}(z - \bar{H}\hat{x}), \quad (6)$$

где

$$\bar{K} = \bar{P}\bar{H}^T \bar{R}^{-1}, \quad (7)$$

$$\dot{\bar{P}} = \bar{F}\bar{P} + \bar{P}\bar{F}^T - \bar{P}\bar{H}^T \bar{R}^{-1} \bar{H}\bar{P} + \bar{G}\bar{Q}\bar{G}^T. \quad (8)$$

Введем обозначения $\Delta F = F - \bar{F}$, $\Delta H = H - \bar{H}$, $\tilde{x} = x - \hat{x}$. Продифференцировав последнее выражение, имеем $\dot{\tilde{x}} = \dot{x} - \dot{\hat{x}}$. Подставляя выражения $\dot{x} = Fx + Gw$ и $\dot{\hat{x}} = \bar{F}\hat{x} + \bar{K}(z - \bar{H}\hat{x})$, получаем $\dot{\tilde{x}} = \dot{x} - \dot{\hat{x}} = Fx + Gw - \bar{F}\hat{x} - \bar{K}z + \bar{K}\bar{H}\hat{x} = (\bar{F} - \bar{K}\bar{H})\tilde{x} + (\Delta F - \bar{K}\Delta H)x + Gw - \bar{K}v$. Таким образом, $\tilde{x}$ удовлетворяет уравнению:

$$\dot{\tilde{x}} = (\bar{F} - \bar{K}\bar{H})\tilde{x} + (\Delta F - \bar{K}\Delta H)x + Gw - \bar{K}v. \quad (9)$$

Пусть $\hat{x}^0$ – процесс на выходе фильтра Калмана, ориентированного на точную модель наблюдаемого процесса. Тогда $\tilde{x} = \tilde{x}^0 + \tilde{x}^a + \tilde{x}^b$, где $\tilde{x}^0 = x - \hat{x}^0$. В выражение (9) подставляем $\tilde{x} = \tilde{x}^0 + \tilde{x}^a + \tilde{x}^b$ и $x = \tilde{x}^0 + \hat{x}^0$, имеем

$$(\bar{F} - \bar{K}\bar{H})(\tilde{x}^0 + \tilde{x}^a + \tilde{x}^b) + (\Delta F - \bar{K}\Delta H)(\tilde{x}^0 + \hat{x}^0) + Gw - \bar{K}v = \bar{F}\tilde{x}^0 - \bar{K}\bar{H}\tilde{x}^0 + \bar{F}\tilde{x}^a - \bar{K}\bar{H}\tilde{x}^a + \bar{F}\tilde{x}^b - \bar{K}\bar{H}\tilde{x}^b + \Delta F\tilde{x}^0 - \bar{K}\Delta H\tilde{x}^0 + \Delta F\hat{x}^0 - \bar{K}\Delta H\hat{x}^0 + Gw - \bar{K}v. \quad (10)$$

Выполняя алгебраические преобразования, получаем

$$(\bar{F} - \bar{K}\bar{H} + \Delta F - \bar{K}\Delta H) = \bar{F} - \bar{K}\bar{H} + F - \bar{F} - \bar{K}\Delta H = F - \bar{K}H + \Delta \bar{K}H.$$

Далее, $(\Delta F - \bar{K}\Delta H) = \Delta F - \bar{K}\Delta H - K\Delta H + K\Delta H = \Delta F - K\Delta H + KH - \bar{K}H + \bar{K}\bar{H} - \bar{K}\bar{H}$.
Продолжая, для выражения (10) имеем

$$\begin{aligned} & (\bar{F} - \bar{K}\bar{H} + \Delta F - \bar{K}\Delta H)\tilde{x}^0 + (\bar{F} - \bar{K}\bar{H})\tilde{x}^a + (\bar{F} - \bar{K}\bar{H})\tilde{x}^b + \\ & (\Delta F - \bar{K}\Delta H)\hat{x}^0 + Gw - \bar{K}v + Kv - Kv = \\ & = (F - KH)\tilde{x}^0 + Gw - Kv + (\bar{F} - \bar{K}\bar{H})\tilde{x}^a + \Delta KH\tilde{x}^0 + \Delta Kv + \\ & (\bar{F} - \bar{K}\bar{H})\tilde{x}^b + (\Delta F - \bar{K}\Delta H)\hat{x}^0. \end{aligned}$$

В результате дальнейших преобразований имеем следующие формулы:

$$\dot{\tilde{x}}^0 = (F - KH)\tilde{x}^0 + Gw - Kv, \quad (11)$$

$$\dot{\tilde{x}}^a = (\bar{F} - \bar{K}\bar{H})\tilde{x}^a + \Delta K(H\tilde{x}^0 + v), \quad (12)$$

$$\dot{\tilde{x}}^b = (\bar{F} - \bar{K}\bar{H})\tilde{x}^b + (\Delta F - \bar{K}\Delta H)\hat{x}^0. \quad (13)$$

Процесс $\tilde{x}^0$, определяемый уравнением (11), не коррелирован с процессом $\tilde{x}^b$, удовлетворяющим уравнению (13), так как ошибка $\tilde{x}^0$ не коррелирована с оценкой $\hat{x}^0$. Возмущающей функцией в уравнении (12) для $\tilde{x}^a$ является обновляющий процесс $\tilde{z} = H\tilde{x}^0 + v$. Из (11) и (12) следует, что процессы $\tilde{x}^0$ и $\tilde{x}^a$ имеют равные нулю средние значения. Процесс $\tilde{x}^b$ представляет собой ту часть ошибки, которая определяется подачей значения состояния через устройство, описываемое ошибками моделирования исходной системы. Таким образом, можно представить

$$\tilde{x}^b = \tilde{x}^e + \mu_{\tilde{x}}. \quad (14)$$

В уравнение (13) подставляем $\tilde{x}^b = \tilde{x}^e + \mu_{\tilde{x}}$, получаем

$$\begin{aligned} & (\bar{F} - \bar{K}\bar{H})\tilde{x}^e + (\bar{F} - \bar{K}\bar{H})\mu_{\tilde{x}} + (\Delta F - \bar{K}\Delta H)\hat{x}^0 = \\ & = (\bar{F} - \bar{K}\bar{H})\tilde{x}^e + (\Delta F - \bar{K}\Delta H)\hat{x}^e + (\bar{F} - \bar{K}\bar{H})\mu_{\tilde{x}} + (\Delta F - \bar{K}\Delta H)\mu_x \end{aligned}$$

откуда следуют выражения:

$$\dot{\tilde{x}}^e = (\bar{F} - \bar{K}\bar{H})\tilde{x}^e + (\Delta F - \bar{K}\Delta H)\hat{x}^e, \quad (15)$$

$$\dot{\mu}_{\tilde{x}} = (\bar{F} - \bar{K}\bar{H})\mu_{\tilde{x}} + (\Delta F - \bar{K}\Delta H)\mu_x. \quad (16)$$

Здесь μ_x – среднее значение вектора состояния системы, $\mu_{\tilde{x}}$ – среднее значение ошибки оценивания, $\hat{x}^e$ – центрированный процесс, получающийся из $\hat{x}^0$ путем вычитания среднего значения, $\tilde{x}^e$ – центрированная часть ошибки. Таким образом, $\hat{x}^e$ и μ_x удовлетворяют уравнениям:

$$\dot{\hat{x}}^e = F\hat{x}^e + K\tilde{z}, \quad (17)$$

$$\dot{\mu}_x = F\mu_x, \quad (18)$$

причем

$$\hat{x}^0 = \hat{x}^e + \mu_x. \quad (19)$$

Процесс

$$\tilde{x}^d = \tilde{x}^a + \tilde{x}^e \quad (20)$$

удовлетворяет уравнению

$$\tilde{\dot{x}}^d = (\bar{F} - \bar{K}\bar{H})\tilde{x}^d + (\Delta F - \bar{K}\Delta H)\hat{x}^e + \Delta K\tilde{z}. \quad (21)$$

Чтобы получить (21), необходимо продифференцировать (20), подставить в полученное выражение (12) и (15) и выполнить алгебраические преобразования:

$$\begin{aligned} \tilde{\dot{x}}^d = \dot{\tilde{x}}^a + \dot{\tilde{x}}^e &= (\bar{F} - \bar{K}\bar{H})\tilde{x}^a + \Delta K(H\tilde{x}^0 + v) + (\bar{F} - \bar{K}\bar{H})\tilde{x}^e + (\Delta F - \bar{K}\Delta H)\hat{x}^e = \\ &= (\bar{F} - \bar{K}\bar{H})\tilde{x}^d + (\Delta F - \bar{K}\Delta H)\hat{x}^e + \Delta K\tilde{z}. \end{aligned} \quad (22)$$

Так как ошибки $\tilde{x}^0$ и $\tilde{x}^a$ не коррелированы, то $\tilde{x}^0$ и $\tilde{x}^b$ также не коррелированы. Это означает, что ковариационная матрица $V_{\tilde{x}}$ общей ошибки представима в виде

$$V_{\tilde{x}} = E\{\tilde{x}^0\tilde{x}^{0T}\} + E\{\tilde{x}^d\tilde{x}^{dT}\}. \quad (23)$$

Поэтому, если ввести обозначение $\Delta V_{\tilde{x}} = V_{\tilde{x}} - P$, то получаем

$$\Delta V_{\tilde{x}} = E\{\tilde{x}^d\tilde{x}^{dT}\}. \quad (24)$$

Учитывая (21), можно показать, что матрица $\Delta V_{\tilde{x}}$ удовлетворяет уравнению

$$\begin{aligned} \Delta \dot{V}_{\tilde{x}} &= (\bar{F} - \bar{K}\bar{H})\Delta V_{\tilde{x}} + \Delta V_{\tilde{x}}(\bar{F} - \bar{K}\bar{H})^T + (\Delta F - \bar{K}\Delta H)\Delta V_c + \\ &\quad \Delta V_c^T(\Delta F - \bar{K}\Delta H)^T + \Delta K R \Delta K^T, \end{aligned} \quad (25)$$

где введено обозначение $\Delta V_c = E\{\hat{x}^e\tilde{x}^{dT}\}$.

Для вывода формулы (25), необходимо выполнить следующие действия:

$$\begin{aligned} E\{\tilde{x}^d\tilde{x}^{dT}\} &= E\{\tilde{x}^{dT}\tilde{x}^{dT}\}(\bar{F} - \bar{K}\bar{H})^T + E\{\tilde{x}^{dT}\hat{x}^{eT}\}(\Delta F - \bar{K}\Delta H)^T + \\ &\quad + E\{\tilde{x}^d\tilde{x}^{0T}\}H^T\Delta K^T + E\{\tilde{x}^d v^T\}\Delta K^T, \\ E\{\tilde{x}^d\tilde{x}^{dT}\} &= (\bar{F} - \bar{K}\bar{H})E\{\tilde{x}^d\tilde{x}^{dT}\} + (\Delta F - \bar{K}\Delta H)E\{\hat{x}^e\tilde{x}^{dT}\} + \Delta K E\{\tilde{z}\tilde{x}^{dT}\}. \end{aligned}$$

Таким образом, получаем (25). Для ΔV_c можно получить уравнение

$$\Delta \dot{V}_c = F\Delta V_c + \Delta V_c(\bar{F} - \bar{K}\bar{H})^T + K R \Delta K^T + \Delta V_x(\Delta F - \bar{K}\Delta H)^T, \quad (26)$$

где

$$\Delta \dot{V}_x = F\Delta V_x + \Delta V_x F^T + K R K^T. \quad (27)$$

Для вывода (26), имеем

$$\begin{aligned} E\{\hat{x}^e\tilde{x}^{dT}\} &= (\bar{F} - \bar{K}\bar{H})E\{\hat{x}^e\tilde{x}^d\} + (\Delta F - \bar{K}\Delta H)E\{\hat{x}^e\hat{x}^e\} + \Delta K E\{\hat{x}^e\tilde{z}\}, \\ E\{\dot{\hat{x}}^e\tilde{x}^{dT}\} &= F E\{\hat{x}^e\tilde{x}^{dT}\} + K E\{\tilde{z}\tilde{x}^{dT}\} = F E\{\hat{x}^e\tilde{x}^{dT}\} + K E\{(H\tilde{x}^0 + v)\tilde{x}^{dT}\}. \end{aligned}$$

Учитывая $E\{\tilde{x}^0\tilde{x}^{dT}\} = 0$, $E\{\hat{x}^e\tilde{x}^{0T}\} = 0$, получаем (26). Для вывода (27), имеем

$$E\{\dot{\hat{x}}^e\hat{x}^{eT}\} + E\{\hat{x}^e\dot{\hat{x}}^{eT}\} = F E\{\hat{x}^e\hat{x}^{eT}\} + K E\{\tilde{z}\hat{x}^{eT}\} + E\{\hat{x}^e\hat{x}^{eT}\}F^T + E\{\hat{x}^e\tilde{z}^T\}K^T.$$

Отсюда следует (27). Если ввести обозначения $V_{\tilde{x}} = \Delta V_{\tilde{x}} + P$; $V_c = \Delta V_c + P$; $V_x = \Delta V_x + P$, то для $V_{\tilde{x}}$, V_c и V_x можно выписать следующие уравнения:

$$\dot{V}_{\tilde{x}} = (\bar{F} - \bar{K}\bar{H})V_{\tilde{x}} + V_{\tilde{x}}(\bar{F} - \bar{K}\bar{H})^T + V_c^T(\Delta F - \bar{K}\Delta H)^T + (\Delta F - \bar{K}\Delta H)V_c + GQG^T + \bar{K}R\bar{K}^T, \quad (28)$$

$$\dot{V}_c = FV_c + V_c(\bar{F} - \bar{K}\bar{H})^T + V_x(\Delta F - \bar{K}\Delta H)^T + GQG^T, \quad (29)$$

$$\dot{V}_x = FV_x + V_xF^T + GQG^T. \quad (30)$$

В качестве исходного уравнения для вычисления разности между ковариационной матрицей ошибок оценивания при неточной модели и ковариационной матрицей ошибок оценивания, ориентированного на точную модель наблюдаемого процесса, может служить уравнение:

$$\Delta \dot{V}_{\tilde{x}} = (\bar{F} - \bar{K}\bar{H})\Delta \bar{V}_{\tilde{x}} + \Delta \bar{V}_{\tilde{x}}(\bar{F} - \bar{K}\bar{H})^T + (\Delta F - \bar{K}\Delta H)V_c + V_c^T(\Delta F - \bar{K}\Delta H)^T + (GQG^T - \bar{G}\bar{Q}\bar{G}^T) + \bar{K}(R - \bar{R})\bar{K}^T.$$

Выше приведенные формулы позволяют сделать оценку погрешности восстановления вектора состояния объекта, вызванную неточно заданными параметрами объекта.

Данная задача для непрерывных систем исследовалась Э.П. Сейджем в работах [1] - [2], где приведены, к сожалению, не все расчетные соотношения, необходимые для вычислений, а приведенные соотношения содержат многочисленные опечатки и неточности. Фильтр Калмана для оценки вектора состояния используется и при восстановлении сигнала, и при расчете систем управления, и при планировании эксперимента [3] – [8] для идентификации параметров динамических объектов. Но при этом, как правило, не учитываются погрешности оценки вектора состояния из-за погрешностей задания параметров объекта. Методика, приведенная выше, может быть применима для объекта с управлением в правой части [9] – [10]. В работах по оценке качества экспериментального материала, использующих фильтры для оценки вектора состояния, необходимо учитывать тот факт, что точные значения параметров объекта не известны.

Библиографический список

1. Sage A.P., White C.C., III Optimum system control. - Prentice-Hall, 1977. – 392 p.
2. Brown R.J., Sage A.P. Error Analysis of Modeling and Bias Errors in Continuous Time State Estimation. – Automatica, 7, 1971, p.577-90.
3. Воевода А.А., Трошина Г.В. О некоторых методах фильтрации в задаче идентификации // Сб. науч. тр. НГТУ. - Новосибирск, 2014. – Вып.2(76). – С. 16-25.
4. Трошина Г.В. Об использовании фильтра Калмана при идентификации динамических систем // Сборник научных трудов НГТУ. – 2014. – № 3 (77). – С. 37–52.
5. Воевода А.А., Трошина Г.В. Об оценке вектора состояния и вектора параметров в задаче идентификации // Сб. науч. тр. НГТУ. - Новосибирск, 2014. – Вып.4(78). – С. 53-68. – doi: 10.17212/2307-6879-2014-4-53-68.
6. Трошина Г.В. Вычислительные аспекты задачи восстановления вектора состояния для модели с неточно заданными параметрами. // Сб. науч. тр. НГТУ. - Новосибирск, 2008. – Вып.3(53). – с. 25-34.
7. Воевода А.А., Трошина Г.В. Вычисление информационной матрицы Фишера для линейных стационарных дискретных систем с неизвестными параметрами в моделях динамики и наблюдения. // Сб. науч. тр. НГТУ. - Новосибирск, 2006. – Вып.2(44). – С. 29-34.

8. Трошина Г.В. О методах оценивания вектора состояния в задачах идентификации // Сборник научных трудов НГТУ. – 2012. – № 1 (67). – С. 69–78.
9. Troshina G. V., Voevoda A.A. Parameters estimation with fischer information matrix on the example of the control system of the inverted pendulum [Electronic resource] / G. V. Troshina, A. A. Voevoda // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON–2015) : proceedings., Omsk, Russia, 21–23 May 2015. – Omsk, 2015. – P. 1-4. – doi: 10.1109/SIBCON.2015.7147243.
10. Voevoda A.A., Troshina G.V. Active identification of linear stationary dynamic object on base of the Fisher information matrix: the steady state / A. A. Voevoda, G. V. Troshina // Proc. of the XII Intern. Conf. «Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE-2014)», Novosibirsk, Russia, 2–4 October 2014. – Novosibirsk, 2014. – P. 745–749. – doi: 10.1109/APEIE.2014.7040785.

УДК 621.771

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОКАТКИ ШАРОВ В ВИНТОВЫХ КАЛИБРАХ

Филиппова М.В.¹, Сметанин С.В.², Перетягко В.Н.¹

¹ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет»
г. Новокузнецк, Россия, kafkshp@sibsiu.ru

²АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»
г. Новокузнецк, Россия, Sergey.Smetanin@evraz.com

Аннотация. В статье приведены результаты компьютерного моделирования с оценкой полей распределения интенсивности деформаций с целью получения шаров без внутренних дефектов. Результаты компьютерного моделирования показали, что распределение интенсивности деформаций вдоль оси прокатки неравномерно. Максимальная величина интенсивности деформаций наблюдается под второй ребордой прокатного вала. В центре шаров интенсивность деформаций имеет небольшую величину. Проведена оценка адекватности компьютерного моделирования посредством сравнения данных с результатами промышленными исследований.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, прокатка шаров, интенсивность деформаций, калибровка валков, твердость.

Abstract. The results of computer simulations with field intensity distribution estimation of deformation with the purpose of getting balls without internal defects. The results of the computer modeling showed that the distribution of the intensity along the axis of rolling deformation unevenly. Maximum intensity of deformations observed under the second rolling roll spiral. In the center of the balls the intensity of deformations of the names of a small amount. Assess the adequacy of the computer simulation by comparing the data with the results of industrial research.

Keywords: computer simulation, rolling of balls, intensity of deformation, rolls pass design, hardness.

Сплошные тела, имеющие форму шара, прокатывают на двухвалковых станах методом поперечно-винтовой прокатки. Валки станов имеют винтовые калибры с одним или несколькими заходами. Протяжённость калибра измеряется в градусах угла поворота вала. Калибр разделяют на два участка – формующий, на котором высота реборды монотонно увеличивается, реборда внедряется в круглую заготовку, формируя из неё шар. При прокатке мелющих шаров и шаров-заготовок для штамповки в конце формующего участка происходит отрезка шара от заготовки. Второй участок калибра называют отделочным, высота и ширина реборды на нём остаются постоянными, обжатия шара в нём не происходит, шар вращается в трёх плоскостях, проглаживается, устраняется овальность геометрии.

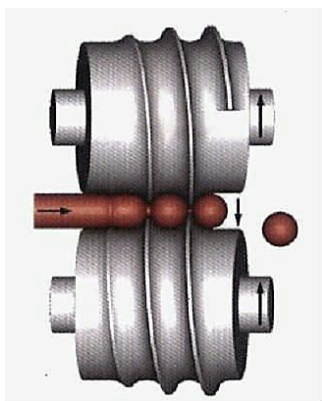


Рисунок 1 – Схема процесса прокатки шаров

Одним из основных факторов процесса прокатки шаров в винтовых калибрах является определение режимов деформации, при которых отсутствует разрыхление металла и вскрытие полости в осевой зоне изделия.

Склонность к разрыхлению металла в сердцевине заготовки при поперечно-винтовой прокатке приведена в работе [1]. В работе [2] установлено, что склонность металла к разрыхлению в осевой зоне увеличивается при уменьшении величины обжатия в перемычке за половину оборота заготовки, увеличением ширины реборды калибра, снижением температуры прокатки заготовки. Также отмечается, что с уменьшением ширины реборды калибра склонность к разрыхлению металла в осевой зоне заготовки уменьшается и при отношении ширины реборды (a) к диаметру (d_n) перемычки $a/d_n \leq 1$ можно избежать разрыхления металла при весьма высоких обжатиях.

Для проверки качества прокатанных шаров номинальным диаметром 120 мм было проведено специальные исследования с использованием программы компьютерного моделирования. Для моделирования прокатки шаров был разработан проект виртуального шаропрокатного стана, у которого рабочие валки имеют профиль в соответствии с разработанной калибровкой шара номинальным диаметром 120 мм.

Условия компьютерного моделирования:

- материал заготовки – сталь 40;
- температура прокатки – 1100°C ;
- скорость прокатки – 65 об/мин.

Сила прокатки, крутящие моменты и напряженно-деформированное состояние металла при прокатке в винтовых калибрах непрерывно изменяются от максимума до минимума в течение оборота валка вокруг своей оси. Вследствие этого расчет обычно ведут при четырех положениях калибра, соответствующих повороту валка через 90° [1].

На рисунке 2 приведена мозаика распределения интенсивности деформаций при прокатке шара при одном положении валков шаропрокатного стана. Ввиду симметрии процесса прокатки приведена только половина процесса деформации металла в валках. Как видно, интенсивность деформаций распределена по сечению шара неравномерно. Основная деформация металла при прокатке шаров наблюдается на формирующем участке. Причем наибольшая величина интенсивности деформаций наблюдается под ребордой при ее внедрении в металл заготовки. На отделочном участке, где происходит обкатка шаров, интенсивность деформаций значительно меньше.

Для количественного определения интенсивности деформаций выбраны характерные точки в направлении прокатки по оси симметрии прокатываемого металла, вдоль осевой линии – оси X. Точка 1 – передний торец валков; точка 2 – внедрение первой реборды; точка 3 – центр первого шара; точка 4 – внедрение второй реборды; точка 5 – центр второго шара. В таблице 1, в качестве примера, приведены результаты исследования при первом положении валков.

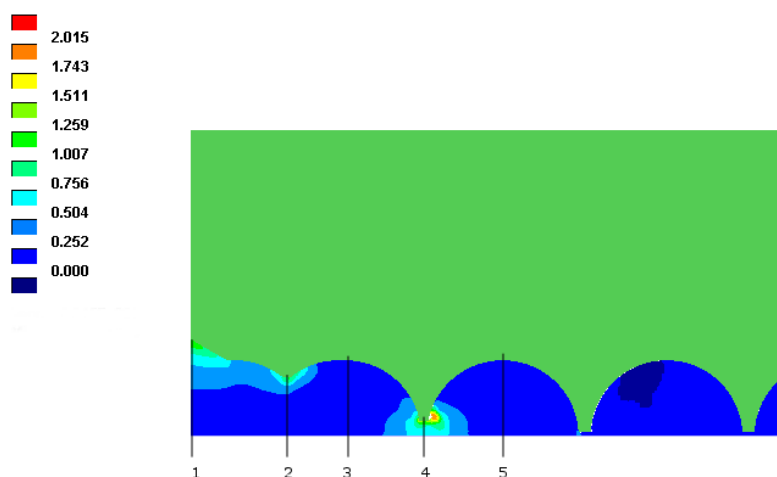


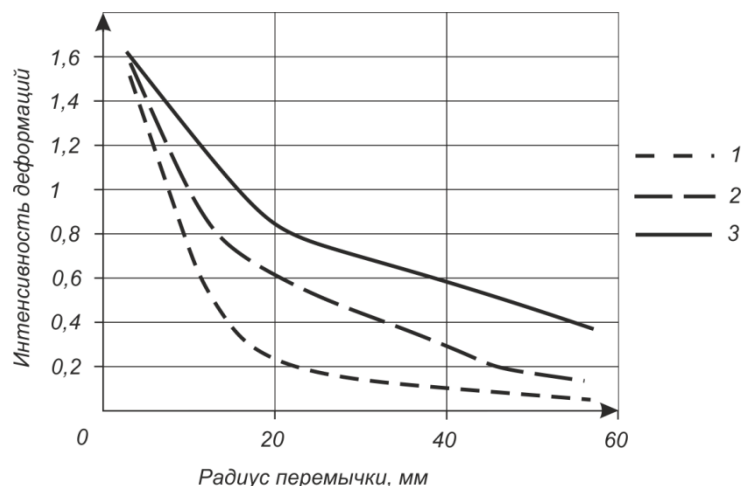
Рисунок 2 – Интенсивность деформаций в шаровой заготовке при одном из положений валков

Таблица 1 – Интенсивность деформаций в характерных точках

Характерные точки	1	2	3	4	5
Интенсивность деформаций	0,07	0,05	0,09	0,25	0,02

Анализ данных показывает, что интенсивность деформаций по оси прокатываемой заготовки имеет небольшие значения. Выделяется более высокая интенсивность деформаций под второй ребордой (точка 4), радиус перемычки в которой составляет 18 мм.

Результаты обработки данных по компьютерному моделированию приведены на рисунке 3 в виде графика зависимости интенсивности деформаций от радиуса перемычки при прокатке шара.



1 – по горизонтальной оси симметрии заготовки, 3 – поверхности валков (место соприкосновения металла и реборды), 2 – в среднем слое между осью заготовки и поверхностью валков

Рисунок 3 – Зависимость интенсивности деформаций от радиуса перемычки

Из рисунка видно, что максимальное значение интенсивности деформаций наблюдается непосредственно под ребордой прокатных валков и при радиусе перемычки 2,8 мм достигает 1,62. С увеличением радиуса перемычки величина интенсивности деформаций

уменьшается. Интенсивность деформаций также уменьшается от поверхности реборды вала к осевой линии заготовки.

Таким образом, результаты компьютерного моделирования показали, что интенсивность деформаций непосредственно в центральных зонах шара мала и разрушения центральной зоны шара отсутствует.

Для проверки качества металла внутренних слоев, шары после прокатки и охлаждения, разрезали по диаметральному сечению, проходящему через полюса (место отрыва перемычек) шара. После шлифовки темплета и удаления поверхностного наклепанного слоя проводили визуальный осмотр поверхности при 5-ти кратном увеличении. При осмотре на поверхности разреза дефектов в виде пористости или микротрещин обнаружено не было. Далее проводили замеры твердости по всему сечению шара. Замеры проводили с шагом 5 мм [3,4].

В работе приведены экспериментальные данные по замеру твердости шара по горизонтальному диаметру шара (место отрыва перемычек) и вертикальному диаметру шара номинальным диаметром 120 мм.

На рисунке 4 приведены гистограммы распределения твердости по горизонтальному сечению шара из углеродистой стали номинальным диаметром 120 мм.

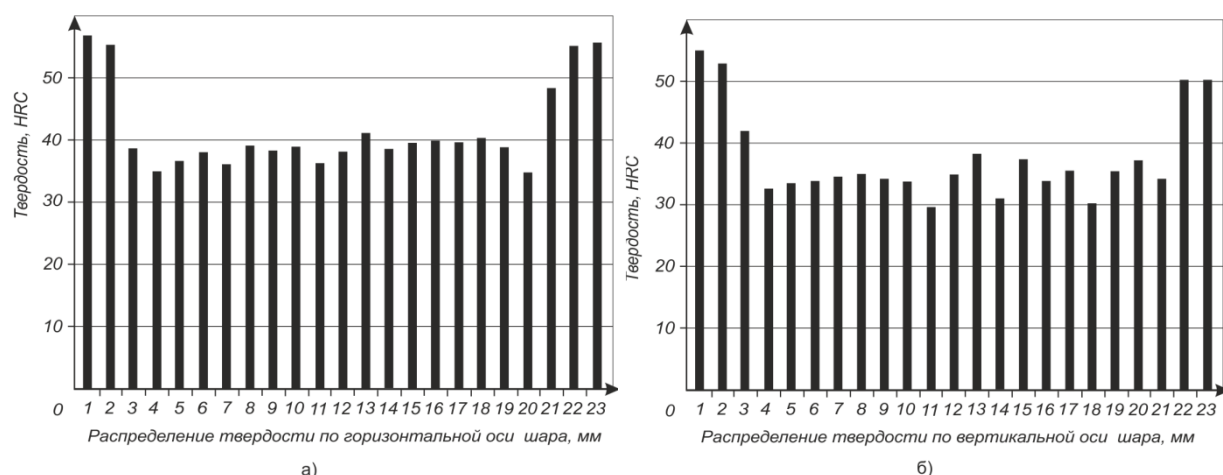


Рисунок 4 – Распределение твердости по диаметру 120 мм шара

При анализе рисунка 4а можно отметить наличие двух зон с различной величиной твердости. Подповерхностные слои толщиной 20 мм, имеющие повышенную твердость 55 – 58 HRC (среднее значение 55,6), и центральные слои металла диаметром примерно 80 мм, которые имеют более низкую твердость 35 – 42 HRC (среднее значение 38,5). Провалов твердости в центральной зоне шара не обнаружено, что говорит об отсутствии внутренних дефектов и хорошем качестве металла внутренних слоев.

Распределения твердости по вертикальному сечению шара из углеродистой стали номинальным диаметром 120 мм приведены на рисунке 4б.

При анализе рисунка 4б можно также отметить наличие двух зон с разной величиной твердости. Подповерхностные слои толщиной 20 мм, имеющие повышенную твердость 55 – 60 HRC (среднее значение 57,1), и центральные слои металла диаметром 40 мм, которые имеют более низкую твердость 32 – 42 HRC (среднее значение 37,8). Провалов твердости в центральной зоне шара не обнаружено, что говорит об отсутствии внутренних дефектов и хорошем качестве металла внутренних слоев.

Таким образом, разработанная калибровка [5-8] и технология прокатки шара номинальным диаметром 120 мм [9] подтверждают результаты компьютерного моделирования и обеспечивает получение качественного изделия без трещин и разрыхления металла в сердцевине заготовки.

Библиографический список

1. Целиков А.И. Специальные прокатные станы / А.И. Целиков, М.В. Барбарин, М.В. Васильчиков и др. - М.: Металлургия, 1971, – 336 с.
2. Грановский С.П. Новые процессы и станы для прокатки изделий в винтовых калибрах / М.: Металлургия, 1980, –116 с.
3. Перетятыко В.Н. Качество шаровой заготовки. / В.Н. Перетятыко, М.В. Филиппова, А.А. Федоров, А.В. Бахаев // Металлургия: технологии, управление, инновации, качество: труды Всерос. науч.-практ.конф. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2008. С. 65 – 67.
4. Перетятыко В.Н. Шаровая заготовка / В.Н. Перетятыко, М.В. Филиппова, А.С. Климов А.С, Г.С. Котлов и др. // Заготовительное производство в машиностроении. 2012. № 3. С. 17 – 19.
5. Перетятыко В.Н. Калибровка валков для прокатки шара / В.Н. Перетятыко, А.С. Климов, М.В. Филиппова // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургия: сб. науч. трудов. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2012. Вып. 30. С. 44 – 50.
6. Перетятыко В.Н. Калибровка валков шаропрокатного стана. Сообщение 1 / В.Н. Перетятыко, А.С. Климов, М.В. Филиппова // Известия вузов. Черная металлургия. 2013. № 4. С. 27 – 30.
7. Перетятыко В.Н. Калибровка валков шаропрокатного стана. Сообщение 2 / В.Н. Перетятыко, А.С. Климов, М.В. Филиппова // Известия вузов. Черная металлургия. 2013. № 6. С. 16 – 20.
8. Peretyatko V.N. Roller grooving in ball-rolling mills / V.N. Peretyatko, A.S. Klimov, M.V. Filippova // Steel in Translation. 2013.T.43. №4. p.p. 168 – 170.
9. Перетятыко В.Н. Шаропрокатный стан / В.Н. Перетятыко, А.С. Климов, М.В. Филиппова // Металлургия: технологии, управление, инновации, качество: труды Всерос. науч.-практ.конф. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2010. С. 255 – 258.

УДК 621.745.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ СИНТИКОМА С ДИСПЕРСНОЙ ОСНОВОЙ В ПРОЦЕССЕ НАГРЕВА И ПЛАВЛЕНИЯ

Харитонов Ю.В., Дорофеев Г.А., Щивка Е.

*Тульский государственный университет
г. Тула, Россия, iuliia-kharitonova@yandex.ru*

*Ченстоховский политехнический университет
г.Ченстохова, Польша, siwka@wip.pcz.pl*

Аннотация. В ходе экспериментальных исследований и анализа поведения синтикома с дисперсной основой в процессе нагрева и плавления получены данные об особенностях поведения оксидоуглеродных материалов при высокотемпературном нагреве, отвечающем уровню температур при производстве стали, которые позволяют прогнозировать варианты их поведения при выплавке стали в различных сталеплавильных агрегатах.

Ключевые слова: новые композиционные материалы, синтиком, степень восстановления железа, продолжительность периода восстановления железа.

Abstract. In experimental research and analysis of the behavior Synticom with dispersed base during heating and melting we get data about distinctive feature of behavior of oxide-carbon materials during high-temperature heating, it allows to predict their behavior in steelmaking in various steelmaking units.

Keywords: new composite materials, sinticom, extent of iron reduction, duration period of iron recovery.

Развитие производства стали сопровождается ростом объемов производства и применения в сталеплавильных агрегатах предварительно подготовленных материалов.

Особый интерес среди них представляют синтетические композиционные материалы нового поколения типа синтиком®. Принцип их получения базируется на объединении в единый монолит различных компонентов, используемых при выплавке стали обычно раздельно, т.е. в свободном виде [1]. Эти компоненты могут включать в себя передельный чугун, твердые окислители, науглероживатели, шлакообразующие реагенты и др.

Основу материалов типа синтиком составляют железоуглеродистые сплавы в виде передельного чугуна либо частицы металлического железа самого различного происхождения, в том числе железа прямого восстановления. В первом случае синтиком получают путем литья в мульты разливочной машины чугуна. Физически материал представляет собой чугунные слитки, «начиненные» наполнителем соответствующего состава. Размеры и форма слитков аналогична чушкам передельного чугуна.

В отличие от этого во втором случае композиционные материалы имеют основу, состоящую из дисперсных частиц железа и/или железо-углеродистого сплава, объединенных с другими компонентами в одно целое методами окускования, прежде всего брикетирования. Размеры, форма, масса и состав данного композита при этом могут изменяться в самых широких пределах. Это является серьезным преимуществом по отношению к синтикому классического типа с литой металлической основой. Вопросы производства и применения синтикома на основе передельного чугуна и твердого окислителя подробно освещены в монографиях [1,2]. В настоящей работе рассмотрено поведение при нагреве и плавлении композиционных материалов, состоящих из дисперсных компонентов, которое до сих пор является малоизученным.

Данные материалы брикетировали в лабораторных условиях, варьируя соотношение исходных веществ в широких диапазонах. В качестве исходных компонентов использовали частицы железа прямого восстановления, оксиды железа в виде окалины, железорудных окатышей, концентрата, углеродистый восстановитель (кокстик). Связующим материалом служил портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Н, доля которого изменялась в пределах 10-15% сверх 100% массы ведущих компонентов, в зависимости от состава брикетов.

Нагрев и плавление образцов брикетов проводили в печи Таммана Ченстоховского политехнического университета. Максимальная температура нагрева в опытах составляла 1550°C, что соответствует средней температуре металла при расплавлении ванны. Продолжительность нагрева во всех случаях была выбрана одинаковой и равной 900 с. При проведении опытов измерялись состав образующегося газа, температура печи, химсостав исходных образцов, конечного металла и шлака.

Наибольший интерес из числа исследуемых образцов представляет материал, содержащий одновременно восстановитель, оксиды железа и металлическое железо состава, % мас: C=5,28; FeO=33,12; Fe₂O₃=6,62; Fe_{мет}=28,53; S=0,09; P=0,021.

Таблица 1 – Химический состав металла, полученного в результате нагрева и плавления данного композита до 1550°C за время 900с., % мас.

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	N, ppm	O ₂ , ppm
0,43	0,02	0,16	0,019	0,13	0,01	<0,01		42,42,42, 40,41,40	116,99,103, 83,117,85

Полученный при этом шлак имел следующий состав, % масс.: CaO=27,30; SiO₂=32,35; Al₂O₃=35,07; Fe_{общ}=2,08; FeO=1,80; Fe₂O₃=0,97.

Лабораторные эксперименты по нагреву образцов синтикома в тигле печи Таммана показали, что до температуры 1380-1450°C все исследуемые материалы сохраняют свою форму. При дальнейшем нагреве начинается размягчение, которым при температуре 1500-1520°C завершается полным переходом из твердого в расплавленное состояние с образованием двух отдельных жидких фаз – металла и шлака. В процессе нагрева проис-

ходит взаимодействие углерода и оксидов железа, сопровождающееся одновременным и параллельным восстановлением железа из его оксидов углеродом и окислением самого углерода. Продуктами карботермической реакции являются металлическое железо, которое в зависимости от соотношения углерод-кислород в композите может содержать углерод, а также газовая фаза. Последняя состоит преимущественно из монооксида углерода, доля которого изменяется в пределах 85-95%.

Анализ результатов исследований свидетельствует о том, что восстановление железа углеродом протекает преимущественно в интервале температур 1380-1520°C. Следовательно восстановление в брикетах завершается еще до температуры полного расплавления металлозавалки и образования металлической ванны (1550-1580°C). Сказанное выше свидетельствует о том, что куски композита, загруженные в сталеплавильный агрегат, будут нагреваться без изменения формы до момента расплавления шихты.

Одной из важнейших характеристик композита является продолжительность периода восстановления железа из его оксидов. Согласно полученным данным этот процесс протекает в основном в интервале температур 1400-1520°C, при которых взаимодействующие компоненты находятся в расплавленном состоянии 60с.

Приведенное значение свидетельствует об интенсивном взаимодействии углерода и оксидов железа в синтикоме, что находит свое объяснение в жидкофазном характере восстановления, протекающем с огромными скоростями [1]. Подчеркнем, что характер и скорость взаимодействия углерода и оксидов железа в данном материале определяются темпом подвода тепла, поскольку данная реакция носит эндотермический характер. С этих позиций наиболее рациональным вариантом применения таких материалов является их ввод в зоны с максимальной температурой, в частности в зону горения дуг.

Другой важнейшей характеристикой является степень восстановления железа в данных условиях. Данные о содержании оксидов железа в конечном шлаке, образующемся после завершения нагрева, свидетельствуют об относительно низкой их концентрации. Концентрация монооксида железа при этом составила всего 1,8%, а оксида железа – 0,97%, что дает в сумме не более 2,8% $Fe_{общ.}$. Эти показатели подтверждают, что карботермическое восстановление железа в механически спрессованной смеси углеродистого восстановителя и оксидов железа при температуре 1550°C протекает весьма полно – практически до конца. Степень восстановления исходного железа достигает 93-97%. Дополнительным фактором, подтверждающим это положение, является весьма низкое содержание кислорода в конечном металле, составляющее всего 80-120ppm, а также наличие в нем кремния в количестве 0,16%, восстановленного из шлака углеродом. Определенную роль в восстановлении железа вероятно сыграло наличие в исходном материале частиц металлического железа, облегчающих восстановление оксидов и понижающих температуру начала восстановления, а также высокое содержание SiO_2 . Обращает на себя внимание, что восстановление железа из его оксидов в оксидоугольном композите в отличие от доменной печи протекает по механизму прямого восстановления. Состав образующейся газовой фазы, состоящей главным образом из монооксида углерода, подтверждает это положение.

Металл, полученный в результате нагрева данного состава композита и протекания в нем реакций карботермического восстановления, содержит 0,43% углерода. Это позволяет сделать вывод о возможности получения из оксидоугольных материалов конечного металла с различным и регулируемым содержанием углерода, начиная от низкоуглеродистого чернового железа и заканчивая чугуном. Тем самым открываются возможности для сокращения количества науглероживателя, подаваемого в электродуговую печь в свободном виде. Это придает данным материалам свойства науглероживающего вещества.

Данные о составе конечного металла свидетельствуют о высокой чистоте по содержанию фосфора – 0,019% и остаточных элементов Cu , Cr , Ni – не более 0,01% каждого из элементов, а также азота – на уровне 40ppm.

Единственным элементом, содержание которого является высоким и превышает его концентрацию в передельном чугуна, является сера, массовая доля которой в данном случае составила 0,13% вместо 0,025-0,080% в чугуна. При этом общее количество серы в процессе нагрева до 1550°C несколько снизилось, однако это не превысило 25% от начального содержания серы.

Концентрация серы в данном случае определяется ее содержанием в углеродистом восстановителе и массовой долей его в композите. Следует признать, что такое положение является органическим недостатком композиционных материалов данного типа. Оно предъявляет весьма жесткие требования к чистоте восстановителя по сере. Поэтому необходимо продолжить исследование процессов десульфурации в оксидоугольных материалах, например за счет ввода в их исходный состав оксидов кальция.

Проанализируем поведение составляющих композита синтикома во время нагрева и плавления. Основным компонентом данного вида синтикома являются частицы металлического железа и смесь различных соединений окисленного железа включая, FeO , Fe_3O_4 , Fe_2O_3 и $Fe(OH)_3$, а также углеродистый восстановитель. В процессе нагрева гидроокись железа диссоциирует, образуя Fe_2O_3 и выделяя H_2O . Последний является дополнительным окислителем к кислороду поступающему из оксидов железа. Одновременно с этим происходит диссоциация Fe_2O_3 с образованием FeO и газообразного кислорода. Доля его значительна и составляет 33,3% от исходного его содержания в оксиде железа. Вследствие этого во время нагрева наблюдается постепенный переход Fe_2O_3 в Fe_3O_4 и далее в FeO с увеличением количества FeO по сравнению с его начальным содержанием.

Температура плавления различных видов оксидов железа отличается друг от друга. Температура плавления Fe_2O_3 составляет 1562°C, температура разложения Fe_3O_4 на FeO и Fe_2O_3 – 1538°C, температура плавления FeO – 1368°C. Наименьшую температуру плавления, равную 1368°C, имеет FeO . Поэтому до температуры 1370°C все составляющие оксидоугольных композитов являются твердыми фазами. Химические реакции компонентов друг с другом при этом происходят в твердофазном режиме в точках их контакта и поэтому протекают с относительно небольшими скоростями, резко усиливаясь в области температур выше 1400°C. Углерод кокса вступает в реакцию с оксидами железа по механизму топохимических реакций. Оксид железа Fe_2O_3 при этом восстанавливается до FeO в местах контакта с частицами коксика и образующимися молекулами CO .

Следует специально отметить, что в области температур 1383°C, весьма близких к температуре плавления FeO , упругость диссоциации Fe_2O_3 на FeO и O_2 достигает высоких значений [1,2]. Благодаря этому кислородный потенциал Fe_2O_3 резко возрастает, превосходя соответствующий показатель чистого газообразного кислорода, не говоря уже об атмосфере печи. Выделение при диссоциации кислорода увеличивает его активность и существенно повышает его сродство к углероду, повышая тем самым интенсивность реакции восстановителя.

Связующим материалом в рассматриваемом случае при окусковании композита является цемент, который широко используется в брикетировании, придавая брикетам монолитный характер без видимой наружной поверхности и обеспечивая им требуемую прочность. По сути дела композиты из смеси углеродистого восстановителя, железа и его оксидов с использованием в качестве связующего цемент представляют собой аналог или модель бетонного изделия.

Типичный состав цемента, % мас.: 65-66 CaO ; 21-22 SiO_2 ; 5-6 Al_2O_3 ; 4-5 MgO ; 2-3 Fe_2O_3 ; остальное – примеси Cr_2O_3 , MnO , TiO_2 и т.п. Материалы этого состава отличаются весьма высокой температурой плавления. Согласно диаграммам состояния шлаковых систем температуре плавления цемента состава 66% CaO , 5 Al_2O_3 и 29% SiO_2 достигает 1900-1920°C. Заметим, что основные компоненты цемента CaO и SiO_2 в имеющемся соотношении образует химическое соединение $3(CaO) \cdot SiO_2$, температура плавления которого близка к 1900°C.

С этих позиций использование в качестве связующего весьма тугоплавкого материала типа цемента при получении компактированных материалов вызывает сомнение. Покажем, что состав материалов и высокотемпературный нагрев их устраняет данную проблему, снижая температуру плавления связующего цемента. Как уже отмечалось выше, нагрев кусков композита оксидоугольного состава сопровождается в области температур выше 1370°C образованием и дополнительным увеличением содержания монооксида железа. Последний имеет наиболее низкую температуру плавления, равную 1368°C . Поэтому при температуре выше 1370°C монооксид переходит из твердого вида в расплавленное состояние, взаимодействуя и сплавляясь с частицами цемента $[3(\text{CaO})\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{Al}_2\text{O}_3]$, образующего каркас композита. В результате этого процесса температура плавления системы цемент-монооксид железа резко падает. При наличии в системе $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO}$ примерно 60-70% FeO температуры плавления этой системы с цементной связкой резко снижается до 1260°C , что ускоряет растворение цементного каркаса композита. Наблюдаемый в опытах факт полного завершения расплавления всех исходных компонентов материала включая цемент, при температурах не выше 1550°C подтверждает этот вывод. Одновременно с этим жидкий монооксид железа FeO вступает в реакцию с твердыми частицами кокса, находящимися в скелете цементной решетки, образуя монооксид углерода CO . Выделяющиеся при этом пузыри CO дополнительно разрушают цементный скелет данного композита, приводя к высвобождению частиц коксика. Это в свою очередь облегчает их растворение в металле и восстановление углеродом оксидов железа с образованием металлического железа и CO . Приведенные выше данные свидетельствуют о возможности использования цемента как связующего материала при изготовлении оксидоугольных материалов. Практика применения этих материалов подтверждает указанное положение.

Заключение

Полученные данные об особенностях поведения оксидоугольных материалов при высокотемпературном нагреве, отвечающем уровню температур при производстве стали, позволяют прогнозировать варианты их поведения при выплавке стали в различных сталеплавильных агрегатах в зависимости от состава данных материалов.

Одним из перспективных вариантов применения синтикома оксидоугольного типа является ввод их в электродуговую печь по ходу плавки, в том числе в зону горения дуг.

Библиографический список

1. Шахпазов Е.Х. Дорофеев Г.А. Новые синтетические композиционные материалы и технология выплавки стали с их использованием. –М.: Интерконтакт Наука, 2008. - 272с.
2. Дорофеев Г.А. Афонин С.З. Шевелев Л.Н. Энерготехнологические особенности использования синтикома при выплавке стали в электродуговых печах. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013.112с.

Секция 3. Моделирование теплоэнергетических процессов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ФУРМЕННОЙ ЗОНЫ ПЕЧЕЙ РОМЕЛТ И ВАНЮКОВА

Терехова А.Ю.

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет МИСиС»
г. Москва, Россия, terekhova.nastya@mail.ru

Аннотация. Технологическая эффективность печей с барботажным слоем определяется в основном особенностями процессов межфазного обмена, протекающих в слое, которые в свою очередь зависят от гидродинамики ванны. При этом решающая роль принадлежит гидродинамике фурменной зоны.

Следовательно, при разработке физической модели печи было принято решение основываться на математическом описании гидродинамики ванны и особенно ее фурменной зоны.

Ключевые слова: Математическая модель, печь, барботажный слой, фурма.

Abstract. Technological efficiency of furnaces bubbling layer determined mainly by the peculiarities of interfacial exchange processes proceeding in the layer, which in turn depend on the hydrodynamics of the bath. Nevertheless crucial role is played by the hydrodynamics of the tuyere zone.

Therefore, when physical model of the furnace developed, it was decided to use base of the mathematical description of the hydrodynamics of the bath and especially the tuyere zone.

Keywords: mathematical model, furnace, bubbling layer, tuyere.

Математическая модель гидродинамики барботажного слоя

При составлении математической модели приняли следующие допущения:

- газ и жидкость химически нейтральны, изотермичны и несжимаемы;
- ванна состоит из однородной жидкости;
- газовый пузырь до своего отрыва от носка фурмы остается симметричным относительно ее продольной оси;
- газовая струя на всем протяжении до дробления на пузыри также симметрична относительно продольной оси фурмы;
- минимальное статическое давление газа на выходе из фурмы равно статическому давлению в надслоевом пространстве печи.

Математическую модель гидродинамики барботажного слоя представим в следующем виде:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \mathbf{w}_r}{\partial t} &= \mathbf{k} - \frac{1}{\rho_r} \text{grad} p_r + \mathbf{v}_r \nabla^2 \mathbf{w}_r; \\ \text{div} \mathbf{w}_r &= 0; \\ \frac{\partial \mathbf{w}_j}{\partial t} &= \mathbf{k} - \frac{1}{\rho_j} \text{grad} p_j + \mathbf{v}_j \nabla^2 \mathbf{w}_j; \\ \text{div} \mathbf{w}_j &= 0; \\ \rho \frac{\partial \mathbf{w}_{j-r}}{\partial t} &= \mathbf{g}(\rho_j - \rho_r) - \text{grad} p_j + \mu_j \nabla^2 \mathbf{w}_{j-r}; \\ \text{div} \mathbf{w}_{j-r} &= 0; \\ p_j^{\text{гп}} - 2\mu_j \left(\frac{\partial \mathbf{w}}{\partial Y} \right)_{j-r}^{\text{гп}} &= p_r^{\text{гп}} + \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right); \\ \mathbf{w}_r^{\text{гп}} = \mathbf{w}_j^{\text{гп}} = \mathbf{w}_\Pi &\end{aligned} \quad (1)$$

Краевые условия формулируются отдельно для пузырькового и струйного режимов истечения.

Для пузырькового режима:

$$\begin{aligned} & - \text{при } t \geq t_0 \quad 0,5\rho_r \left(\frac{\partial x}{\partial t} \right)^2 = g\rho_{\text{ж}} h_{\text{ж}}; \\ & - \text{при } X = 0 \quad Z = 0,5d_{\text{п}}, \quad w_{\text{зг}} = 0; \\ & - \text{при } Z = 0 \quad X = 0,5d_{\text{п}}, \quad w_{\text{хг}} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Для струйного режима:

$$\begin{aligned} & - \text{при } t = t_0 \quad w_0 = w_{\text{кр}}; \\ & - \text{при } 0 < X < l_{\text{стр}} \text{ и } Z = 0,5d_{\text{стр}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (\rho_r + \rho_{\text{ж}}) \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} + \frac{1}{\lambda^2} (\mu_r + \mu_{\text{ж}}) \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} [F + (\rho_r - \rho_{\text{ж}}) \cdot b \cos(\omega t)] \xi = 0; \\ & F = g(\rho_r - \rho_{\text{ж}}) + \frac{\sigma}{\lambda^2}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{при } x = l_{\text{стр}} \quad 0,5\rho_r \left(\frac{\partial x}{\partial t} \right)^2 = g\rho_{\text{ж}} h_{\text{ж}}.$$

Индексом «г» обозначены параметры газа, индексом «ж» – параметры жидкости; «гр» – значения параметров на границе раздела фаз; $w_{\text{ж-г}}$ – относительная скорость омывания жидкостью газового пузыря, м/с; R_1, R_2 – главные радиусы кривизны поверхности всплывающего пузыря (предполагается, что он имеет форму эллипсоида), м; $w_{\text{п}}$ – скорость всплывания пузыря, м/с; t_0 – момент начала роста пузыря или перехода пузырькового режима истечения в струйный; $d_{\text{п}}$ – диаметр пузыря, м; $d_{\text{стр}}$ – диаметр поперечного сечения струи, м; w_0 – среднерасходная скорость газа в выходном сечении фурмы, м/с; $w_{\text{кр}}$ – скорость, при которой начинается струйный режим истечения, м/с; $l_{\text{стр}}$ – длина струи, м; ξ – смещение вдоль оси OZ границы раздела фаз в процессе колебаний; λ – длина волны этих колебаний, м; b – амплитудное значение переменного ускорения, действующего вдоль оси OZ и возникающего в результате колебаний границы раздела струя-жидкость, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с; ω – круговая частота колебаний, рад/с.

В краевых условиях заданы также:

– геометрические параметры печи (межосевое расстояние фурм $l_{\text{ф}}$, м; диаметр выходного отверстия фурмы d_0 , м; высота слоя осветленной жидкости над осью фурмы $h_{\text{ж}}$, м);

- физические параметры жидкости и газа (ρ , кг/м³; μ , Па·с; σ , н/м);
- скорость газа на выходе из фурмы – w_0 , м/с;
- скорость звука в газе a , м/с.

Первые четыре уравнения системы (1) являются уравнениями движения и сплошности газа и жидкости. Следующие два уравнения являются уравнениями движения и сплошности жидкости, обтекающей газовый пузырь, условно принятый неподвижным. Седьмое уравнение выражает условие равенства нормальных напряжений на поверхности пузыря с учетом действия поверхностного натяжения и при пренебрежении влиянием вязкости газа. При этом $p_{\text{ж}}$ – давление в жидкости у поверхности пузыря, а $p_{\text{г}}$ – давление газа внутри пузыря. Последнее уравнение выражает отсутствие проскальзывания фаз на поверхности пузыря.

Физический смысл уравнения (2) заключается в следующем. В момент отрыва пузыря отверстие мгновенно перекрывается жидкостью. Газ,двигающийся по подводному трубопроводу, испытывает в выходном сечении фурмы внезапное торможение вплоть до полной остановки, и его кинетическая энергия превращается в статический напор. При

этом приняли, что $h_{\text{ж}} \gg d_0$. Через x обозначено расстояние вдоль продольной оси фурмы, на котором происходит торможение газа от скорости w_0 до нуля, а через t – время, в течение которого это торможение происходит.

Уравнение (3) описывает механизм подавления струей действия выталкивающей силы.

При струйном режиме истечения в конце горизонтального участка струи всегда выполняется условие, аналогичное условию (2). Оно выражено последним уравнением.

Критерии подобия и пределы их изменения

Пользуясь методом обобщенных переменных, систему уравнений (1) с краевыми условиями представили в безразмерной форме и выделили критерии подобия. При этом исходили из двух фундаментальных положений теории подобия, согласно которым критериями подобия могут быть только те безразмерные комплексы, которые составлены из параметров, заданных в условии задачи. Параметры, заданные в условии задачи и не попавшие в критерии подобия комплексного вида, могут быть введены в критериальное уравнение в виде симплексов.

Приведение первого уравнения системы (1) к безразмерному виду позволяет получить четыре комплекса: число Струхала, критерий Фруда, критерий Рейнольдса и число Эйлера, два из которых являются критериями подобия и должны войти в обобщенное уравнение в качестве аргументов:

$$\text{Re} = \frac{\rho_{\text{г}} w_0 d_0}{\mu_{\text{г}}}; \quad \text{Fr} = \frac{w_0^2}{g d_0}.$$

Приведение к безразмерному виду третьего уравнения системы (1) позволяет получить те же комплексы применительно к движению жидкости как сплошной среды (например, в каплях или между пузырями в квазистационарном слое). Однако ни один из них не является критерием подобия, так как содержит в качестве сомножителя либо скорость жидкости, либо размер образования (например, размер капли), которые не могут быть заданы в условиях однозначности, поскольку являются функциями параметров движения газа. Эти комплексы могут рассматриваться либо как определяемые величины, либо как независимые переменные. В любом случае их включение в критериальное уравнение зависит от постановки задачи.

Остальные уравнения системы (1) образуют следующие комплексы [1]:

$$\frac{w_{\text{п}} d_{\text{п}}}{v_{\text{г}}}; \quad \frac{\Delta P}{\rho_{\text{г}} w_{\text{п}}^2}; \quad \frac{w_{\text{п}} t}{d_{\text{п}}}; \quad \frac{\sigma}{(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}}) g d_{\text{п}}^2}; \quad \frac{\sigma^{3/2} \rho_{\text{ж}}}{\mu_{\text{ж}}^2 g^{1/2} (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})^{1/2}}.$$

В первые четыре комплекса входят скорость или диаметр пузыря, которые являются функциями и не могут быть заданы в краевых условиях.

Критерием является только последний комплекс, полностью составленный из заданных величин и названный С.С. Кутателадзе модифицированным критерием Архимеда жидкости:

$$\text{Ar}_{\text{ж}} = \frac{\sigma^{3/2} \rho_{\text{ж}}}{\mu_{\text{ж}}^2 g^{1/2} (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})^{1/2}}.$$

Критерий $\text{Ar}_{\text{ж}}$ характеризует действие выталкивающей силы на пузырь или струю с учетом физических свойств жидкости.

Из уравнения (2) образуется критерий подобия:

$$Gn = \frac{\rho_r w_0^2}{g \rho_{ж} h_{ж}}.$$

В ходе приведения уравнения (3) к безразмерному виду образуются четыре комплекса, два из которых идентичны:

$$\pi_1 = \frac{(\mu_r + \mu_{ж})t}{(\rho_r + \rho_{ж})d_0^2}; \quad \pi_2 = \pi_4 = \frac{(\rho_r - \rho_{ж})gt^2}{(\rho_r + \rho_{ж})d_0}; \quad \pi_3 = \frac{\sigma_{ж}t^2}{d_0^3(\rho_r + \rho_{ж})}.$$

Во все комплексы в качестве сомножителя входит время t , характеризующее колебательные процессы на границе раздела струя-жидкость. Так как параметры этих процессов переменны во времени и пространстве, то значение t не может быть задано в краевых условиях, т.е. указанные комплексы не могут быть критериями подобия.

Сгруппировав комплексы π_1 и π_3 таким образом, чтобы исключить переменную величину t , получили:

$$\pi_{\mu\sigma\rho} = \frac{\pi_1^4 \pi_2}{\pi_3^3} = \frac{(\mu_r + \mu_{ж})^4 (\rho_r - \rho_{ж}) g}{(\rho_r + \rho_{ж})^2 \sigma_{ж}^3}.$$

Учитывая, что вязкость газа на шесть порядков меньше вязкости металлического расплава, а его плотность на три порядка меньше плотности расплава, комплекс $\pi_{\mu\sigma\rho}$ можно существенно упростить:

$$\pi_{\mu\sigma\rho} = \frac{\mu_{ж}^4 g}{\rho_{ж} \sigma_{ж}^3}.$$

В таком виде он был получен с помощью анализа разностей Б.Л. Марковым и А.А. Кирсановым [2], а еще раньше – Уайтом и Бермором и представляет собой по существу модифицированный критерий Архимеда.

В полученные критерии подобия не вошли некоторые геометрические и кинематические параметры, заданные в краевых условиях и имеющие важное значение для изучаемого процесса. Введем эти параметры в виде критериев подобия параметрического вида:

- относительные размеры печи $L_1 = l_1/d_0$; $L_2 = l_2/d_0$... и т.д.;
- относительная высота слоя $H = h_{ж}/d_0$;
- относительное межсоевое расстояние $A = l_{\phi}/d_0$;
- относительная скорость истечения (число Маха) $M = w_0/a$.

Таким образом, приведение к безразмерному виду системы (1) с краевыми условиями дает следующий набор критериев подобия:

$$Re_r, Fr_r, Ar_{ж}, Gn, H, A, M, L_1, L_2 \dots$$

Их число можно сократить на основании следующих соображений.

В работе [3] показано, что при истечении газовой струи в жидкость, процесс автомоделен относительно критерия Рейнольдса. Поэтому этот критерий может быть исключен из числа безразмерных параметров.

Критерий Фруда в данной задаче имеет следующий вид:

$$Fr_r = \frac{\rho_r w_0^2}{g \rho_{ж} d_0}.$$

По его физическому смыслу при продувке ванны через погруженное сопло в знаменателе вместо диаметра сопла в качестве линейного размера должна фигурировать высота слоя жидкости над осью фурмы, которая так же как d_0 задается в краевых условиях задачи. Таким образом, совершенно ясным становится смысл этого комплекса – это есть мера отношения кинетической энергии газа на входе в слой к потенциальной энергии ванны (ее противодействию), препятствующей продвижению струи. С этой точки зрения комплекс G_n является аналогом критерия Фруда при продувке ванны через погруженное отверстие. Окончательно список критериев подобия принимает следующий вид:

$$Ar_{ж}, G_n, H, A, M, L_1, L_2 \dots$$

Пределы изменения каждого из них на модели в сравнении с соответствующими пределами для промышленных печей, рассчитанными по литературным данным [4, 5,6], приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Пределы изменения критериев подобия

Величины	Значения	
	на образце	на модели
G_n	0,61÷2,7	0,61÷112
$Ar_{ж}$	0,923÷7,9·10 ⁵	1,534÷4·10 ⁵
H	4÷23	4÷19
M	0,1÷0,5	0,1÷0,8
A	2,5÷16	2,5÷28
L_1	43÷200	8÷425
L_2	20÷80	42÷225

Библиографический список

1. Кутателадзе С.С., Стыркович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. М.: Энергия, 1976.
2. Марков Б.А. Дис...докт. техн. наук. М.: МИСиС, 1970
3. Сборщиков Г.С. Дис...канд. техн. наук.. – М.: МИСиС, 1974.
4. Essa S.H. Schugekl K. // Chem. Eng. Sei., 1975, vol. 30, № 7.
5. Быстров В.П., Ванюков А.В., Васкевич А.Д и др. // Цветные металлы, 1980, № 10.
6. Гречко А.В., Нестеренко Р.Д., Кудинов Ю.Д. Практика физического моделирования на металлургическом заводе. М.: Металлургия, 1976.

К ВОПРОСУ О ПОСТРОЕНИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДОЖИГАНИЯ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ В ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Меркер Э.Э.¹, Степанов В.А.¹, Крахт Л.Н.¹, Харламов Д.А.²

¹Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
г. Старый Оскол, Россия, Viktor1990_31@mail.ru

²Белгородский государственный технологический университет (БГТУ) им. В.Г. Шухова,
Губкинский филиал
г. Губкин, Россия

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы повышения эффективности дожигания CO в ДСП при использовании топливно-кислородных горелок и устройств для подачи потока O₂ навстречу потоку отходящих газов с применением системы непрерывного контроля содержания состава (CO, O₂ и др.) отходящих газов в патрубке газоотводящей системы агрегата. Была предложена математическая модель для использования в оценке эффективности дожигания газов в дуговой печи.

Ключевые слова: дуговая печь, топливно-кислородная горелка, дожигание, окатыши, фурма, факел

Abstract. The paper discusses the issues of improving the efficiency of post-combustion of CO in the DSP by using oxy-fuel burners and devices for feeding O₂ flow against the flow of exhaust gases using a system of continuous monitoring of the composition (CO, O₂ and others.) Flue gas flue pipe system unit. A mathematical model has been proposed for use in evaluating the effectiveness of post-combustion gases in the arc furnace.

Keywords: arc furnace, fuel-oxygen burner, post-combustion, pellets, lance torch.

Современный технологический процесс выплавки стали [1,2] в дуговой сталеплавильной печи (ДСП) предусматривает [3] проведение в окислительный период интенсивной продувки ванны кислородом с помощью продувочной фурмы [4] или с применением [5] топливно-кислородных горелок (ТКГ). В период продувки концентрации горючих газов (CO, H₂ и др.) в ДСП достигают 15 - 20% CO, а содержание кислорода (O₂, %) в отходящих из ДСП газах достигает 15%. При этом полное дожигание в рабочем пространстве CO, выделяющегося из ванны печи, уже не обеспечивается [3,6], и CO поступает в газоотводящий тракт. В связи с этим представляется важной разработка математической модели дожигания CO в ДСП с тем, чтобы содержание CO в отходящих газах в начале газоотводящего тракта практически [7] отсутствовало.

Интенсификация выплавки стали и увеличение доли топливной составляющей в энергетическом балансе [6,7] современных дуговых сталеплавильных печей (ДСП), в особенности с применением железорудных металлизированных окатышей (ЖМО), приводит к увеличению количества [1,3] образующихся в печи газов и изменению их состава, что существенно влияет на эффективность работы систем отвода и очистки газов. Эти изменения являются значительными, что приводит к необходимости серьезной реконструкции систем очистки и дожигания газов с применением новых конструктивных решений [4].

Установлено, что при интенсификации процессов электроплавки стали кислородом [3], в особенности в условиях электроплавки ЖМО в 150-т ДСП, более высокий окислительный потенциал [1,2] газовой фазы и турбулентность обеспечивают достаточно высокое содержание CO и CO₂ в составе отходящих газов (до 75 - 90%). Из анализа опытных данных [2] следует, что дожигание горючих газов (CO, H₂) в рабочем пространстве ДСП представляется важным и целесообразным, т.к. теоретическая эффективность дожигания CO может достигать 279 кДж/моль CO или 6,92 кВт·ч/м³ кислорода. Δq_6

В условиях работы 150-т ДСП с применением ЖМО и ТКГ теплоусвоение шлако-металлической ванны (Δq_v , кВт) характеризуется скоростью её нагрева (V_t , °C/с) от тепла, поступающего от электрических дуг, топливно-кислородных горелок (ТКГ) и за счёт тепла от дожигания CO :

$$\Delta q_v = G_M \cdot \overline{C_M} \cdot \left(\frac{\partial T_M}{\partial \tau} \right) = (G_0 + V_{ок} \cdot \tau) \cdot \overline{C_M} \cdot V_t, \text{ кВт}, \quad (1)$$

где G_M и G_0 – текущая и начальная масса металла, кг;

$\overline{C_M}$ – средняя теплоёмкость ванны, кДж/(кг·°C);

$V_{ок}$ – расход ЖМО в ванну, кг/с;

T_M – температура металла в ДСП, °C;

$\partial \tau$ – временной период плавки, с.

При дожигании CO над шлаком (рисунок 1) потоком O_2 , поступающего из ТКГ в патрубок устройства для дожигания CO в ДСП выделяется следующее дополнительное количество тепла:

$$Q_{CO}^{дож} = \alpha_{\Sigma} \cdot \gamma \cdot (t_{cp(CO)} - t_{шл}) \cdot S_{шл}, \text{ кВт}, \quad (2)$$

где α_{Σ} – усреднённый коэффициент теплоотдачи путём конвекции и излучения, кВт/(м²·°C);

$t_{cp(CO)}$ и $t_{шл}$ – температуры соответственно поверхности факела дожигания CO и шлака, °C;

$S_{шл}$ – поверхность теплоотдачи, м²;

γ – коэффициент, характеризующий долю тепла от дожигания CO , поступающего на нагрев шлаковой ванны ($\gamma = 50-75\%$).

Из анализа выражений (1) и (2) следует, что в случае дополнительного поступления тепла $Q_{CO}^{дож}$ на увеличение Δq_v при $V_{ок} = const$ скорость нагрева ванны V_t заметно возрастает, что приводит [2,3] к увеличению производительности агрегата [1] и снижению удельного расхода электроэнергии на процесс электроплавки ЖМО в ДСП. На рисунке 1б приведена принципиальная схема дожигания CO в потоке O_2 над шлаковой ванной в атмосфере ДСП. Уровень искривлённости неизотермического потока факела дожигания CO в ДСП определяется углом наклона оси ТКГ к поверхности шлака в печи и значением критерия Архимеда [1], характеризующим отношение подъёмной и инерционной сил, т.е. имеем:

$$Ar = d_0 \cdot g \cdot (\rho_{г.с.} - \rho_{ф}) / (\rho_{г.с.} \cdot w^2), \quad (3)$$

где d_0 – диаметр потока на выходе из фурмы, м;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

w – скорость потока факела дожигания, м/с;

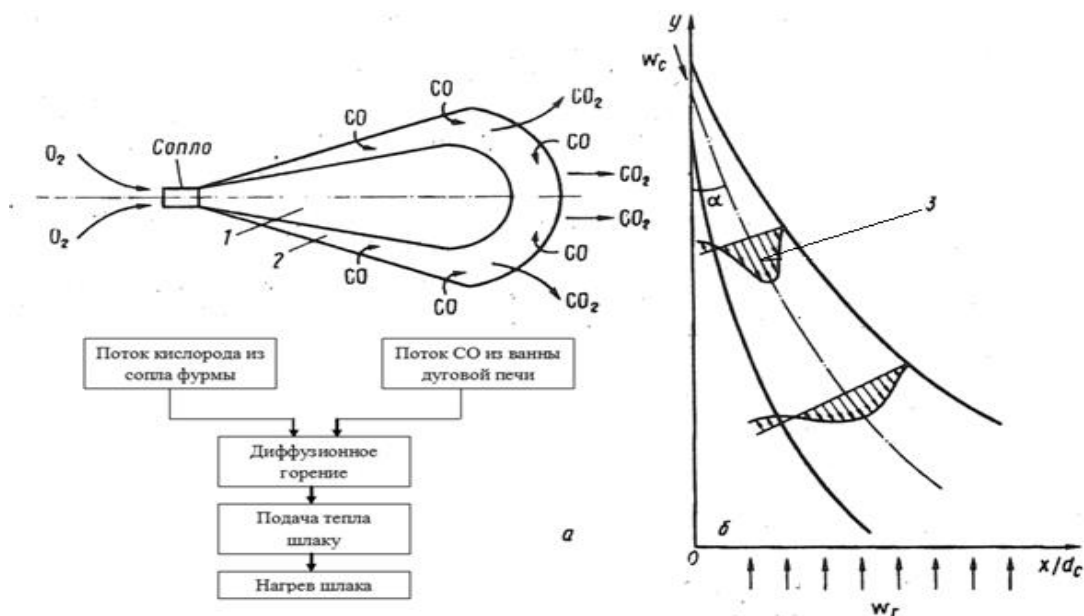
$\rho_{г.с.}$ и $\rho_{ф}$ – плотности газовой среды в печи и факела дожигания, кг/м³.

Траектория струи факела дожигания (рисунок 1б, поз. 3) описывается уравнением Г.Н. Абрамовича и имеет вид:

$$y = 0,027 \cdot Ar \cdot (x^3 + 11,3 \cdot r_c \cdot x^2) / r_c^3, \quad (4)$$

где r_c – начальный радиус струи потока O_2 из ТКГ, м;

x – расстояние вдоль поверхности шлака в печи, м.



1 – ядро струи O_2 ; 2 – зона горения CO в потоке O_2 ; 3 – эпюра распределения скоростей по сечению струи O_2 ; w_c и w_r – начальные скорости потока O_2 и встречного потока отходящих газов, м/с; ось «у» – вдоль оси фурмы; ось «х» – вдоль поверхности шлаковой ванны в печи

Рисунок 1 – Принципиальная схема механизма дожигания CO в закрученном потоке O_2 (а) и характер движения факела дожигания CO в сносящем потоке (б) отходящих газов в дуговой печи над шлаком

Для осуществления полного дожигания CO перед входом в газоотводящий тракт ДСП предлагается в работе [4] использовать устройство (рисунок 2) с многосопловым наконечником, что позволяет встречными струями O_2 воздействовать на поток горючих газов на выходе их из агрегата. Особенностью¹ устройства дожигания горючих газов (УДГ) является то, что наконечник его имеет центральное сопло с винтовой нагрузкой, остальные сопла размещены вокруг центрального под углом $30 \div 45$ градусов к оси устройства.

Суммарный коэффициент дожигания CO в объёме вспененного шлака определяли по выражению:

$$\eta_{CO}^{\Sigma} = \frac{I_{O_2} \cdot \eta_{CO} / (100 + \eta_{CO}) + I_{O_2}^{\text{дож}} \cdot \beta_0 / 100}{100 \cdot I_{O_2} / (100 + \eta_{CO}) + I_{O_2}^{\text{дож}} \cdot (100 - \beta_0) / 100} \cdot 100, \quad (5)$$

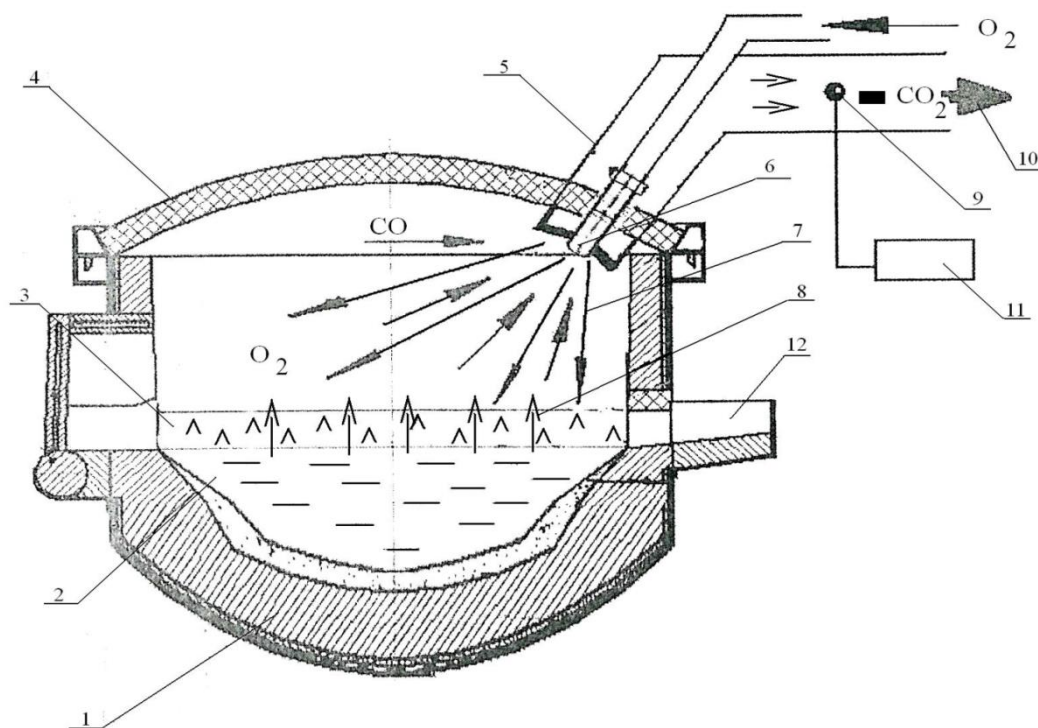
где I_{O_2} – расход O_2 в ТКГ, м³/с;

$I_{O_2}^{\text{дож}}$ – расход O_2 на дожигание CO , м³/с;

$\beta_0 = (1 - \{O_2\}_S) \cdot 100$ – доля использованного O_2 на дожигание CO , которая определяется газодинамическими свойствами струйной системы;

η_{CO} – коэффициент дожигания CO при типовой продувке ванны O_2 (без ТКГ).

¹ Меркер Э.Э. и др. Патент РФ №2520883. Дуговая печь с дожиганием горючих газов. Опубл. 27.06.2014. Бюл. №18.



1 – дуговая печь; 2 – жидкая сталь; 3 – шлак; 4 – свод печи; 5 – газоотвод; 6 – фурма для подачи O_2 ; 7 – поток O_2 ; 8 – поток CO из ванны; 9 – датчик контроля содержания кислорода методом Э.Д.С.; 10 – отходящие из газохода газы; 11 – прибор контроля степени дожига CO ; 12 – выпускное отверстие печи

Рисунок 2 – Схема дожигающих горючих газов в дуговой сталеплавильной печи

Среднюю температуру газовой струи (T_c , °C) в любом сечении её длины (L_c , м) находили из выражения:

$$T_c = \left\{ \begin{aligned} &Q_c / (V_z^\Sigma \cdot \bar{C}_z), Q_c = \bar{C}_z (T_m - 273) + Q_{CO} \cdot \{O_2\}_s, \\ &V_z^\Sigma = V_z^0 \cdot q_m, \quad V_z^0 = 0,785 U_0 d_0 n \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

где Q_c и V_z^Σ – энтальпия газовой струи и суммарный расход газа в любом её сечении по ходу движения;

$\bar{C}_z$ – теплоёмкость газовой смеси в струе, кДж/(кг·К);

T_m – температура газа на оси струи, К;

Q_{CO} – теплота сгорания CO в струе O_2 , кДж/кг;

V_z^0 – начальный расход газа на ТКГ, м³/с.

Величину присоединённой массы (q_m) по ходу движения сверхзвуковой струей газовой системы определяем из выражения:

$$q_m = (0,408 / Ma - 0,09) \bar{x} / N, \quad (7)$$

где $\bar{x} = x / d_c$ – относительное расстояние струи дожига от сопла;

$N = p_0 / p_a$ – степень нерасчётности;

Ma – число Маха;

p_0 и p_a – давление потока и в атмосфере, Па.

Установлено, что при сверхзвуковых истечениях потоков газоструйной системы из сопел ТКГ для повышения q_m следует рекомендовать значение числа $1 < Ma < 3$ и увеличение ($\bar{x} = \max$) дальнотойности струй. Энтальпию струи (h_c) определяем с учётом закона её сохранения по уравнению:

$$d(M(h_c - h_\infty))dL_c = 0, \quad (8)$$

где h_∞ – энтальпия отходящих из зоны продувки газов, кДж/кг;

$M = c \cdot p \cdot r^2 \cdot U_M$ – массовый расход газа в сечении струй дожигания, кг/с.

Уравнение сохранения составляющей компоненты струи дожигания имеет вид:

$$d(M \cdot I_0) / dL_c = (-16/28) \cdot \{CO\}_\infty \cdot dM / dL_c, \quad (9)$$

где $I_0 = \{O_2\}_S - (16/28) \cdot \{CO\}_S$; $\{O_2\}_S + \{CO\}_S + \{CO_2\}_S = 1$.

Последние величины характеризуют текущие значения CO , CO_2 и O_2 в объёме газовых струй по ходу их движения после выхода из ТКГ.

Равновесие газовой системы O_2 - CO_2 - CO находим из выражения константы:

$$K_p = \ln(P_{CO} \cdot P_{O_2}^{0.5} / P_{CO_2}) = -14760 / T_m + 4,54, \quad (10)$$

где P_{CO} , P_{O_2} , P_{CO_2} – парциальные давления этих компонентов в струях, Па.

Уравнения сохранения горизонтального и вертикального моментов потока импульса силы струи ТКГ имеет вид:

$$d(i_c^{\partial o ж} \cdot \cos \gamma) / dL_c = 0, \quad (11)$$

$$d(i_c^{\partial o ж} \cdot \sin \gamma) / dL_c = -U_\infty \cdot dM / dL_c - q \cdot \pi \cdot r^2 \cdot (\rho_\infty - \rho_c), \quad (12)$$

где $i_c^{\partial o ж} = (c_c \cdot p \cdot r^2 \cdot U_m^2)$ – поток импульса силы струи дожигания, кг·м/с²;

ρ_∞ и ρ_c – плотность встречного потока и струи дожигания, кг/м³;

$\gamma = 90 - \alpha$, где α – угол наклона струи к оси ТКГ, град.

При соответствующих граничных условиях для данного дутьевого режима плавки находим L_c , состав основных компонентов после дожигания CO , определяем значение η_{CO}^Σ и определяем коэффициент использования тепла от дожигания CO ($\eta_{КИТ}^{CO}$) в системе факела ТКГ над зоной продувки:

$$\begin{aligned} \eta_{КИТ}^{CO} &= \frac{\Delta Q_{усв}^M}{Q_{CO}^g} \cdot 100 = \frac{(Q_{CO}^M - Q_{энд}^{CO_2}) \cdot 100}{\rho_x \cdot I_{O_2}^{\partial o ж} \cdot \beta_0 \cdot Q_{CO} \cdot 932 / 22,4} = \\ &= \frac{F_{з.н.} \cdot [\alpha_\Sigma (T_c - T_M) - K_c \{CO_2\}_S \cdot Q_{CO_2}]}{\rho_x \cdot I_{O_2}^{\partial o ж} \cdot \beta_0 \cdot Q_{CO} (32 / 22,4)} \cdot 100 = \left[\frac{Q_{CO}^M}{Q_{CO}^g} - (F_{з.н.} \cdot K_c \{CO_2\}_S \cdot \frac{Q_{CO_2}}{Q_{CO}^g}) \right] = \\ &= \left[K_{эф} - \frac{Q_{энд}^{CO_2}}{Q_{CO}^g} \right] \cdot 100 \end{aligned} \quad (13)$$

где $K_c \{CO_2\}_S \cdot Q_{CO_2} = Q_{энд}^{CO_2}$;

T_M – температура металла, °C;

$F_{з.н.} = n \cdot \pi \cdot r_x^2$ – площадь контакта n – струй (радиусом r_x) дожигания на поверхности металла, м²;

$Q_{\text{эндо}}^{CO_2}$ – эндотермический эффект реакции восстановления CO_2 , кДж/кг;

$Kc = \rho_x \cdot U_{m(x)}$ – массовая скорость компонента $\{CO_2\}_S$, кг/(м²·с);

$\rho_x, U_{m(x)}$ – плотность и максимальная скорость струи в зоне удара её о поверхность металла;

$\beta_0 = (1 - \{O_2\}_S)$ – доля O_2 , идущая на дожигание CO ;

n – число струй в системе факела ТКГ. Из анализа выражения (14) следует, что при $K_{\text{эф}} = \text{const}$ повышение Q_{CO}^g за счёт увеличения $\beta_0, I_{O_2}^{\text{дож}}$ и снижения $Q_{\text{эндо}}^{CO_2}$ способствует существенному повышению $\eta_{\text{КИТ}}^{CO}$.

Теплоусвоение ванны характеризуется [4,5] изменением теплосодержания металла (Q_M , кДж), скоростью его нагрева (V_t , °С/мин) и коэффициентом теплового состояния (K_v , кДж/К) ванны:

$$\Delta Q_{\text{усв}}^M = Q_M / d\tau = G_M \cdot \bar{c}_M \cdot (dT / d\tau) = K_v \cdot V_t, \text{ кВт}, \quad (14)$$

где $\bar{c}_M$ – теплоёмкость металлического расплава, кДж/(т·К).

Учёт теплотехнических параметров ($\Sigma Q_{CO}^{\text{дож}}$, η_{CO}^{Σ} , θ , $\eta_{\text{КИТ}}^{CO}$ и др.) позволяет при соблюдении оптимальных технологических факторов, таких как ($15\% < (FeO) < 20\%$, V_t / V_c , $t_{\text{Ш}}$, ΔT_M , $(O_2)_{Fe+Mn}^{\text{шл}}$, $\eta_{\text{Ш}}$ и др.) обеспечивать энергосберегающие условия электроплавки стали.

Приведённые математические зависимости (5)–(14) составляют основу структуры модели и алгоритма расчёта дожигания CO и других горючих газов при использовании устройства для их дожигания в ДСП. В модели при расчёте таких параметров как q_g , $Q_{CO}^{\text{дож}}$, V_t , η_{CO}^{Σ} , $\eta_{\text{КИТ}}^{CO}$, $\Delta Q_{\text{усв}}^M$, $K_{\text{эф}}$ и другие учитываются конструктивные характеристики устройства дожигания, газодинамические и теплофизические показатели истечения струй O_2 и факела дожигания CO , а также потока отходящих газов и некоторые технологические данные протекания процессов электроплавки стали.

Библиографический список

1. Меркер Э.Э., Черменёв Е.А. Электроплавка металлизированных окатышей в дуговой печи. - Старый Оскол: ТНТ, 2015. - 320 с.
2. Трахимович В.И., Шалимов А.Г. Использование железа прямого восстановления при выплавке стали. - М.: Металлургия, 1982. - 248 с.
3. Смирнова Е.Ю., Миронова А.Н. Использование тепла отходящих газов в дуговой сталеплавильной печи // Электрометаллургия. 2003. №10. с. 14 - 19.
4. Меркер Э.Э. и др. Устройство для продувки газом. Патент на изобретение РФ № 2356946 от 27.05.2009. Бюл. №15; Способ дожигания горючих газов в дуговой печи. Патент на изобретение РФ № 2520925 от 27.06.2014. Бюл. №18.
5. Степанов В.А., Крахт Л.Н., Меркер Э.Э. Разработка метода дожигания горючих газов в ДСП // Научно-технический прогресс чёрной металлургии. Материалы II международной научно-технической конференции. Череповец. 7 - 9 октября 2015 г. с. 141 - 144.
6. Стомахин А.Я., Лопатин О.П., Арутюнов В.А. Дожи́гание отходящих газов в 100-т дуговой печи // Сталь. 1999. №2. с. 27 - 30.
7. Кочнов М.Ю., Шульц Л.А., Кочнов Ю.М. Повышение эффективности дожигания в ДСП // Известия ВУЗов. «Чёрная металлургия». 2009. №11. с. 49 - 55.

КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ ВОДО-ВОЗДУШНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ В ПАКЕТЕ ANSYS ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ*

Гребнева Н.В., Черемискина Н.А., Лавров В.В., Киселев Е.В.

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
г. Екатеринбург, Россия, nat1994@bk.ru

Аннотация. Современный инженер невозможен без знания систем автоматического проектирования, автоматического производства и автоматического инженерного анализа. Одним из самых распространенных комплексов, позволяющих решить данные задачи, сегодня является программа ANSYS, использующая метод конечных элементов. Программный модуль ANSYS FLUENT имеет широкий спектр возможностей моделирования течений жидкостей и газов для промышленных задач с учетом турбулентности, теплообмена, химических реакций. С помощью данного модуля смоделирован процесс движения жидкости в лабораторной установке «Изучение водо-воздушных теплообменников» для теплообменного аппарата с естественной конвекцией.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, компьютерное моделирование, ANSYS FLUENT, создание твердотельной модели, наложение сетки, граничные условия.

Abstract. The modern engineer is impossible without knowledge of systems of automated designing, automatic production and the automatic engineering analysis. One of the most widespread complexes allowing to solve these problems is the ANSYS, program using a method of final elements. The program module ANSYS FLUENT has a wide range of opportunities of modeling of currents of liquids and gases for industrial tasks taking into account turbulence, heat exchange, chemical reactions. By means of this package, process of the movement of liquid in the laboratory installation «Studying of Air-and-water Heat Exchangers» for the heatexchange device with natural convection is simulated.

Keywords: heat exchanger, computer modeling, ANSYS FLUENT, creation of a solid model, grid overlay, boundary condition.

Подготовка профессионального исследователя и инженера невозможна без обучения современным системам автоматического проектирования (CAD, Computer Aided Design) и автоматического инженерного анализа (CAE, Computer Aided Engineering) [1]. Многие задачи, с которыми приходится в настоящее время сталкиваться в научно-исследовательской и производственной сферах, не поддаются аналитическому решению либо требуют больших финансовых и временных затрат на экспериментальную реализацию по схеме «проектирование – изготовление – испытания». В то же время, прогресс в разработке численных методов и компьютерного моделирования позволил существенно расширить круг задач, доступных расчетному анализу. Полученные на основе методов CAE результаты используются практически во всех областях науки и техники. Одним из самых известных универсальных программных комплексов в области автоматического инженерного анализа является пакет ANSYS [2–4].

Авторы доклада с помощью программного модуля ANSYS FLUENT разработали расчетную модель процесса движения жидкости в теплообменном аппарате с естественной конвекцией для лабораторной установки «Изучение водо-воздушных теплообменников» на кафедре «Теплофизика и информатика в металлургии» института материаловедения и металлургии ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» [5].

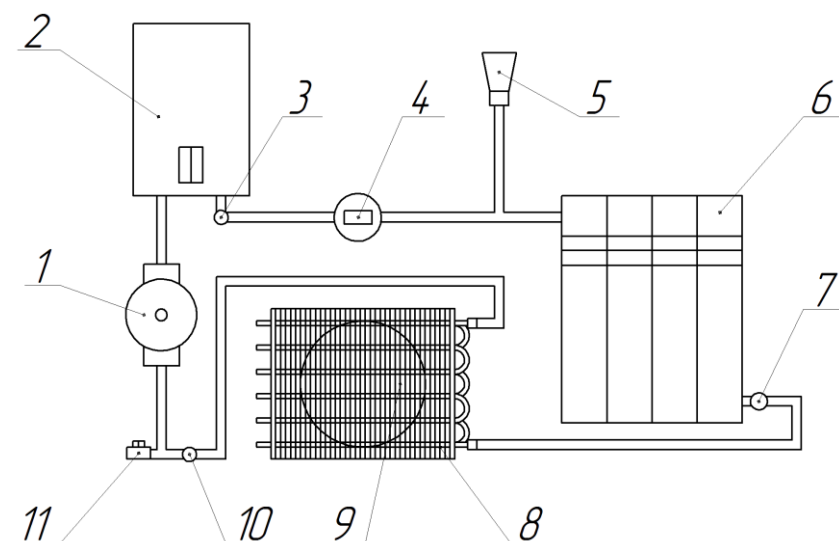
Целью исследования являлось компьютерное моделирование теплообменных процессов при движении жидкости в теплообменном аппарате с естественной конвекцией и

* Работа выполнена при финансовой поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.A03.21.0006.

The work was supported by Act 211 Government of the Russian Federation, contract № 02.A03.21.0006

сопоставление полученных расчетных значений с результатами экспериментальных исследований на лабораторной установке. Лабораторная установка предназначена для изучения студентами конструкции и принципов работы водо-воздушных теплообменников.

Основными элементами лабораторной установки (рисунок 1) являются теплообменный аппарат с естественной конвекцией и водо-воздушный теплообменник с вынужденной конвекцией. В данной работе рассмотрен теплообменный аппарат только с естественной конвекцией.



1 – циркуляционный насос подачи горячего теплоносителя; 2 – водонагреватель со ступенчатым управлением нагревом; 3 – термодатчик на входе в теплообменник с естественной конвекцией; 4 – счетчик расхода теплоносителя с импульсным выходом; 5 – заливочное устройство; 6 – теплообменник с естественной конвекцией; 7 – термодатчик на выходе из теплообменника естественной конвекции и на входе в теплообменник с вынужденной конвекцией; 8 – теплообменник с вынужденной конвекцией; 9 – термодатчик воздуха на выходе из теплообменника с вынужденной конвекцией; 10 – термодатчик на выходе из теплообменника с вынужденной конвекцией; 11 – сливной кран горячего теплоносителя

Рисунок 1 – Схема лабораторной установки

Центральным объектом при работе в пакете ANSYS Workbench является проект, представляющий собой совокупность геометрических, физических и конечно-элементных моделей тел задачи, для которой находят результат численного решения [3]. Проект может включать один или нескольких блоков, реализующих отдельные виды инженерного анализа и состоящих из элементов – структурных, отвечающих за определенный этап анализа.

В общем случае решение задачи инженерного анализа включает в себя следующие этапы:

1) создание расчетной модели (препроцессинг). Здесь создается геометрическая модель, задаются материал и его свойства, генерируется конечно-элементная сетка, определяются физические условия моделирования. В результате этого этапа получают модель, подготовленную для численного решения;

2) настройка решателя и решение. На этом этапе задаются настройки решателя, параметры, обеспечивающие сходимость итерационного процесса, и запускается решение задачи. Результатом этапа является численное решение;

3) обработка результатов (постпроцессинг). В этом этапе на базе полученного численного решения задачи выполняется визуализация распределения искомых физических величин. Конечным результатом этапа являются графики, массивы значений и т.д.

Построение геометрии объекта исследования выполнено в пакете ANSYS с помощью встроенного модуля Geometry Design. Модуль реализует современные методы моделирования плоской и трехмерной геометрии. Кроме стандартных инструментов геометрического моделирования Design Modeler имеет ряд специальных функций, позволяющих подготовить модель к инженерному анализу в ANSYS. Геометрическая модель водовоздушного теплообменника представлена на рисунке 2.

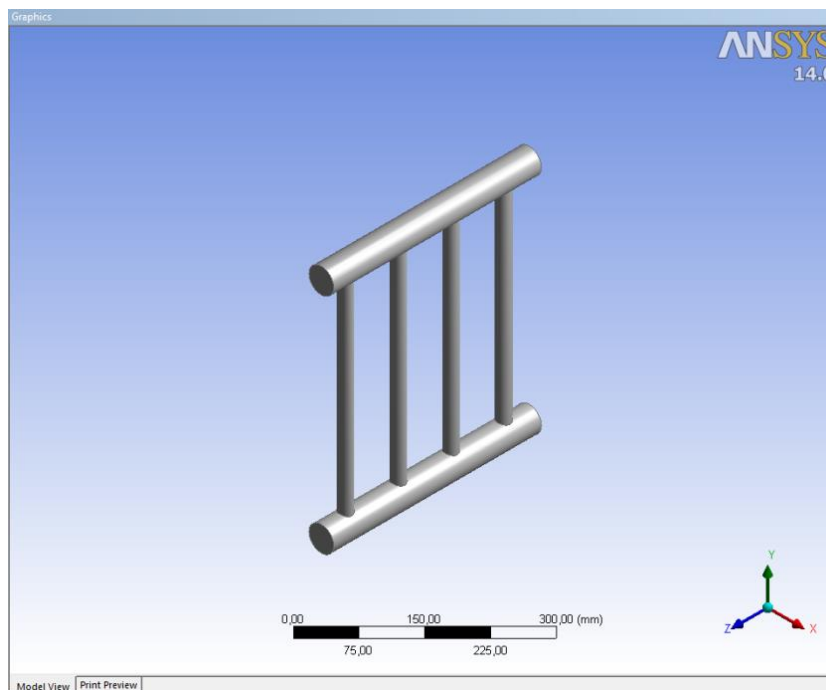


Рисунок 2 – Геометрическая модель, построенная в модуле Design Modeler

Создание сетки является неотъемлемой частью процесса компьютерного инженерного моделирования. Качество сеточной модели влияет на точность, сходимость и скорость получения решения. В работе использована трехмерная тетраэдральная расчетная сетка. Базовый размер ячейки составил $5 \cdot 10^{-3}$ м. Остальные параметры были заданы автоматически.

Численное решение задачи произведено с помощью программного модуля ANSYS FLUENT, решатель которого основан на методе конечных объемов [2]. При этом область течения разделяется на конечное множество контрольных объемов; в этом множестве контрольных объемов решаются уравнения сохранения массы, импульса, энергии и т.д.; уравнения в частных производных дискретизируются в систему алгебраических уравнений; в завершении осуществляется численное решение этих алгебраических уравнений в расчетной области. Интеграция модуля ANSYS FLUENT в рабочую среду ANSYS Workbench, а также возможность использования модуля ANSYS CFD-Post для обработки результатов создает комплексное решение для выполнения инженерного анализа в области моделирования течений жидкостей и газов.

В качестве начальных условий заданы: температура окружающей среды – 25°C, температура на входе в радиатор 48°C, атмосферное давление 101 325 Па. На входной границе задан расход воды из насоса – 0,7 л/мин или $0,00001167 \text{ м}^3/\text{с}$ (рисунок 3), коэффициент теплоотдачи $357 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

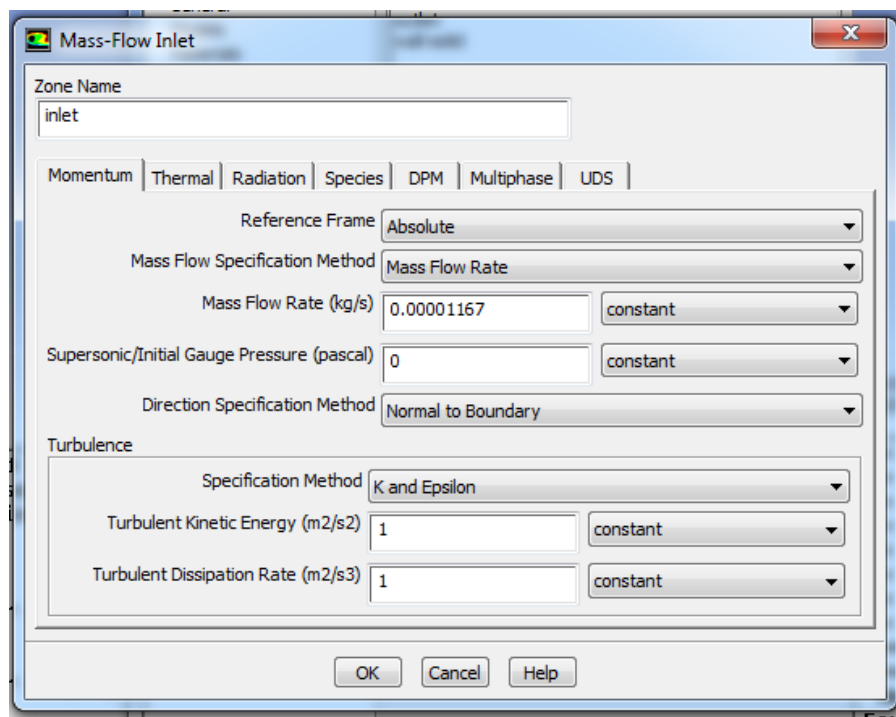


Рисунок 3 – Определение граничных условий для входа

Для проверки сходимости расчета использовался контроль текущих значений и невязок компонентов температуры. Кроме того, осуществлялся контроль массового расхода на входных и выходной границах. Относительная величина невязки не превысила 0,2% (рисунок 4).

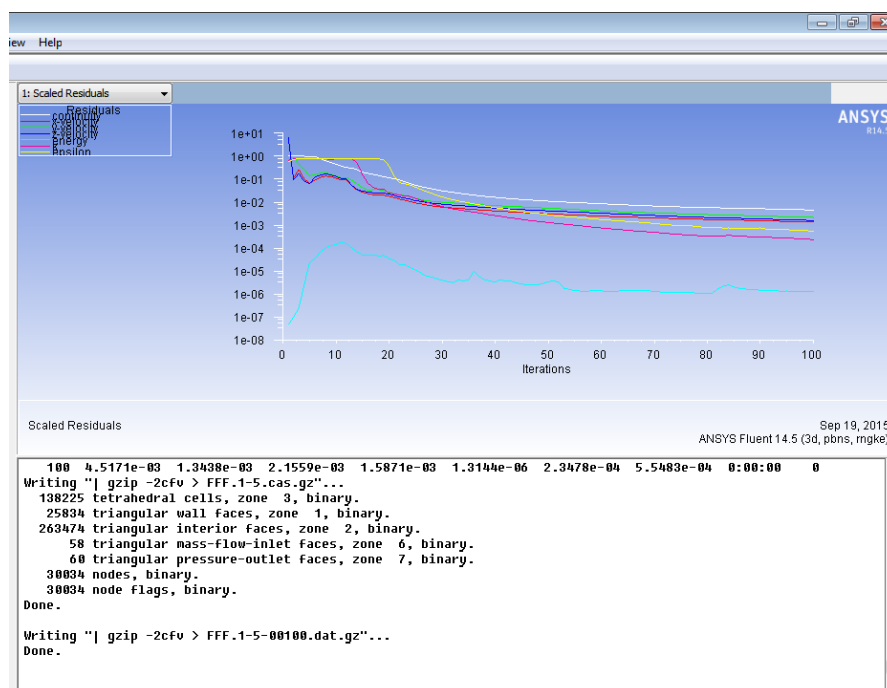


Рисунок 4 – Окно контроля процесса сходимости решения

Визуализация результатов распределения температуры жидкости в радиаторе для стационарного решения произведена с помощью модуля ANSYS CFD-Post. Фрагмент представлен на рисунке 5.

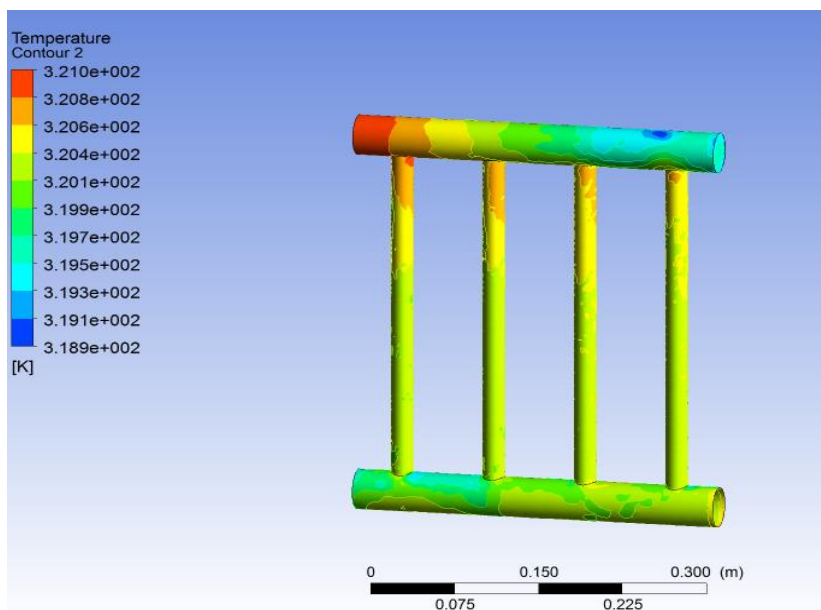


Рисунок 5 – Распределение температуры воды внутри радиатора

В результате расчета температура воды на выходе из радиатора составила 46,5 °С (319,5 К). Полученные в ходе компьютерного моделирования результаты согласуются с результатами экспериментального изучения теплообменных процессов в теплообменнике, выполненными авторами в соответствии с методикой проведения лабораторных работ. В частности, опытным путем была получена температура воды на выходе из радиатора 45,7 °С. Несущественную разницу между температурой, полученной экспериментально и в пакете ANSYS, можно объяснить потерями на нагрев металла между термопарой и входом в радиатор.

Разработанная компьютерная модель будет использована в учебном процессе при проведении лабораторных и практических работ соответствующих дисциплин для подготовки бакалавров и магистрантов по направлениям «Металлургия» и «Информационные системы и технологии».

Библиографический список

1. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К.Ли. – СПб.: Питер, 2004. – 560 с.
2. Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования: учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Информационные системы в математике и механике» / А.В. Жидков. Нижний Новгород, 2006. – 115 с.
3. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учеб. пособ. / В.А. Бруйка, В.Г. Фокин, Е.А. Солдусова [и др.]. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.
4. Численное исследование конвективных течений в пакете ANSYS: выпускная квалификационная работа бакалавра / Д.Ф. Ибраев. – Пермь: ПГНИУ, 2012. – 57 с.
5. Компьютерное моделирование водо-воздушных теплообменников в пакете ANSYS для проведения лабораторного практикума / Гребнева Н.В., Черемискина Н.А., Лавров В.В., Киселев Е.В. Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: Труды X Всероссийской научно-практической конференции (17–19 декабря 2015 г.). Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: изд. центр СибГИУ, 2015. С. 323–327.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАГРЕВА НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТРУБ*

Лисиенко В.Г., Маликов Г.К., Титаев А.А.

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента РФ Б.Н.Ельцина» (УрФУ)
г. Екатеринбург, Россия, alexander.titaev@gmail.com

Аннотация. В данной работе выполнен анализ теплофизических процессов в нагревательной печи для нагрева непрерывнолитых заготовок (НЛЗ) перед прокаткой труб. В соответствии с предложенной схемой модернизации конструкции подины печи проведены расчеты динамики и равномерности нагрева НЛЗ для различных вариантов конструкции подины. Предложенная модернизация была опробована на действующей кольцевой печи трубопрокатного цеха ОАО «Северский Трубный Завод». Отмечены достигнутые в процессе эксплуатации преимущества и недостатки.

Ключевые слова: нагревательная печь, нагрев непрерывнолитых заготовок, теплообмен излучением, зональный метод.

Abstract. The analysis of thermal processes in the heating furnace for treatment of continuous cast billets before tubes production is presented. In accordance with the proposed scheme of the modernization construction in the furnace floor calculations of the temperature dynamics and uniformity in concast billets are performed. The modernization was realized and tested on a working ring furnace at «Seversky Trubnyi Zavod» (Polevskoy). Advantages and disadvantages of this scheme are noted.

Keywords: heating furnace, treatment of concast billets, radiation heat exchange, zonal method.

Введение

В настоящее время широкое развитие получило использование расчетов, включающих математическое моделирование, как для проверки, так и для прогнозирования работы теплотехнических устройств (печей) в металлургии [2]. Использование моделирования позволяет существенно сократить этап опытной эксплуатации печей в плане подбора наилучших режимов нагрева изделий, а также оценить эффект от реализации тех или иных изобретений до их внедрения в производство.

В процессе работы была создана математическая модель кольцевой нагревательной печи для нагрева НЛЗ перед прокаткой, проведена адаптация модели с использованием опытных данных, определены показатели работы печи до и после модернизации конструкции подины, выполнены теплотехнические расчеты и оценки качества нагрева металла.

1. Технические данные кольцевой нагревательной печи

В процессе работы над проектом были изучены основные конструктивные и режимные параметры кольцевых печей (КП) трубопрокатного цеха №1 ОАО «Северский Трубный Завод» (г. Полевской) ТПЦ-1. Основные конструктивные и режимные параметры КП приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные конструктивные и режимные параметры кольцевой печи

Средний диаметр	24 м
Длина печи по средней линии	70,7 м
Ширина рабочего пространства	5,2 м
Высота рабочего пространства	2,04 м
Диаметр слитка	290-360 мм

* Работа выполнена при финансовой поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.А03.21.0006

Продолжение таблицы 1

Длина слитка	2300- 4500 мм
Вес	933 – 3596 кг
Количество заготовок в печи	122 заготовки
Расположение заготовок	однорядное
Производительность печи	До 90 т/ч
Температура нагрева	1200 - 1300
Число зон регулирования	5 + 1 не отапливаемая
Количество горелок	56
Температура подогрева воздуха	450-500
Максимальный расход газа	5400 м ³ /ч

2. Описание модернизации конструкции пода

Для улучшения прогрева заготовок в соответствии с патентом на полезную модель RU 128301 U1 «Устройство подины кольцевой нагревательной печи» (приоритет от 12.11.2012) [1] предложено усовершенствование подины печи, состоящее в установке на нее продольных выступов шириной 290мм и высотой 60мм, отстоящих друг от друга на расстоянии 350мм, выполненных из огнеупорного бетона (см. рисунок 1).

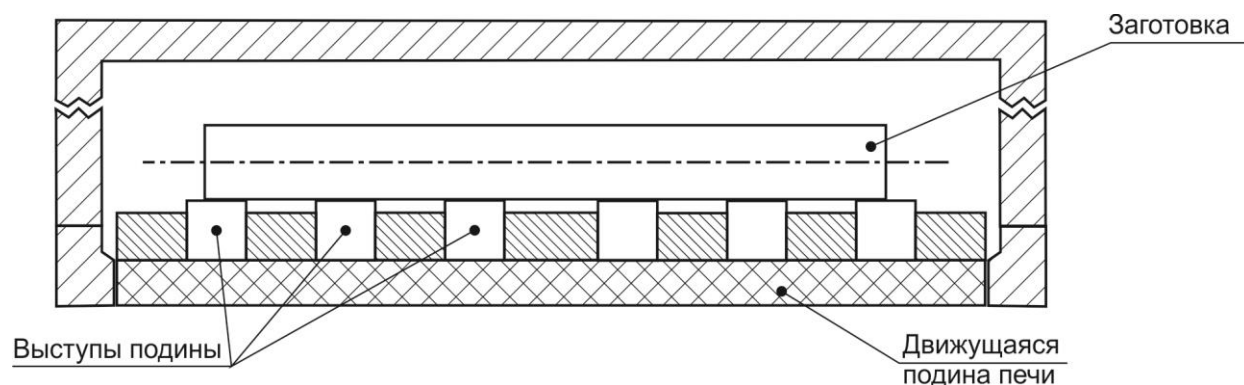


Рисунок 1 – Поперечный разрез печного пространства с модернизированной конструкцией подины

Данное усовершенствование позволяет увеличить эффективность прогрева труб, приподняв их над плоскостью пода печи. Также важной задачей является сохранение подины от образования углублений под весом заготовки, что значительно ухудшает процесс теплообмена между поверхностью заготовки и излучающими поверхностями.

Задачей моделирования является проверка эффективности данного усовершенствования и уточнение получаемых тепловых параметров режимов нагрева.

В качестве базовых режимов для моделирования нагрева с различной конструкцией подины были взяты два характерных режима, приведенные в таблице 2, с различной производительностью печи: 60 т/ч (типовая по результатам эксплуатации печи в линии проката) и 80 т/ч (близкая к максимальной для печи). Критерием получения удовлетворительных результатов нагрева является достижение к концу нагрева температуры всех участков заготовки не ниже $1280^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$ (в соответствии с заданной температурой последней зоны и указанным в технических характеристиках печи допуском). Сопутствующий анализ выполняется по параметру максимального разброса температуры по толщине заготовки в течение ее нагрева в печи.

Таблица 2. Режимы нагрева для расчета различных вариантов конструкции подины печи

Производительность, т/ч		60	80
Диаметр заготовок, мм		360	360
Длина заготовок, мм		2300	2300
Марка стали		20	20
Заданные температуры в зонах печи, °С	1	1170	1170
	2	1285	1285
	3	1295	1295
	4	1285	1285
	5	1280	1280

3. Методика расчета параметров нагрева НЛЗ

Для достижения вышеуказанных целей была построена математическая модель кольцевой печи нагрева НЛЗ, отражающая теплообмен в печи посредством излучения, конвекции, теплопроводности и движения газообразного теплоносителя (продуктов сгорания природного газа) в печном пространстве.

Основным механизмом теплообмена в печах нагрева трубной заготовки является теплообмен излучением [3]. В качестве метода расчета теплообмена излучением был использован хорошо зарекомендовавший себя на практике зональный метод [4]. Модель печи по длине была разбита на 12 расчетных участков. Каждый участок включает в себя 10 поверхностных и 2 объемные зоны. Каждая заготовка имеет 5 поверхностных зон, из которых 4 зоны соответствуют поду, верхней боковой части, нижней боковой части, своду заготовки соответственно, а одна зона моделирует одну или две торцевых поверхности заготовки. Отдельные зоны моделируют торцевые поверхности печи.

Пример расчетной сетки одного из участков печи и сетки узлов для моделирования теплопередачи внутри заготовки приведены на рисунке 2.

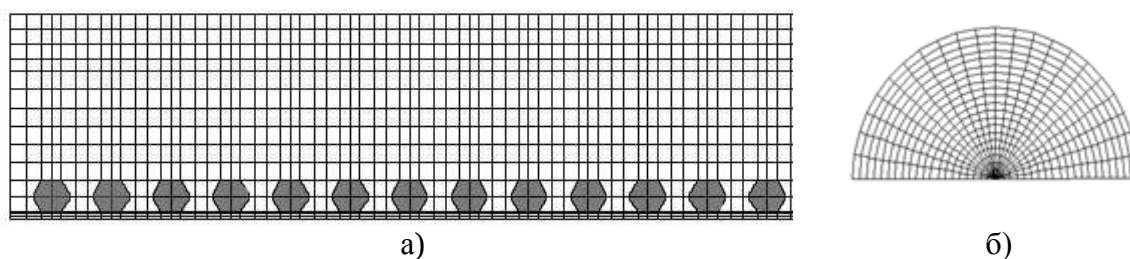


Рисунок 2 – Расчетная сетка для участка печи с заготовками (а) и отдельной заготовки (б)

4. Результаты расчета

Результаты моделирования динамики нагрева различных участков заготовки для одного из выбранных режимов (с производительностью 80 т/ч) представлены на рисунке 3.

Для режима с производительностью печи 60 т/ч при условии использования плоской подины установлено, что на выходе из печи заготовка имеет температуру не ниже 1280°С для самого холодного своего участка (по модели – зона пода заготовки). Разброс температуры по поверхности и толщине заготовки составляет 30°С на выходе из печи (1280..1310°С). Максимальный разброс температуры по поверхности и толщине заготовки при нагреве составляет 359°С (691..1050°С). При использовании модернизированной конструкции подины в конце печи заготовка имеет температуру не ниже 1300°С для са-

мого холодного своего участка (по модели – зона оси заготовки). Разброс температуры по поверхности и толщине заготовки составляет 10°C на выходе из печи (1300..1310°C). Максимальный разброс температуры по поверхности и толщине заготовки составляет 217°C (793..1010°C) через 89 минут после начала нагрева. Также за счет лучшего прогрева заготовки, лежащей на ребрах подины, возможно увеличение производительности на 7-8% без потери качества нагрева.

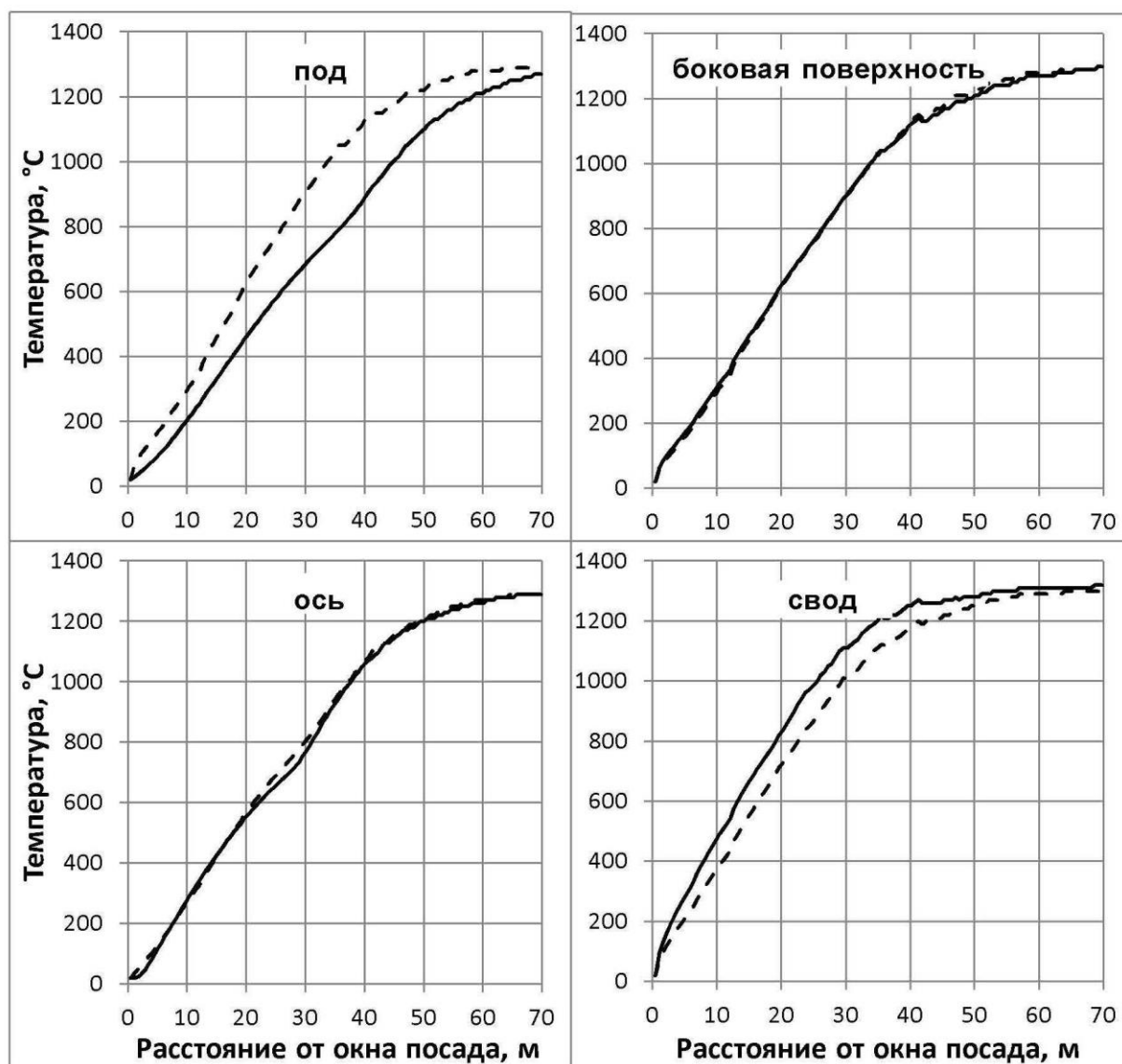


Рисунок 3 – Сравнение динамики нагрева различных участков НЛЗ диаметром 360мм из стали 20 при плоской конструкции подины печи (сплошные линии) и при модернизированной (штриховые линии). Производительность 80 т/ч

В случае работы с производительностью 80 т/ч при условии использования плоской подины в конце нагрева заготовка будет иметь температуру не ниже 1270°C для самого холодного своего участка (по модели – зона пода заготовки). Разброс температуры по поверхности и толщине заготовки составляет 50°C на выходе из печи (1270..1320°C). Максимальный разброс температуры по поверхности и толщине заготовки составляет 436°C (664..1100°C) через 69 мин после начала нагрева. Модернизированная конструкция подины позволяет повысить температуру заготовки до 1300°C для самого холодного своего участка (по модели – зона оси заготовки). Разброс температуры по поверхности и

толщине заготовки составляет 10°C на выходе из печи (1290..1300°C). Максимальный разброс температуры по поверхности и толщине заготовки составляет 220°C (790..1010°C) через 69 минут после начала нагрева.

Таким образом, установка выступов на подине печи позволяет уменьшить максимальный разброс температур по поверхности и толщине заготовки практически в 2 раза (с 436°C до 220°C), увеличив при этом производительность печи на 7–8% . Также необходимо отметить, что наиболее холодной зоной заготовки для укладки на плоской подине является зона соприкосновения заготовки с подиной (под заготовки). В случае изменения конструкции подины зоной с наименьшей температурой становится зона центральной части заготовки.

Заключение

Моделирование усовершенствования работы кольцевой печи дл нагрева НЛЗ показало, что установка выступов на подине печи позволяет уменьшить максимальный разброс температур по поверхности и толщине НЛЗ практически в 2 раза (с 436°C до 220°C), увеличив при этом производительность на 7–8% без дополнительных затрат топлива. Внедрение усовершенствования в производство позволило сократить на 3,5% удельный расход топлива и повысить общую эффективность нагрева путем предотвращения образования углублений в подине под весом заготовки.

Библиографический список

1. Топоров В. А., Губин Ю. Г., Щипанов М. А., Лисиенко В. Г., Засухин А. Л. Патент на полезную модель RU 128301 U1 «Устройство подины кольцевой нагревательной печи» (приоритет от 12.11.2012).
2. Лисиенко В.Г. Совершенствование и повышение эффективности энерготехнологий и производств (интегрированный энерго-технологический анализ: теория и практика). Т.1, -М: Теплотехник, 2008. – 608с.
3. Невский А.С. Лучистый теплообмен в печах и топках.-М: Metallurgy, 1971.-440с.
4. Лисиенко В.Г., Журавлев Ю.А., Катаев Б.И. Анализ локальных характеристик внешнего теплообмена в высокотемпературной пламенной печи. Известия ВУЗов. Черная металлургия. 1973, №6. – с.131-135.

УДК 669-5

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА ANSYS ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА СТУДЕНТОВ*

Черемискина Н.А., Гребнева Н.В., Лавров В.В., Киселев Е.В.

*ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
г. Екатеринбург, Россия, n_cheremiskina@mail.ru*

Аннотация. В докладе использованы элементы автоматизированного инженерного анализа тепловых режимов пластинчатого теплообмена с использованием пакета ANSYS (модуль ANSYS FLUENT). Авторами разработана компьютерная модель пластинчатого теплообменника для лабораторной установки, используемой студентами металлургических специальностей при изучении курса «Теплотехника». Полученные в ходе компьютерного моделирования результаты согласуются с результатами экспериментального изучения теплообменных процессов в теплообменнике.

* Работа выполнена при финансовой поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.А03.21.0006.

The work was supported by Act 211 Government of the Russian Federation, contract № 02.А03.21.0006

Ключевые слова: ANSYS, моделирование, пластинчатый теплообменник, автоматизация, инженерный анализ, лабораторный практикум.

Abstract. The report uses elements of computer-aided engineering analysis of thermal conditions of a plate heat exchange with the use of ANSYS package (ANSYS FLUENT module). The authors have developed a computer model of a plate heat exchanger for a laboratory used by the metallurgical professions students in the study of the course «heat engineering» The findings of the computer simulation results are consistent with the results of an experimental study of heat transfer processes in a heat exchanger.

Keywords: ANSYS, modelling, plate heat exchanger, automation, engineering analysis, laboratory practical work.

Использование в инженерной практике современных систем автоматизации инженерных (CAE, Computer Aided Engineering) совместно с системами автоматического проектирования (CAD, Computer Aided Design) существенно ускоряет весь цикл разработки и изготовления новых конструкций теплотехнических устройств [1; 2]. Быстрое выполнение инженерных расчетов позволяет своевременно вносить в проект изменения на основе полученных результатов и исключить необходимость внесения дорогостоящих проектных изменений на поздних этапах проектирования. Совместное использование имитационного компьютерного моделирования и физических лабораторных испытаний позволяет получить большую уверенность в результатах анализа и сократить количество физических прототипов.

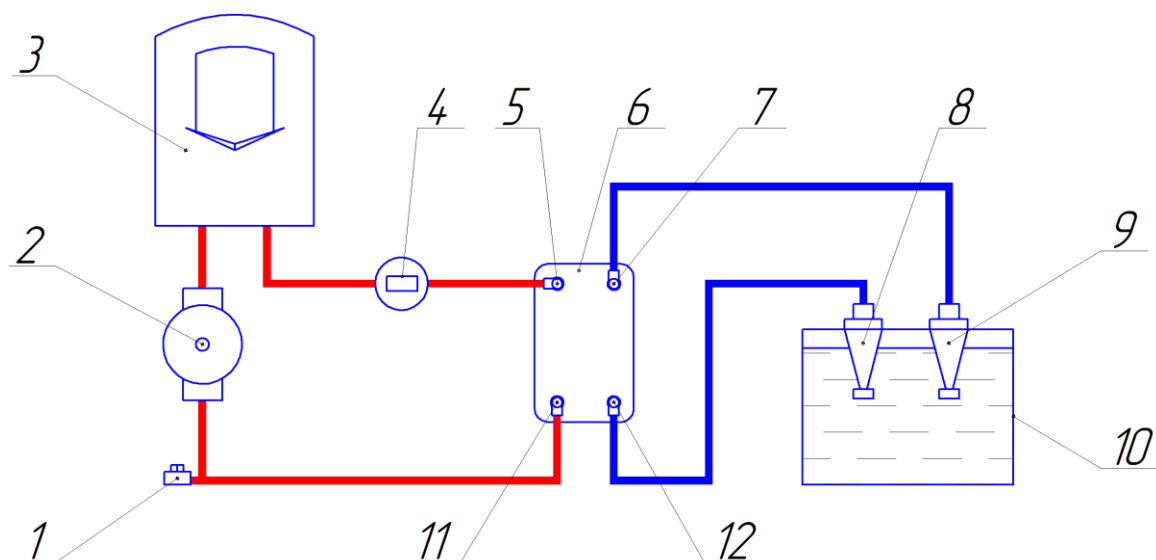
Для обучения студентов навыкам компьютерного инженерного анализа теплотехнических устройств на кафедре «Теплофизика и информатика в металлургии» института материаловедения и металлургии ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» используется программный комплекс ANSYS Academic Teaching Advanced.

В докладе представлена расчетная модель для лабораторной установки «Испытание пластинчатого теплообменника», выполненная в программном модуле ANSYS FLUENT. Целью исследования является компьютерное моделирование теплообменных процессов при движении жидкости в пластинчатом теплообменном аппарате и сопоставление полученных расчетных значений с результатами экспериментальных лабораторных исследований. Конструкция и принцип работы пластинчатого теплообменника изучаются студентами в курсе «Теплотехника» на лабораторной установке, представленной на схеме (рисунок 1) [3].

Основным элементом теплообменника являются теплопередающие пластины, изготовленные из коррозионно-стойких сплавов толщиной 0,4–1,0 мм методом холодной штамповки (рисунок 2). Пластины плотно прижаты друг к другу и образуют щелевые каналы. Два из четырех отверстий в пластине обеспечивают подвод и отвод греющей или нагреваемой среды к каналу. Два других отверстия, дополнительно изолированы малыми контурами, предотвращающими смешение (переток) греющей и нагреваемой сред. Для предупреждения смешивания сред в случае прорыва одного из малых контуров прокладки предусмотрены дренажные пазы.

Пространственное извилистое течение жидкости в каналах способствует турбулизации потоков, а противоток между нагреваемой и греющей средой способствует увеличению температурного напора и, как следствие, интенсификации теплообмена при сравнительно малых гидравлических сопротивлениях.

Основной платформой решения задачи в пакете ANSYS является проект ANSYS Workbench, представляющий собой совокупность геометрических, физических и конечно-элементных моделей тел задачи, для которой находят результат численного решения [4; 5].



1 – сливной кран горячего теплоносителя, 2 – циркуляционный насос подачи горячего теплоносителя, 3 – водонагреватель со ступенчатым управлением нагревом, 4 – счетчик расхода горячего теплоносителя с импульсным выходом, 5 – датчик температуры горячего теплоносителя на входе в теплообменник Т1, 6 – пластинчатый теплообменник, 7 – датчик температуры горячего теплоносителя, 7 – датчик температуры холодного теплоносителя Т3, 8 – насос подачи холодного теплоносителя противотоком, 9 – насос подачи холодного теплоносителя прямотоком, 10 – резервуар холодного теплоносителя, 11 – датчик температуры горячего теплоносителя на входе теплообменника Т2, 12 – датчик температуры холодного теплоносителя Т4

Рисунок 1 – Схема лабораторной установки

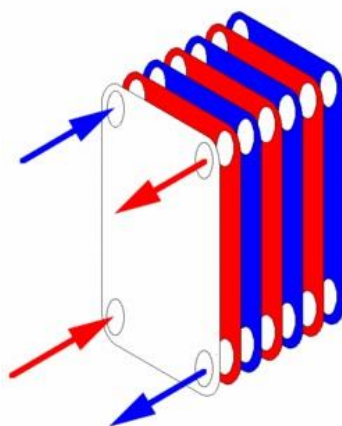


Рисунок 2 – Упрощенная схема пластинчатого теплообменника

Решение задачи инженерного анализа включает в себя следующие основные этапы:

1) создание геометрии расчетной модели (препроцессинг). Здесь создается геометрическая модель, задаются материал и его свойства, генерируется конечно-элементная сетка, определяются физические условия моделирования. В результате этого этапа получают модель, подготовленную для численного решения;

2) настройка решателя и решение. На этом этапе задаются настройки решателя, параметры, обеспечивающие сходимость итерационного процесса, и запускается решение задачи. Результатом этапа является численное решение;

3) обработка и представление результатов моделирования (постпроцессинг). В этом этапе на базе полученного численного решения задачи выполняется визуализация распределения искомых физических величин. Конечным результатом этапа являются графики, массивы значений и т.д.

Пакет ANSYS позволяет интегрировать в модули расчетов твердотельные модели из сторонних CAD-систем (Компас, AutoCAD и др.). Однако для более углубленного изучения пакета было решено создать модель пластинчатого теплообменника во встроенном графическом редакторе Geometry ANSYS Workbench. Модуль реализует современные методы моделирования плоской и трехмерной геометрии. Кроме стандартных инструментов геометрического моделирования Geometry Design Modeler имеет ряд специальных функций, позволяющих подготовить модель к инженерному анализу в ANSYS. Геометрическая модель пластинчатого теплообменника представлена на рисунок 3.

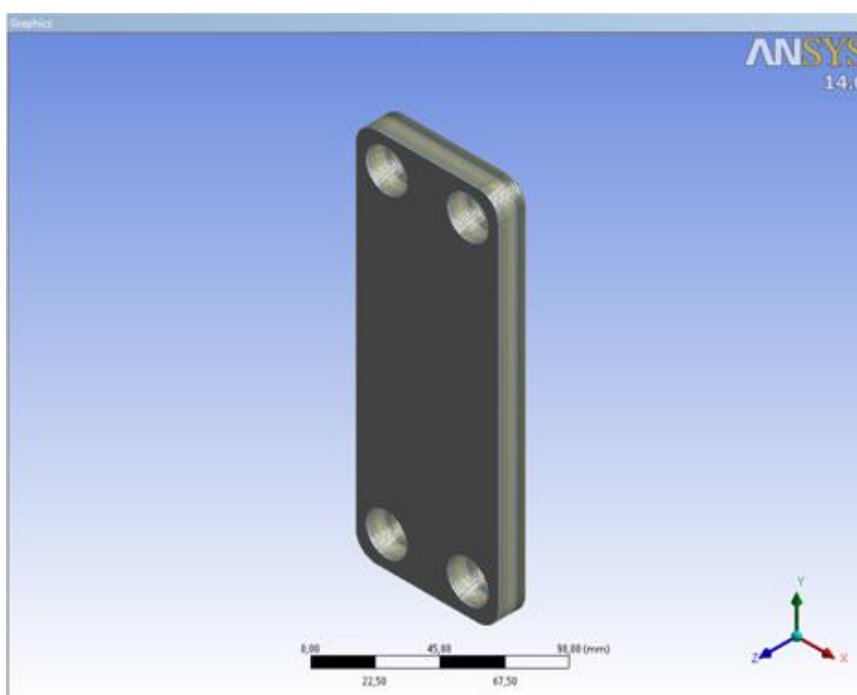


Рисунок 3 – Геометрическая модель, построенная в модуле Geometry Design Modeler

Первым этапом процесса компьютерного инженерного моделирования является создание сетки. Качество сеточной модели влияет на точность, сходимость и скорость получения решения. Изначально сетка имеет ячейки треугольной формы, но для более точного расчета используется трехмерная тетраэдральная сетка, с размером ячейки $5 \cdot 10^{-3}$ м. Остальные параметры были оставлены без изменений.

Численное решение задачи произведено с помощью программного модуля ANSYS FLUENT, решатель которого основан на методе конечных объемов [2]. При этом область течения разделяется на конечное множество контрольных объемов; в этом множестве контрольных объемов решаются уравнения сохранения массы, импульса, энергии и т.д.; уравнения в частных производных дискретизируются в систему алгебраических уравнений; в завершении осуществляется численное решение этих алгебраических уравнений в расчетной области. Интеграция модуля ANSYS FLUENT в рабочую среду ANSYS Workbench, а также возможность использования модуля ANSYS CFD-Post для обработки

результатов создает комплексное решение для выполнения инженерного анализа в области моделирования течений жидкостей и газов.

Начальными условиями были заданы: температура окружающей среды – 27°C, температура горячего теплоносителя на входе в пластинчатый теплообменник – 34,8°C, температура холодного теплоносителя на входе – 36,8°C, атмосферное давление – 101 325 Па. Расход воды из насоса на входной границе – 0,7 л/мин или 0,0001167 м³/с, коэффициент теплоотдачи – 587 Вт/м²·°C. Для проверки сходимости расчета использовался контроль текущих значений и невязок компонентов температуры. Кроме того, осуществлялся контроль массового расхода на входных и выходной границах. Относительная величина невязки не превысила 0,2% (рисунок 4).

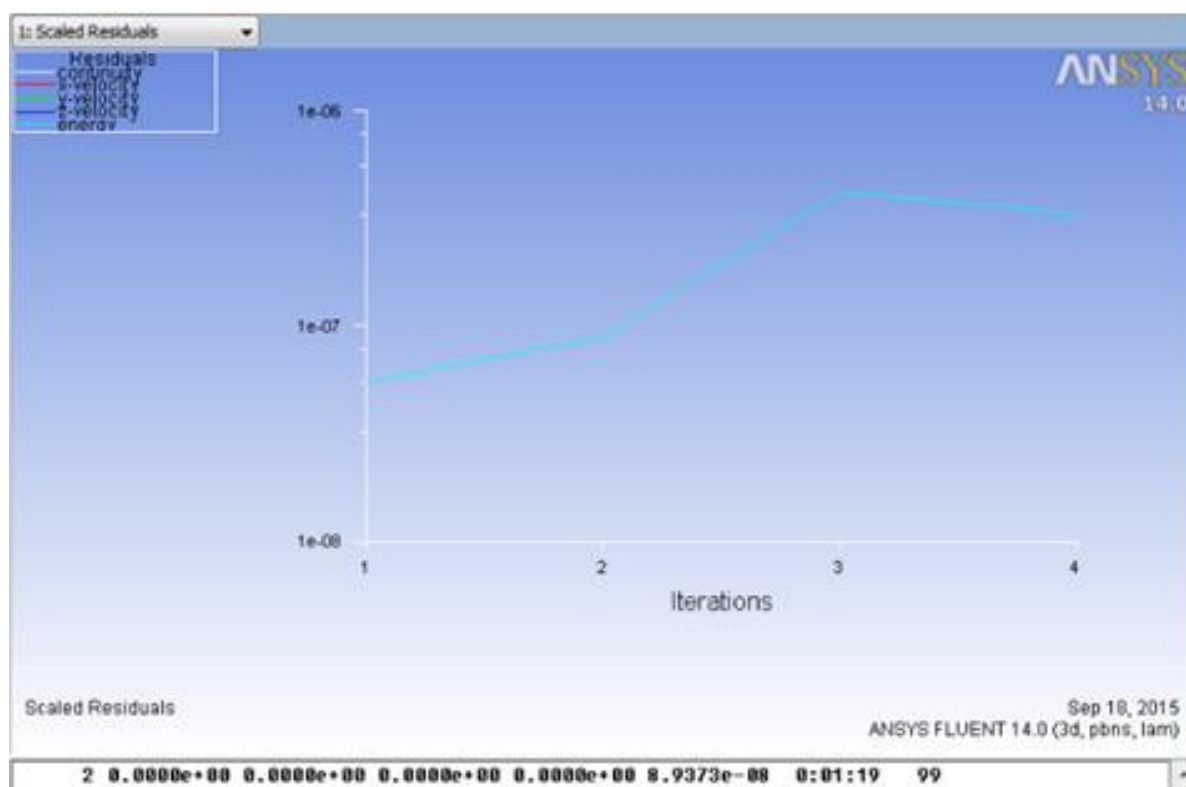


Рисунок 4 – Окно контроля процесса сходимости решения

Визуализация результатов распределения температуры жидкости в пластинчатом теплообменнике для стационарного решения произведена с помощью модуля ANSYS CFD-Post. Фрагмент представлен на рисунке 5.

В результате расчета температура горячей воды на выходе из пластинчатого теплообменника составила 37°C (310 K), температура холодной воды – 32°C (305 K).

Полученные в ходе компьютерного моделирования результаты согласуются с результатами экспериментального изучения теплообменных процессов в теплообменнике, выполненными авторами в соответствии с методикой проведения лабораторных работ. Несущественную разницу между температурой, полученной экспериментально и в пакете ANSYS, можно объяснить потерями на нагрев металла между термпарой и входом в теплообменник.

Разработанная компьютерная модель будет использована в учебном процессе при проведении лабораторных и практических работ соответствующих дисциплин для подготовки бакалавров и магистрантов по направлениям «Металлургия» и «Информационные системы и технологии».

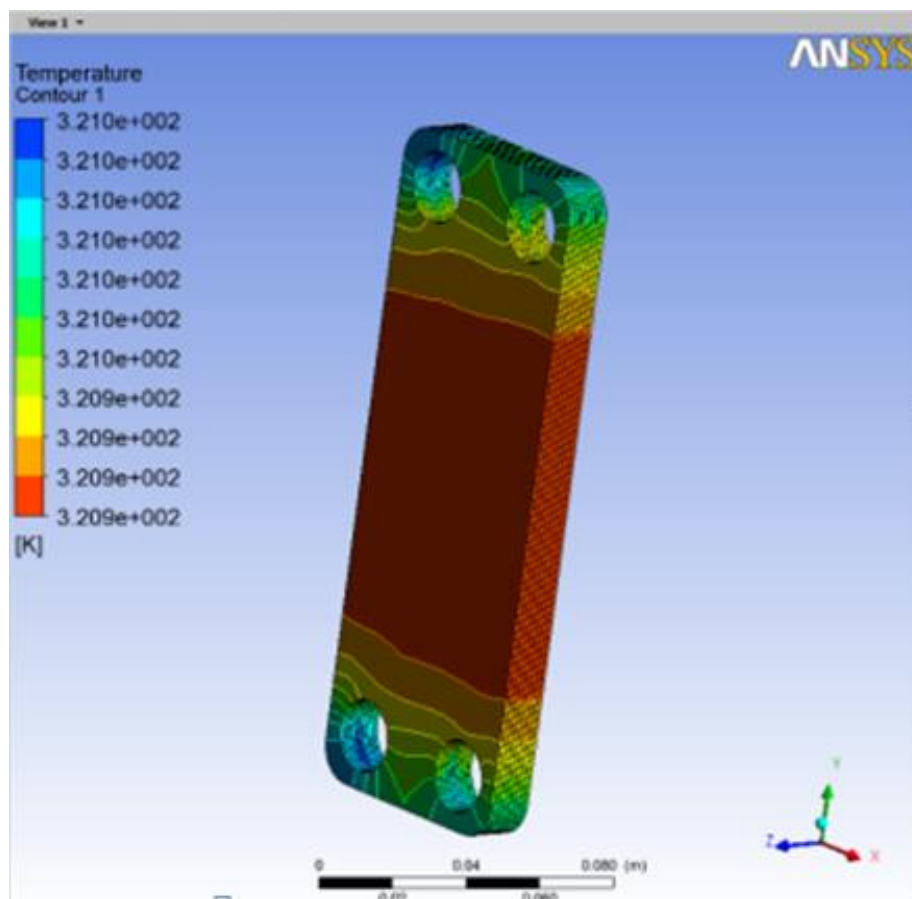


Рисунок 5 – Распределение температуры воды внутри пластинчатого теплообменника

Библиографический список

1. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К.Ли. – СПб.: Питер, 2004. – 560 с.
2. Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования: учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Информационные системы в математике и механике» / А.В. Жидков. Нижний Новгород, 2006. – 115 с.
3. Компьютерное моделирование процессов теплообмена в пакете ANSYS для проведения лабораторного практикума при испытании пластинчатого теплообменника / Черемискина Н.А., Гребнева Н.В., Лавров В.В., Киселев Е.В. Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: Труды X Всероссийской научно-практической конференции (17–19 декабря 2015 г.). Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк: изд. центр СибГИУ, 2015. С. 327–331.
4. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учеб. пособ. / В.А. Бруяка, В.Г. Фокин, Е.А. Солдусова [и др.]. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 271 с.
5. Инженерный анализ в ANSYS Workbench. Ч.2: учеб. пособ. / В.А. Бруяка, В.Г. Фокин, Я.В. Кураева. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 149 с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ МЕТАНА

Рыбенко И.А., Буинцев В.Н.

ФГОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет»
г. Новокузнецк, Россия, rybenkoi@rambler.ru

Аннотация. В работе представлены результаты математического моделирования процесса горения метана в замкнутом пространстве. Особое внимание уделено наиболее опасному диапазону концентраций метана – от 0% до 20%. Рассчитаны последствия реакции горения метановоздушной смеси, такие как температура и давление. Приведен состав продуктов горения для исследуемого диапазона концентрации метана в смеси с воздухом атмосферы в замкнутом объеме.

Ключевые слова: Математическое моделирование, горение метана, последствия реакции, продукты горения.

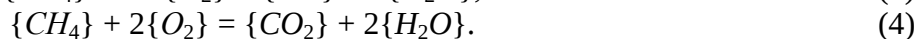
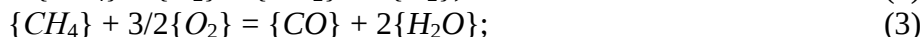
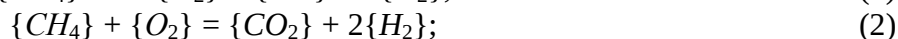
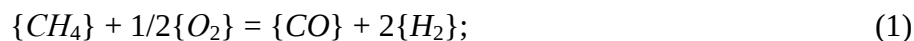
Abstract. The results of mathematical modeling of methane combustion in an enclosed space. Particular attention is given to the most dangerous methane concentrations range from 0% to 20%. Calculated the effects of methane combustion reaction mixtures such as temperature and pressure. Shows the composition of the combustion products for the test range of concentration of methane in the mixture with air in a confined space atmosphere.

Keywords: mathematical modeling, combustion of methane, the effects of the reaction, the products of combustion.

Кузбасс является главным стратегическим угольным бассейном страны. На его долю приходится 55 % общего объема российской добычи угля, в том числе 83 % особо ценных коксующихся марок. Две трети угля добывается подземным способом. По словам губернатора Кемеровской области А.Г. Тулеева: «Имеется скорбная статистика – на один миллион добытого угля приходится одна человеческая жертва». К наиболее тяжким последствиям приводят взрывы газа и угольной пыли в подземных выработках шахт.

К сожалению, взрывы газа и пыли на угольных шахтах России, особенно в последние годы, стали доминирующими травмирующими факторами по сравнению с другими видами аварий с групповыми несчастными случаями. Нормативная база, регламентирующая безопасность ведения горных работ на угольных шахтах по пылегазовому фактору, основывается на исследованиях, выполненных в прошлом веке [1]. За последние годы существенно изменилась технология подземной угледобычи, что отрицательно сказалось на факторах риска взрывов газа и угольной пыли. Об этом свидетельствует ряд аварий с массовой гибелью людей, происшедших за последние 15 лет на шахтах Кузбасса: «Ульяновская», «Юбилейная», «Распадская». В связи с этим была и остается актуальной задача исследования причин и последствий взрывов метана на угольных предприятиях.

Процесс горения метана можно представить реакциями:



Реакции (1) – (3) представляют собой реакции неполного горения или конверсии метана при избыточной концентрации метана в воздухе. Реакция (4) – реакция полного горения протекает при избытке кислорода при низких концентрациях метана в воздухе.

Рассмотрим механизм горения метана в замкнутом пространстве. Принимает объем реактора равным V_p м³. В объеме реактора будут находиться n_{O_2} и n_{N_2} молей кислорода и азота соответственно.

Пусть концентрация метана в воздухе составляет k %. При такой концентрации количество молей метана соответственно равно:

$$n_{CH_4,мет} = \frac{k \cdot V}{100 \cdot (100 - k) \cdot 0,0224}, \quad (5)$$

где V – объем реактора, м³.

С использованием методики, изложенной в работах [2 – 6], рассчитываем состав продуктов горения. Принимаем, что первоначально метан сгорает до CO и H_2 по реакции (1). Если в реакторе удвоенное количество молей кислорода превышает количество молей метана, то количество молей образовавшегося в результате конверсии метана CO определяется числом молей метана, а иначе удвоенным количеством молей кислорода:

$$\text{Если } 2n_{O_2,исх} > n_{CH_4,исх}, \text{ то } n_{CO,мет} = n_{CH_4,исх}, \text{ иначе } n_{CO,мет} = 2n_{O_2,исх}. \quad (6)$$

На образование CO в результате конверсии будет израсходовано $n_{CH_4,мет} = n_{CH_4,исх} - n_{CO,мет}$ молей метана и затрачено молей кислорода.

В результате конверсии метана также образуется водород. Количество молей водорода в реакторе определяется следующим образом:

$$n_{H_2,мет} = 2n_{CO,мет}. \quad (7)$$

Если в реакторе после конверсии метана остался кислород, то часть или весь оксид углерода догорит до CO_2 , а H_2 – до H_2O по реакциям:



Если $n_{O_2,исх} - n_{O_2,мет} > n_{CO,мет} + n_{CO,исх} + n_{H_2,мет} + n_{H_2,исх}$, то $n_{CO,гор} = n_{CO,мет} + n_{CO,исх}$ и $n_{H_2,гор} = n_{H_2,мет} + n_{H_2,исх}$, иначе $n_{CO,гор} = 2(n_{O_2,исх} - n_{O_2,мет})/3$ и $n_{H_2,гор} = 4(n_{O_2,исх} - n_{O_2,мет})/3$. (10)

На дожигание CO и водорода будет затрачено $n_{O_2,гор} = n_{CO,гор} + n_{H_2,гор}$ молей кислорода.

В результате дожигания образуется CO_2 и H_2O :

$$n_{CO_2,гор} = n_{CO,гор} \text{ и } n_{H_2O,гор} = n_{H_2,гор}. \quad (11)$$

В результате протекания реакций горения в реакторе будут находиться следующие вещества: CO , CO_2 , N_2 , H_2 , H_2O , CH_4 , O_2 .

Состав продуктов горения определяется по уравнениям (12):

$$\begin{aligned} n_{CO} &= n_{CO,мет} - n_{CO,гор}; \\ n_{CO_2} &= n_{CO_2,гор}; \\ n_{N_2} &= n_{N_2,исх}; \\ n_{H_2} &= n_{H_2,мет} - n_{H_2,гор}; \\ n_{H_2O} &= n_{H_2O,гор}; \\ n_{CH_4} &= n_{CH_4,исх} - n_{CH_4,мет}; \\ n_{O_2} &= n_{O_2,исх} - n_{O_2,мет} - n_{O_2,гор}. \end{aligned} \quad (12)$$

Масса и объем i -го компонента смеси определяются в соответствии с формулами (13 – 14):

$$G_i = n_i \cdot M_i; \quad (13)$$

$$V_i = \frac{n_i}{\sum_{j=1}^N n_j} \cdot V_p, \quad (14)$$

где M_i – молярная масса i -го компонента, кг/моль;

V_p – объем реактора, м³;

N – число компонентов газовой фазы.

Далее рассчитываем тепловой баланс процесса.

Приходную часть тепла составляют тепловые эффекты независимых реакций перехода системы из начального состояния в конечное, к которым можно отнести реакцию конверсии метана (1) и дожигания CO (8) и H_2 (9) [7 – 10]. Суммарный тепловой эффект от экзотермических реакций можно рассчитать следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta H_{x.p.} = & \Delta H_{CH_4} (n_{CH_4^{уч}} - n_{CH_4}) + \\ & + \Delta H_{CO} (n_{CO_2} - n_{CO_2^{уч}}) + \Delta H_{H_2} (n_{H_2O} - n_{H_2O^{уч}}), \end{aligned} \quad (15)$$

где $\Delta H_{CH_4}, \Delta H_C, \Delta H_{CO}, \Delta H_{H_2}$ – стандартные тепловые эффекты реакций конверсии метана, дожигания CO и H_2 соответственно, кДж/моль.

С учетом стандартных тепловых эффектов можно записать

$$\begin{aligned} \Delta H_{x.p.} = & 149 \cdot (n_{CH_4^{уч}} - n_{CH_4}) + \\ & + 283 \cdot (n_{CO_2} - n_{CO_2^{уч}}) + 252 \cdot (n_{H_2O} - n_{H_2O^{уч}}). \end{aligned} \quad (16)$$

Тепло экзотермических реакций затрачивается на нагрев продуктов.

Энтальпия нагрева продуктов соответственно определяется:

$$\begin{aligned} \Delta H_{нагр} = & \Delta H_{CH_4}^0 n_{CH_4} + \Delta H_{CO}^0 n_{CO} + \Delta H_{CO_2}^0 n_{CO_2} + \Delta H_{H_2}^0 n_{H_2} + \\ & + \Delta H_{H_2O}^0 n_{H_2O} + \Delta H_{O_2}^0 n_{O_2} + \Delta H_{N_2}^0 n_{N_2} + \Delta H_A^0 n_A. \end{aligned} \quad (17)$$

Расчет энтальпии нагрева определяется при произвольной температуре. Затем формируется целевая функция невязки теплового баланса $\varepsilon = \Delta H_{прих} - \Delta H_{расх} = \Delta H_{x.p.} - \Delta H_{нагр}$, и с использованием встроенного оптимизатора табличного процессора Excel определяется температура, при которой невязка будет равна нулю.

Далее, при известной температуре, рассчитывается давление в реакторе:

$$P = \frac{\sum_{j=1}^N n_j \cdot RT}{1000 \cdot V}, \quad (18)$$

где R – универсальная газовая постоянная, кДж/кг·К.

Рассмотренная модель была реализована в MS Excel. На рисунке 1 приведены результаты расчета температуры и давления (а), а также концентрации продуктов горения (б) в замкнутом реакторе при сжигании метана в диапазоне концентраций от 0% до 40%.

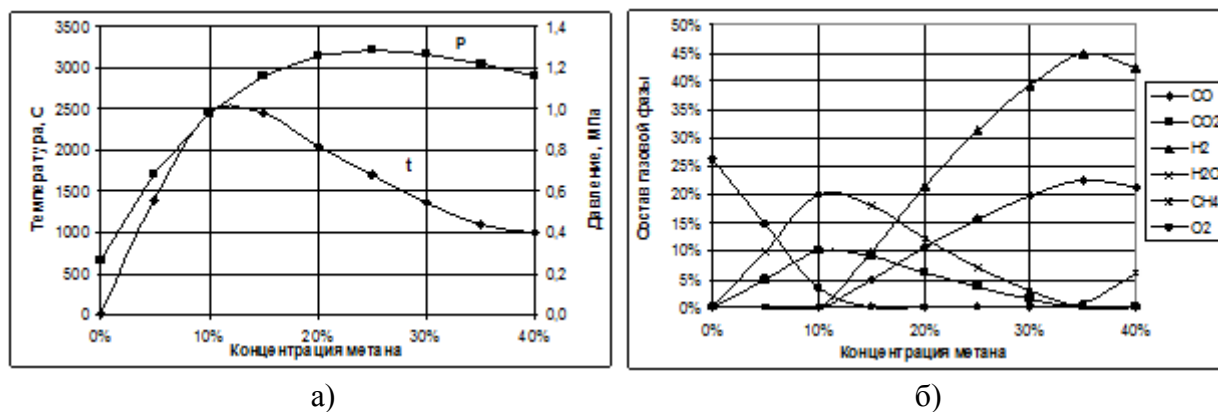


Рисунок 1 – Результаты моделирования процесса горения метана

Библиографический список

1. Джигрин А.В. Предупреждение и локализация взрывов газа и пыли в угольных шахтах / А. В. Джигрин, Г. А. Поздняков, А. И. Новосельцев [и др.] // Безопасность труда в промышленности. – 2009. – № 4. – С. 22 – 26.
2. Рыбенко И. А. Разработка методики и системы расчета вариантов технологий непрерывного получения металла в агрегатах струйно-эмульсионного типа : дис. канд. техн. наук : спец. 05.16.02 : защищена 28.03.00 : утв. 14.06.00 / И. А. Рыбенко. – Новокузнецк, 2000. – 165 с. : ил.
3. Рыбенко И. А. Методика и система расчета и оптимизации статических стационарных режимов технологических процессов / И. А. Рыбенко, С. П. Мочалов, П. С. Мочалов // Металлургия: технологии, управление, инновации, качество: тр. XVII всерос. науч.-практ. конф. / под ред. Е.В. Протопопова : Сиб. гос. индустр. ун-т. –Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2013. – С. 29 – 32.
4. Рыбенко И. А. Технология моделирования и оптимизации стационарных режимов производственных процессов / И. А. Рыбенко, С. П. Мочалов // Векторы развития современной науки : материалы междунар. науч.-практ. конф. Часть II. – Уфа : РИО ИЦИПТ, 2014. – С.145 – 150.
5. Моделирование и оптимизация стационарных режимов металлургических процессов : монография / И. А. Рыбенко, С. П. Мочалов ; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2015. – 170 с.
6. Методика математического моделирования и расчета равновесных условий сложных сталеплавильных систем / С. П. Мочалов, И. А. Рыбенко, К. М. Шакиров, В. И. Кожемяченко // Моделирование физико-химических систем и технологических процессов в металлургии : тез. докл. всесоюз. совещ., Новокузнецк, 14 – 19 октября 1991 г. – Новокузнецк, 1991. – С. 132.
7. Математическое моделирование процессов горения суспензионного водугольного топлива в вихревой топке / И. А. Рыбенко, С. П. Мочалов, П. С. Мочалов, С. Н. Калашников // Вестник СибГИУ. – 2012. - № 1. – С. 52 – 57.
8. Математическое моделирование стационарных режимов горения отходов углеобогащения в адиабатической камере / С. П. Мочалов, И. А. Рыбенко, П. С. Мочалов // Уголь. – 2011. - № 6. – С. 79 – 81.
9. Рыбенко И. А. Моделирование стационарных режимов горения ВУТ в адиабатической камере / И. А. Рыбенко, С. П. Мочалов, П. С. Мочалов // Моделирование, программное обеспечение и наукоемкие технологии в металлургии: тр. 3-й Всероссийской науч.-практ. конф. посвященной 30-летию кафедры ИТМ. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2011. – С. 65 – 68.

10. Mochalov S. P. Mechanism and mathematical modeling of coal-water slurry combustion in swirl adiabatic combustion chamber / S. P. Mochalov, I. A. Rybenko, L. A. Ermakova // World Applied Sciences Journal. – 2012. - № 19 (1). – С. 20 – 25.

УДК 669.001.57

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОМАССООБМЕНА В РЕАКТОРАХ АГРЕГАТА ТИПА СЭР ДЛЯ УСЛОВИЙ ПРЯМОГО ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛА ИЗ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ермакова Л.А., Мочалов С.П.

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет»
г. Новокузнецк, Россия, ermakova@sibsiu.ru

Аннотация. В данной работе предложена методика расчета процессов в реакторах агрегата струйно-эмульсионного типа на основе моделирования тепломассообменных процессов, протекающих в дисперсных системах с учетом термодинамических и гидродинамических условий.

Ключевые слова: струйно-эмульсионный агрегат непрерывного действия, прямое восстановление, тепломассообмен, математическое моделирование.

Abstract. In this paper we propose a method of calculating processes in the reactor unit jet-emulsion-type on the basis of modeling heat and mass transfer processes occurring in dispersed systems based on thermodynamic and hydrodynamic conditions.

Keywords: jet-emulsion unit continuous, direct reduction, heat and mass transfer, mathematical modeling.

Вопрос создания принципиально новых процессов и технологий сегодня является актуальным так как современные технологии получения металлопродукции полного цикла являются одними из самых энергоемких промышленных отраслей. Среди новых процессов перспективными являются процессы получения металла методом прямого твердофазного и жидкофазного восстановления непосредственно из пылевидных руд и отходов промышленных предприятий без предварительного окомкования. Одним из вариантов реализации таких процессов является создание струйно-эмульсионного агрегата типа СЭР, в котором процессы протекают в твердофазных и жидкофазных средах [1-3]. Основными конструктивными элементами агрегата, в котором процессы получения металла протекают под давлением, являются [1]: реакционная камера сферической формы, соединенная цилиндрическим каналом с рафинирующим отстойником. Реакционная камера соответствующим каналом соединена с устройством для подготовки и подачи сыпучих материалов.

Формирование потока шихтовых материалов. Расчеты осуществляли для следующих дисперсных шихтовых материалов: железорудный концентрат, окалина, конвертерный шлам, известь и коксик. Химический состав материалов приведен в таблице 1.

Очевидно, что для сокращения числа расчетов при моделировании тепломассообменных процессов целесообразно рассматривать не каждый материал в отдельности, а сначала сформировать смесь шихтовых материалов. Формирование смеси производили исходя из массовых соотношений компонентов и параметров закона распределения для отдельных дисперсных материалов, после чего смесь шихтовых материалов использовали как новый дисперсный материал. Расчет параметров закона распределения для отдельных дисперсных материалов осуществляли по методике, подробно рассмотренной в опубликованной ранее работе [4].

Процедура формирования потока смеси из желаемого набора шихтовых материалов и массовых соотношений компонентов смеси с известными параметрами закона распределения приведена на рисунке 1.

Таблица 1 – Химический состав материалов, %

Элементы	Материал				
	Руда	Окалина	Шлам	Известь	Кокс
FeO	21,5%	30,5%	24,1%	-	-
Fe_2O_3	58,2%	67,5%	46,7%	-	-
$Fe_{мет}$	-	-	3%	-	-
$Fe_{общ}$	57,5%	70,9%	54,5%	-	-
C	-	-	8%	-	98%
CaO	5,5%	-	10%	92%	1,5%
MgO	1,6%	-	1,6%	2%	0,5%
SiO_2	8,1%	1%	4%	5%	-
Al_2O_3	4,7%	-	0,5%	1%	-
MnO	0,4%	1%	1,5%	-	-
S	-	-	0,1%	-	-
P_2O_5	-	-	0,5%	-	-

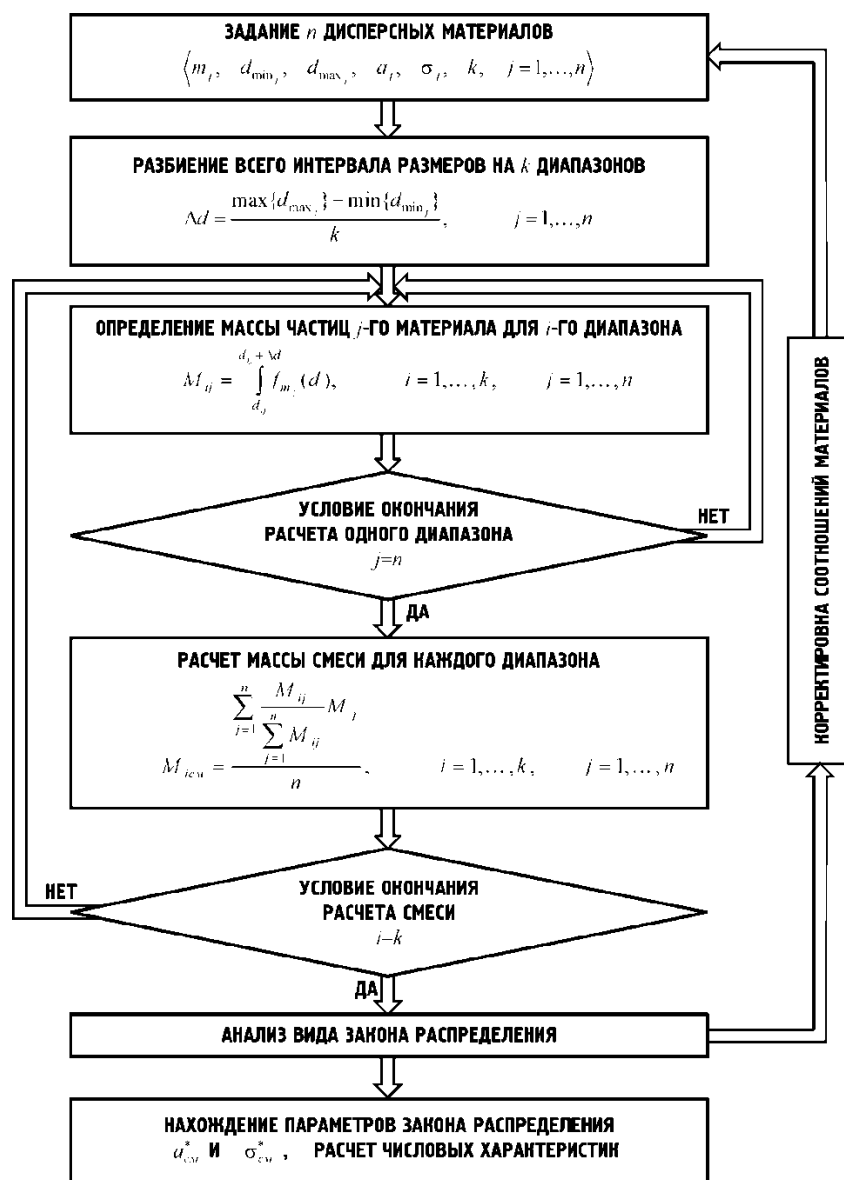


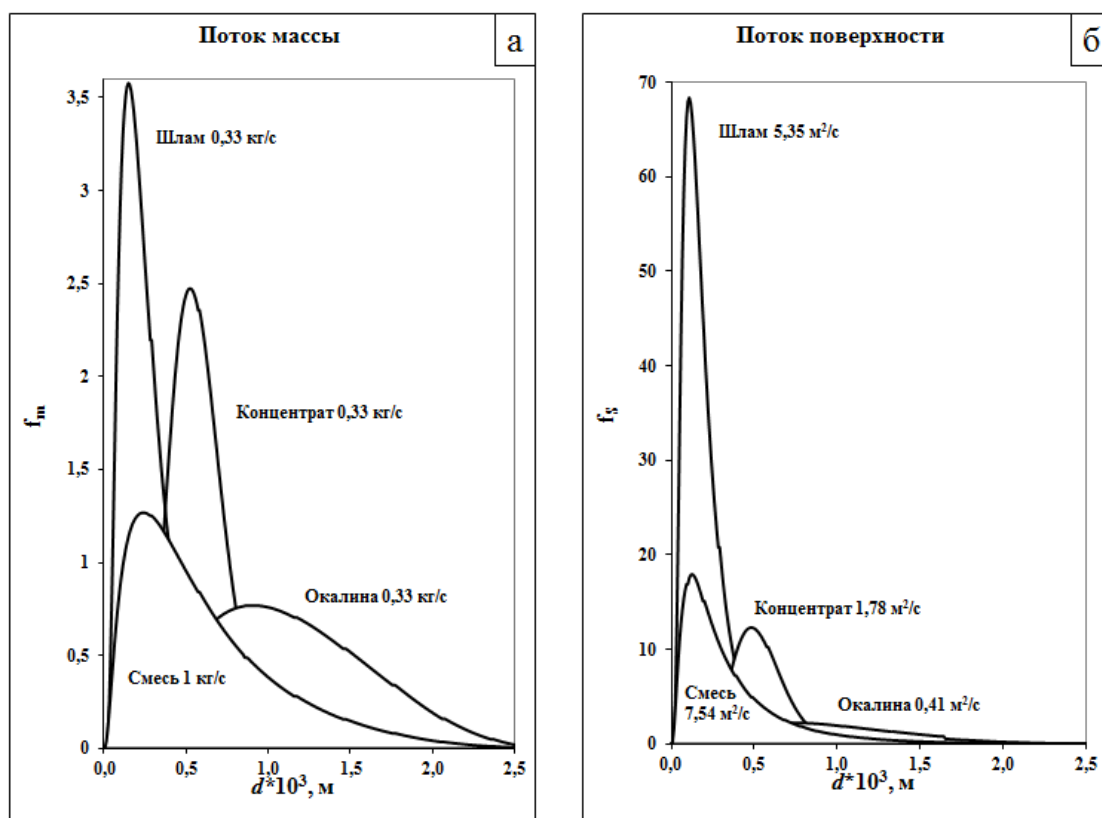
Рисунок 1 – Представление продвижения фронта реакции вглубь частицы

При разбиении всего интервала размеров частиц на k диапазонов определяли интервал изменения размеров частиц для смеси, при этом наименьший диаметр частиц смеси соответствует размеру самой мелкой из фракции шихтовых материалов, а наибольший – диаметру самой крупной из фракций материалов. После чего определяли границы каждого диапазона.

Определение массы частиц каждого материала для текущего диапазона осуществляли путем интегрирования функции распределения частиц по размерам данного материала по границам диапазона. Условием окончания расчета текущего диапазона являлся расчет всех материалов образующих смесь. Расчет массы смеси для текущего диапазона производился с учетом массовых соотношений шихтовых материалов и результатов предыдущего этапа. Условием окончания расчета массы смеси был расчет для последнего диапазона.

На этапе анализ вида закона распределения смеси проверяли возможность описания закона распределения смеси по размерам в виде логарифмически нормального распределения, в противном случае проводили корректировка массовых соотношений компонентов смеси. Нахождение параметров закона распределения $a^*_{см}$ и $\sigma^*_{см}$ и расчет числовых характеристик для смеси производили по тем же уравнениям, что и для отдельных исходных материалов [4].

Графики, описывающие плотность распределения параметров отдельных материалов и сформированной смеси приведены на рисунке 2.



а – поток массы; б – поток поверхности

Рисунок 2 – Параметры железосодержащих материалов и сформированной смеси

Рассчитанные на основе предложенной методики параметры закона распределения и числовые характеристики смеси и химические составы использовали в дальнейшем в соответствующих уравнениях тепломассообменных процессов, материального и теплового балансов для замыкания полного описания систем.

Методика расчета процессов в реакторах агрегата типа СЭР Схема расчета процессов в реакторах агрегата приведена на рисунке 3 [5].

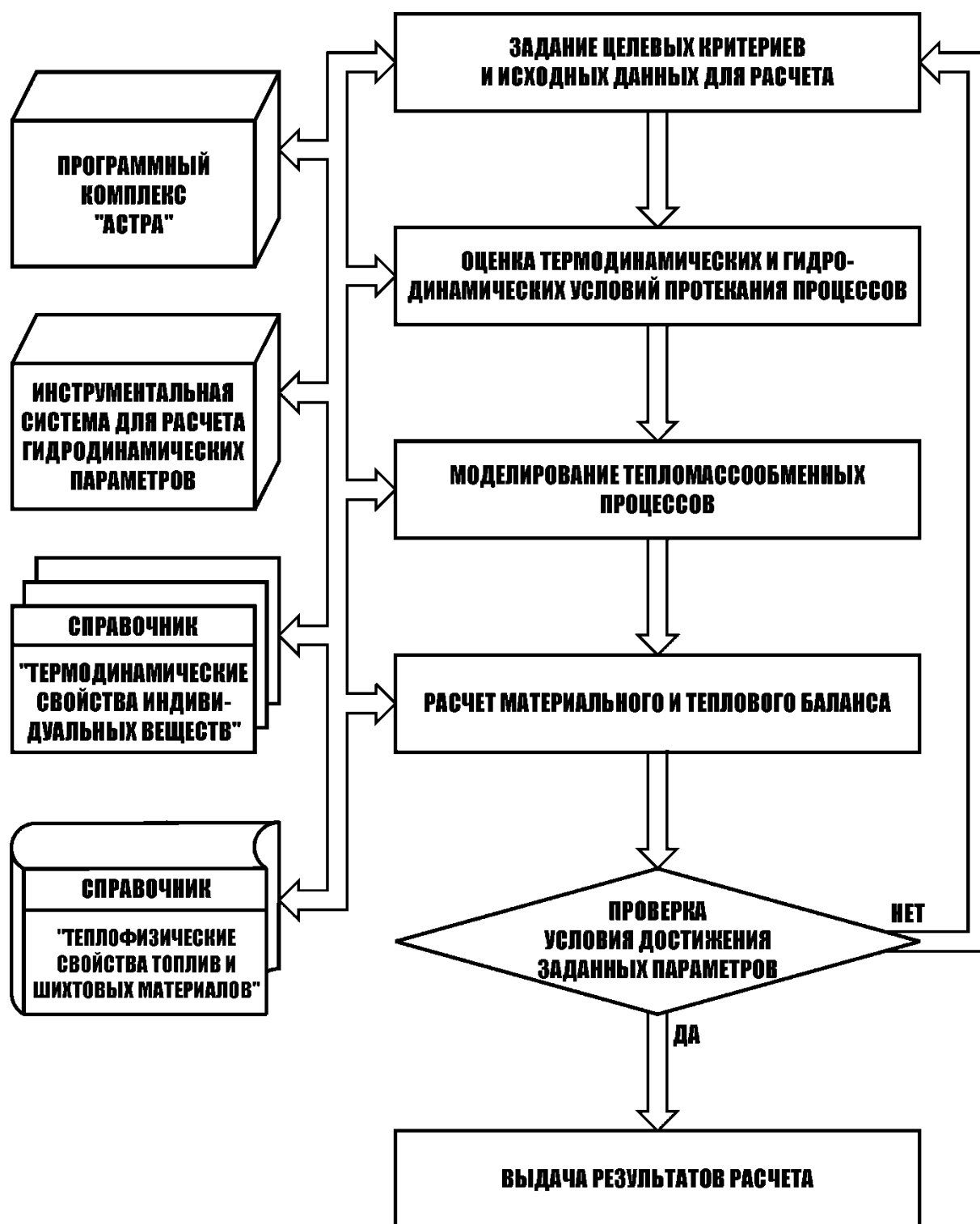


Рисунок 3 – Схема расчета процессов в реакторах агрегата

Задание целевых критериев и исходных данных для расчета осуществляли исходя из технологических соображений для обеспечения необходимых режимов процесса. На этом этапе производился расчет процесса в целом и определение числовых характеристик входного потока шихтовых материалов, что необходимо для анализа процесса на уровне входных и выходных параметров и формирования требований к химическому и грануло-

метрическому составу шихтовых материалов. Этап предусматривал реализацию задач термодинамического моделирования, расчет материальных и тепловых балансов, а также расчет параметров закона распределения и числовых характеристик потока шихты, состоящего из набора различных материалов на основании методике приведенной выше.

Материальный баланс описывался на основе уравнения неразрывности (закона сохранения масс) на основе феноменологической теории многоскоростного континуума. Для расчета скорости перехода элемента из одной фазы в другую осуществляли решение задачи нестационарного тепломассообмена, которое описали уравнением теплопроводности и молекулярной диффузии для частиц сферической формы с граничными условиями 3 рода [6-7].

Методика решения задачи нестационарного тепломассообмена с учетом фазового перехода подробно рассмотрена в работе [4].

Для оценки термодинамических и гидродинамических условий протекания тепломассообменных процессов использовали созданные на кафедре «Информационных технологий в металлургии» СибГИУ инструментальные системы [8-9] и программный комплекс «Астра», разработанный в Московском государственном техническом университете [10]. Для определения термодинамических функций и параметров индивидуальных веществ и химических реакций использовались справочники и готовые программные модули ИВТАНТЕРМО, ТСИБ.

С учетом времени пребывания и теплофизических параметров реактора рассчитывались процессы тепломассообмена, материальный и тепловой балансы. Анализ высокоинтенсивного протекания процессов в струйно-эмульсионном агрегате при использовании в качестве шихты мелкодисперсных материалов, позволил поставить задачу математического моделирования тепломассообменных процессов на основе решения внутренней задачи с учетом внешних условий протекания процессов.

В результате для заданных условий в реакторе определяются параметры входных потоков либо при заданных входных потоках рассчитываются время пребывания, степень восстановления, фазовое состояние материалов, температура и составы твердых, жидких и газообразных фаз.

Методика реализована средствами табличного процессора EXCEL в виде модуля, имеющего согласованные форматы данных с другими системами. Электронное поле в табличном процессоре Excel оказалось удобной визуальной средой для реализации данной задачи со средствами интерактивного взаимодействия и позволило очень удобно, в соответствии с естественно-физическим содержанием задачи и структурой математической модели, расположить интересующую численно-графическую информацию. Оптимизатор, входящий в состав табличного процессора Excel, использован при решении различного рода оптимизационных задач, связанных с реализацией численных процедур. Разработанная методика является универсальной и позволяет рассчитывать различные варианты технологий.

Результаты расчета процессов в реакционной камере агрегата типа СЭР производился в соответствии с предложенной методикой для условий, характеризующих режимы в реакционной камере (диапазон температур 1400÷1600 °С и время пребывания компонентов шихты в реакционной камере от 0,3 до 0,5 с). Полученные результаты характеризуют возможные пределы развития массообменных и теплообменных процессов при восстановлении шихты в реакционной камере струйно-эмульсионного агрегата.

Библиографический список

1. Процесс СЭР - металлургический струйно-эмульсионный реактор / В.П. Цымбал, С.П. Мочалов, И.А. Рыбенко и др. // -М: Металлургиздат, 2014.-488с.
2. Разработка новых наукоемких металлургических процессов и агрегатов струйно-эмульсионных типа на принципах самоорганизации / В.П. Цымбал, С.П. Мочалов,

К.М. Шакиров и др. // Новые промышленные технологии и материалы. - Новокузнецк, 2000. - С. 299-308

3. Процесс и агрегат типа самоорганизующийся струйно-эмульсионный реактор, как пример наукоемкой технологии в металлургии. / В. П. Цымбал, С. П. Мочалов, В. И. Кожемяченко, И. А. Рыбенко, Красноперов С.Ю. // Известия вузов. Черная металлургия. – 2005. -№ 6. – С. 60 – 65.

4. Калашников С.Н. Математическая модель и методика решения задач нестационарного теплообмена совокупности частиц пылевидных железосодержащих материалов / С.Н. Калашников, Л.А. Ермакова, С.П. Мочалов // Известия вузов. Черная металлургия.-2001.-№6.-С.67-71.

5. Методика и результаты расчета процессов в реакторах агрегата струйно-эмульсионного типа для технологии прямого получения металла из дисперсных материалов / Л.А. Ермакова, С.П. Мочалов // Известия вузов. Черная металлургия.-2004.-№10.-С.48-51.

6. Методика и результаты численно-аналитического моделирования массообменных процессов при восстановлении пылевидных железосодержащих материалов / С.Н. Калашников, С.П. Мочалов, Л.А. Ермакова, С.Ю. Красноперов // Известия вузов. Черная металлургия. -1999. -№10. -С. 61 -64.

7. Методика численно-аналитического моделирования теплообменных процессов в дисперсных системах/С.Н. Калашников, С.П. Мочалов, С.Ю. Красноперов, Л.А. Ермакова//Численно-аналитические методы решения краевых задач. Сборник трудов межвузовской научной конференции. Новокузнецк, 1998. -С. 52-54.

8. Разработка методики и системы расчета процессов непрерывного получения металла в агрегатах струйно-эмульсионного типа / С. П. Мочалов, И. А. Рыбенко, В. Ю. Климов // Моделирование, программное обеспечение и наукоемкие технологии в металлургии : тр. всеросс. науч.-практ. конф., посвященной 20-летию кафедры «Информационные технологии в металлургии», 2 – 5 апреля 2001 г. – Новокузнецк, 2001. – С. 193 – 199.

9. Концептуальные и математические аспекты разработки инструментальных систем моделирования технологических процессов / С.П. Мочалов, С.Н. Калашников, С.Ю. Красноперов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1991. № 12. С. 83-86.

10. Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. – М.: Металлургия, 1994. -353 с.

УДК 662.61

УТОЧНЕНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГОРЕНИЯ КАПЕЛЬ ВУТ

Ермакова Л.А., Калашников С.Н., Мочалов С.П.

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет»
г. Новокузнецк, Россия, ermakova@sibsiu.ru

Аннотация. Работа посвящена уточнению механизма горения капель суспензионного водоугольного топлива, предложена уточненная физико-химическая схема процесса, состоящая из нескольких независимых параллельно-последовательных стадий. Предложенная физико-химическая схема горения капель ВУТ подтверждается гранулометрическим анализом продуктов горения.

Ключевые слова: суспензионное водоугольное топливо, механизм горения, кинетические константы, вихревая топка.

Abstract. The work is dedicated to clarify the mechanism of combustion of coal-water slurry fuel drops, offered a refined physical and chemical diagram of the process, consisting of several independent parallel-sequential steps. The proposed scheme of physico-chemical burning droplet size distribution analysis and confirmed by microscopic examination of the products of combustion.

Keywords: suspension water-coal fuel, mechanism of burning, kinetic constants, swirl burner.

Одним из способов утилизации отходов углеобогащения является формирование на их основе водоугольного топлива (ВУТ) для сжигания в вихревой топке автоматизированного энергогенерирующего комплекса [1-3], что позволяет значительно сократить объемы складированных отходов на обогатительных фабриках и решить экологические проблемы региона.

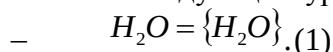
Для оптимизации технологии сжигания суспензионного водоугольного топлива в вихревой топке энергогенерирующего комплекса необходимо уточнить механизм горения капель ВУТ.

При описании процесса горения водоугольного топлива необходимо учитывать основные отличия процесса воспламенения и горения капли суспензии от горения пылевидного твердого топлива. Как показали лабораторные исследования, представленные в работах [4-9], горение капли водоугольной суспензии протекает одновременно с испарением влаги из ее внутренней части, причем испарение влаги не замедляет процесса горения углерода. Вырывающиеся из внутренней части капли струи пара активизируют горение на поверхности капли, в результате одновременного течения этих двух процессов капля суспензии превращается в сильно пористое тело [6]. Для описания процесса горения капель ВУТ можно предложить следующую физико-химическую схему процесса, состоящую из нескольких независимых параллельно-последовательных стадий (рисунок 1):

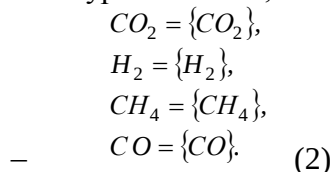
– *на поверхности капли* – мгновенный прогрев и поверхностное испарение влаги, низкотемпературная активация реакционной поверхности топлива перед его воспламенением, горение микрочастиц угля на поверхности капли;

– *внутри капли* – постепенный прогрев капли, испарение влаги из внутренней области капли, выход летучих и горение летучих около капли ВУТ, перенос микрочастиц угля к поверхности капли с образованием пористой ксеносферы (полый сферы), горение микрочастиц угля в результате химической реакции с кислородом воздуха и водяным паром.

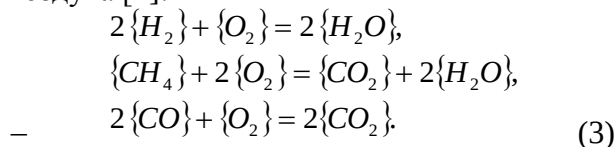
– При попадании капли ВУТ в горячую топочную камеру происходит практически мгновенный прогрев поверхности капли и испарение влаги с поверхности капли. Внутри капли происходит её постепенный прогрев, и с повышением температуры начинает происходить процесс испарения влаги из внутренней области капли. Процесс испарения влаги описывается следующим уравнением:



– При повышении температуры поверхности капли начинается процесс термической деструкции (пиролиза) органической массы на поверхности капли ВУТ, сопровождающийся выделением летучих веществ. При продвижении температурного фронта вглубь капли начинается процесс выхода летучих веществ из внутренней области капли. Основными уравнениями, описывающими выход летучих, являются следующие:



– Выделяющиеся горючие газообразные компоненты вступают в реакцию с кислородом воздуха [4]:



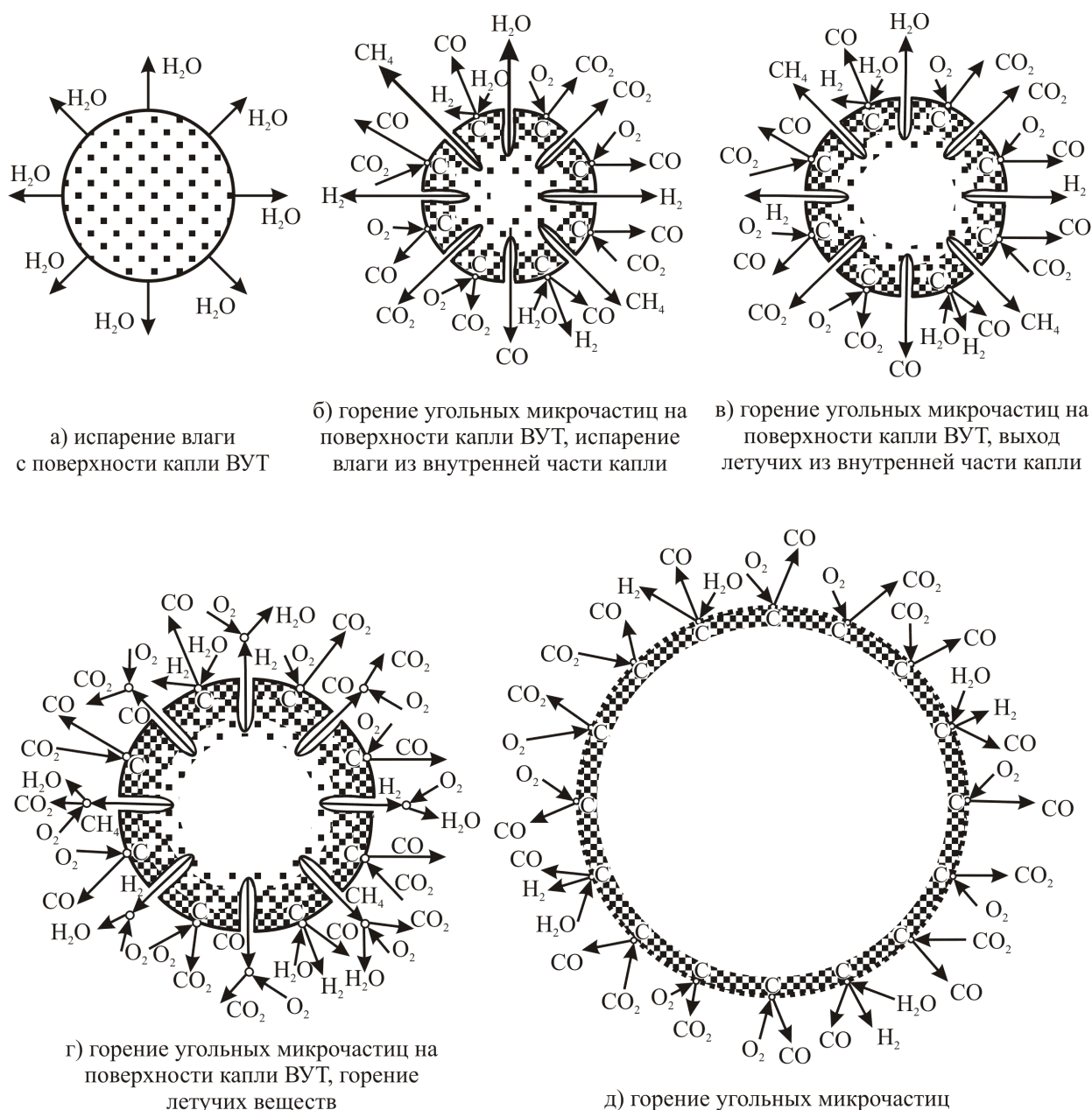


Рисунок 1 – Физико-химическая схема горения ВУТ

За счет водяного пара, образующегося при испарении влаги с поверхности, происходит низкотемпературная активация угольных микрочастиц на поверхности капли ВУТ до их воспламенения, что приводит к существенному снижению температуры воспламенения ВУТ. В процессе горения летучих происходит нагрев капли и воспламенение коксового остатка микрочастиц угля на её поверхности. На поверхности протекают реакции горения за счет взаимодействия углерода с кислородом воздуха, водяными парами и CO_2 , полученным как от выхода летучих, так и от горения летучих и коксовой основы топлива. Горение происходит по следующим реакциям [4]:



Процесс горения на поверхности капли ВУТ происходит параллельно с процессами испарения влаги и выхода летучих из глубины капли. В ходе процесса испарения влаги и выхода летучих осуществляется вынос микрочастиц угля из глубины капли к ее поверхности [4], в это же время зона испарения воды распространяется на внутренние слои капли, в результате чего там развивается повышенное давление и размер капли увеличивается [10]. На поверхности капли углеродные частицы выгорают, а минеральная часть спекается, образуя пористую полую сферу.

Гранулометрический анализ водоугольного топлива и продуктов его горения. Для проведения исследования применяли лазерный анализатор размеров частиц Mastersizer 2000 (Malvern, Великобритания). Пробу водоугольного топлива массой 10 г разбавляли в 100 мл ацетона ЧДА (ГОСТ 2603) для растворения масляного компонента, а затем пробу просушивали в вытяжном шкафу до получения сухого порошка. Для анализа готовили суспензию: навеску пробы массой 0,25 г смешивали с 50 мл ацетона и тщательно перемешивали. Резервуар диспергатора заполняли дисперсантом (ацетоном 250 мл). Для контроля чистоты оптической системы проводили измерение фона, при этом интенсивность лазера составляла 79÷80%. Подготовленную суспензию из химического стакана переливали в резервуар до обеспечения затемнения лазера от 4 до 8 %. Таким образом проводилось 5 измерений пробы, протокол испытаний рассчитывается по среднему из пяти измерений.

В таблице 1 приведен результат экспериментального исследования гранулометрического состава ВУТ, полученного из отходов угольного производства ЦОФ шахты «Антоновская» и двух проб пыли, отобранных в вихревом пылеуловителе в ходе эксперимента по сжиганию ВУТ в вихревой адиабатической топке.

Таблица 1 – Распределения частиц ВУТ и по размерам

Диапазон размеров, мм		0,00002-0,00025	0,00025-0,00071	0,00071-0,00200	0,00200-0,00564	0,00564-0,01589	0,01589-0,04478	0,04478-0,12619	0,12619-0,35566	0,35566-2,000
Объем частиц, %	ВУТ	0	0,65	2,25	7,36	20,35	33,65	29,16	6,47	0
	Зола (проба №1)	0	0	0	0,11	6,56	43,02	41,32	8,31	0,7
	Зола (проба №2)	0	0	0	1,21	8,95	20,55	39,06	28,18	2,06

Оценка для плотности распределения $f(d)$ частиц по размерам на основе экспериментальных данных строится в классе регулярных распределений в интервале $(d_{\min}, d_{\max})$ в виде логарифмически нормального закона распределения с учетом минимального и максимального диаметров частиц $d_{\min}$ и $d_{\max}$:

$$f(d) = \frac{\lambda(d_{\max} - d_{\min})}{(d_{\max} - d)(d - d_{\min})\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\left(\ln\left(\frac{d_{\max}-d}{d-d_{\min}}\right) - \ln a\right)^2}{2\sigma^2}}, \quad (5)$$

где λ, a, σ – параметры распределения.

Конкретный вид $\tilde{f}_m(d)$ определяется значениями параметров λ^*, a^* и σ^* , которые минимизируют функционал:

$$\Phi(\lambda^*, a^*, \sigma^*) = \min_{\lambda, a, \sigma} \sum_{i=1}^{N_\phi} (f(d_i) - S_i)^2, \quad (6)$$

где N_{ϕ} – количество фракций соответствующего вещества;
 d_i – размер частиц в i -ой фракции, мм;
 S_i – доля i -ой фракции, %.

Полученные при обработке экспериментальных данных значения параметров плотности распределения частиц по размерам для ВУТ и продуктов его горения приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры распределения частиц ВУТ и золы по размерам

Материал	$d_{\min}$, мм	$d_{\max}$, мм	λ	a^*	σ^*
ВУТ	0,00028	0,31698	0,611	2,555	1,177
Зола (проба № 1)	0,00448	0,63246	0,703	7,668	0,846
Зола (проба № 2)	0,00317	2,00000	1,701	8,194	1,011

На рисунке 2 приведены экспериментальные данные в виде гистограмм распределения частиц ВУТ и золы по размерам и полученный при обработке график плотности распределения в виде уравнения (5). При этом размер частиц расположен по логарифмической шкале.

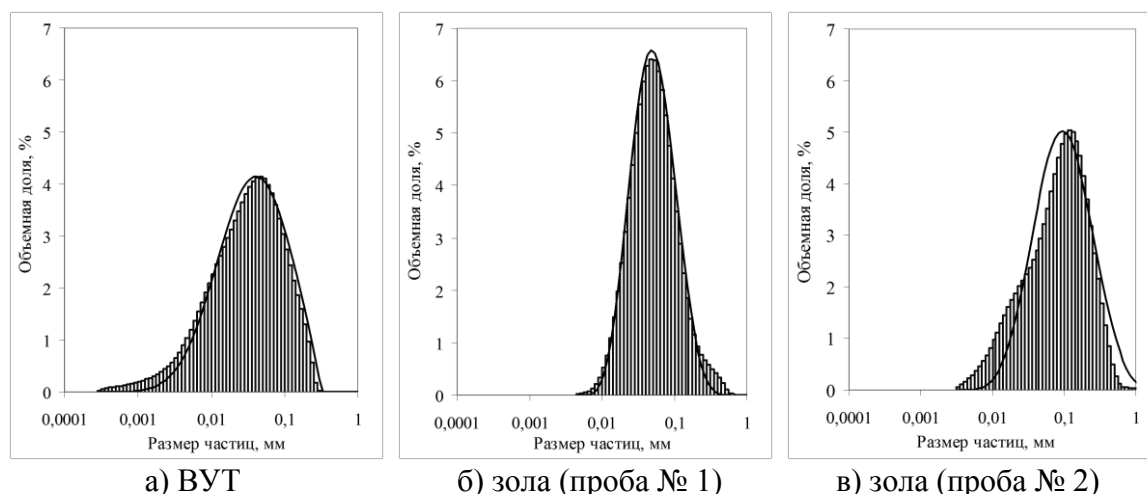


Рисунок 2 – Гистограммы и плотности распределений частиц ВУТ и золы по размерам

Таким образом, проведенный гранулометрический анализ подтверждает, что при сгорании капель водоугольного топлива образуются полые сферические частицы более крупного размера, чем исходный ВУТ, что соответствует предложенной выше физико-химической модели горения капель ВУТ. Полученные результаты хорошо согласуются с данными, полученными в работе [10] при исследовании зольных частиц, образующихся при сжигании сухой пыли и водоугольной суспензии из одного и того же угля: при сжигании суспензии резко снижается число зольных частиц, увеличиваются их размеры (с 0,01–0,05 до 0,5–1,5 мм) и меняется структура поверхности.

Библиографический список

1. Разработка научно-технических основ для создания технологии подготовки и сжигания суспензионного угольного топлива, приготовленного на основе отходов углеобогащения и пилотного образца автоматизированного энергогенерирующего комплекса. Отчет о НИР, Этап 5. СибГИУ, Новокузнецк, 2012.
2. Куксов И.А. Численное моделирование процессов горения водоугольного топлива с использованием пакета STAR-CCM+ / Куксов И.А., Мочалов С.П., Сарычев В.Д.,

Шендриков А.Е. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2012. № 5(93). С. 144-148.

3. Сарычев В.Д. Математическое моделирование газодинамических течений в вихревой камере с использованием пакета STAR CMM+/Сарычев В.Д., Куксов И.А., Мочалов С.П., Шендриков А.Е.//Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2012. № 8. С. 39-42.

4. Делягин Г.Н. Вопросы теории горения водоугольной суспензии в потоке воздуха / Делягин Г.Н. // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий: сборник. – М.: Наука, 1967. –С.45-55.

5. Делягин Г.Н. Исследование процесса воспламенения капли водоугольной суспензии / Делягин Г.Н., Сметанников Б.Н. // Новые методы сжигания топлив и вопросы теории горения. - М.: Наука, 1965. –С.126-140.

6. Делягин Г.Н. Об условиях совместного протекания процессов испарения воды и выгорания капли водоугольной суспензии / Делягин Г.Н. // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий: сборник. – М.: Наука, 1967. – С.55-67.

7. Mochalov S.P. Mechanism and mathematical modeling of coal-water slurry combustion in swirl adiabatic combustion chamber / Mochalov S.P., Rybenko I.A., Ermakova L.A. // World Applied Sciences Journal. 2012. Т. 19. № 1. С. 20-25

8. Ермакова Л.А. Физико-химическая модель горения капель водоугольного топлива / Ермакова Л.А., Мочалов С.П., Калашников С.Н., Пермяков А.А. // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2012. № 1. С. 37-40.

9. Ермакова Л.А. Физико-химическая модель горения капель водоугольного топлива/Ермакова Л.А., Мочалов С.П., Калашников С.Н., Пермяков А.А.//Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2012. № 1. С. 37-40.

10. Бутылькова Г.Н. Зола и шлак при сжигании водоугольных суспензий / Бутылькова Г.Н., Делягин Г.Н. // Новые методы сжигания топлив и вопросы теории горения. - М.: Наука, 1969. - С.58-64.

УДК 697.12

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЗДАНИЙ

Стерлигов В.В., Зоря И.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк, Россия, razm@list.ru*

Аннотация. На основе частных зависимостей теплового сопротивления отдельных элементов зданий разработана обобщенная модель.

Ключевые слова: тепловое сопротивление, тепловые потери, строительные элементы.

Abstract. General model of the thermal resistance for anyelement of building is worked out.

Keywords: thermal resistenmce, heat losses model, structure element.

В силу важности проблемы энергосбережения и повышения энергоэффективности сейчас в России существует много информационных сообщений этого направления. В них наряду с аналитическими прогнозными материалами публикуются результаты практического опыта по решению конкретных задач.

Если статья содержит практический материал, то необходимо очень точно соизмерять описанные условия с условиями решаемой задачи, так как почти всегда существуют отклонения по исходным данным. Даже аналитические решения, представленные чаще всего в виде диаграмм, не всегда можно использовать для практического применения. Как правило, диаграммы представляют собой несколько линий, рассчитанных для фиксиро-

ванных дискретно задаваемых значений параметра. И если в реальной задаче величина параметра отличается от расчетной, то необходимо производить интерполирование.

Обусловлено это многофакторным характером связей и желанием исследователя точно учесть все детали задачи, когда достигается обобщенное универсальное решение. Как отмечается в работе, посвященной теории эксперимента [1], в этом случае функциональная зависимость $y = \varphi(x)$, учитывающая основной процесс, дополняется дискретными параметрами k_1, k_2, k_3 , которые и учитывают детали процесса.

В результате, диаграммы представлены совокупностью линий $y_1 = \varphi_1(xk_1)$, $y_2 = \varphi_2(xk_2)$, $y_3 = \varphi_3(xk_3)$. Достаточно просмотреть журнал «Энергосбережение», который, на наш взгляд имеет наиболее высокий профессиональный и научный уровень среди подобных изданий, чтобы найти этому подтверждение.

Вместе с тем, существует метод, который позволяет вместо семейства кривых иметь одну обобщенную кривую. Такая единая обобщенная зависимость подчеркивает физическую однородность изученных процессов, позволяет избегать интерполяции, что особенно затруднительно при неоднородных шкалах, и получать однозначные решения для конкретной задачи.

Эта методика была опубликована ранее [2, 3] и была апробирована для задач аэродинамики теплообмена, излучения, физических свойств материалов и др. Суть ее основана на «аффинных преобразованиях» пространства диаграммы и объясняется ниже.

Предложенная методика может быть использована и тогда, когда дискретный уровень имеет качественное выражение. Для демонстрации используем пример диаграммы статьи В.И. Ливчака [4]. Представительная и даже изящная интерпретация роли теплового сопротивления в управлении тепловыми потерями через элементы здания в своем оригинальном виде. Использование в качестве входной величины, отлагаемой по оси абсцисс, тепловое сопротивление R_T , а в качестве выходной величины по оси ординат используется относительные потери через ограждения Q_{hT} , т. е. выражена функция

$$\overline{Q_{hT}} = f(R_T). \quad (1)$$

В этом выражении $\overline{Q_{hT}}$ есть отношение величины потерь планируемой на последующий момент $(\tau+1)$ по отношению к существующей величине потерь в настоящий момент τ , т. е.

$$\overline{Q_{hT}} = \frac{Q_{\tau+1}}{Q_{\tau}}. \quad (2)$$

В реальных задачах именно это отношение есть «выходная» величина, а реализуется это изменение за счет «входной» величины, т.е. теплового сопротивления.

Поэтому для реальных задач более удобно иметь зависимость (см. рисунок 1)

$$R_T = \varphi(\overline{Q_{hT}}). \quad (3)$$

Для получения обобщенной зависимости определяют величину $\Delta y = y - y_{cm}$, а затем $\overline{\Delta y} = \Delta y / \Delta y_{cm}$, где Δy_{cm} – приращение выходного фактора при каком-то «стандартном значении входного фактора».

Результат обработки этих трех качественно отличных зависимостей, выраженных разными кривыми, представлен в таблице 1.

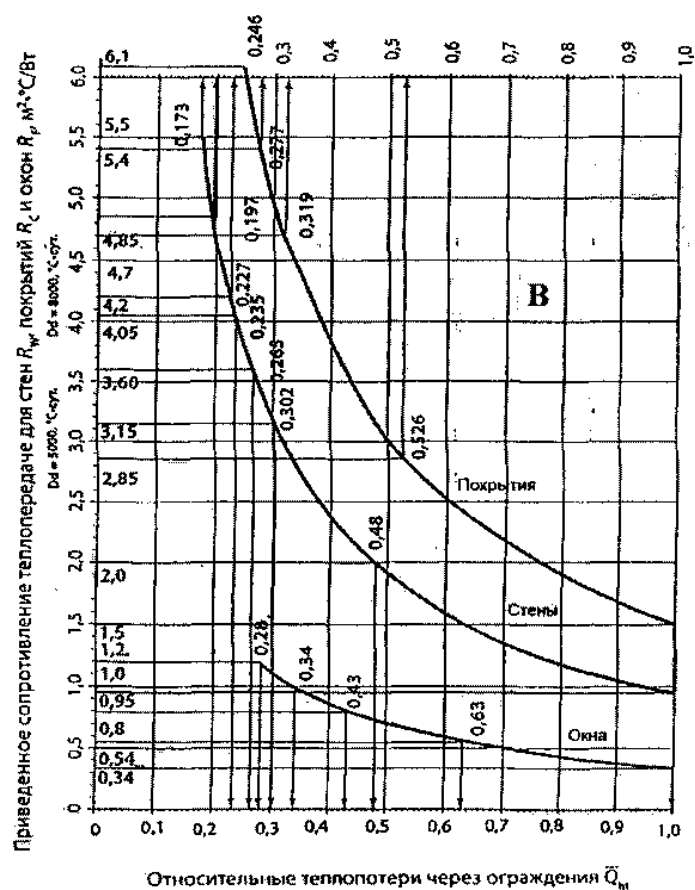


Рисунок 1 – Изменение относительных теплотерь через ограждения здания при повышении их теплозащиты

Таблица 1 – Обработка данных по тепловым потерям

Элементы здания	Параметр	Относительные потери Q								
		0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Окно	y_1	1,50	1,22	0,91	0,72	0,57	0,50	0,42	0,38	0,36
	Δy_1	1,16	0,86	0,50	0,36	0,23	0,16	0,08	0,04	0,00
	$\overline{\Delta y_1}$	3,22	2,39	1,55	1,0	0,64	0,44	0,16	0,03	0,00
Стена	y_2		3,16	2,35	1,90	1,65	1,33	1,20	1,05	0,95
	Δy_2		2,21	1,40	0,95	0,70	0,38	0,25	0,10	0,00
	$\overline{\Delta y_2}$		2,32	1,48	1,00	0,74	0,40	0,26	0,10	0,00
Покрытие	y_3		5,00	3,80	3,00	2,50	2,20	1,85	1,70	1,50
	Δy_3		3,50	2,30	1,50	1,00	0,70	0,35	0,20	0,00
	$\overline{\Delta y_3}$		2,33	1,53	1,00	0,67	0,47	0,23	0,13	0,00
Среднее значение с.к.о.	$\overline{\Delta y}$		2,35	1,52	1,00	0,69	0,44	0,22	0,09	0
	σ_{n-1}		0,038	0,036	0,000	0,056	0,035	0,051	0,051	0,000

Как следует из таблицы, величина расчетного нормированного приращения функции $\overline{\Delta y}$ фактически одинакова для разных элементов здания при одном и том же уровне

относительных потерь $\overline{Q_{ht}}$. Среднеквадратичное отклонение σ_{n-1} при этом колеблется незначительно и проверка его значений по критерию Кохрена показала однородность дисперсии. Это означает, что для оценки ошибки определения можно использовать величину среднего по всем колонкам значения среднеквадратичного отклонения

$$\overline{\sigma_{сво}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{m} = \pm 0,0345, \quad (4)$$

где σ_i – с.к.о. для каждой i -ой колонки;
 m – число колонок в таблице.

Полученная обобщенная зависимость $R_T = \varphi(\overline{Q_{ht}})$ представлена на рисунке 2 (левый квадрант). И то, что вместо трех исходных линий получена одна, означает универсальность этой зависимости для всех элементов здания.

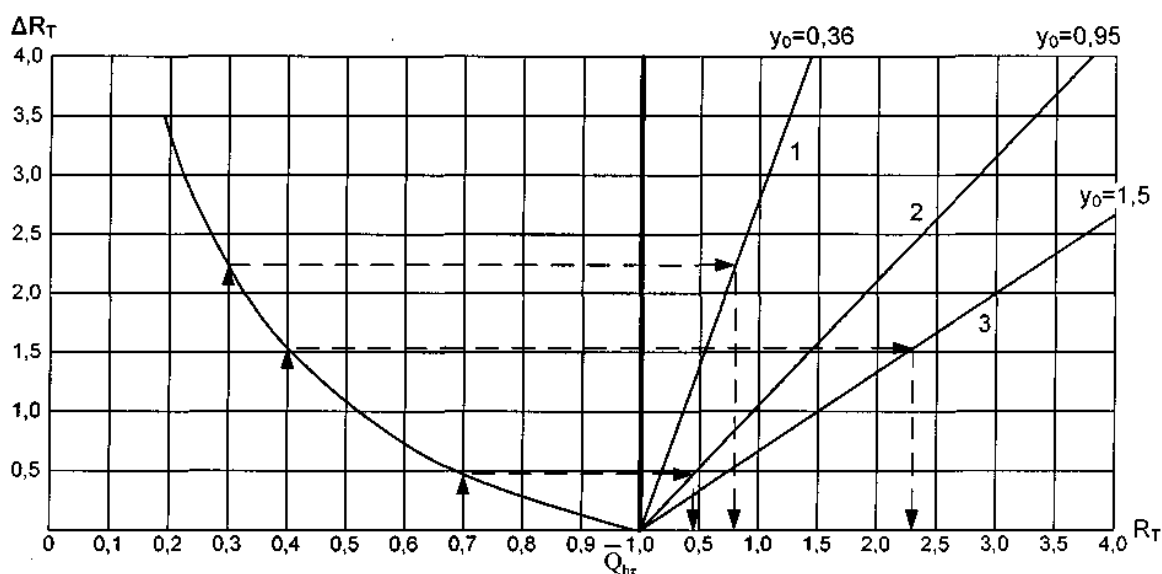


Рисунок 2 – Обобщенная зависимость

И теперь можно, не принимая в расчет конструкцию элемента, найти его нормированное приращение при заданном уровне энергопотребления, определяемом Q .

Для того чтобы определить конкретную величину искомой функции для реальных условий, в нашем случае R_T , необходимо провести две процедуры:

- 1) определение абсолютного приращения $\Delta y \cdot y_{cm} = \Delta y_1$, для чего нужно знать стандартные приращения функции (стандарт);
- 2) прибавление к определенной величине «нулевого» значения функции, т. е. выполнения действия $\overline{\Delta y_i} + y_{0i} = y_i$.

В нашем случае за стандарт для всех трех кривых начальной диаграммы было принято значение входного фактора $\overline{Q} = 0,5$, что дало соответствующие значения $\overline{\Delta y_i}$, для каждой из кривых. Для удобства пользования величины $\overline{\Delta y_i}$ и y_0 для разных значений входного фактора $\overline{Q_{ht}}$ представлены на диаграмме (рисунок 2, левый квадрант).

Для линии 1 (для окон) при $\overline{Q_{ht}} = 0,3$ получаем из номограммы точку $\Delta R_T = 0,86$ на оси абсцисс правого квадранта. Величина $R_T = \Delta R_T + R_{T0} = 0,86 + 0,36 = 1,22$. Для этих условий это число совпадает с величиной ординат на рисунке 2 (для окон).

Соответственно для стен (линия 2, рисунок 2) при $\overline{Q_{ht}} = 0,7$, $R_T = 1,33$, а по номограмме $R_T = 0,42 + 0,95 = 1,37$.

Для покрытий (линия 3, рисунок 2) при $\overline{Q_{ht}} = 0,4$, $R_T = 3,8$, а по номограмме $R_T = 2,3 + 1,5 = 3,8$.

Таким образом, доказано, что предлагаемый способ позволяет к компактной обобщенной форме точно представлять реальные частные характеристики процесса.

Библиографический список

1. Гухман, А. А. Введение в теорию подобия [Текст] / А. А. Гухман – М. : Высшая школа, 1973. – 295 с.
2. Стерлигов, В. В. Об одном способе решения задач регулярного режима нагрева [Текст] / В. В. Стерлигов // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1988:– № 12. – с. 103 – 105.;
3. Стерлигов, В. В. Создание обобщенной модели теплопроводности для тел с анизотропными свойствами [Текст] / В. В. Стерлигов, А. А. Чекулаев // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2011. – № 8. – 45–48 с;
4. Ливчак В. И. Энергосбережение [Текст] – № 4. – 2012. – 14–20 с.

УДК 662.9 (083)

ИЗУЧЕНИЕ НА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРЕЛКИ СО ВСТРОЕННЫМ РАДИАЦИОННЫМ РЕКУПЕРАТОРОМ

Стерлигов В.В., Шадринцева Д.А.

*Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк, Россия, schadrintseva.darya@yandex.ru*

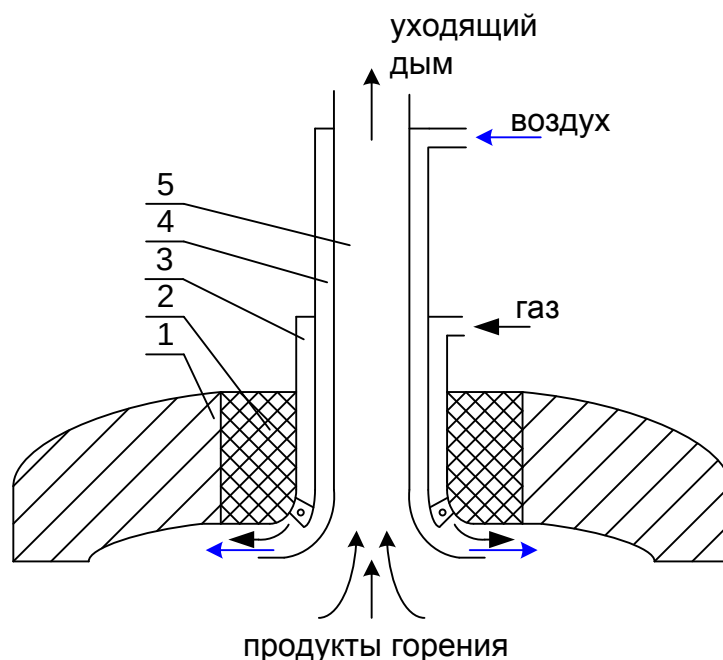
Аннотация. На физической модели, созданной на основе положений теории подобия, были определены рабочие характеристики плоскопламенной горелки со встроенным радиационным рекуператором. Были получены данные по аэродинамике и теплопередаче при подогреве воздуха.

Ключевые слова: физическая модель, теория подобия, плоскопламенная горелка, радиационный рекуператор.

Abstract. On the physical model created on the basis of the provisions of the theory of similarity were determined performance flat flame burners with integrated heat recovery radiation. data on aerodynamics and heat transfer during air heating have been obtained.

Keywords: physical model, similarity theory, flat flame burners, radiative recuperator.

При работе теплотехнических устройств экономия энергоресурсов может быть достигнута за счет установки специального оборудования для использования тепла уходящих газов, что является обычным путем решения такой задачи. В нашем случае предполагается создание системы отопления, в которой устройство для сжигания газа совмещено с утилизацией тепла уходящих газов. Наряду с обычным теплотехническим эффектом (экономия энергоресурсов) использование газовой плоскопламенной горелки со встроенным радиационным рекуператором, позволяет значительно упростить систему подвода газа и воздуха в агрегате, что снизит капитальные затраты на его строительство. Отказ от трубопроводов для горячего воздуха позволяет избежать теплопотерь при движении его в обычных системах отопления. Эта рекуперативная горелка создает особый режим отопления рабочего пространства за счет разогрева кладки, с последующим переизлучением тепла. Такое отопление позволяет увеличить интенсивность теплопередачи этих плоскопламенных горелок по сравнению с обычными струйными. Схема такой горелки представлена на рисунке 1.



1 – свод; 2 – горелочный блок; 3 – газовая труба; 4 – воздушная труба; 5 – дымовая труба

Рисунок 1 – Схема предлагаемой горелки

Факел, формируемый профилем проточной части, растекается с углом раскрытия 180° (плоский факел) по поверхности свода 1. Горелочный блок 2 имеет профиль, определяемый способом формирования растекания факела – радиальный факел или закрученный, что будет обсуждено ниже, при этом газ подается через трубу 3, а воздух по трубе 4. Из чисто умозрительных рассуждений можно видеть, что при захвате факелом объемов печной газовой среды в центре факела образуется дефицит массы (локальное разрежение). Поэтому к этому месту будут постоянно подтекать новые объемы продуктов горения. Такое предположение подтверждается специальными экспериментами [1]. Эту зону разрежения (зону возвратного движения) нужно использовать для отбора дыма через центральную дымовую трубу 5.

Для обеспечения минимального аэромеханического сопротивления скорость движения дыма должна быть минимальной, что требует максимально возможного диаметра дымовой трубы. При этом будет увеличиваться интенсивность лучистой теплоотдачи от газа к стенкам дымовой трубы 5. Т.к. дым отбирается непосредственно из рабочего пространства, то температура дыма будет высокой и при этом преобладающим будет лучистый теплообмен в газовой среде. Поскольку газы излучают всем объемом, то нужно увеличить величину газового объема, в нашем случае – диаметр газовой трубы. Специальные опыты [2] показывают, что увеличение диаметра трубы, по которой проходят горячие дымовые газы с 50 мм до 150 мм увеличивают тепловой поток в 5 раз.

Предложение альтернативной конструкции топливосжигающего устройства в производство будет тем успешнее, чем больше оно будет вписываться в существующую систему отопления печей. Поэтому предполагается использование системы разводки труб и установки горелочных камней на печах. Для горелки ГР-1500, обладающей максимальной мощностью, габаритный размер горелочного камня 458×458 мм. Этот же размер принят для новой газовой плоскопламенной горелки со встроенным радиационным рекуператором.

С учетом высокой температуры продуктов горения ($t_d > 1400^\circ\text{C}$) рекуператор будет работать в радиальном режиме, а с учетом движения потоков и расположения рекупера-

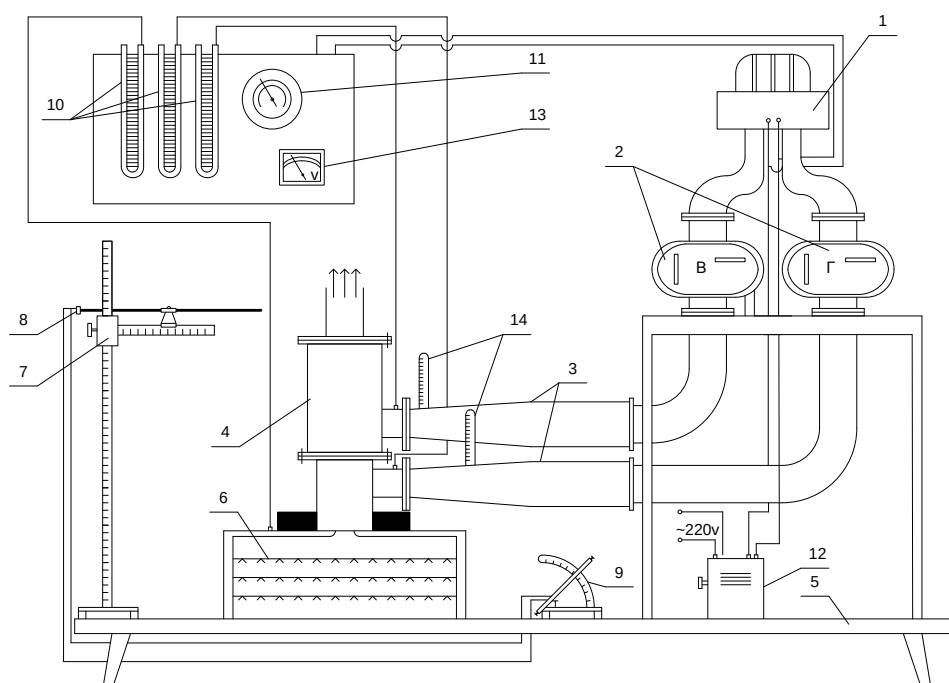
тора его можно классифицировать как «радиальный щелевой одностороннего нагрева» [2].

Тепловые расчеты рекуперативной части горелки с учетом аэродинамики ее работы позволили определить размеры горелки тепловой мощности 120 кВт, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Размеры проточной части прототипа горелки

Тракт	Диаметр, мм		Площадь, 10^4 м^2	Скорость среды, м/с	Расход среды, $\text{м}^3/\text{с}$
	наружный	внутренний			
Газовый	446	436	34	10	0,034
Воздушный	426	416	113	30	0,34
Дымовой	405	390	1193	10	0,381

Схема специально разработанной и созданной экспериментальной установки для испытаний конструкции горелки с целью определения аэродинамических характеристик ее представлена на рисунке 2.



1 – дутьевое устройство, 2 – газосчетчик, 3 – коллектор, 4 – горелка, 5 – рама, 6 – камера, имитирующая рабочее пространство агрегата, 7 – координатник, 8 – пневмометрический зонд, 9 – микроманометр, 10 – U-образный манометр, 11 – барометр, 12 – регулятор напряжения, 13 – вольтметр, 14 – термометр

Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки

Поскольку при аэродинамических («холодных») испытаниях можно использовать для обоих потоков газового и воздушного – в качестве моделирующей среды воздух [3,4], то для подачи его используется центробежный вентилятор 1 обеспечивающий давление до 1300 мм водяного столба (~13000 Па).

На выходе поток разделяется на «воздушный» (на схеме слева помечен буквой В) и «газовый» (на схеме справа помечен буквой Г). Оба потока проходят через измеряющее расход устройство 2, в качестве которых используются так называемые «газовые ротационные» счетчики типа РГ-1.

После счетчиков потоки подводятся к патрубкам горелки 4, смонтированной и закрепленной на платформе 5.

Модель горелки присоединена к камере 6, имитирующей рабочее пространство теплового агрегата. Для визуализации потоков внутри установлены рамки, на проволочках которых закреплены флюгерки в виде коротких (2-3 см) шелковых нитей.

На этой же платформе установлен координатник 7, с прикрепленной к нему трубкой Прандтля-Пито 8 для измерения поля скоростей в камере 6 и на выходе потока из горелки 4. Вторичным прибором при измерении скоростей используется микроманометр ММН-240, жидкостные U-образные манометры с водяным заполнением 10 служат для измерения давления «газа» и «воздуха» перед горелкой. Здесь на приборном щите установлен барометр 11 для измерения атмосферного давления.

Для управления и контроля работы вентилятора служат трансформатор 12 и вольтметр 13. Термометры 14 служат для измерения температуры потоков.

Результаты аэромеханических испытаний

Испытаниям подвергалась модель горелки, представленная на рисунке 3. Она представляет собой копию прототипа горелки, выполненную в масштабе М 1:5 с некоторым приближением.

Результаты испытаний, представляющие собой обработанный материал измерений по 3-м дублям, представлены в итоговой таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики горелок

Показатель	Величина
Тепловая мощность максимальная, кВт	56
Расход «газа» максимальный, м ³ /ч	5,8
Давление «газа», кПа	6,5
Расход воздуха максимальный, м ³ /ч	58
Давление воздуха, кПа	8,0
Номинальная тепловая мощность, кВт	45
Расход «газа», м ³ /ч	-
Давление «газа», кПа	-
Расход воздуха, м ³ /ч	-
Давление воздуха, кПа	-
Коэффициент регулирования мощности	6
Диапазон регулирования коэффициента расхода воздуха	0,8-5,0

Сравнение расходных характеристик с такими же показателями для существующих горелок показывает некоторые расхождения для плоскопламенных горелок типа ГР наиболее близкой по тепловой мощности является горелка ГР-60 с тепловой мощностью $N=70$ кВт [5]. Разработанная горелка обладает большим давлением воздуха и газа.

Но сравнение с рекуперативной горелкой ГСР-150, [6] показывает, что разработанная горелка сопоставима с указанной конструкцией по величине потребного давления для обеспечения заданного расхода. Измерение поля скоростей в сечении дымовой трубы показало изменение её в пределах 7-9 м/с. Наблюдение потока в рабочей камере подтвердило предполагаемое движение «факела», т.е. смешанного потока «газового» и «воздушного» в виде циркуляционного контура с выходом факела через дымовую трубу. Давление в рабочей камере менялось в пределах 10-30 Па. Полученные результаты подтвердили возможность работы предлагаемой конструкции горелки. Коэффициент гидравлического сопротивления определяется по уравнению (3-4) как

$$\xi = \frac{2P_g}{\rho \left(\frac{V}{S_g} \right)}$$

для каждого из трактов.

Расчет производился для каждого из пяти опытов и дал средние значения: для воздушного тракта $\xi_g=120\pm5$, для газового тракта $\xi_g=280\pm12$.

Тепловые испытания проводились с целью проверить возможности подогрева воздуха при излучении уходящих газов в дымовой трубе. Расчетами для прототипа горелки было установлено, что для достижения подогрева воздуха до $t_g = 200^\circ\text{C}$ необходимо обеспечить плотность теплового потока $q = 45 \text{ кВт/м}^2$. Эта величина была принята в качестве исходной при проектировании радиационного нагревателя, который на модели был выполнен в виде фарфоровой трубы с навитой на нее нихромовой спиралью. Диаметр трубы, диаметр спирали, шаг витка и другие параметры рассчитывались из необходимости обеспечения требуемой плотности теплового потока. Спиральный нагреватель включался в электрическую цепь с напряжением 220 вольт через делитель напряжения, что позволяло регулировать подаваемую мощность, которая менялась в пределах 4,5-5,2 кВт.

Температуру воздуха на входе и выходе замеряли портативным прибором с цифровой индикацией. В опытах была достигнута максимальная температура 203°C .

Таким образом, была подтверждена возможность радиационного нагрева воздуха в предлагаемой горелке. Однако, для полной достоверности необходимо провести еще огневые испытания горелки.

Библиографический список

1. Иванов Д.А., Сеничкин Б.К. Аналитическое определение коэффициента теплоотдачи с помощью пристеночных функций // Энергетики и металлурги настоящему и будущему России : материалы 8-й Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и специалистов / под общ. ред. Б.К. Сеничкина. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. – С. 141-145.
2. Тебеньков Б.П. Рекуператоры для промышленных печей. М.: Металлургия, 1975, - 296 с.
3. Современные горелочные устройства (конструкции и технические характеристики): Справочное издание / А. А. Винтовкин и др. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 496 с.
4. Гухман А. А. Введение в теорию подобия/Гухман А.А. – М.: «Высшая школа», 1973. – 296 с.
5. Гусовский В. Л., Ладыгичев М. Г., Усачев А. Б. Современные нагревательные и термические печи (конструкции и технические характеристики): Справочник/под ред. А. Б. Усачева. – М.: «Теплотехник», 2007. – 656 с.
6. Барташ М. Р., Дружинин Г. М., Ложкарев И. Б., Попов А. Б., Хамматов И. М. Новая скоростная рекуперативная газовая горелка для прямого нагрева металла в промышленных печах/ Барташ М. Р., Дружинин Г. М., Ложкарев И. Б., Попов А. Б., Хамматов И. М.//Сталь. – 2010. – № 3. – с 125-127.

СОЗДАНИЕ ОБОБЩЕННЫХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ АФФИННЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Стерлигов В.В.

Сибирский государственный индустриальный университет

г. Новокузнецк, Россия, razm@list.ru

Аннотация. Рассматривается методика получения обобщенной модели на основе частных зависимостей, определенных экспериментально.

Ключевые слова: аффинное подобие, модель, аддитивный, мультипликативный фактор.

Abstract. The technique of obtaining, based on a generalized model of partial dependencies determined experimentally.

Keywords: affine similarity, model, additive, multiplicative factor.

Аффинные преобразования относятся к аналитической геометрии и означают возможность отражения точек одной поверхности на другой поверхности за счет некоторых математических операций.

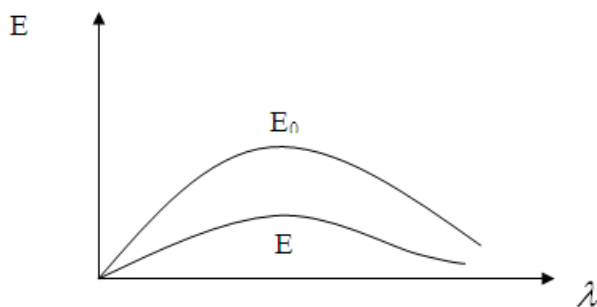
Возникающее при этом аффинное подобие кривых, фигур является частным случаем общего (полного) подобия.

Если при полном подобии все константы линейного подобия имеют идентичное значение [1], это позволяет записать

$$c_l = c_x = c_y = c_z = idem, \quad (1)$$

где c_x, c_y, c_z – константы подобия для отдельных проекций отрезка «l» на оси координат декартовой системы.

Широко известен случай аффинного подобия для характеристики излучения «серого» тела [2], который обычно представляется такой иллюстрацией (рисунок 1).



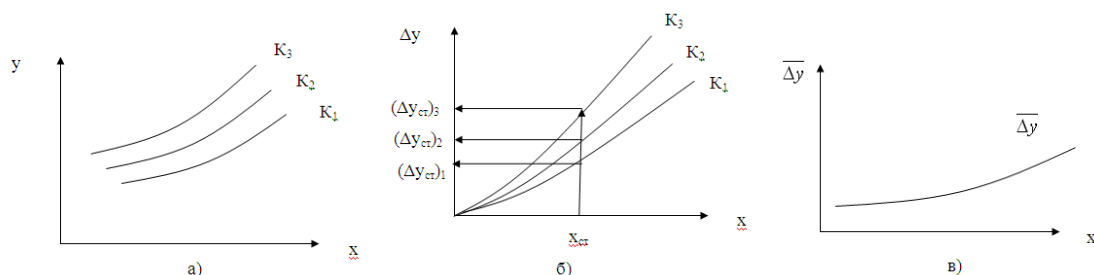
E_0 – излучение «абсолютного черного» (идеального) излучателя, Вт/м²;
 E – излучение «серого» (реального) излучателя, Вт/м²; λ – длина волны, м

Рисунок 1 – Излучение «серого» тела

Константы подобия для этого случая выражаются как

$$c_E = \frac{E}{E_0} = \varepsilon; \quad c_\lambda = \frac{\lambda}{\lambda_0} = 1, \text{ т.е. } c_E \neq c_\lambda.$$

Часто графическое изображение в виде совокупности кривых получается при физическом моделировании (рисунок 2).



x – входной фактор; y – выходной фактор; K_1, K_2, K_3 – дискретные параметры
а) исходные кривые; б) «поляризация»; в) обобщенная кривая

Рисунок 2 – Результаты однофакторного эксперимента и их аффинное преобразование

Реально, существует непрерывная зависимость

$$y = (x, k, m, n), \quad (2)$$

где x – входной (изучаемый) фактор;
 k, m, n – другие факторы.

Поскольку для трехмерного пространства, когда реализуется связь $y = (x, k)$, возникает поверхность отклика, которую сложно представлять графически, то, как правило, исследователи представляют графически результаты исследований в виде совокупности кривых, построенных при некотором фиксированном значении фактора K_i . При этом каждая кривая представляет собой след пересечения поверхности отклика, его проекцию на плоскость $x - y$. Такая ситуация возникает из желания детализировать исследование, увеличить его применимость. Вместе с тем, поскольку разные исследователи могут произвольно принимать дискретные значения параметра K , это приводит к несходности результатов и спорам об истинности результатов. Другое обстоятельство – необходимость интерполирования в случае, если необходимо получить результаты при $k_{i-1} < k_i < k_{i+1}$. Это затрудняет пользование диаграммой, особенно если используются нелинейные шкалы, например, логарифмические.

Аффинные преобразования с целью получения обобщенной зависимости включают две операции:

- 1) поляризация;
- 2) нормирование.

Рассмотрим самое общее уравнение

$$y = y_0 + kx^n. \quad (3)$$

Член kx^n учитывает действие фактора x , а y_0 – всех остальных факторов, которые действуют «аддитивно», т. е. как добавок.

Поляризация математически означает устранение аддитивно действующих факторов и выражается как

$$\Delta y = y - y_0 = kx^n. \quad (4)$$

Нормирование заключается в устранении факторов, действующих «мультипликативно» как сомножители, и выражается так:

$$\overline{\Delta y} = \frac{\Delta y}{\Delta y_{cm}}, \quad (5)$$

где Δy_{cm} – приращение величины функции при некотором x_{cm} , которое можно выбрать произвольно.

Используя выражения (4), (5), получим

$$\overline{\Delta y} = \frac{\Delta y}{\Delta y_{cm}} = \frac{kx^n}{kx_{cm}^n} = \left(\frac{x}{x_{cm}} \right)^n = Ax^n, \quad (6)$$

где $A = \left(\frac{1}{x_{cm}} \right)^n = const$, одинаковые для всех кривых, поэтому функция $\overline{\Delta y} = Ax^n$ даст одну кривую, выражающую обобщенную зависимость $y = \varphi(x)$.

Таким образом, алгоритм получения обобщенной зависимости сводится к двум операциям:

– поляризация $\Delta y = y - y_0 = kx^n$;

– нормирование $\overline{\Delta y} = \frac{kx^n}{kx_{cm}^n}$.

Как видно из процедуры аффинных преобразований эти две операции устраняют влияние тех факторов, которые характеризуют особые свойства изучаемого процесса, то что принято называть «условия однозначности».

Для получения конкретного значения y при заданных условиях необходимо провести обратные операции:

– денормирование $\overline{\Delta y} \cdot \Delta y_{cm} = \Delta y_i$;

– деполяризацию $\Delta y_i + y_{0i} = y_i$.

Эти два действия характеризуют воздействие условий однозначности и позволяют получить одно единственное значение искомой величины, т.е. выполняются требования алгоритма получения частных значений из общего уравнения.

Для практического пользования весь этот метод может быть представлен в виде номограммы (рисунок 3), где представлены результаты по применению этого метода [3].

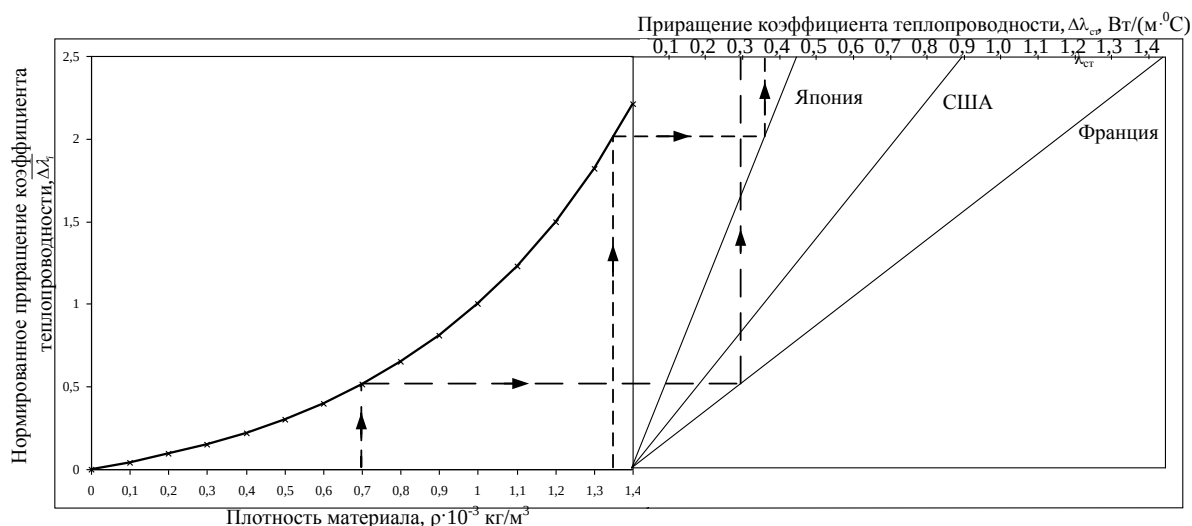


Рисунок 3 – Обобщенная зависимость для определения коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов

В левом квадранте этой номограммы представлена обобщенная зависимость $\overline{\Delta \lambda}_i = f(\rho)$ (ρ – плотность огнеупоров). В правом квадранте реализуется умножение

$\Delta\lambda$, $\Delta\lambda_{ст}$ которая в данном примере задается дискретно (по уравнениям), хотя величина $\Delta u_{ст}$ может быть выражена и кривой.

Этот метод был использован для решения частных задач теплопроводности [3,4], нагрева металла [5], аэродинамики [6] и ряда других задач. Это позволяет нам заявить о применении его как решение для создания обобщенных зависимостей на основе частных результатов.

Библиографический список

1. А.А. Гухман Введение в теорию подобия . М.: Высшая школа, 1973. – 296 с.
2. Михеев М. А. Основы теплопередачи/ М.А. Михеев, И. М. Михеева, М. Энергия, 1973, 319 с., ил.;
3. Стерлигов В.В. Влияние структуры теплоизоляционных материалов на коэффициент теплопроводности. / В.В. Стерлигов, Д.А. Шадринцева // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2014. – №2. – С.30-33.
4. Стерлигов В.В. Создание обобщенной модели теплопроводности для тел с анизотропными свойствами. / В.В. Стерлигов, А.А. Чекулаев // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2011. – №8. – С.45–48.
5. В.В. Стерлигов Об одном способе решения задач регулярного режима нагрева. Известия вузов. Черная металлургия. 1988, №12, С 103-105
6. В.В. Стерлигов, В.Я. Рудерфер. Известия вузов. Черная металлургия, 1983, №10, С106-109.

УДК 536.2.083:519.876.5

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАГНАЦИИ ВОЗДУШНОГО СЛОЯ ДЛЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ

Стерлигов В.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк, Россия, razm@list.ru*

Аннотация. В работе показана возможность удержания воздушного слоя в системе геометрических элементов для целей теплоизоляции.

Ключевые слова: свободная конвекция, теплоизоляция, слой воздуха, геометрическое сопротивление.

Abstract. The paper shows the possibility of keeping the air layer in the system of geometric elements for thermal insulation purposes.

Keywords: free convection, thermal insulation, air layer, the geometric resistance.

Теплоизоляционный материал – это структура, заполненная воздухом. В работе [1] показана возможность получения обобщенной характеристики для разных теплоизоляторов, если в качестве входного фактора использовать пористость (то есть долю воздуха в объеме).

Физической моделью стабилизации (удержания) неподвижного слоя воздуха для предлагаемого типа теплоизоляционного материала является процесс, наблюдаемый при использовании меха: остья, выступающие перпендикулярно поверхности шкуры и расположенные с достаточно большой частотой, удерживают слой воздуха толщиной δ , равной высоте (длине) остья.

В работе [2] приведена логическая схема тепловой работы такой теплоизоляции; показано, что геометрическое давление, возникающее при свободной конвекции, вызывает движение среды и переходит в динамическое.

Движение реальной (вязкой) жидкости или газа происходит с преодолением сопротивления трения и местных сопротивлений. Потери давления, обусловленные сопротивлением, в гидродинамике выражаются уравнением

$$\Delta P_{\text{пот}} = \zeta \Delta P_{\text{дин}},$$

где $\Delta P_{\text{пот}}$ – потери давления, Па;
 ζ – коэффициент гидравлического сопротивления;
 $P_{\text{дин}}$ – динамическое давление.

При условии $\zeta > 1$ на потери (преодоление сопротивления) будет израсходована вся энергия движения.

Математическое обоснование возможности стагнации (торможения) пристенного слоя при свободной конвекции возникает из анализа уравнений Л. Эйлера, Д. Бернулли и Л. Прандтля для ламинарного пограничного слоя.

Для закрытого потока в трубе уравнение Д. Бернулли для реальной жидкости показывает, что потери кинетической энергии при движении закрытого потока в трубе компенсируются за счет потенциальной энергии статического давления.

В открытом пространстве слой при свободной конвекции можно определить как пограничный вдоль какой-то поверхности. Из уравнения Л. Прандтля для пограничного слоя ламинарного течения можно записать условия $dP/dy = 0$ и $dP/dx = 0$ (где x и y – координаты), которые означают отсутствие градиента давления на поверхности тела (также, как и в открытом невозмущенном пространстве, то есть $P = \text{const}$ или $P_1 = P_2$ [3]).

Для этого случая на основе уравнения Бернулли можно записать

$$\Delta P_{\text{пот}} = \left(\frac{w_1^2}{2} \rho - \frac{w_2^2}{2} \rho \right),$$

где w_1 и w_2 – скорость жидкости в начале и в конце трубы, м/с;
 ρ – плотность воздуха, кг/м³.

Так как выполняется условие $\Delta P_{\text{пот}} > 0$, то справедливо $w_1 > w_2$, $\partial w_x / \partial x < 0$.

Уравнение неразрывности для плоского слоя записывается в следующем виде: $dw_x/dx + dw_y/dy = 0$. С учетом условия $dw_x/dx < 0$ можно записать $dw_y/dy > 0$. Последнее условие означает возникновение поперечного по отношению к основному направлению движения, «оттеснение» потока от поверхности. Таким образом, торможение потока в основном направлении ($dw_x/dx < 0$) вызывает движение в поперечном направлении ($dw_y/dy > 0$), что может быть замечено, если поток визуализировать. Внешне при визуализации потока, например дымом, это будет проявляться в появлении дыма на поверхности остьев, его вытеснении из слоя, в котором происходит торможение за счет трения или местного сопротивления.

Для проверки гипотезы о возможности торможения были проведены расчеты с учетом местных сопротивлений, когда реализуется условие $\Delta P_{\text{пот}} = \zeta_{\Sigma} P_{\text{дин}}$, где ζ_{Σ} – суммарный коэффициент гидравлического сопротивления.

Наиболее близким к структуре меха случаем является пучок труб, расположенный в шахматном порядке. Коэффициент местного сопротивления такого пучка труб определяется следующим образом [4]:

$$\zeta = n \frac{S}{b} \alpha + \beta.$$

Результаты расчета коэффициентов местных сопротивлений показали, что выполнения условия $\zeta_{\Sigma} > 1$ легко достигнуть при различных вариантах конструкций для нескольких рядов труб.

Другим способом достижения стагнации является трение. Классическим случаем течения жидкости, для которого существует аналитическое решение потерь на трение, является так называемое «течение Пуазейля», представляющее собой стационарное одномерное ламинарное течение в плоском канале, образуемом двумя бесконечно большими параллельными плоскостями.

Величина потерь на трение для задачи Пуазейля определяется по формуле

$$\Delta P_{\text{тр}} = \lambda \frac{L}{d_3} \frac{\bar{w}_x^2}{2} \rho,$$

где $\bar{w}_x$ – средняя скорость по сечению, м/с;
 d_3 – эквивалентный диаметр сечения, м;
 λ – коэффициент трения;
 L – длина участка, м.

Для рассматриваемого течения решение уравнения Пуазейля имеет вид

$$\lambda = \text{Re} / 96,$$

где $\text{Re} = \frac{\bar{w}_x d_3}{\nu}$ – число Рейнольдса;

ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с.

В настоящей работе необходимо определить геометрию канала, в котором может быть реализовано явление стагнации за счет трения.

Решение уравнения для определения значения d_3 позволяет определить геометрические параметры системы: толщину слоя между ребрами и их высоту.

В терминах теории подобия условие стагнации может быть выражено числом подобия Sg (Sg – Stagnation), учитывающим отношение

$$\frac{\Delta P_{\text{пот}}}{\Delta P_{\text{геом}}} = \frac{\Delta P}{\text{Hg} \Delta \rho} = Sg.$$

Отсутствие такого числа подобия среди тех, которые уже известны в специальной терминологии [5], говорит о том, что эта задача еще не решена.

Ближайшим аналогом числа Sg является число Эйлера $Eu = \frac{\Delta P}{w^2 \rho}$, представляющее собой падение давления при движении среды, отнесенное к динамическому давлению, величина которого уже определялась ранее.

В работе при опытной проверке гипотезы¹ использовали образцы, характеристики которых представлены в таблице.

Для выявления возможности создания застойной зоны была создана опытная установка. Визуализацию потока осуществляли дымом. На рисунке 1 показаны фотографии образцов при визуализации потока. В первом случае дым проходит сквозь остья по всему сечению пучка, а во втором четко виден вытесненный дым в застойной зоне, где нет движения, при этом видна зона в начале участка, где дым еще проходит внутри пучка.

¹ В опытах принимала участие Е.А. Плюснина.

Таблица 1

Образец	Материал остьев (игл)	Расположение остьев	d , мм	b , мм	S , мм
1	Алюминий	Коридорное	0,8	5	18
2	Сталь	Шахматное	0,2	4	12
3	Хлор-винил	Коридорное (в виде пучка)	1,0	15	4
4	Щетина	Шахматное	0,2	0,5	12

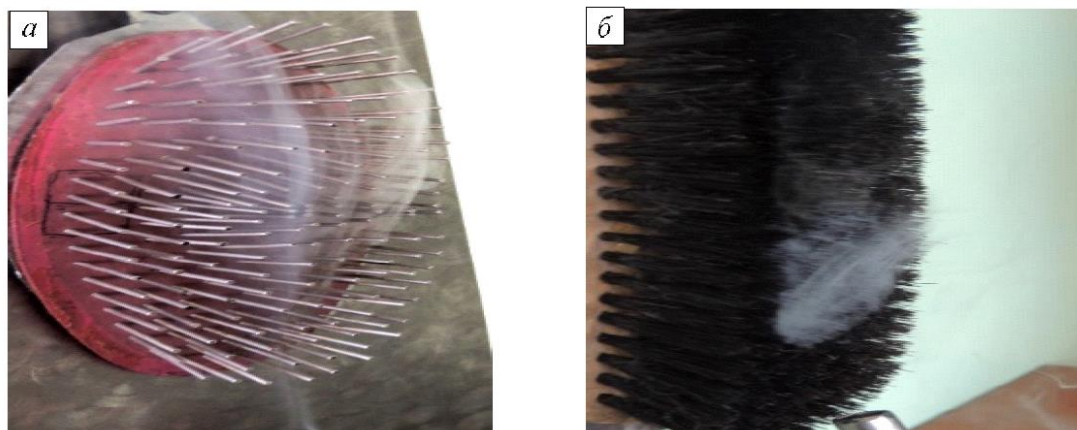


Рисунок 1 – Фотографии по визуализации потока при использовании образцов (а) и (б)

Другая установка представляет собой металлическую емкость, внутри которой установлен нагреватель. К лицевой части установки припаяны металлические стержни диам. 1 мм, расположенные в шахматном порядке; высота игл составляет 30 мм, шаг между остьями в продольном и поперечном направлении 10 мм. Шаг между остьями изменяли путем использования трубок («надеваемых» на стрержни) различного диаметра: от 2 до 6 мм. В емкости поддерживали постоянную температуру воды (100 °С) за счет кипения. Для выявления застойной зоны и определения наилучших геометрических параметров системы дым пропускали через остья.

На рисунке 2 приведены фотографии опытов при использовании трубок разного диаметра. При $d = 1$ мм (рисунок 2, а) видно, что поток, визуализированный дымом, проходит через все сечение пучка. При $d = 3$ мм (рисунок 2, б) поток существует только в нижней части; в верхней части происходит отеснение его от поверхности нагрева, так как выше находится застойная зона. При $d = 4$ мм (рисунок 2, в) более ярко видна застойная зона.

Таким образом опыты показали, что при свободной конвекции при движении нагреваемого потока вдоль горячей стенки при определенных геометрических размерах можно добиться образования застойной зоны с характерным вытеснением потока из пучка и перевести теплообмен из режима конвекции в режим теплопроводности.

Для доказательства изменения теплового режима на этой же установке были проведены измерения плотности теплового потока (q) специальным зондом ИПП-2. При этом были получены следующие величины:

- при $d = 1$ мм (проходной слой) $q = 161$ Вт/м² (нет застоя воздуха);
- при $d = 4$ мм (застойный слой) $q = 81$ Вт/м² (застой воздуха).

– **Выводы.** Математический анализ условий явления показал возможность создания застойной зоны и использования структуры из «остьев» с целью теплоизоляции. Численный эксперимент, проведенный на основе известных уравнений, показал возможность создания такой структуры и продемонстрировал методику расчета гидравлических (аэродинамических) показателей конструкции. При физическом эксперименте визуализирова-

но вытеснение потока, которое является признаком возникновения застойной зоны. Показано влияние конструктивных элементов структуры на характер течения потока и тепловую эффективность предлагаемого решения. Все это позволяет утвердиться в правильности высказанной гипотезы и перейти к поиску практических решений и разработке технологий производства предлагаемого типа теплоизоляции.

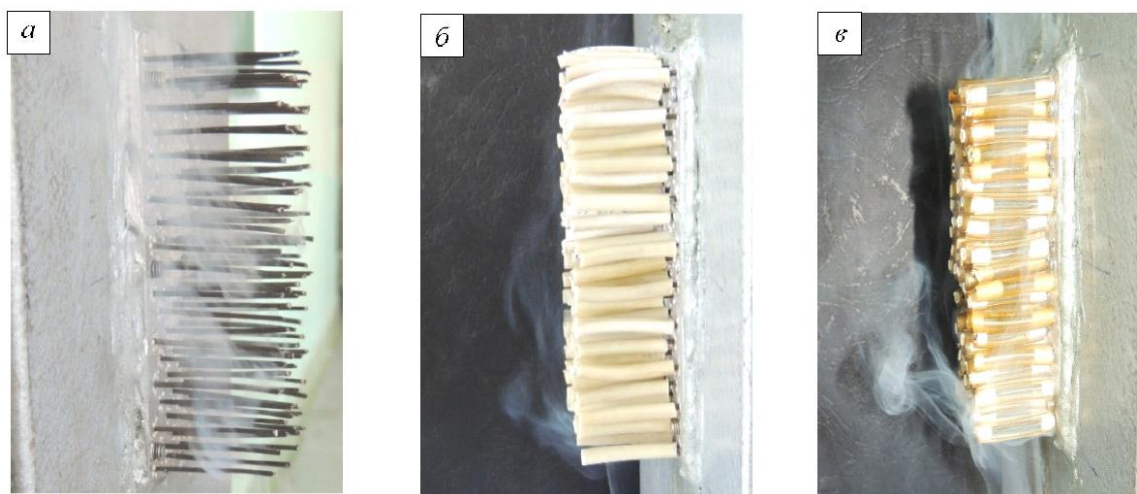


Рисунок 2 – Движение дыма в пучке стержней диам. 1 мм (а), 3 мм (б) и 4 мм (в)

Библиографический список

1. Стерлигов В.В., Шадринцева Д.А. Влияние структуры теплоизоляционных материалов на коэффициент теплопроводности // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 2. С. 30 – 35.
2. Стерлигов В.В., Михайличенко Т.А. О возможности использования стационарного воздушного слоя для теплоизоляции энергетических агрегатов // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. 2011. Вып. 28. С. 72 – 74.
3. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Изд. 2-е. – Л.: МАШГИЗ, 1962. – 456 с.
4. Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования – М.: Металлургия, 1964. – 385 с.
5. Петухов Б.С. Теория теплообмена. Терминология. Вып. 83. – М.: Наука, 1971. – 28 с.

УДК 536.3:535.24

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОСТЕКЛЕНИЯ ЗДАНИЙ

Стерлигов В.В.

Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк, Россия, razm@list.ru

Аннотация. Разработана математическая модель теплового сопротивления окон с заполнением лучепоглощающим газом и проведена опытная проверка ее.

Ключевые слова: тепловое сопротивление, теплопередача, степень черноты, элементы остекления.

Abstract. A mathematical model of thermal resistance of windows filled with better absorbing the gas and conducted a pilot test it.

Keywords: thermal resistance, heat transfer, degree of blackness, glazing elements.

Энергосбережение объявлено одним из приоритетов модернизации экономики России, а уменьшения тепловых потерь через ограждения зданий признано одним из важнейших направлений этой проблеме. В отечественном строительстве доля площади элементов в общей площади поверхности административных, общественных и жилых зданий достаточно высока, что с учетом сурового климата и малого термического сопротивления остекления приводит к большим тепловым потерям. В Сибирском государственном индустриальном университете на кафедре теплоэнергетики и экологии была выполнена работа по изучению механизмов теплопередачи в пакетах оконного остекления.

Нормативно установлено требование повышения теплового сопротивления до $R_{cm} = (0,7-1,0)$ град·м²/Вт при существующем ныне уровне 0,3-0,4. Известное решение предлагают заполнение камер ПВХ-окон аргоном, использование специальных стекол и пленок. Нами было исследовано действие заполнения камер окон лучепоглощающим газом.

Математический анализ условий теплообмена на базе работ [1,2] показал, что основным видом теплообмена через современные камерные окна является излучение. За счет теплопроводности стекол и воздушных прослоек передается около 25-30% всего тепла, а остальное – за счет теплоизлучения.

Для проверки теоретических расчетов были проведены испытания окон с заполнением камер воздухом, азотом, аргоном и диоксидом углерода CO_2 ¹. При прохождении тепла от источника измерялись температура поверхности стекол с обеих сторон двухкамерного пакета. Замер температур осуществлялся термопарами и параллельно тепловизором testo-881, что дало хорошую сходимость. Тепловой поток измерялся специальным датчиком ИПП-2000.

При сравнении результатов за базовый вариант принимался пакет с воздушным заполнением, который имел тепловое сопротивление $R_{cm} = (0,31-0,34)$ град·м²/Вт. Использование дорогостоящего инертного аргона для заполнения камер не дало практически никакого эффекта, хотя такие конструкции широко рекламируются в настоящее время на рынке, несмотря на возрастание в цене за счет аргона.

Использование CO_2 в качестве заполнителя камер позволило снизить лучистый теплообмен на 8-10%. Это хорошо согласуется с выводами теоретического анализа условий лучистого теплообмена для двух поверхностей с лучепоглощающей прослойкой [3], который показывал изменение лучистого теплообмена при заполнении поглощающим газом по сравнению с лучепрозрачной газовой прослойкой в соотношении, где – степень черноты газовой прослойки. Увеличение степени черноты газа, заполняющего прослойку между стеклами, ведет к снижению приведенной степени черноты системы и, следовательно, к снижению интенсивности лучистого теплообмена.

Полученная аналитическая зависимость указывает направление, по которому необходимо развивать указанное предположение.

Газы и пары обладают способностью поглощать и излучать лучистую энергию. Трех- и более атомные газы обладают селективной способностью. Лишь в определенных интервалах длин волн, так называемых полосок, расположенных в различных частях спектра, происходит поглощение и излучение энергии. В диапазонах этих полос излучения степень черноты газа различна [4].

Следовательно, для нашей задачи целесообразно подобрать состав смеси газов для заполнения камер стеклопакетов таким образом, чтобы интервалы излучения отдельных ингредиентов создавали приближение к сплошному спектру инфракрасного излучения в пределах длин волн от 0 до ∞ подобно излучению твердого «серого» тела.

Таким образом, использование многоатомных газов с высокой поглощательной способностью, а так же их смеси, позволяет получить еще больший энергетический и финансовый эффект.

¹ В опытах принимала участие Слажнева К.С.

По результатам работы был получен патент на изобретение по способу изготовления стеклопакетов с заполнением лучепоглощающим газом.

Библиографический список

1. Михеев М. А. Основы теплопередачи/ М.А. Михеев, И. М. Михеева, М. Энергия, 1973, 319 с., ил.;
2. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена М. – Л. Матгиз., 1962, 455 с, ил.;
3. Казанцев Е. И. /Промышленные печи. М.: Металлургия, 1964, 451 с., ил.;
4. Мак. Адамс В./ Теплопередача, М. Металлургия, 1961, 689 с., ил.

УДК 669.046:536.24

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ВНУТРЕННЕГО ТЕПЛООБМЕНА В САДОЧНОЙ ПЕЧИ

Бухмиров В.В., Сулейманов М.Г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

г. Иваново, Россия, smusag@mail.ru

Аннотация. В работе описывается решение внутренней задачи теплообмена в садовой печи. Трехмерная математическая модель, учитывающая протекание газов через пористую садку, позволяет находить температурное поле садки. Модель реализована в виде программы на языке программирования Delphi. Программа позволяет моделировать нагрев садки с известными теплофизическими свойствами и пористостью при заданных граничных условиях.

Ключевые слова: математическое моделирование, модель печи, садовые печи, пористая садка, метод конечных разностей.

Abstract. This paper considers mathematical modeling of the batch furnace. A three-dimensional mathematical model of the furnace taking into account the filtration combustion products through the pores is used to optimize heating modes. Problem of heat transfer in the furnace is solved using the finite difference method and the zonal method considering filtering combustion products through the batch, presence of flame, heat loss to the accumulation lining and heat loss to the environment through the furnace lining.

Keywords: mathematical model, batch furnace, porous media, heating, finite difference method.

Реализация производственного процесса в машиностроении связана с технологией нагрева металла, которая является одной из самых энергоемких операций. Для промышленного производства с применением нагревательных печей актуальными остаются проблемы повышения качества продукции и достижения высоких показателей энергетической эффективности. Для определения рациональных температурных режимов в металлургии и машиностроении широко распространено математическое моделирование процессов теплообмена, позволяющее повысить эффективность работы оборудования и качество нагрева металла [1].

Для совершенствования тепловой работы садовой печи разработана трехмерная математическая модель газовой печи с подподовой топкой [2]. В модели рабочее пространство разделено на две объемные зоны, что позволяет более полно учесть неизотермичность тепловоспринимающих поверхностей садки, внутренней поверхности футеровки, и объема продуктов сгорания, заполняющих рабочее пространство печи. Расчет процесса теплообмена в рабочем пространстве производится путем совместного решения внешней и внутренней задач.

Насыпная садка образована сравнительно мелкими одинаковыми изделиями помещенными в контейнер в форме параллелепипеда с размерами $L \times b_n \times h_c$. Пористость садки f задают из эксперимента.

Допускаем, что температурное поле нагреваемой садки является симметричным относительно вертикальных плоскостей, проходящих через ее середину перпендикулярно боковым и торцевым сторонам, тогда систему координат можно выбрать так, как показано на рисунке 1. В этом случае при решении задачи теплопроводности в качестве расчетной области можно рассматривать параллелепипед с размером $0 < x < L/2$, $0 < y < b_n/2$, $0 < z < h_c$.

Температурное поле насыпной садки $T(x, y, z, t)$ в системе координат, показанной на рисунке 1, находят решением трехмерного уравнения теплопроводности:

$$c_c \rho_c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_c(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_c(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_c(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями.

Начальное условие:

$$T(x, y, z, t) = T_0. \quad (2)$$

Граничные условия в центральной плоскости садки при $x = 0$, $y = 0$ – условия симметрии температурного поля относительно вертикальной плоскости, проходящей через ось Oy и ось Ox соответственно:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = 0. \quad (3, 4)$$

Граничное условие на торцевой поверхности садки (при $x = L/2$):

$$\lambda_c(T) \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L/2} = q_{x=L/2}. \quad (5)$$

Граничное условие на боковой поверхности садки, обращенной к стене (при $y = b_n/2$):

$$\lambda_c(T) \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=b_n/2} = q_{y=b_n/2}. \quad (6)$$

Граничное условие на нижней поверхности садки (при $z = 0$):

$$-\lambda_c(T) \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = q_{z=0}. \quad (7)$$

Граничное условие на верхней поверхности садки (при $z = h_c$):

$$\lambda_c(T) \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=h_c} = q_{z=h_c}. \quad (8)$$

В уравнениях (1), (3), (4), (6) – (8) эффективный коэффициент теплопроводности садки $\lambda_c(T)$ рассчитывается по формулам [3], а плотности тепловых потоков $q_{x=0}$, $q_{x=L}$, $q_{y=b_n/2}$, $q_{z=0}$, $q_{z=h_c}$ определяются решением внешней задачи теплообмена [2].

Для решения задачи теплопроводности (1) – (8) методом конечных разностей введем в расчетной области $0 \leq x \leq L$, $0 \leq y \leq b_n$, $0 \leq z \leq h_c$ сетку с шагами $\Delta x = L/n_x$, $\Delta y = b_n/n_y$, $\Delta z = h_c/n_z$, узлы которой имеют координаты $x_i = i \cdot \Delta x$, $y_j = j \cdot \Delta y$, $z_m = m \cdot \Delta z$, ($i=0...n_x$, $j=0...n_y$, $m=0...n_z$), дискретное время $t_k = k \cdot \Delta t$ ($k=1,2,...$) с шагом Δt . Сеточные значения температуры садки в узловых точках x_i , y_j , z_m , в моменты времени t_{k-1} (в начале k -го шага) и t_k (в конце k -го шага) обозначим через T_{ijm}^{k-1} и T_{ijm}^k соответственно.

Для решения трехмерного уравнения теплопроводности (1) использован метод расщепления [4]. При учете переноса тепла по каждому из трех координатных направлений применим чисто неявную разностную схему. Введем следующие обозначения:

- T_{ijm}^{k-1} и T_{ijm}^k – сеточные значения температуры садки в узловых точках x_i , y_j , z_m в моменты времени t_{k-1} (в начале k -го шага) и t_k (в конце k -го шага) соответственно;
- $\hat{T}_{ijm}$ – температуры, по которым рассчитываются значения коэффициента теплопроводности садки и плотности внешних тепловых потоков;
- $T_{ijm}^{k-2/3}$ и $T_{ijm}^{k-1/3}$ – промежуточные значения температур, используемые при реализации метода расщепления.

Разностный аналог одномерной задачи теплопроводности, описывающей перенос тепла вдоль оси x для каждого $j=0...n_y$, $m=0...n_z$, имеет следующий вид:

- при $i=1...n_x - 1$

$$f_{ijm}^- \cdot T_{i-1,jm}^{k-2/3} - \left[1 + \left(f_{ijm}^- + f_{ijm}^+ \right) \right] \cdot T_{ijm}^{k-2/3} + f_{ijm}^+ \cdot T_{i+1,jm}^{k-2/3} + T_{ijm}^{k-1} = 0 \quad (9)$$

где f_{ijm}^- и f_{ijm}^+ – сеточные числа Фурье слева и справа от i -го узла:

$$f_{ijm}^- = \lambda_c \left(\frac{T_{ijm}^{k-1} + T_{i-1,jm}^{k-1}}{2} \right) \cdot \Delta t / (c_c \cdot \rho_c \cdot \Delta x^2), \quad (10)$$

$$f_{ijm}^+ = \lambda_c \left(\frac{T_{ijm}^{k-1} + T_{i+1,jm}^{k-1}}{2} \right) \cdot \Delta t / (c_c \cdot \rho_c \cdot \Delta x^2); \quad (11)$$

- при $i = 0$ (разностный аналог граничного условия (3)):

$$-\left(1 + 2 \cdot f_{0,jm}^+ \right) \cdot T_{0,jm}^{k-2/3} + 2 \cdot f_{i=0,jm}^+ \cdot T_{1,jm}^{k-2/3} + T_{0,jm}^{k-1} + 2 \cdot r_{\Delta x} \cdot q_{x=0} = 0; \quad (12)$$

- при $i = n_x$ (разностный аналог граничного условия (4)):

$$-\left(1 + 2 \cdot f_{n_x,jm}^- \right) \cdot T_{n_x,jm}^{k-2/3} + 2 \cdot f_{n_x,jm}^- \cdot T_{n_x-1,jm}^{k-2/3} + T_{n_x,jm}^{k-1} + 2 \cdot r_{\Delta x} \cdot q_{x=l_{\Pi}} = 0, \quad (13)$$

где $r_{\Delta x}$ – вспомогательный параметр, характеризующий степень влияния компоненты q_x плотности внешнего теплового потока на изменение температурного поля садки в течение шага по времени:

$$r_{\Delta x} = \Delta t / (c_c \cdot \rho_c \cdot \Delta x). \quad (14)$$

Разностные аналоги одномерных задач теплопроводности, описывающие перенос тепла вдоль оси y и z , записываются аналогично. Для решения полученного разностного

аналога уравнения теплопроводности на каждом шаге по времени применяется итерационная процедура, включающая в себя следующие этапы.

1. Задание температур $\hat{T}_{ijm} = T_{ijm}^{k-1}$ ($i=0...n_x, j=0...n_y, m=0...n_z$).
2. Методом прогонки нахождение промежуточных температур:
 $T_{ijm}^{k-2/3}$ ($i=0...n_x$) для каждого $j=0...n_y$ и $m=0...n_z$;
 $T_{ijm}^{k-1/3}$ ($j=0...n_y$) для каждого $i=0...n_x$ и $m=0...n_z$;
 T_{ijm}^k ($m=0...n_z$) для каждого $i=0...n_x$ и $j=0...n_y$;
3. Если максимальное отклонение найденных значений температур в конце шага по времени T_{ijm}^k от температур $\hat{T}_{ijm}$ превышает заданную по условию погрешность расчета, присваивание $\hat{T}_{ijm} = T_{ijm}^k$ ($i=0...n_x, j=0...n_y, m=0...n_z$) и возврат к п.2.
4. Нахождение средних температур поверхностей садки $\bar{T}_{x=0}, \bar{T}_{x=L}, \bar{T}_{y=b_n/2}, \bar{T}_{z=0}, \bar{T}_{z=h_c}$, используемых при решении внешней задачи теплообмена.

Футеровку представим в виде плоских стенок, тогда температурные поля отдельных элементов футеровки: пода $T_{\phi 1}(x, t)$, стен $T_{\phi 2}(x, t)$, заслонок $T_{\phi 3}(x, t)$ и свода $T_{\phi 4}(x, t)$ определяются решениями одномерных уравнений теплопроводности:

$$c_{\phi} \rho_{\phi} \frac{\partial T_{\phi}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_{\phi}(T_{\phi}) \cdot \frac{\partial T_{\phi}}{\partial x} \right], \quad 0 < x < \delta_{\phi}. \quad (15)$$

Начальное условие:

$$T_{\phi}(x, 0) = T_0, \quad 0 \leq x \leq \delta_{\phi}. \quad (16)$$

Граничные условия на наружных поверхностях футеровки стен и свода (начало координат $x = 0$ соответствует внешним поверхностям футеровки):

$$\lambda_{\phi}(T_{\phi}) \frac{\partial T_{\phi}}{\partial x} \bigg|_{x=0} = \alpha_w(T_w) \cdot (T_w - T_{oc}) \equiv q_w, \quad (17)$$

- где T_w – температура кожуха, °C;
 q_w – плотность теплового потока, переносимого через зазор между футеровкой и кожухом, Вт/м²;
 T_{oc} – температура окружающей среды, °C;
 α_w – коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности кожуха, Вт/м²·К.

Граничное условие на наружных поверхностях футеровки заслонок:

$$\lambda_{\phi}(T_{\phi}) \frac{\partial T_{\phi}}{\partial x} \bigg|_{x=0} = \alpha_b \cdot (T_{\phi}|_{x=0} - T_b), \quad (18)$$

- где T_b – температура воды, охлаждающей заслонки, °C;
 α_w – коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности заслонок, Вт/м²·К.

Граничное условие на нижней поверхности пода:

$$\lambda_{\phi}(T_{\phi}) \frac{\partial T_{\phi}}{\partial x} \bigg|_{x=0} = 0. \quad (19)$$

Граничные условия на внутренних поверхностях футеровки:

$$\lambda_{\phi}(T_{\phi}) \frac{\partial T_{\phi}}{\partial x} \Big|_{x=\delta_{\phi}} = q_{\phi}. \quad (20)$$

где q_{ϕ} – плотность теплового потока на внутренних поверхностях футеровки, определяется решением внешней задачи теплообмена, Вт/м².

Система (15) – (20) решается методом конечных разностей. Введем для каждого элемента футеровки в расчетной области $0 \leq x \leq \delta_{\phi}$ сетку с шагом $\Delta x = \delta_{\phi} / N$ (где N – число слоев), узлы имеют координаты $x_i = i \cdot \Delta x$ ($i=0..N$). Обозначим время $t_k = k \cdot \Delta t$ ($k=1,2,\dots$) с шагом Δt . Сеточные значения температуры футеровки в узловых точках x_i в моменты времени t_{k-1} (в начале k -го шага) и t_k (в конце k -го шага) обозначим через $T_{\phi,i}^{k-1}$ и $T_{\phi,i}^k$ соответственно.

Разностный аналог начального условия имеет следующий вид:

$$T_{\phi,i}^0 = T_{\phi,n}, \quad i=0..N. \quad (21)$$

Разностный аналог уравнения теплопроводности при $i=1..N-1$:

$$f_i^- \cdot T_{\phi,i-1}^k - \left[1 + (f_i^- + f_i^+) \right] \cdot T_{\phi,i}^k + f_i^+ \cdot T_{\phi,i+1}^k + T_{\phi,i}^{k-1} = 0, \quad (22)$$

где f_i^- и f_i^+ – сеточные числа Фурье слева и справа от i -го узла:

$$f_i^- = \lambda_{\phi} \left(\frac{T_{\phi,i}^{k-1} + T_{\phi,i-1}^{k-1}}{2} \right) \cdot \Delta t / (c_{\phi} \cdot \rho_{\phi} \cdot \Delta x^2), \quad (23)$$

$$f_i^+ = \lambda_{\phi} \left(\frac{T_{\phi,i}^{k-1} + T_{\phi,i+1}^{k-1}}{2} \right) \cdot \Delta t / (c_{\phi} \cdot \rho_{\phi} \cdot \Delta x^2). \quad (24)$$

При $i=0$ (разностный аналог граничного условия (17) для футеровки стен и свода):

$$-\left[1 + 2 \cdot f_0^+ \cdot (b_w + 1) \right] \cdot T_{\phi,0}^k + 2 \cdot f_0^+ \cdot T_{\phi,1}^k + T_{\phi,0}^{k-1} + 2 \cdot f_0^+ \cdot b_w \cdot T_{oc} = 0, \quad (25)$$

где b_w – сеточное число Био на поверхности кожуха:

$$b_w = \alpha_w (T_{\phi,1}^{k-1} - q_w \cdot r_{\phi}) \cdot \Delta x / \lambda_{\phi} (T_{\phi,1}^{k-1}), \quad (26)$$

q_w – плотность теплового потока, переносимого через зазор между футеровкой и кожухом, Вт/м²:

$$q_w = \lambda_{\phi} (T_{\phi,1}^{k-1}) \cdot (T_{\phi,2}^{k-1} - T_{\phi,1}^{k-1}) / \Delta x, \quad (27)$$

r_{ϕ} – вспомогательный параметр, характеризующий степень влияния плотности теплового потока q_{ϕ} на изменение температурного поля футеровки в течение шага по времени

$$r_{\phi} = \Delta t / (c_{\phi} \cdot \rho_{\phi} \cdot \Delta x). \quad (28)$$

Разностный аналог граничного условия (18) для футеровки заслонок при $i=0$:

$$-\left[1 + 2 \cdot f_0^+ \cdot (b_{\text{в}} + 1)\right] \cdot T_{\phi,0}^k + 2 \cdot f_0^+ \cdot T_{\phi,1}^k + T_{\phi,0}^{k-1} + 2 \cdot f_0^+ \cdot b_{\text{в}} \cdot T_{\text{ос}} = 0, \quad (29)$$

где $T_{\text{ос}}$ – температура окружающей среды, °C;
 $b_{\text{в}}$ – сеточное число Био на наружных поверхностях футеровки заслонок:

$$b_{\text{в}} = \alpha_{\text{в}} \cdot \Delta x / \lambda_{\phi} (T_{\phi,1}^{k-1}). \quad (30)$$

Разностный аналог граничного условия (19) для футеровки пода при $i=0$:

$$-\left[1 + 2 \cdot f_0^+\right] \cdot T_{\phi,0}^k + 2 \cdot f_0^+ \cdot T_{\phi,1}^k + T_{\phi,0}^{k-1} = 0. \quad (31)$$

Разностный аналог граничного условия (20) на внутренних поверхностях футеровки при $i=n$:

$$2 \cdot f_n^- \cdot T_{\phi,n-1}^k - \left(1 + 2 \cdot f_n^-\right) \cdot T_{\phi,n}^k + T_{\phi,n}^{k-1} + 2 \cdot r_{\phi} \cdot q_{\phi} = 0. \quad (32)$$

Система уравнений (21),(22),(25),(29),(30),(31) представляет собой разностный аналог задачи теплопроводности для отдельных элементов футеровки, решение данной системы выполняется методом прогонки.

Вывод. Разработана численная модель решения внутренней задачи теплообмена. Решение реализовано на языке программирования Delphi в среде Borland Delphi 7. Программа позволяет рассчитывать температурные поля насыпной садки и футеровки при заданных условиях однозначности.

Библиографический список

1. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей: Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1990. – 239 с.
2. Бухмиров В.В., Сулейманов М.Г. Математическая модель термической садочной печи // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве. III Всероссийская научно-практическая конференция Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве (ТИМ'2014), 27 апреля 2014 г., г. Екатеринбург: Материалы конференции. – Екатеринбург: УрФУ. – 2014. – С.138 – 140
3. Андреарчук А.В., Катель Н.М., Липов В.Я. и др. Общепромышленные электропечи непрерывного действия. – М.: Энергия, 1977.
4. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы математической физики. – М.: Научный мир, 2003. – 316 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ КОЛЬЦЕВОЙ ПЕЧИ С РЕГЕНЕРАТИВНЫМИ ГОРЕЛКАМИ

Ерёмин А.О., Гупало Е.В., Воробьева Л.А.

Национальная металлургическая академия Украины
г. Днепропетровск, Украина, gupaloelena@gmail.com

Аннотация. В докладе представлены результаты моделирования тепловой работы кольцевой печи, оборудованной регенеративными горелочными устройствами. Для работы печи с максимальной производительностью выбран энергоэффективный тепловой режим, определены расходы топлива по зонам печи, мощность горелочных устройств и их расположение. На основе результатов моделирования регенераторов горелочных устройств определены параметры шариковой насадки, обеспечивающие заданный коэффициент регенерации теплоты уходящих продуктов сгорания.

Ключевые слова: кольцевая печь, регенеративная горелка, экономия топлива, температурный режим, параметры регенеративной насадки.

Abstract. The paper presents the results of simulating of ring furnace work. The ring furnace which was equipped with regenerative burners was chosen as the subject of research. Authors chose the energy-efficient heating mode for the maximum furnace productivity and determined zonal fuel consumptions, capacity, and layout of burners. It was also carried out the simulation of the burners work and determined parameters of their regenerators filling, which are made of corundum balls, to provide the required value of the regeneration coefficient of waste gases.

Keywords: ring furnace, regenerative burner, fuel saving, temperature, parameters of regenerator filling.

Для нагрева трубных заготовок перед прошивкой широко используются кольцевые печи, в которых сжигание топлива осуществляется с помощью двухпроводных горелок, а продукты сгорания отводятся из рабочего пространства печи через дымопады, расположенные в начале методической зоны. Одной из главных статей энергозатрат кольцевых печей, достигающей в структуре теплового баланса 35 – 45 % от подведенного тепла, являются тепловые потери с уходящим дымом [1]. Утилизация теплоты дымовых газов осуществляется путем подогрева воздуха, подаваемого на сжигание топлива, до температуры 200 – 400 °С [2]. Более глубокая утилизация теплоты уходящего дыма может быть достигнута путем применения регенеративной системы отопления печи. По данным работ [3,4], использование регенеративных горелок обеспечивает экономию топлива до 65 % за счет возврата в рабочее пространство печи до 90 % теплоты, уходящих дымовых газов. При этом температура дыма на входе в регенеративную в насадку горелки может достигать 1400 °С, а на выходе из нее не превышает 200 °С и регулируется частотой переключения горелок [5, 6].

Цель данной работы: исследование нагрева металла в кольцевой печи, оборудованной регенеративными горелками, определение основных показателей энергоэффективности печи и конструктивных параметров регенеративных насадок горелок.

В качестве объекта исследования выбрана кольцевая печь, работающая по многозонному температурному режиму. В печи нагреваются цилиндрические заготовки из углеродистой стали диаметром 0,16 м и длиной 1,8 м до конечной температуры поверхности 1260 °С с перепадом температур по сечению заготовки 10 °С. Рабочее пространство печи разделено на шесть зон регулирования. Печь оборудована 30 регенеративными горелочными устройствами. В каждой зоне печи расположено по пять горелок, две из которых установлены на внутренней боковой стене печи, а три – на наружной. В каждой зоне тепловая мощность горелочных устройств, расположенных на внутреннем кольце печи, соответствует тепловой мощности горелок, расположенных на наружном кольце.

Печь отапливается природным газом с теплотой сгорания 33,8 МДж/м³. Максимальная производительность печи 50 т/ч. Основные размеры рабочего пространства: диа-

метр печи по средней линии – 15, 4 м; ширина пода – 4,5 м; высота – 1,6 м. Угол мертвой зоны печи $22^{\circ}30'$.

Исследования тепловой работы кольцевой печи и регенеративных горелочных устройств выполнены методом математического моделирования.

Для математического описания процесса нагрева металла использовано аналитическое решение задачи нагрева тел простых форм при распределенном подводе и отводе газообразного теплоносителя вдоль зоны теплообмена, которое позволяет определять закономерности изменения расхода топлива, температуры дымовых газов и температуры металла при нагреве металла в условиях равномерного подвода топлива вдоль зоны теплообмена [7]. При выполнении исследований тепловой работы печи в качестве ограничений принято, что максимальный расход топлива на зону не должен превышать $400 \text{ м}^3/\text{ч}$, максимальная температура дымовых газов в зонах регулирования – 1350°C .

Моделирование работы регенераторов горелочных устройств выполнено с использованием математической модели теплообмена в слое твердых тел с учетом аэродинамического сопротивления слоя [8], адаптированной по результатам теплотехнических испытаний регенеративных горелок [9]. Критериальная зависимость для средних коэффициентов теплоотдачи в слое насадки, обеспечивающая наименьшее расхождение экспериментальных и расчетных данных, выбрана в соответствии с рекомендациями работы [9].

При моделировании работы регенеративной насадки горелочных устройств принято, что начальная температура насадки и температура воздуха на входе в насадку составляют 20°C ; средняя температура дыма, уходящего из зоны теплообмена, принимается в соответствии с результатами моделирования нагрева металла; длительность дымового и воздушного периодов работы насадки 60 с. В качестве материала насадки регенераторов выбраны корундовые окатыши диаметром 20 мм. Термическая массивность элементов шариковой насадки учитывалась путем введения поправки на массивность в расчете коэффициента теплоотдачи. Порозность насадки, составляет 0,4. Расход воздуха и дыма в зоне теплообмена определяется в соответствии с результатами расчета расхода природного газа на зону печи. Теплофизические свойства металла, воздуха и дымовых газов, а также материала регенеративной насадки приняты в соответствии с работой [10]. Размеры поперечного сечения камеры регенератора и высота насадки определялись из условия получения одинакового для каждой зоны теплообмена коэффициента регенерации, равного 0,66 (температура подогрева воздуха составляет 80 % от температуры дымовых газов на выходе из рабочего пространства печи [3,5]), и аэродинамического сопротивления, не превышающего 2200 Па.

Результаты исследований представлены на рисунке 1 и в таблице 1.

Энергоэффективный режим нагрева металла в кольцевой печи, определен методом последовательного поиска. Как показали исследования, нагрев металла до заданных конечных параметров обеспечивается при расходе топлива $1852 \text{ м}^3/\text{ч}$, что соответствует удельному расходу природного газа $37,03 \text{ м}^3/\text{т}$. Средний коэффициент использования теплоты топлива в печи – 0,81.

Как видно из рисунка 1 тепловая нагрузка по зонам печи распределяется не равномерно: расходы топлива сначала возрастают с первой по третью зону печи, а затем уменьшаются, начиная с четвертой зоны, что обусловлено необходимостью обеспечения заданных конечных параметров нагрева металла. Поскольку расходы топлива по зонам 1 – 4 отличаются не существенно, то эти зоны печи могут быть оборудованы горелками одинаковой тепловой мощности: мощность горелок внутреннего кольца печи – не менее 1972 кВт; мощность горелок наружного кольца печи – не менее 1315 кВт (см. таблицу 1). Тепловая мощность горелок 5 зоны печи, расположенных на внутреннем кольце – не менее 1315 кВт, на наружном – не менее 875 кВт. Мощность горелок 6 зоны на внутреннем кольце – не менее 493 кВт, на наружном – не менее 329 кВт. Мощность одной горелки принималась с учетом запаса по расходу топлива на зону.

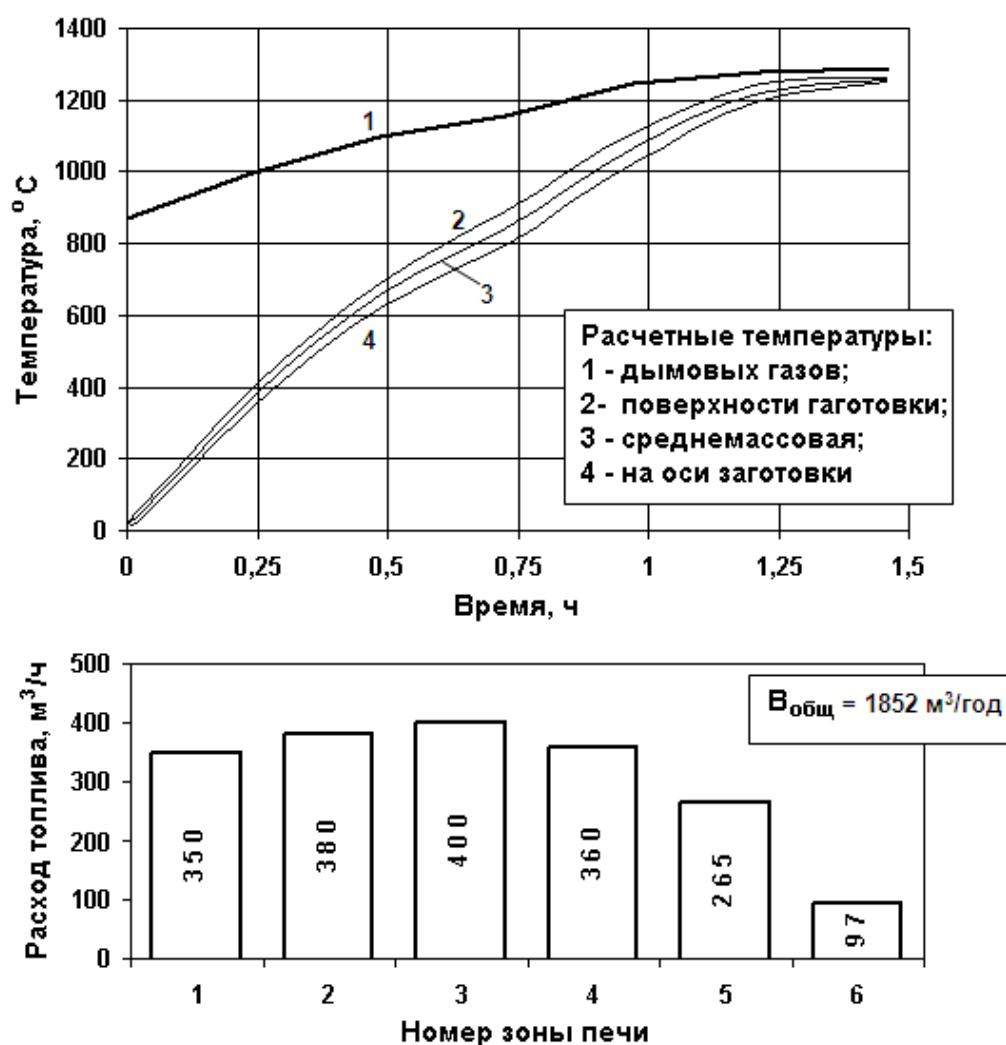


Рисунок 1 – Температурная и расходная диаграммы нагрева металла при энергоэффективном режиме

Таблица 1 – Характеристика шарикового регенератора горелочного устройства

Параметры	Номер зоны печи					
	1, 2, 3, 4		5		6	
	внутреннее кольцо печи	наружное кольцо печи	внутреннее кольцо печи	наружное кольцо печи	внутреннее кольцо печи	наружное кольцо печи
Количество горелок на кольце печи, шт	2	3	2	3	2	3
Количество регенерато- ров в зоне печи, шт	1	3	1	3	1	3

Продолжение таблицы 1

Параметры		Номер зоны печи					
		1, 2, 3, 4		5		6	
		внутреннее кольцо печи	наружное кольцо печи	внутреннее кольцо печи	наружное кольцо печи	внутреннее кольцо печи	наружное кольцо печи
Расход газа на 1 горелку с учетом запаса по расходу топлива на зону, м ³ /ч		210	140	140	94	53	35
Расход дыма и воздуха на свободное сечение ре- генератора при н.у., м ³ /с		1,21	0,403	0,802	0,267	0,134	0,101
Скорость дыма и воздуха на свободное сечение ре- генератора при н.у., м/с		1,49	1,33	1,253	0,742	1,21	1,121
Средняя за период температура дыма на входе в насадку, °С		1133		1287		1266	
Размеры поперечного се- чения насадки, м × м		0,9×0,9	0,55×0,55	0,8×0,8	0,6×0,6	0,5×0,5	0,3×0,3
Масса насадки, кг		530,5	201,5	426,2	161	163,7	59
Объем насадки, м ³		0,243	0,091	0,192	0,104	0,075	0,027
Удельная поверхность нагрева, м ² /м ³		180					
Средняя за период температура на выходе из насадки, °С	дыма	426	426	482	482	490	490
	воздуха	855	855	977	977	945	945
Коэффициент регенерации, %		0,66					
Аэродинамическое сопротивление, Па		2121	1780	1164	1278	1619	1400
Мощность 1 горелки с учетом запаса по расходу топлива на зону, МВт		1,972	1,315	1,315	0,875	0,493	0,329

В связи с ограниченностью свободного пространства на рабочей площадке внутреннего кольца печи, для обеспечения компактности оборудования предложено горелки, расположенные на внутреннем кольце печи и обслуживающие одну зону регулирования, оборудовать общим регенератором. При этом горелки, расположенные на наружном кольце печи, оборудованы индивидуальными регенераторами.

Как видно из таблицы 1, общая масса шариковой насадки всех регенераторов горелочных устройств, обеспечивающих степень утилизации теплоты уходящих дымовых газов 0,66, составляет 3,7 т. При цене корундовых окатышей 3125 \$/т стоимость насадки составит 11677 \$/т.

Библиографический список

1. Тимошпольский В. И. Кольцевые печи: теория и расчеты / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, М. Я. Пекарский; [Под общ. ред. В. И. Тимошпольского]. – Мн.: Выш. шк., 1993. – 248 с.
2. Сидоренко А. А. Эффективность совершенствования системы утилизации теплоты дымовых газов кольцевой печи / А. А. Сидоренко, Е. В. Гупало // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: Сборник докладов. III Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных с международным участием, посвященной 150-летию со дня рождения Владимира Ефимовича Грум-Гржимайло (Екатеринбург, 27-29 марта, 2014 г.). – Екатеринбург: УРФУ, 2014. – С. 92-95.
3. Russ Lang. Regenerative Burners / Russ Lang, Bruse B. Abe, Clive Lucas, John Newby // Electronic reproduction. Boca Raton, FL: CRC Press, 2004. Available Via World Wide Web. Access restricted to CRC Press subscribing libraries. – 790 p.
4. Дистергефт И. М. Регенеративные системы отопления для нагревательных печей прокатного и кузнечного производств (История развития. Теория и практика) / И. М. Дистергефт, Г. М. Дружинин, И. И. Щербинин [и др.] // Metallургическая теплотехника: сборник научных трудов НМетАУ. – 2002. – С. 44–57.
5. Web-сайт компании Hotwork Combustion Technology Limited. – Режим доступа: <http://www.hotworkct.com>. – Заголовок с экрана.
6. Дьяков С. В. Опыт применения горелок WS в нагревательных и термических печах / С. В. Дьяков, А. В. Дьяков, А. Е. Макий // Оборудование. Технический альманах. – №1, 2009. – С.14 – 16
7. Гупало О.В. Нагрівання тіл при розподілених підведенні палива та відведенні продуктів згоряння уздовж зони теплообміну// XXXIV міжнародна научно-практична конференція «Перспективні напрями отечественної науки», 13- 17 жовтня 2015 року. – С.50-53.
8. Губинский В. И., Лу Чжун-У. Теория пламенных печей. – М.: Машиностроение, 1995.– 255 с.
9. Затопляев Г. М. Теплотехническое испытание нагревательной печи с регенеративными горелками / Затопляев Г. М., Еремин А. О. // Metallургическая и горнорудная промышленность – № 3, 2000. – С. 85 –87.
10. Казанцев Е. И. Промышленные печи / Казанцев Е. И. // М.: Metallургия, 1975. – 368 с.

УДК 669.162

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ И ПАРНИКОВЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПРЯМОГО ЛЕГИРОВАНИЯ СТАЛИ

Лисиенко В.Г., Чесноков Ю.Н., Лаптева А.В.

*Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина
г. Екатеринбург, Россия, annalapteva@mail.ru*

Аннотация. Процесс прямого легирования стали ванадием (ЛП-В) состоит из печи жидкофазного восстановления – газификатора, шахтной печи для металлзации окатышей, электродуговой печи для выплавки стали. Приведены различные запатентованные схемы процессов ЛП-В. Для них вычислены значения энергоемкости и сквозной эмиссии диоксида углерода – углеродного следа. Для сравнения приведены значения энергоемкости и эмиссии для традиционной схемы легирования стали ванадием с использованием FeV.

Ключевые слова: сталь, ванадий, легирование, энергоемкость, углеродный след, печь жидкофазного восстановления, шахтная печь, электродуговая печь, металлизированные окатыши.

Abstract. The process of direct alloying of steel with vanadium (AD) consists of the furnace of liquid – phase reduction– gasifier, a shaft furnace for the metallization of pellets, electric arc furnace for steelmaking. The different patented schemes of AD-V processes are presented. For them the values of energy capacity and through emissions of carbon dioxide – coal track is calculated. For comparison, the values of energy capacity and emission for the traditional scheme of steel alloying with vanadium using FeV is presented.

Keywords: steel, vanadium, alloying, energy capacity, carbon footprint, smelting reduction furnace, shaft furnace, electric arc furnace, metallized pellets.

Процесс прямого легирования стали ванадием (ЛП-В) разработан в УрФУ и Региональном уральском отделении АИН РФ (Лисиенко В.Г., Пареньков А.Е. и др.) в содружестве с рядом организаций. Процесс ЛП-В состоит из следующих основных агрегатов (рисунок 1): печи жидкофазного восстановления (ПЖВ), шахтной печи (ШП) для металлизации окатышей, деванадатора, электродуговой печи для выплавки стали (ЭДП) [1, 2]. Сущность процесса состоит в восстановлении железа из его оксидов, находящихся в шлаковой ванне ПЖВ с замешанным в ней углём. Ванна через боковые фурмы барботируется дутьём с кислородом. Образующийся восстановительный газ от пиролиза угля, его неполного сгорания до оксида углерода CO и прямого восстановления до оксидов железа, дожигается над ванной до CO_2 и H_2O кислородсодержащим дутьём, подаваемым через верхний ряд фурм ПЖВ. При этом обеспечивается дополнительный приход тепла в шлаковую ванну, необходимый для одностадийного протекания процесса восстановления. Дутьё обеспечивает необходимый барботаж ванны и генерирование тепла в результате неполного сгорания углерода до CO . Капли восстанавливаемого в жидкой ванне железа из его оксида науглероживаются, укрупняются и опускаются на подину агрегата через зону спокойного шлака, образуя металлическую ванну.

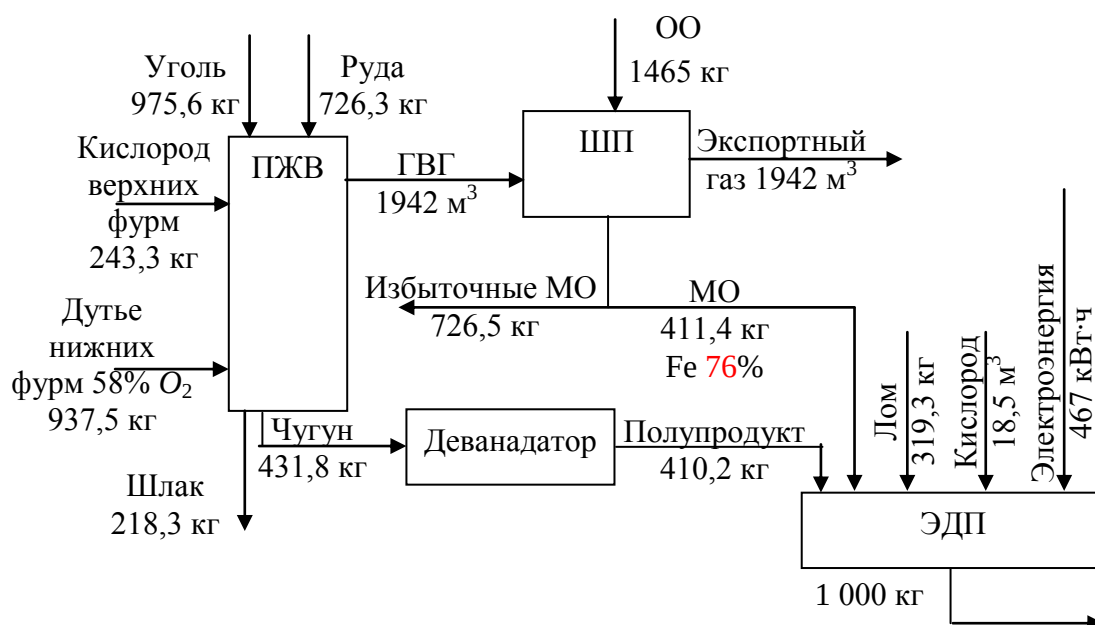


Рисунок 1 – Структурная схема полного цикла ЛП-В

Образующиеся горячие восстановительные газы (ГВГ) удаляются из рабочего пространства ПЖВ при температуре 1 300–1 800 °С в зависимости от степени их дожигания [3] через дымоотводящий патрубок. В процессе ЛП агрегат ПЖВ работает в смешанном режиме, то есть с получением в процессе плавки и чугуна, и горячего восстановительного газа (ГВГ).

В ПЖВ (газификатор) поступают уголь с $C^P = 73,1\%$ (0,4–0,5 кг/м³ ГВГ или 2–2,5 т/т полупродукта), рудное сырье, дутье (кислорода 0,23–0,25 м³/м³ ГВГ или 400–500 м³/т

полупродукта). На выходе ПЖВ – шлак и чугун, который подается в деванадатор. Деванадатор служит для улучшения процесса легирования. Этим агрегатом может быть конвертер или ковш.

Восстановительные газы из агрегата ПЖВ используются для газотвердофазной металлизации в шахтной печи. В ШП поступают рудное сырье и горячий восстановительный газ (ГВГ) в объеме 2000-2700 м³/т металлизированных окатышей. Из ШП выходят металлизированные окатыши (МО) и экспортный газ (ЭГ) 2,225 т/т металлизированных окатышей или 1730 м³/т металлизированных окатышей. Состав ЭГ % по объему: CO – 34; H₂ – 12; N₂ – 12; CO₂ – 31; H₂O – 11, а состав ЭГ по весу: CO – 32,9 % или 0,732 т/т металлизированных окатышей; H₂ – 0,81 %; N₂ – 11,66 %; CO₂ – 47,57 % или 1,058 т/т металлизированных окатышей; H₂O – 7,06 %.

Металлизированные окатыши, полупродукт и шлак загружаются в ЭДП. В ЭДП подается топливо (экспортный газ), кислород 15 %-20 % от топлива. Используемое рудное сырье содержит ванадий [6]. При оптимизации процесса по шихтовым материалам ЭДП в этом процессе в качестве основных ВЭР выступает ванадиевый шлак и излишние (товарные) металлизированные окатыши [6].

Недостатком технологии ЛП-В является производство металлизированных окатышей в количествах больших, чем требуется для одной электродуговой печи. Кроме того, на выходе ШП образуется много экспортного газа, который содержит ядовитый оксид углерода. Для устранения этого недостатка была заявлена схема процесса ЛП-В (рисунок 2), в которой избыточные металлизированные окатыши переплавляются в сталь в дополнительной электродуговой печи [4]. ЭГ сгорает в котлах местной электростанции (ЭС), обеспечивая энергетические потребности процесса ЛП-В. Технический результат использования данного устройства – эффективное использование и снижение выбросов вредных газов ШП, которые сгорают в электростанции.

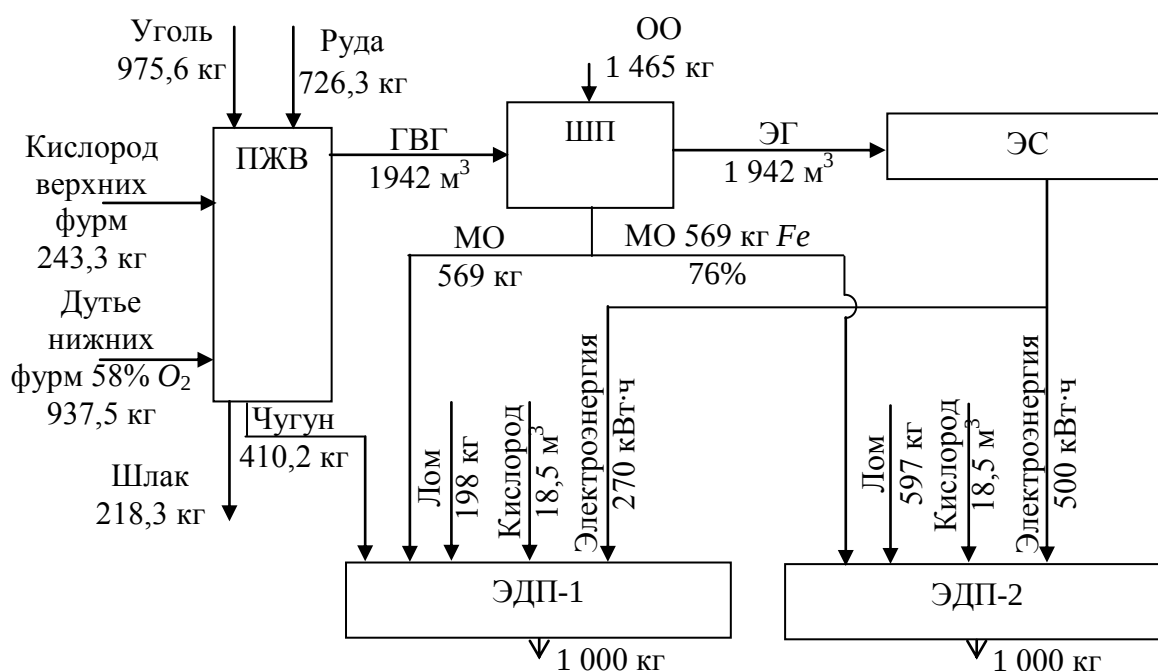


Рисунок 2 – Схема ЛП-В-2 без производства излишних металлизированных окатышей

Недостатком этого устройства является возможное вспенивание шлака в ПЖВ из-за значительного количества окиси железа в руде шихты ПЖВ [4]. Для устранения этого недостатка была заявлена схема процесса ЛП-В (рис. 3), в которой часть металлизированных окатышей подается в ПЖВ [5]. Техническим результатом данного устройства являет-

ся уменьшение риска вспенивания шлака, уменьшение расходов угля и железной руды при одновременной работе двух ЭДП.

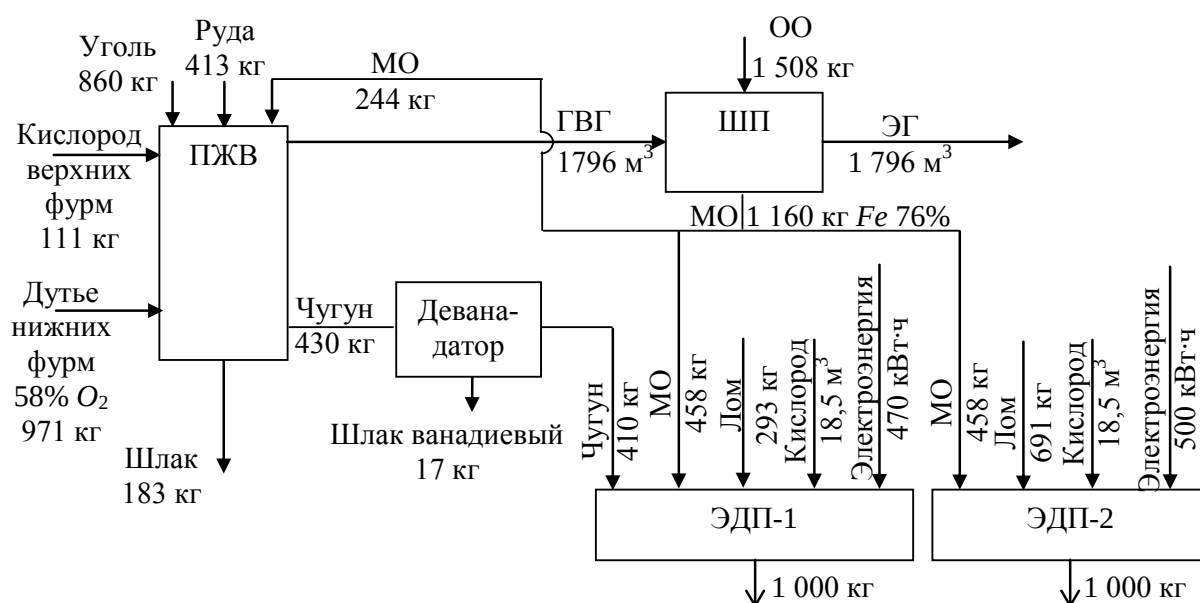


Рисунок 3 – Схема процесса ЛП-В-3 с подачей части металлизированных окатышей в ПЖВ

Широко распространенное за рубежом понятие углеродного следа в процессах производства чугуна и стали можно свести к понятию сквозной интегральной эмиссией диоксида углерода M_C . Эта эмиссия является суммой произведений расходов ресурсов на значения эмиссий CO₂, последовательно возникающих при производстве этих ресурсов во всех процессах технологической цепи, начиная с добычи сырья и кончая тем продуктом, для которого эта эмиссия определяется. Кроме того, следует различать интегральные эмиссии процесса M_{II} и транзитную M_T , обусловленную долей от суммарной массы эмиссии диоксида углерода, образованного в предыдущих процессах, которая перешла на анализируемый процесс. Сквозная M_C удовлетворяет соотношению:

$$M_C = M_{II} + M_T. \quad (1)$$

Методика определения значений эмиссий диоксида углерода в различных процессах производства чугуна и стали приведены в [6]. Для определения сквозных эмиссий нескольких переделов используются графы эмиссий диоксида углерода [7, 8]. На основе этих методик были определены сквозные эмиссии диоксида углерода описанных схем ЛП-В и традиционной схемы легирования стали ванадием с использованием феррованадия. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Основным показателем сквозного энергетического анализа является технологическое топливное число ТТЧ [1] – это суммарные расходы всех видов энергии в данном и во всех предшествующих производствах технологического процесса, пересчитанные на необходимое для их получения первичное топливо, за вычетом ТТЧ полученных вторичных энергетических ресурсов (ВЭР). Методика расчета ТТЧ процесса позволяет проводить сравнение удельной энергоемкости на отдельные виды продукции по различным отраслям промышленности, определять основные источники потерь энергии, приоритетные направления её экономии, объективные результаты энергосберегающих мероприятий в отдельных технологических процессах. Структурированная методика сквозного энергетического анализа рассматривает следующий состав ТТЧ:

Таблица 1 – Значения сквозной эмиссии диоксида углерода и энергоемкости в различных схемах ЛП-В

Переделы	Сквозная эмиссия на 1 т продукции (Э)		Сквозное ТПЧ, кг у.т. на т	ТТЧ, кг у.т. на т	ТПЧ, кг у.т. на т	Ранг процесса по			Э/ТТЧ
	Массовая, кг	Объемная, м ³				эмиссии CO ₂	ТТЧ	ТПЧ	
ЛП-В	1864	943	326	632	598	1	1	1	2,95
ЛП-В-2 средние значения	1939	981	338	834	1172	2	2	3	2,54
ЛП-В-3 средние значения	2013	1018	351	681	1032	3	3	2	2,36
Процесс с легированием FeV	3417	1728	586	1304	1890	4	4	4	2,62

$$\text{ТТЧ} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 - \mathcal{E}_4. \quad (2)$$

Первичная энергия $\mathcal{E}_1$ – химическая энергия ископаемого топлива (кг у.т./т продукции), а также затраты на добычу, подготовку или обогащение, на транспортировку и др. Производная энергия $\mathcal{E}_2$ – энергия производных энергоносителей (например, электроэнергия, пар, сжатый воздух, кислород и т.п.). Определяющей величиной в затратах на эту форму энергии является удельный расход первичной энергии на производство конкретного энергоносителя (кВт·ч электроэнергии, 1000 м³ кислорода, кДж тепловой энергии и т.д.). Скрытая или овеществлённая энергия $\mathcal{E}_3$ – энергия, израсходованная в предшествующих технологиях и содержащаяся в скрытом виде в исходных материалах, оборудовании, капитальных сооружениях данного процесса, а также в операциях по поддержанию оборудования в работоспособном состоянии – ремонты и т.п. Энергия вторичных ресурсов $\mathcal{E}_4$ складывается из фактически сэкономленных энергозатрат (ВЭР) при производстве топливных, тепловых и материальных ресурсов. При этом учитывается химическая энергия вторично используемых топлив, тепловая энергия (пар), а также материальные ресурсы на том переделе, на котором заменяются первичные ресурсы с учётом коэффициентов использования вторичных ресурсов.

Технологическое парниковое число (ТПЧ) технологического процесса и продукта (сквозное ТПЧ) – это количество килограмм условного топлива (кг у.т.), требуемого для погашения стоимости экономического ущерба от выбросов парниковых газов на единицу выпускаемой продукции. ТПЧ переводит рубли в кг у.т., т. е. экономические параметры в энергетические. При этом за стоимость топлива принята цена природного газа, т.е. использован «газовый» эквивалент:

$$\text{ТПЧ}_{\text{П}} = \frac{C_{\text{в.в.}}}{C_{\text{пр.г.}}} \cdot \frac{Q_{\text{н.пр.г.}}^{\text{р}}}{Q_{\text{н.у.т.}}^{\text{р}}} \cdot M_{\text{к}}, \quad (3)$$

где $M_{\text{к}}$ – фактическая удельная масса выбросов диоксида углерода, т выбр. /т прод;
 $C_{\text{в.в.}}$ – учитывает плату за эмиссию диоксида углерода природопользователя за загрязнение окружающей среды выбросами в атмосферу парниковых газов, принято значение 50 \$/т п.г.;
 $C_{\text{пр.г.}}$ – цена природного газа, принимается на уровне;

$Q_{н.пр.г.}^p$ – низшая рабочая теплота сгорания природного газа, МДж/м³,

$Q_{н.у.т.}^p$ – низшая рабочая теплота сгорания условного топлива, МДж/кг у.т.

В результате размерность ТПЧ – кг у.т./т прод. Таким образом, ТПЧ для металлургических процессов однозначно определяется эмиссией диоксида углерода. Обобщающий параметр – технологическое топливно-парниковое число

$$ТППЧ = ТТЧ + ТПЧ. \quad (4)$$

Выводы

1) проведен энергетический и парниковый анализ процессов прямого легирования стали ванадием в сравнении с процессом традиционного способа легирования с использованием FeV ;

2) энергоемкость и эмиссия диоксида углерода при производстве легированной ванадием стали в предложенных схемах ЛП-В значительно меньше, чем при традиционном производстве ванадием стали с использованием FeV .

Библиографический список

1. Лисиенко В.Г. Альтернативная металлургия: проблема легирования, модельные оценки эффективности / В.Г. Лисиенко, Н.В. Соловьева, О.Г. Трофимова; под ред. В.Г. Лисиенко. - М.: Теплотехник, 2007. – 440 с.
2. В.Г. Лисиенко, В.А. Роменец, А.Е. Пареньков и др. Способ бескоксовой переработки ванадийсодержащего рудного сырья с получением легированной ванадием стали / Патент РФ № 2167944. Приоритет от 11.08.1998 г. Бюл. № 15, 27.05.2001.
3. Чесноков Ю.Н., Лисиенко В.Г., Лаптева А.В. Устройство для производства стали с использованием железорудного сырья и жидкого чугуна. Патент №132076. Приоритет от 25.10.12.
4. Роменец В.А. Процесс Ромелт / В.А. Роменец. [и др.]; под ред. В.А. Роменца. – М.: МИСиС, Издательский дом «Руда и металлы», 2005. – 400 с.
5. Чесноков Ю.Н., Лисиенко В.Г., Лаптева А.В. Устройство выплавки легированной ванадием стали с использованием металлизированного железорудного сырья. Патент №156076. Приоритет от 01.04.15.
6. Чесноков Ю.Н., Лисиенко В.Г., Лаптева А.В. Математические модели косвенных оценок эмиссии CO_2 в некоторых металлургических процессах // Сталь. – 2011. – №8. – С. 74-77.
7. Чесноков Ю.Н., Лисиенко В.Г., Лаптева А.В. Разработка графов эмиссии диоксида углерода металлургическими предприятиями // Металлург. – 2012. – №12. – С. 23-26.
8. Чесноков Ю.Н., Лисиенко В.Г., Лаптева А.В. Оценка углеродного следа при выплавке стали в электродуговой печи // Металлург. – 2013. – №9. – С. 23-26.

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СХЕМ УТИЛИЗАЦИИ ВТОРИЧНОЙ ЭНЕРГИИ ОТ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ

Оленников А.А.

Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк, Россия, oaa@cirkul-m.ru

Аннотация. Описаны три уровня сложных систем состоящие из подсистем. Представлен программный комплекс, используемый для проектирования вариантов утилизации вторичной энергии от металлургических агрегатов. Описана пошаговая работа с программным комплексом. Показаны результаты расчета программного комплекса в виде графических зависимостей.

Ключевые слова: программный комплекс, адекватность, сложный теплообмен, котел-утилизатор, коэффициент использования тепловой энергии, схема утилизации энергии

Abstract. We describe three levels of complex systems consisting of subsystems. A program system is used to design variants of utilization of secondary energy from metallurgical units. Described step by step work with the software package. The results of the calculation software package in the form of plots.

Keywords: software complex, value, complex heat transfer, heat recovery boiler, the coefficient of thermal energy use, energy recovery circuit.

В металлургическом процессе коэффициент полезного действия всего цикла составляет порядка 20%. Часть энергии расходуется на протекание процесса в основном технологическом агрегате. Около 20-30% энергии уходит на тепловые потери через стенки агрегата, гарнисажное охлаждение и 40-50% теряется с отходящими газами [1, 2].

Учитывая, что с каждым днем дорожает добыча и переработка топлива, и истощаются мировые запасы, проблемы энергоресурсосбережения ставятся на одно из первых мест. Необходимо всё шире внедрять энергосберегающие технологии. Поэтому наиболее рациональным вариантом является создание энерго-металлургического комплекса, в основу которого положено два подхода к использованию энергии. Речь идет о физической и химической регенерации тепловой энергии.

Первый подход основан на утилизации тепловой энергии энергетическими установками: котлами-утилизаторами, системами гарнисажного охлаждения, установками подогрева топлива. В зависимости от мощности металлургического агрегата, полученная тепловая энергия в первых двух установках, в среднем от 2МВт до 15 МВт, может использоваться для отопления производственных цехов. Включение к котлу-утилизатору паровой турбины позволит получить от 50 до 420 кВт электрической энергии. Такой подход позволит снизить нагрузку на котельную или ТЭЦ предприятия, а утилизация энергии отходящих газов составит около 70-85%.

Второй подход основан на использовании химического потенциала отходящего газа с последующим получением моторного топлива. Это процесс состоит из следующих стадий: сначала отходящий газ попадает в реформер, затем проходит сероочистку, осуществляется каталитический синтез, где вырабатывается синтез-газ. Полученный газ с объемным отношением CO/H_2 близким к 1/1 может использоваться и как энергетическое топливо и как сырье для получения синтетического топлива. Такой вариант утилизации позволяет использовать всю физическую и химическую энергию отходящего газа с эффективностью до 98% энергоиспользования. Такая технология позволит создать полностью бездымный процесс.

Выполнить проект любого варианта утилизации энергии отходящих газов, основанного на одном из подходов весьма не простая задача. Необходимо знать цели использования утилизируемых вторичных энергетических ресурсов (ВЭР), а также выполнить емкие расчеты. Перспективным способом решения этой задачи является моделирование

процессов теплообмена, газодинамики на ЭВМ, что позволяет существенно сократить трудоемкость и избежать многих ошибок при проектировании и оценки.

При разработки моделей используемых в программном комплексе рассматривался подход к моделированию сложных систем. В основу закладывается поэлементно-физическая постановка задачи, анализ и синтез системы по ее отдельным составным частям. Этот подход носит название метод прямой аналогии [3].

Адекватность построенных таким образом сложных моделей, базируется на дополнительном положении о подобии сложных систем, сформулированном В.А. Вениковым в развитии первой теории подобия [3].

В рассматриваемой работе мы имеем дело, по крайней мере, с тремя уровнями сложных систем, собираемых из подсистем.

Первый уровень: процессы в отдельных конструктивных элементах теплоиспользующих агрегатов (пучках труб, соединительных каналах и т.д.). Здесь в качестве элементарных систем рассматриваются процессы сложного теплообмена между тепловоспринимающими элементами и средами, процессы трения газа о стенки и т.п., которые описываются фундаментальными физическими законами, справедливость этих законов считается доказанной, а конечный результат зависит от используемых сочетаний и соединений.

Второй уровень: теплоутилизирующие агрегаты в целом. Они состоят из описанных выше конструктивных элементов. И следовательно, вид сложной системы этого (второго) уровня зависит от сочетания и способа соединения отдельных конструктивных элементов (систем первого уровня). Примерами сложных систем второго уровня являются: котлы-утилизаторы, газовые турбины, агрегаты кипящего слоя и т.п. [4, 5].

К этому уровню относятся модели сложного теплообмена в котлах-утилизаторах [6, 7]:

Для коридорного пучка

$$\alpha_K = 0,2C_sC_z \frac{\lambda}{d} \left(\frac{wd}{\nu} \right)^{0,65} Pr^{0,33} + 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\alpha_s + 1}{2} aT^3 \frac{1 - \left(\frac{T_s}{T} \right)^{3,6}}{1 - \frac{T_s}{T}}, \quad (1)$$

где C_s – поправка на геометрическую компоновку пучка; определяется в зависимости от относительного шага труб;

C_z – поправка на число рядов труб по ходу газов; определяется в зависимости от среднего числа рядов в отдельных пакетах рассчитываемого пучка;

λ – коэффициент теплопроводности материала пучка труб;

d – диаметр пучка труб;

w – скорость газового потока;

ν – коэффициент кинематической вязкости текущей среды;

Pr – число Прандтля;

α_s – степень черноты загрязненных стенок лучевоспринимающих поверхностей;

a – степень черноты потока газов в зависимости от температуры;

T, T_s – температура газов и наружной поверхности стенки с учетом загрязнений.

Для шахматного пучка

$$\alpha_{ш} = 0,36C_sC_z \frac{\lambda}{d} \left(\frac{wd}{\nu} \right)^{0,6} Pr^{0,33} + 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\alpha_s + 1}{2} aT^3 \frac{1 - \left(\frac{T_s}{T} \right)^{3,6}}{1 - \frac{T_s}{T}}. \quad (2)$$

Модель для определения потерь давления на трение с учетом транспортировки газа под повышенным давлением

$$\Delta P = P_{CT1} - P_{CT2} = P_{CT1} - \left[P_{CT1}^2 - \left(\lambda \frac{l}{d_{\text{эKB}}} \cdot \frac{\rho w^2}{2} \cdot \frac{2PT_{CT}}{T} \right) \right]^{0,5}, \quad (3)$$

где P_{CT1}, P_{CT2} – соответственно давление газа в начале и в конце участка газопровода;
 l – длина рассматриваемого газохода;
 $d_{\text{эKB}}$ – эквивалентный диаметр канала для прохода отходящего газа;
 ρ – плотность перемещаемого газа;
 T_{CT}, T – соответственно средняя в пределах рассчитываемого участка газового канала температура стенки и отходящего газа.

Третий уровень составляют комбинации описанных выше агрегатов, их набор осуществляют по критерию полезного теплоиспользования, который определяется после расчетов теплоиспользующих установок, включенных в газовый тракт и выявления их частных коэффициентов использования тепловой энергии, следующим образом [8]:

$$\sum \eta_{\text{КПТ}} = \eta_{\text{АГР}}^{\text{ИСП}} + \eta_{\text{ГО}}^{\text{ИСП}} \cdot \eta_{\text{ГО}}^{\text{КПД}} + \eta_{\text{У1}}^{\text{ИСП}} \cdot \eta_{\text{У1}}^{\text{КПД}} + \eta_{\text{У2}}^{\text{ИСП}} \cdot \eta_{\text{У2}}^{\text{КПД}} + \dots + \eta_{\text{УN}}^{\text{ИСП}} \cdot \eta_{\text{УN}}^{\text{КПД}}, \quad (4)$$

где $\eta_{\text{АГР}}^{\text{ИСП}}, \eta_{\text{ГО}}^{\text{ИСП}}, \eta_{\text{У1}}^{\text{ИСП}}, \eta_{\text{У2}}^{\text{ИСП}}, \eta_{\text{УN}}^{\text{ИСП}}$ – соответственно, коэффициенты теплоиспользования металлургического агрегата, гарнисажного охлаждения и последовательно соединенных энергоутилизаторов и газоочистных систем;
 $\eta_{\text{ГО}}^{\text{КПД}}, \eta_{\text{У1}}^{\text{КПД}}, \eta_{\text{У2}}^{\text{КПД}}, \eta_{\text{УN}}^{\text{КПД}}$ – соответственно, коэффициенты полезного действия системы гарнисажного охлаждения, теплоутилизаторов и газоочистных систем.

Таким образом, при последовательном применении указанного дополнительного положения адекватность получаемых сложных систем из подсистем нижнего уровня (прежде всего качественную) можно считать доказанной. Настройка же конкретных параметров, особенно для агрегатов второго уровня, естественно возникнет, но только после реализации проектных решений.

На основе представленных моделей создан и в настоящее время активно развивается программный продукт SKV_SAPR, разработанный с использованием объектно-ориентированного подхода [8, 9], а также технологии многопоточных приложений.

В задачу программного продукта входит: компоновка схемы утилизации энергии отходящих газов; конструктивный расчет теплоэнергетических установок, используемых в схеме; расчет количества тепла, воспринятого установками энергоутилизации; оценка потерь давления по газовому тракту, включая энергоутилизаторы; расчет физических параметров отходящих газов на каждом участке газового тракта; поиск оптимального варианта теплоэнергетической установки и всей схемы с участием эксперта; выдача технической документации и рекомендаций по проектированию.

На рисунке 1 представлена структура программного комплекса. На начальном этапе моделирования, задаются технические условия и выходные параметры отходящего газа металлургического агрегата: состав, расход, давление, температура. В соответствии с названием проекта создаются рабочие файлы и формируются пути к ним.

Далее выполняется компоновка схемы энергоутилизации, при этом возможно обращение к базе данных с целью выбора предлагаемого варианта, рассчитанного ранее, либо конструирования нового. Далее вычисляют термодинамические параметры отходящего газа на основе известных термодинамических законов и приступают к описанию и вводу необходимых данных для теплоэнергетических установок. При этом возможно обращение к расширяемым базам данных, которые разработаны в среде Microsoft Access и

содержат, нормативную, конструкторскую, теплофизическую и энергетическую документации стандартных моделей, предлагаемых заводом-изготовителем, либо сконструированных самостоятельно. По завершению ввода данных выполняются расчеты и выводятся результаты по текущей установке по ходу движения газов.

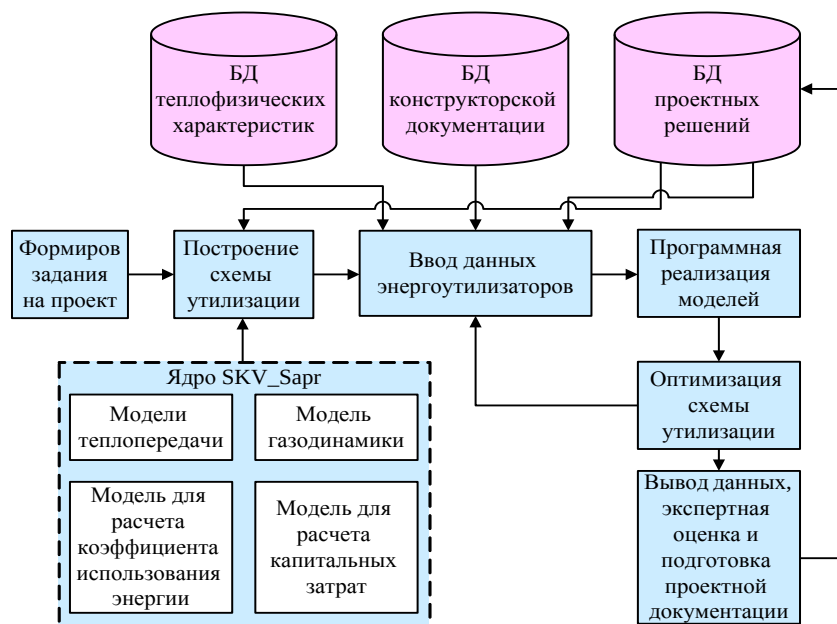


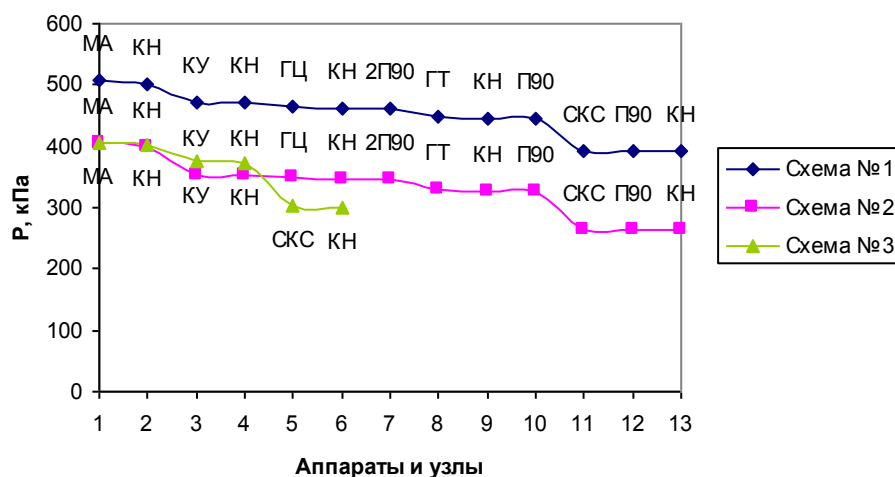
Рисунок 1 – Структура комплекса SKV_SAPR

По завершению работы над последним энергоутилизатором, находящимся в схеме, выполняется расчет, по результатам которого определяют окончательные конструкторские параметры установок, возможное усвоение ими тепловой энергии, потери давления на каждом участке схемы, определение термодинамических параметров газа и его калорийности. Если же проектом предполагается выбрать эффективный вариант из набора схем утилизации энергии, тогда выполняется анализ по сквозному коэффициенту использования тепловой энергии. Полученные результаты оцениваются экспертом, если необходимо вносятся необходимые изменения в конфигурации установки и выполняются перерасчеты.

Ниже приведен фрагмент расчета программного комплекса. На рисунках 2 и 3 рассмотрено три возможных схемы энергоутилизации, представлены графические зависимости потерь давления и утилизируемой тепловой энергии (при различных конструктивных параметрах систем энергоутилизации, газоочистки, узлов сопротивлений и каналов).

Таким образом, использование данного программного комплекса позволяет конструировать схемы энергоутилизации, выполнять расчеты и выбирать оптимальный вариант по коэффициенту сквозного теплоиспользования, а также исследовать влияние основных режимных параметров.

Предложенные модели и программный комплекс прошли апробацию в ОАО «Сибирский Сантех Проект», г. Новокузнецка. Полученные данные были сопоставлены со сторонними программными продуктами и имеют положительные отзывы проектировщиков работающих в теплотехнической области.



МА – металлургический агрегат; КН – канал; КУ – котел–утилизатор; ГЦ – группа циклонов; П90 – поворот на 90°; ГТ – газовая турбина; СКС – сушило кипящего слоя

Рисунок 2 – Падение давления в установках энергоутилизации, систем газоочистки, узлах сопротивлений и каналов

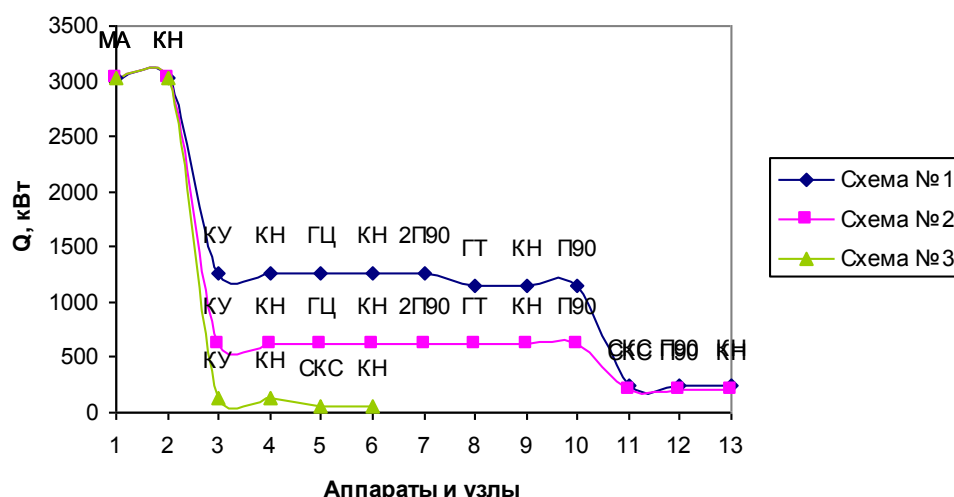


Рисунок 3 – Тепловая энергия, полезно использованная утилизаторами

Библиографический список

1. Курунов И.Ф., Савчук Н.А. Состояние и перспективы бездомной металлургии железа. – М.: Черметинформация, 2002. – 198 с.
2. Цымбал В. П., Мочалов С. П., Рыбенко И. А. и др. Процесс СЭР - металлургический струйно-эмульсионный реактор. М.: Металлургиздат, 2014. 488 с.
3. Тетельбаум И.М., Тетельбаум Я.И. Модели прямой аналогии. – М.: Наука, 1979. 834 с.
4. Войнов А.П., Зайцев В.А., Куперман Л.И. и др. Котлы–утилизаторы и энерготехнологические агрегаты. М.: Энергоиздат, 1989. 272с.
5. Оленников, А.А. Математическое моделирование и комплекс программ для решения задач утилизации вторичной энергии отходящих газов металлургических агрега-

тов струйно-эмульсионного типа : дис....канд. техн. наук : 05.13.18 : защищена 08.12.09 : утв. 12.03.10. / А. А. Оленников – Новокузнецк, 2009. – 133 с.

6. Оленников А.А. Математическая и физическая модели котла-утилизатора и агрегата кипящего слоя применительно к струйно-эмульсионному реактору типа СЭР / Оленников А.А., Цымбал В.П. // Изв. Вузов. Чер. металлургия. – 2009 – №8. – С. 43–51.

7. Оленников А.А. Математическая модель и алгоритм расчета котла-утилизатора, работающего на вторичных энергоресурсах агрегатов жидкофазного восстановления / Оленников А.А. // IX Международная научно-практическая конференция: Проблемы энергосбережения и экологии в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах. – Пенза. ПДЗ. – 2008. – С. 277–279.

8. Оленников А.А. Варианты и оценка эффективности использования вторичных энергоресурсов для агрегатов жидкофазного восстановления / Оленников А.А., Цымбал В.П. // Изв. Вузов. Чер. металлургия. – 2008. – №6. – С. 43–51.

9. Оленников А.А. Комплекс моделей и программ для оптимизации вторичной энергии металлургических процессов прямого восстановления / Оленников А.А., Цымбал В.П. // Творческое наследие Б.И. Китаева: труды междунар. науч.-практ. конф. 11–14 февраля 2009 г. Екатеринбург: УГТУ–УПИ. – 2009. – С. 232–236.

УДК 004.94

ВИРТУАЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ В АППАРАТАХ КИПЯЩЕГО СЛОЯ

Оленников А.А., Цымбал В.П., Сеченов П.А., Чапаев Д.Б.

*Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк, Россия, oaa@circul-m.ru*

Аннотация. Представлен программный продукт позволяющий имитировать процесс сушки сыпучих материалов в аппаратах кипящего слоя колонного типа. Основное внимание уделено процессу сушки материалов нагретым воздухом, подаваемым под давлением при помощи вентиляторных установок. Подробно изложено взаимодействие пользователя с разработанной программой. Приведены некоторые основные модели использованные при разработке виртуального лабораторного комплекса.

Ключевые слова: аппарат кипящего слоя, вентиляторная установка, неоднородный режим, виртуальная лабораторная установка, вентиляционный клапан, фильтрационная секция, калориферная установка.

Abstract. Presented program product can simulate the process of drying of bulk materials in the apparatus of fluidized bed type column. Emphasis is given to hot air drying process materials supplied under pressure by means of fan units. A detailed explanation of the user interaction with our program. It presents some of the basic models used in the development of a virtual laboratory complex.

Keywords: fluidized bed unit, fan installation, heterogeneous mode, a virtual laboratory installation, vent the filter section, air heater installation.

Виртуальная лабораторная установка представляет собой программный комплекс, позволяющий проводить исследования на компьютере без непосредственного контакта с реальной лабораторной установкой или стендом. Виртуальная установка, как правило, сочетает в себе имитационную динамическую модель оборудования и оболочку, включающую методическое сопровождение лабораторной работы. Динамическая модель формируется из совокупности элементов управления, позволяющих регулировать конкретные входные параметры и считывать выходные параметры опыта, тем самым имитируя протекание физических процессов.

С развитием компьютерной графики стало возможным создавать высокореалистичные трехмерные модели лабораторных установок, станков, приборов и прочих объектов. Гармоничное сочетание текстур материалов и освещения, а также возможность пе-

ремещения камеры в трехмерном пространстве, дает наиболее полное ощущение виртуальной реальности.

Представленная виртуальная лабораторная установка разработана в среде Visual Basic.NET – это новый мощный язык программирования, созданный корпорацией Microsoft. Этот язык программирования не позволяет программировать по-старому, т.к. по сути, является совершенно другим языком, таким же, как и любой другой язык программирования для платформы .NET. Индивидуальность языка, так же как и его преимущества (простота, скромность создания программ, лёгкость использования готовых компонент) при использовании в среде .NET не имеют такого значения, как раньше – всё сосредоточено на возможностях самой системы .NET, на её библиотеке классов. Сохранив во многом внешнюю простоту своего предшественника – языка Visual Basic 6.0 – он радикально обогатил и усложнил свое внутреннее содержание, предоставив программисту огромное количество новейших инструментов. Самый главный из них – настоящее, полноценное объектно-ориентированное программирование. Среда разработки Visual Basic считается идеальным средством быстрой разработки прототипов программы, для разработки приложений баз данных и вообще для компонентного способа создания программ, работающих под управлением операционных систем семейства Microsoft Windows [1-3].

В основу созданной виртуальной лабораторной установки положена работа, изложенная в [4-6] и модернизирована с учетом [7, 8]. Прежде всего, установка ориентирована на: исследование процесса сушки сыпучих материалов, поступающих в аппараты кипящего слоя; изучение газодинамических режимов слоя в зависимости от состава материала и характера потока воздуха формируемого вентиляторными установками.

Виртуальная лабораторная работа состоит из двух основных программных окон представленных на рисунке 1, 2. Во время работы открываются и другие окна отображающие уставки вентиляционных, калориферных и фильтрационных установок.



Рисунок 1 – Окно с расстановкой напорных вентиляторов, калориферов и фильтров



Рисунок 2 – Окно с расстановкой аппаратов кипящего слоя

Как видно из рисунков, одновременно можно работать с тремя аппаратами кипящего слоя, для которых отдельными секциями предусмотрены напорный вентилятор, калориферная и фильтрационная установки. Кликнув на любую установку можно легко изменить ее производительность в сплывающем диалоговом окне. Максимальный расход воздуха развиваемый вентиляторной установкой – 30 тыс.м³/ч, а создаваемый напор – до 12 кПа. В качестве греющего теплоносителя в калориферной установке используется обычная вода с максимальной температурой 150 °С, причем температура воды может регулироваться балансировочной арматурой. В настройках секции фильтра задается фильтрующий материал и его эффективность. У аппаратов кипящего слоя задаются их конструктивные характеристики (диаметр и высота колонны, диаметр и шаг расположения отверстий решетки на которую подается сыпучий материал). Программа содержит расширяемую базу данных разработанную в Access и содержит все основные характеристики сыпучих материалов (материал частиц, их диаметр и форма, температура и влажность). После того, как все настройки выполнены приступают к запуску установки. В реальном времени отображаются начальные и конечные температура и влажность воздуха, масса загружаемого материала до и после сушки, время нахождения материала в аппарате кипящего слоя. Во время работы установки возможна корректировка: расхода и напора воздуха путем изменения числа оборотов вентиляторных установок или положение угла дроссельных клапанов; температуры теплоносителя калориферных установок. У аппаратов кипящего слоя возможно изменение расхода и времени пребывания сыпучих материалов в аппарате.

Во время процесса сушки в аппаратах кипящего слоя протекают сложные процессы газодинамики и теплообмена, в реальном времени рассчитываются уравнения материального и теплового балансов. В их основе лежат законы сохранения вещества и энергии.

Балансовые расчеты позволяют получить важнейшие теплотехнические характеристики сушильных установок: расход теплоты, на килограмм испаренной влаги, количество сухого воздуха (подаваемого в агрегат), изменение параметров теплоносителя.

Материальный и тепловой балансы, для простейшего случая непрерывной сушки влажного материала нагретым воздухом будут выглядеть следующем образом. Считается, что сушимый материал и нагретый воздух состоят из сухой части и влаги. Для сушилок непрерывного действия материальный баланс составляется для часовых расходов возду-

ха, влаги, материала. При составлении материального баланса периодически действующей сушилки расчеты ведут в целом на цикл ее работы.

Приходная и расходная части материального баланса непрерывно действующей сушилки с однократным использованием воздуха выглядит следующим образом:

$$L_{c.в1} + G_{c1} + G_{в1} = L_{c.в2} + G_{c2} + G_{в2}, \quad (1)$$

где $L_{c.в1}, L_{c.в2}$ – количество воздуха на входе и выходе аппарата кипящего слоя, кг;
 G_{c1}, G_{c2} – количество влаги, содержащейся в материале, до и после сушки, кг;
 $G_{в1}, G_{в2}$ – количество влаги, до и после сушки, кг.

Тепловой баланс, составляемый при проектировании сушильных установок, кВт, позволяет аналитически определить расход теплоносителя, топлива, а также основные теплотехнические показатели процесса:

$$Q + Q_0 + L_1 I_1 + G c_1 t_{м1} + W c_{вл} t_{м1} = L_2 I_2 + G c_2 t_{м2} + Q_m, \quad (2)$$

где Q – количество тепла, переданное воздуху от калориферной установки, кВт;
 Q_0 – количество дополнительно подведенной теплоты до калориферных установок, кВт;
 L_1, L_2 – расход воздуха на входе и выходе аппарата кипящего слоя, м³/ч;
 I_1, I_2 – энтальпия воздуха на входе и выходе, кДж/кг;
 G – количество сушеного материала, кг;
 c_1 и c_2 – удельные теплоемкости сушеного материала до и после сушки, кДж/(кг·°C);
 $t_{м1}, t_{м2}$ – температура материала до и после сушки, °C;
 W – количество испаряемой влаги, кг/ч;
 $c_{вл}$ – удельная теплоемкость влаги, кДж/(кг·°C);
 Q_m – потери теплоты в окружающую среду, кВт.

Скорость процесса сушки влажного материала нагретым воздухом зависит от интенсивности внешнего и внутреннего тепло- и массообмена. Под внешним тепло- и массообменом понимается совокупность процессов, способствующих передаче тепла сушиму материалу и восприятию влаги, испарившейся с его поверхности. Интенсивность этих процессов применительно к конвективной сушке зависит от режимных параметров теплоносителя (нагретого воздуха), т. е. от его температуры, относительной влажности и скорости.

Перенос теплоты и перемещение влаги внутри сушеного материала (внутренний тепло- и массообмен) в некоторых случаях решающим образом влияют на скорость процесса сушки, так как от этих процессов зависит количество влаги, подведенной к поверхности испарения. Перенос теплоты и влаги во влажном материале, характер изменения в процессе сушки его физико-механических свойств определяются коллоидно-физическими свойствами и формой связи влаги с материалом. Процесс удаления влаги из материала происходит при нарушении связи ее с веществом скелета тела, на что затрачивается определенное количество энергии, поэтому классификация форм связи влаги с материалом должна учитывать величину этой энергии связи.

Количество тепла, переданного от газа к слою в зависимости от времени пребывания в аппарате описывается выражением

$$Q = \alpha_{\Sigma} \left(T_{\Sigma} - \frac{T_n + T_k}{2} \right) \cdot S \cdot t, \quad (3)$$

где α_{Σ} – коэффициент теплоотдачи конвекцией, излучением и теплопроводностью, Вт/(м²·°C);

T_g – температура газа, °C;
 T_n, T_k – соответственно начальная и конечная температура загружаемого материала, °C;
 S – площадь поперечного сечения слоя, м²;
 t – время пребывания слоя в аппарате, с.
 Значение коэффициента α_Σ определяется зависимостью выражением:

$$\alpha_\Sigma = \alpha_{\text{кнв}} + \alpha_{\text{луч}} + \alpha_{\text{кнр}}. \quad (4)$$

Конвективная составляющая теплообмена может быть определена по зависимости

$$\alpha_{\text{кнв}} = 0,142 \left(\lambda^{0,57} w^{0,8} p^{0,43} c^{0,43} (1 - m_{\text{см}})^{0,133} \right) / \left(d^{0,2} v^{0,37} m_{\text{см}}^{0,8} \right), \quad (5)$$

где λ – теплопроводность;
 w – скорость, м/с;
 p – давление, Па;
 c – теплоемкость, кДж/(кг°С);
 $m_{\text{см}}$ – порозность у теплообменной поверхности;
 d – диаметр частиц, м;
 v – кинематическая вязкость, м²/с.

Коэффициент радиационного теплообмена рассчитывается по формуле

$$\alpha_{\text{луч}} = \sigma \varepsilon_{\text{пр}} \left(\left(\frac{T_n + T_k}{2} \right)^2 + T_g^2 \right) \left(\frac{T_n + T_k}{2} + T_g \right), \quad (6)$$

где σ – постоянная Стефана–Больцмана;
 $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты.

Кондуктивный теплообмен между единицей поверхности и псевдоожиженным слоем зависит от относительной площади, приходящейся на частицы

$$\alpha_{\text{кнр}} = 8,95k / d(1 - m_{\text{см}})^{2/3}. \quad (7)$$

Повышение температуры в аппарате с псевдоожиженным слоем двояко сказывается на интенсивности внешнего теплообмена. Во-первых, происходит изменение теплофизических свойств дисперсного материала и оживающего агента. Во-вторых, усложняется механизм передачи энергии, существенным становится радиационный перенос, роль которого в низкотемпературных системах пренебрежимо мала. Главной особенностью процесса обмена излучением является необязательное наличие среды для передачи энергии.

Взаимодействие излучения с веществом – весьма сложный процесс, зависящий от множества факторов. Он реализуется тремя независимыми физическими механизмами: рассеянием, поглощением и излучением. Первых два обуславливают ослабление падающего излучения, последний усиливает его.

Для определения полных потерь давления с учетом поддержания слоя в псевдоожиженном состоянии использована зависимость

$$P = \left(\frac{f}{F} \right)^2 \cdot \left(\frac{w}{Fc} \right)^2 \cdot \frac{\rho}{2} \left[\left(1 + 0,707 \sqrt{1 - \frac{F}{f}} \right)^2 + \left(1,7 - \frac{F}{f} \right)^2 \right] + H_0 g (\rho_p - \rho) (1 - m_0), \quad (8)$$

где f – площадь подовой решетки аппарата кипящего слоя, м²;

- F – живое сечение решетки (площадь всех отверстий), м^2 ;
 F_c – доля живого сечения решетки м^2 ;
 H_0 – высота неподвижного слоя, м ;
 g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

Проверка адекватности моделей использованных в программном комплексе подтверждена на экспериментальной лабораторной установке, разработанной учеными кафедры информационных технологий в металлургии [9].

Библиографический список

1. Гарнаев А. Самоучитель Visual Studio .NET 2003; БХВ-Петербург – Москва, 2013. – 688 с.
2. Голощапов А.Л. Microsoft Visual Studio 2010; БХВ-Петербург – Москва, 2011. – 544 с.
3. Левинсон Джефф Тестирование ПО с помощью Visual Studio 2010; ЭКОМ Паблишерз – Москва, 2012. – 314 с.
4. Оленников А.А., Морозов П.А., Смирнова Е.В. Виртуальный тренажер «вентиляционная установка» / Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Под общей редакцией М.В. Темлянцева. Новокузнецк. – 2015. – С. 446-449.
5. Оленников А.А. Применение тепла отходящих газов от конвертерных печей в промышленных сушилках / Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Под общей редакцией С.М. Кулакова. – 2006. – С. 272-274.
6. Гудукин Е.И., Оленников А.А., Цымбал В.П. Математические и физические модели агрегатов теплообмена и кипящего слоя / Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Под общей редакцией Л.П. Мышляева. Новокузнецк. – 2008. – С. 288-291.
7. Оленников, А.А. Математическое моделирование и комплекс программ для решения задач утилизации вторичной энергии отходящих газов металлургических агрегатов струйно–эмульсионного типа : дис.....канд. техн. наук : 05.13.18 : защищена 08.12.09 : утв. 12.03.10. / А. А. Оленников – Новокузнецк, 2009. – 133 с.
8. Оленников А.А., Оленников Е.А., Захаров А.А. Программный комплекс для моделирования схем утилизации физической и химической энергии от отходящих газов металлургических агрегатов / Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2015. – Т. 1. – № 2 (2). – С. 185-192.
9. Оленников А.А., Падалко А.Г., Чапаев Д.Б. Автоматизированный лабораторный комплекс для исследований газодинамических режимов в агрегатах прямого восстановления / Системы автоматизации в образовании, науке и производстве труды VIII всероссийской научно-практической конференции. Новокузнецк. – 2011. – С. 522-526.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ФРАГМЕНТА СИСТЕМЫ ГАРНИСАЖНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ АГРЕГАТА СЭР ПРИ ПОМОЩИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ANSYS

Оленников А.А., Цымбал В.П.

Сибирский государственный индустриальный университет
г. Новокузнецк, Россия, oaa@cirkul-m.ru

Аннотация. В работе описана технология работы и схема системы гарнисажного охлаждения металлургического агрегата типа СЭР. Описан процесс построения температурных полей на примере фрагмента системы гарнисажного охлаждения с использованием программного комплекса Ansys.

Ключевые слова: агрегат типа СЭР, гарнисаж, система гарнисажного охлаждения, циркуляционный насос, имитационная модель, тепловой анализ.

Abstract. The article describes the work technology and skull cooling circuit metallurgical unit type SER. The process of constructing the temperature fields on the example of a fragment of skull cooling system using Ansys software.

Keywords: unit type SER, skull, skull cooling system, circulation pump, simulation model, thermal analysis.

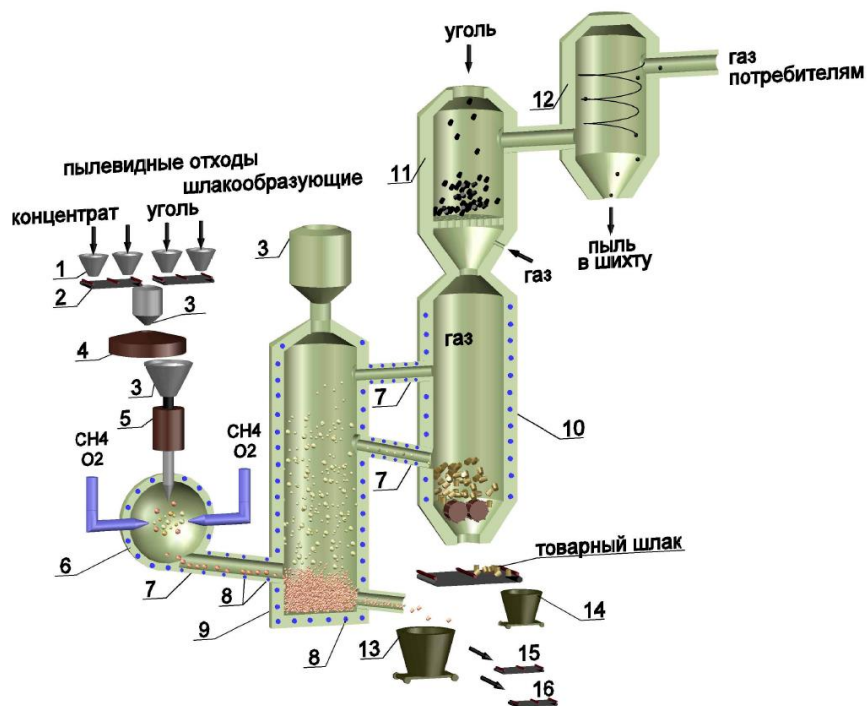
Для металлургических агрегатов типа СЭР характерны высокая интенсивность газодинамических процессов и термоагрессивность среды (газовзвесь и газшлакометаллическая эмульсия) [1, 2]. В связи с этим защита элементов конструкции агрегата посредством огнеупорной футеровки несостоятельна. Наряду с повышенным расходом огнеупоров и необходимостью частых остановок на ремонт, большой «смыв» футеровки по ходу процесса является принципиальным ограничением для реализации некоторых технологий, так как он ведет к изменению химсостава рабочей среды (эмульсии).

Наиболее приемлемой альтернативой в этой ситуации является принудительное формирование защитного гарнисажного слоя с необходимыми свойствами, которые должны обеспечивать его стабильность (стойкость). Для решения данной задачи авторами предлагается использовать позонно-разделенную систему корпусного охлаждения технологических агрегатов, фрагмент которой представлен на рисунке 1, п. 8.

Такой подход позволит решить сразу две задачи: формирование гарнисажного слоя внутри агрегатов; использование тепловой энергии в целях отопления производственных помещений. На рисунке 2 представлена принципиальная схема системы корпусного охлаждения агрегатов [2]. Каждый из четырех охлаждаемых контуров на самом деле представляет целый комплекс контуров со своими циркуляционными насосами, что позволяет гибко регулировать отложение гарнисажного слоя в любом месте внутри каждого агрегата.

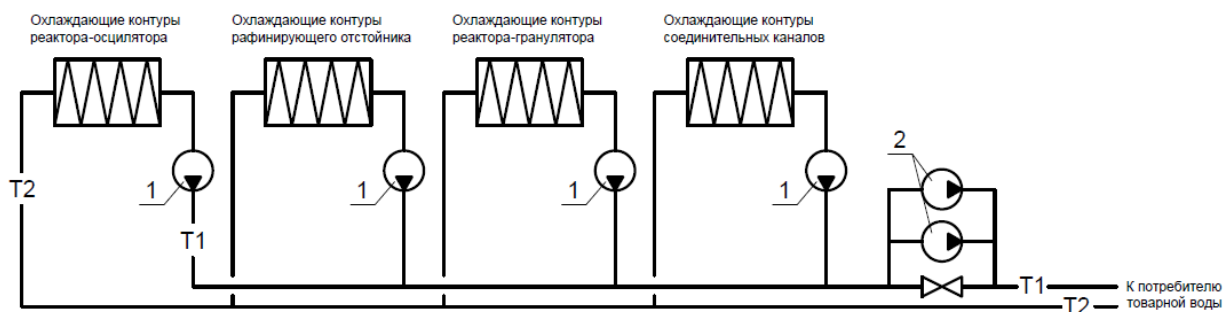
Принцип работы данной системы заключается в следующем. Вода, поступающая в контур охлаждения, подогревается до температуры 130 °С, тем самым утилизируя тепло от стенок агрегата и направляясь в общую сеть к теплопотребителю (например, для отопления производственного цеха и т.д.). В результате охлаждения стенки технологического агрегата с внутренней ее части начинает «намораживаться» расплавленный металл (гарнисаж). Отдавшая тепловую энергию вода с температурой 70 °С поступает вновь в охлаждаемые контура, подогревается и процесс повторяется [2].

Важной особенностью таких систем является их надежность. С одной стороны необходимо выдерживать требуемую толщину гарнисажа, с другой – обеспечить отвод тепловой энергии [3]. Любое отклонение в работе системы охлаждения приведет к аварийным ситуациям.



1 – бункер; 2 – питатели; 3 – дозаторы; 4 – смеситель; 5 – шнековая подача; 6 – реактор-осцилятор; 7 – соединительный канал; 8 – позонно-разделенная система корпусного охлаждения; 9 – рафинирующий отстойник; 10 – реактор гранулятор; 11 – аппарат кипящего слоя; 12 – циклон; 13 – ковш; 14 – бункер для приема товарного шлака; 15 – специальная линия для литья; 16 – разливочная линия

Рисунок 1 – Агрегат СЭР с энергоутилизирующими установками в разрезе



1 – контурный циркуляционный насос; 2 – сетевой циркуляционный насос; T1 – магистраль с горячим теплоносителем; T2 – магистраль с охлажденным теплоносителем

Рисунок 2 – Принципиальная схема системы корпусного охлаждения агрегата СЭР

С использованием программного комплекса «Ansys» разработана имитационная модель фрагмента (рисунок 1, нижняя часть места соединения канал 7 к рафинирующему отстойнику 9) системы гарнисажного охлаждения агрегата СЭР.

Цель. Создать имитационную модель фрагмента гарнисажного охлаждения и провести стационарный тепловой анализ.

Условия. Тип анализа – нелинейный тепловой расчет конструкции. Тип используемого конечного элемента – двумерный твердотельный (Solid). Тип граничных условий – конвекция. Возможности – задание теплопроводности как функции температуры, построение графиков по произвольно заданному пути, получение графика температур и теплового потока.

Порядок выполнения действий:

1) определяется тип анализа: MAIN MENU > PREFERENCES > THERMAL > OK (тепловой расчет);

2) выбирается тип используемого элемента, задается его толщина и определяются со свойствами материала. Далее выбирается конечный элемент: MAIN MENU > PREPROCESSOR > ELEMENT TYPE > ADD/EDIT/DELETE > ADD > THERMAL SOLID QUAD 4 NODE 55 > OK > CLOSE;

3) задается материал: MAIN MENU > PREPROCESSOR > MATERIAL PROPS > MATERIAL MODELS. В окне CONDUCTIVITY FOR MATERIAL NUMBER 1 нажимается три раза кнопка ADD TEMPERATURE и в полях TEMPERATURES задается: 20, 40, 60, 100, а в полях KXX задается 30, 35, 55, 95;

4) аналогично раскрывается DENSITY и в поле DENS задается 7800 кг/м^3 ;

5) строится деталь. Прямоугольник со сторонами 0.5 и 0.75 метра: MAIN MENU > PREPROCESSOR > MODELING > CREATE > AREAS > RECTANGLE > BY DIMENSIONS и задаются координаты X1, X2 и Y1, Y2 равные 0, 0.5 и 0, 0.75 соответственно. Окружность радиусом 0.1 метра, с координатами центра окружности 0.25, 0.15 по оси OX и OY: MAIN MENU > PREPROCESSOR > MODELING > CREATE > AREAS > CIRCLE > SOLID CIRCLE, далее задаются указанные координаты и радиус. Окружность радиусом 0.1 метра, с координатами центра окружности 0.25, 0.6 по оси OX и OY: MAIN MENU > PREPROCESSOR > MODELING > CREATE > AREAS > CIRCLE > SOLID CIRCLE, далее задаются указанные координаты и радиус;

6) создается конструкция (рисунок 3) посредством логического вычитания геометрических объектов и разбивается на конечные элементы. MAIN MENU > PREPROCESSOR > MODELING > OPERATE > BOOLEANS > SUBTRACT > AREAS, затем выбирается прямоугольник, далее указывается сначала нижняя окружность, затем на верхняя;

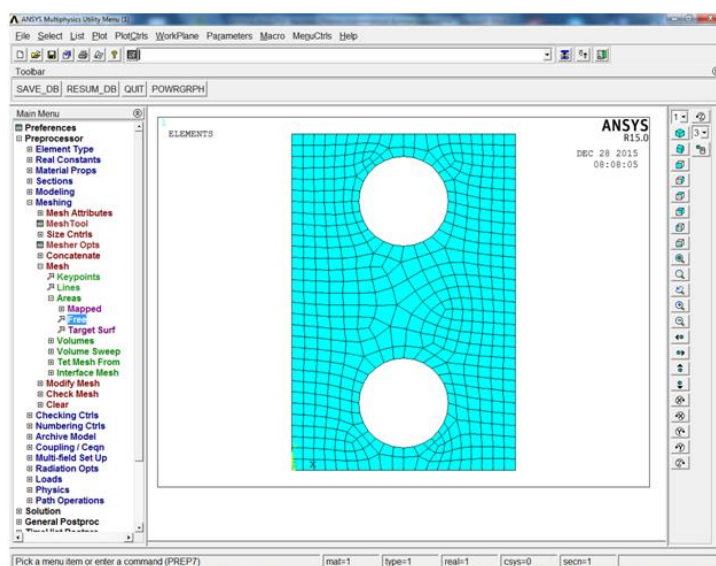


Рисунок 3 – Нанесение сетки на разработанную конструкцию

7) задается средний размер грани конечных элементов: MAIN MENU > PREPROCESSOR > MESHING > SIZE CNTRLS > MANUAL SIZE > GLOBAL > SIZE и переменной SIZE присваивается значение 0.025.

Проводится разбиение: MAIN MENU > PREPROCESSOR > MESHING > MESH > AREAS > FREE > PICK ALL;

8) задаются граничные условия. Указывается температура окружающей среды, контактирующая с нижней линией прямоугольника: MAIN MENU > SOLUTION > DE-

FINE LOADS > APPLY > THERMAL > CONVECTION > ON LINES и указывается данная линия. В окне, переменной VAL1 и VAL2I присваивается значение 20;

9) задается температура, действующая на верхнюю линию прямоугольника: MAIN MENU > SOLUTION > DEFINE LOADS > APPLY > THERMAL > CONVECTION > ON LINES и указывается данная линия. В окне, переменной VAL1 и VAL2I присваивается значение 110;

10) определяется величина шага: MAIN MENU > SOLUTION > LOAD STEP OPTS > TIME/FREQUENC > TIME AND SUBSTEPS и в окне задается переменным TIME и NSUBST значение 1;

11) проводится расчет. MAIN MENU > SOLUTION > SOLVE > CURRENT LS > OK. Просматриваются результаты картины распределения температуры (рисунок 4): MAIN MENU > GENERAL POSTPROC > PLOT RESULTS > CONTOUR PLOT > NODAL SOLU > DOF SOLUTION > NODAL TEMPERATURE > OK.

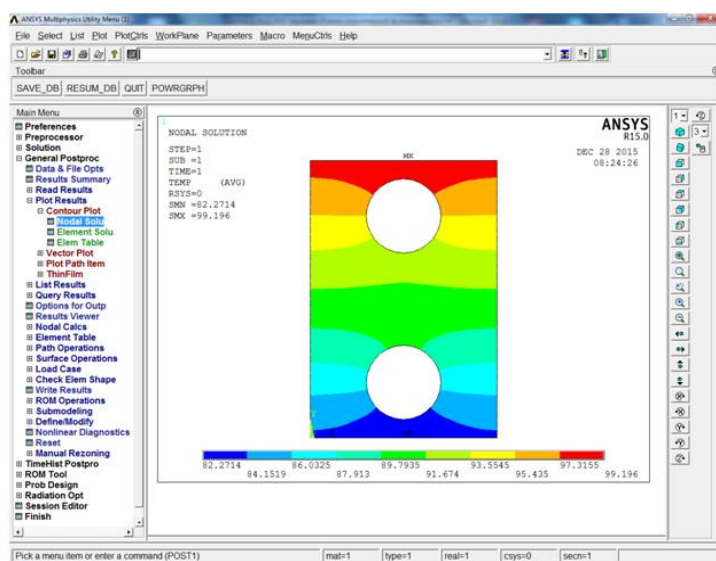


Рисунок 4 – Распределение температуры на конструкции

На рисунке 4 представлены результаты моделирования температурных полей вокруг охлаждающих труб в месте соединения соединительного канала 7 и рафинирующего отстойника 9 (рисунок 1). Прослеживается падение температуры фрагмента сверху-вниз с 97 до 82 °С. Температура теплоносителя в трубах при этом составляет в среднем 90 °С. На основании разработанной модели возможно построение температурных полей и имитирование аварийных ситуаций любой выбранной области агрегата. Для этого необходимо перестроить геометрию выбранного фрагмента и задать необходимые физические параметры материалов и теплонесущих сред.

Библиографический список

1. Tsymbal V.P., Mochalov S.P., Olennikov A.A. and other. Mini-metallurgy of full cycle on the basis of the spray-emulsion metallurgical process SER – from ore to steel / CIS iron & steel review. – 2013. – № 1. – С. 43-48.
2. Tsymbal V.P., Mochalov S.P., Olennikov A.A. and other. Energy-metallurgical complex based on the spray-emulsion reactor CIS iron & steel review.–2012. – № 1. – С. 13-15.
3. Оленников А.А., Оленников Е.А., Захаров А.А. Программный комплекс для моделирования схем утилизации физической и химической энергии от отходящих газов металлургических агрегатов / Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2015. – Т. 1. – № 2 (2). – С. 185-192.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОЙ СМЕСИ

Рыбенко И.А., Буинцев В.Н.

ФГОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет»
г. Новокузнецк, Россия, rybenkoi@rambler.ru

Аннотация. В работе представлены результаты математического моделирования процесса горения угольной пыли в замкнутом реакторе. Рассчитаны последствия реакции горения пылевоздушной влажной смеси, такие как температура, давление, состав продуктов горения. Проведен анализ результатов моделирования на предмет оценки поражающих факторов взрыва пылеугольной смеси.

Ключевые слова: Математическое моделирование, горение угольной пыли, последствия реакции, продукты горения.

Abstract. In work results of mathematical modeling of process of burning of coal dust in the closed reactor are presented. Consequences of reaction of burning of pylevozdushny damp mix, such as temperature, pressure, structure of products of burning are calculated. The analysis of results of modeling regarding an assessment of the striking factors of explosion of coal-dust mix is carried out.

Keywords: Mathematical modeling, burning of coal dust, reaction consequence, burning products.

Добыча угля подземным способом сопровождается выделением в атмосферу шахтного забоя газа метана, который при достижении определенной концентрации образует взрывоопасную смесь с кислородом воздуха. Основным способом борьбы с загазованностью подземных выработок является их вентилирование. Однако вентилирование не обеспечивает защиту от мелкодисперсной угольной пыли, находящейся во взвешенном состоянии в атмосфере шахтных выработок. При определенных концентрациях пыли возможен объемный взрыв, сопровождающийся повышением температуры и давления в замкнутом объеме шахтной выработки. В связи с этим, вызывает интерес исследование условий взрыва пылевоздушной смеси.

Ниже приведено описание инструментальной системы, разработанной в соответствии с методикой [1 – 5], позволяющей осуществлять многовариантные расчеты определения состава и температуры продуктов процесса горения угольной пыли в замкнутом объеме.

Принимает объем реактора равным V_p м³. В объеме реактора будут находиться $n_{O_2 \text{возд}}$ и $n_{N_2 \text{возд}}$ молей кислорода и азота воздуха соответственно.

При влажности воздуха W г/м³ количество влаги составит $n_{H_2O \text{возд}} = \frac{W}{1000} \cdot V_p$ молей.

Масса угольной пыли при ее концентрации в реакторе l % составляет:

$$G_{\text{пыли}} = \frac{l \cdot G_{\text{возд}}}{(100 - l)}, \quad (1)$$

где $G_{\text{возд}} = G_{O_2} + G_{N_2}$ – масса воздуха в реакторе, кг.

Угольная пыль состоит из органической части (C), минеральной части (A), влаги (W) и летучих компонентов (L). Минеральная часть в процессе горения не участвует, остается в виде золы. Количество золы определим по формуле:

$$G_{\text{золы}} = \frac{G_{\text{пыли}} \cdot A}{100}, \quad (2)$$

где A – зольность топлива, %.

Количество молей воды и органического углерода из угольной пыли соответственно равно:

$$n_{H_2O_{пыль}} = \frac{G_{пыли} \cdot W}{100 \cdot 0,018}; \quad (3)$$

$$n_{C_{пыль}} = \frac{G_{пыли} \cdot C}{100 \cdot 0,012}, \quad (4)$$

где W – влажность топлива, %;

C – содержание органического углерода в пыли, %.

При разработке математической модели были выделены следующие этапы развития процесса: выделение и горение летучих компонентов из угольной пыли, горение органического углерода пыли и взаимодействие углерода угольной пыли с водяным паром.

Выделение и горение летучих

В момент возгорания в некотором ограниченном объеме увеличивается температура, и начинается выделение летучих компонентов угольной пыли по следующей схеме: две трети кислорода летучих выделяется в виде CO , одна треть – в виде CO_2 . Оставшийся углерод образует CH_4 , а оставшийся водород – H_2 . Весь азот переходит в N_2 .

$$\begin{aligned} n_{CO_{лет}} &= 2/3 \cdot \left(\frac{G_{пыли} \cdot L}{100} \cdot \frac{O/_{лет}}{100} \right) / 0,016; \\ n_{CO_2_{лет}} &= 1/3 \cdot \left(\frac{G_{пыли} \cdot L}{100} \cdot \frac{O/_{лет}}{100} \right) / 0,032; \\ n_{CH_4_{лет}} &= \frac{G_{пыли} \cdot L}{100 \cdot 0,012} \cdot \frac{C/_{лет}}{100} - n_{CO_{лет}} - n_{CO_2_{лет}}; \\ n_{H_2_{лет}} &= \frac{G_{пыли} \cdot L}{100 \cdot 0,002} \cdot \frac{H/_{лет}}{100} - 2n_{CH_4_{лет}}; \\ n_{N_2_{лет}} &= \left(\frac{G_{пыли} \cdot L}{100} \cdot \frac{N/_{лет}}{100} \right) / 0,028, \end{aligned} \quad (5)$$

где L – содержание летучих в угольной пыли, %;

$O/_{лет}$, $C/_{лет}$, $H/_{лет}$, $N/_{лет}$ – содержание кислорода, углерода, водорода и азота в летучих компонентах пыли, %.

Рассмотрим процесс горения летучих компонентов. Первым из летучих сгорает метан. Если в реакторе удвоенное количество молей кислорода превышает количество молей метана, то количество молей образовавшегося в результате конверсии метана CO определяется числом молей метана, а иначе удвоенным количеством молей кислорода:

$$\begin{aligned} \text{Если } n_{CH_4_{лет}} < 2n_{O_2_{возд}}, \text{ то } n_{CO_{конв. CH_4_{лет}}} &= n_{CH_4_{мет}}, \\ \text{иначе } n_{CO_{конв. CH_4_{лет}}} &= 2n_{O_2_{возд}}. \end{aligned}$$

Количество молей образовавшегося водорода соответственно равно $n_{H_2_{конв. CH_4_{лет}}} = 2n_{CO_{конв. CH_4_{лет}}}$.

На конверсию метана летучих будет затрачено $n_{O_2_{конв. CH_4_{лет}}} = n_{CO_{конв. CH_4_{лет}}} / 2$ молей кислорода.

Если в реакторе после конверсии метана летучих остался кислород, то часть или весь оксид углерода догорит до CO_2 , а H_2 – до H_2O , количество образовавшихся CO_2 и

H_2O будет определяться либо числом молей CO , либо числом молей оставшегося кислорода:

$$\begin{aligned} &\text{Если } 2(n_{O_2\text{возд}} - n_{O_{2\text{конв.}CH_4\text{лет}}}) > (n_{CO\text{лет}} + n_{CO\text{конв.}CH_4\text{лет}} + n_{H_2\text{лет}} + n_{H_{2\text{конв.}CH_4\text{лет}}}), \\ &\quad \text{то } n_{CO\text{доож}} = n_{CO\text{лет}} + n_{CO\text{конв.}CH_4\text{лет}}, \text{ и } n_{H_2\text{доож}} = 2 \cdot n_{CO\text{доож}}, \\ &\text{иначе } n_{CO\text{доож}} = 2(n_{O_2\text{возд}} - n_{O_{2\text{конв.}CH_4\text{лет}}})/3 \text{ и } n_{H_2\text{доож}} = 4(n_{O_2\text{возд}} - n_{O_{2\text{конв.}CH_4\text{лет}}})/3. \end{aligned} \quad (6)$$

На дожигание CO и водорода будет затрачено $n_{O_{2\text{доож}}} = n_{CO\text{доож}}/2 + n_{H_2\text{доож}}/2$ молей кислорода.

В результате дожигания образуется CO_2 и H_2O :

$$n_{CO_2\text{доож}} = n_{CO\text{доож}} \text{ и } n_{H_2O\text{доож}} = n_{H_2\text{доож}}. \quad (7)$$

Горение органического углерода

Процесс горения угольной пыли в зависимости от ее концентрации в воздухе можно представить двумя реакциями:



Проверяем условие наличия кислорода в реакторе. Если кислород остался, то произойдет процесс горения углерода до CO по реакции (8).

$$\begin{aligned} &\text{Если } (n_{O_2\text{возд}} - n_{O_{2\text{конв.}CH_4\text{лет}}} - n_{O_{2\text{доож}}}) > 0, \\ &\quad \text{то } n_{CO\text{пыль}} = n_{C\text{пыль}}, \\ &\text{иначе } n_{CO\text{пыль}} = 2(n_{O_2\text{возд}} - n_{O_{2\text{конв.}CH_4\text{лет}}} - n_{O_{2\text{доож}}}). \end{aligned} \quad (10)$$

Если кислорода не осталось, то $n_{CO\text{пыль}} = 0$.

На горение углерода будет затрачено $n_{O_{2\text{пыль}}} = n_{CO\text{пыль}}/2$ кислорода. Количество сгоревшего углерода соответственно равно $n_{C\text{гор}} = n_{C\text{пыль}} - n_{CO\text{пыль}}$.

Если в реакторе еще остался кислород, произойдет дожигание CO до CO_2 по реакции (9).

$$\begin{aligned} &\text{Если } n_{O_2\text{возд}} - n_{O_{2\text{конв.}CH_4\text{лет}}} - n_{O_{2\text{доож}}} - n_{O_{2\text{пыль}}} > n_{CO\text{лет}} + n_{CO\text{конв.}CH_4\text{лет}} + n_{CO\text{пыль}} - n_{CO\text{доож}}, \\ &\quad \text{то } n_{CO\text{доожост}} = n_{CO\text{лет}} + n_{CO\text{конв.}CH_4\text{лет}} + n_{CO\text{пыль}} - n_{CO\text{доож}}, \\ &\text{иначе } n_{CO\text{доожост}} = 2(n_{O_2\text{возд}} - n_{O_{2\text{конв.}CH_4\text{лет}}} - n_{O_{2\text{доож}}} - n_{O_{2\text{пыль}}}). \end{aligned} \quad (11)$$

При этом образуется $n_{CO_2\text{доожост}} = n_{CO\text{доожост}}$ молей CO_2 , и будет затрачено $n_{O_{2\text{доожост}}} = n_{CO\text{доожост}}/2$ молей кислорода.

Взаимодействие углерода с водяным паром

Если в системе остался углерод и $(n_{C\text{пыль}} - n_{C\text{гор}}) > 0$, то произойдет его взаимодействие с водяным паром по реакции:



Если $(n_{C_{пыль}} - n_{C_{гор}}) > (n_{H_2O_{возд}} + n_{H_2O_{пыль}} + n_{H_2O_{дож}})$, то количество образовавшегося в результате газификации CO и H_2 будет определяться количеством водяных паров $n_{CO_{газиф}} = n_{H_2_{газиф}} = n_{H_2O_{возд}} + n_{H_2O_{пыль}} + n_{H_2O_{дож}}$, иначе – количеством углерода $n_{CO_{газиф}} = n_{H_2_{газиф}} = n_{C_{пыль}} - n_{C_{гор}}$.

В результате протекания всех вышеперечисленных реакций в объеме реактора будут находиться следующие вещества: CO , CO_2 , N_2 , H_2 , H_2O , CH_4 , O_2 , C и зола.

Состав продуктов будет следующим:

$$\begin{aligned} n_{CO} &= n_{CO_{конв}} - n_{CO_{гор.мет}} + n_{CO_{лет}} + n_{CO_{конв. CH_4 лет}} - n_{CO_{дож}} + n_{CO_{пыль}} - n_{CO_{дож.ост}} + n_{CO_{газиф}}; \\ n_{CO_2} &= n_{CO_2 лет} + n_{CO_2 дож} + n_{CO_2 дож.ост}; \\ n_{N_2} &= n_{N_2 возд}; \\ n_{H_2} &= n_{H_2 лет} + n_{H_2 конв. CH_4 лет} - n_{H_2 дож} + n_{H_2 газиф}; \\ n_{H_2O} &= n_{H_2O возд} + n_{H_2O пыль} + n_{H_2O дож} - n_{H_2O газиф}; \\ n_{CH_4} &= n_{CH_4 лет} - n_{CH_4 лет. конв}; \\ n_{O_2} &= n_{O_2 возд} - n_{O_2 конв. CH_4 лет} - n_{O_2 дож} - n_{O_2 дож.ост}; \\ n_C &= n_{C пыль} - n_{C гор}. \end{aligned} \quad (13)$$

Масса и объем i -го компонента смеси определяются в соответствии с формулами (14 – 15):

$$G_i = n_i \cdot M_i; \quad (14)$$

$$V_i = \frac{n_i}{\sum_{j=1}^N n_j} \cdot V_p, \quad (15)$$

где M_i – молярная масса i -го компонента, кг/моль;

V_p – объем реактора, м³;

N – число компонентов газовой фазы.

Далее по методике, изложенной в работах [5 – 10] рассчитывается тепловой баланс процесса, на основе которого определяется температура продуктов горения и повышение давления в замкнутом реакторе.

Рассмотрим варианты расчета горения угольной пыли в замкнутом объеме. Принимает объем реактора равным 100 м³. При стандартном составе воздуха 21% O_2 и 79% N_2 в заданном объеме при нормальных условиях будет присутствовать 25,95 м³ (37,08 кг) кислорода и 74,05 м³ (92,56 кг) азота, что составляет $n_{O_2_{возд}} = 1158,67$ и $n_{N_2_{возд}} = 3305,86$ молей кислорода и азота соответственно. Количество влаги в воздухе составляет 1,8 кг или $n_{H_2O_{возд}} = 100$ молей.

Состав угольной пыли приведен в таблице 1, а в таблице 2 приведен состав летучих компонентов пыли.

С использованием разработанной модели были проведены исследования, результаты представлены на рисунке 1.

Таблица 1 – Состав угольной пыли

Составляющая	W	A	C	L	Всего
%	1	10	77	12	100
кг	0,040	0,401	3,087	0,481	4,009

Таблица 2 – Состав летучих компонентов угольной пыли

Вещество	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	H ₂	Всего
кг	0,081	0,032	0,311	0,034	0,023	0,481
%	16,85	6,62	64,66%	7,07	4,81	100,00
м ³	0,065	0,016	0,436	0,027	0,259	0,803

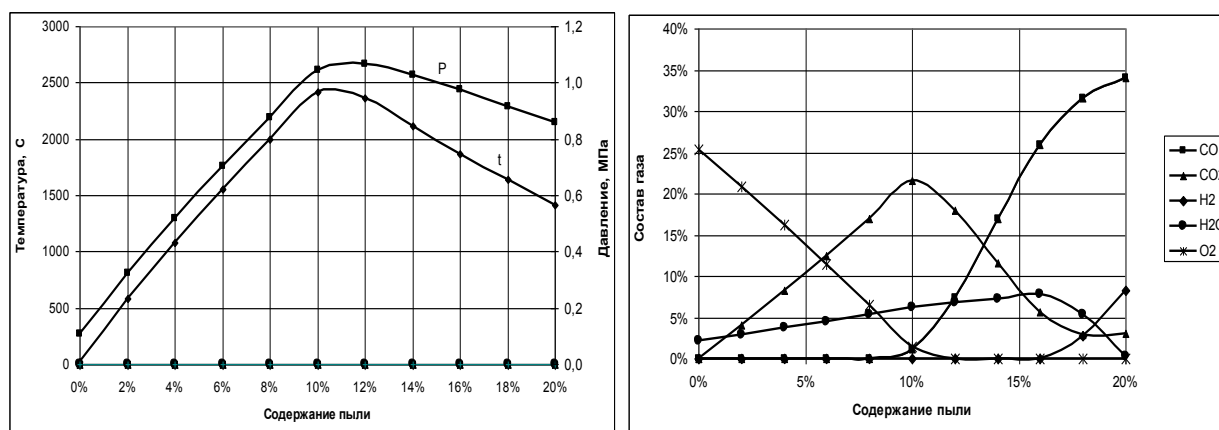


Рисунок 1 – Результаты моделирования процесса горения угольной пыли

Как видно из рисунка 1 а) максимальные давление и температура наблюдаются при концентрации пыли 10 – 12%. При этих же условиях при отсутствии кислорода начинает генерироваться угарный газ. Так как в шахтной атмосфере чаще всего имеет место метаноугольная смесь, то определенный интерес представляет исследование процесса совместного горения метана и угольной пыли.

Библиографический список

1. Рыбенко И. А. Разработка методики и системы расчета вариантов технологий непрерывного получения металла в агрегатах струйно-эмульсионного типа : дис. канд. техн. наук : спец. 05.16.02 : защищена 28.03.00 : утв. 14.06.00 / И. А. Рыбенко. – Новокузнецк, 2000. – 165 с. : ил.
2. Рыбенко И. А. Методика и система расчета и оптимизации статических стационарных режимов технологических процессов / И. А. Рыбенко, С. П. Мочалов, П. С. Мочалов // Металлургия: технологии, управление, инновации, качество: тр. XVII всерос. науч.-практ. конф. / под ред. Е.В. Протопопова : Сиб. гос. индустр. ун-т. –Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2013. – С. 29 – 32.
3. Рыбенко И. А. Технология моделирования и оптимизации стационарных режимов производственных процессов / И. А. Рыбенко, С. П. Мочалов // Векторы развития современной науки : материалы междунар. науч.-практ. конф. Часть II. – Уфа : РИО ИЦИПТ, 2014. – С.145 – 150.
4. Моделирование и оптимизация стационарных режимов металлургических процессов : монография / И. А. Рыбенко, С. П. Мочалов ; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2015. – 170 с.

5. Процесс СЭР – металлургический струйно-эмульсионный реактор : монография / В. П. Цымбал, С. П. Мочалов, И. А. Рыбенко [и др.]. – М.: Металлургиздат, 2014. – 488с.
6. Математическое моделирование процессов горения суспензионного водоугольного топлива в вихревой топке / И. А. Рыбенко, С. П. Мочалов, П. С. Мочалов, С. Н. Калашников // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2012. - № 1. – С. 52 – 57.
7. Математическое моделирование процессов горения суспензионного водоугольного топлива в вихревой топке / И. А. Рыбенко, С. П. Мочалов, П. С. Мочалов, С. Н. Калашников // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2012. - № 1. – С. 52 – 57.
8. Mochalov S. P. Mechanism and mathematical modeling of coal-water slurry combustion in swirl adiabatic combustion chamber / S. P. Mochalov, I. A. Rybenko, L. A. Ermakova // World Applied Sciences Journal. – 2012. - № 19 (1). – С. 20 – 25.
9. Математическое моделирование динамических процессов горения в вихревой топке суспензионного водоугольного топлива из отходов углеобогащения / С. П. Мочалов, И. А. Рыбенко, П. С. Мочалов, С. Н. Калашников // Известия вузов. Черная металлургия. – 2012. - № 8. – С. 6 – 9.
10. Рыбенко И. А. Моделирование стационарных режимов горения ВУТ в адиабатической камере / И. А. Рыбенко, С. П. Мочалов, П. С. Мочалов // Моделирование, программное обеспечение и наукоемкие технологии в металлургии: тр. 3-й Всероссийской науч.-практ. конф. посвященной 30-летию кафедры ИТМ. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2011. – С. 65 – 68.

УДК 669.18

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ СТЕНДОВ РАЗОГРЕВА ФУТЕРОВОК МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ КОВШЕЙ*

Темлянцев М.В., Запольская Е.М., Максакова К.Е.

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет»
г. Новокузнецк, Россия, uchebn_otdel@sibsiu.ru

Аннотация. В статье представлены результаты разработки комплексной детерминированной математической модели тепловой работы стендов разогрева огнеупорных футеровок металлургических ковшей. Модель позволяет рассчитать процессы теплогенерации, внешнего и внутреннего теплообмена, обезуглероживания рабочего слоя углеродсодержащих огнеупоров, а также тепловой баланс стенда.

Ключевые слова. Математическая модель, футеровка, разогрев, металлургический ковш.

Abstract. The article presents the results of developing a comprehensive deterministic mathematical models of thermal workshops heating of refractory linings of metallurgical ladles. The model allows us to calculate the heat generation, external and internal heat transfer, decarbonization of the working layer of carbon-containing refractories and thermal balance of the stand.

Keywords. The mathematical model, the lining, the heating of the metallurgical ladle.

Ковши являются одним из основных видов металлургического оборудования, предназначенного для транспортирования и разливки жидкого металла [1]. Перед приемом расплава футеровку сталеразливочных ковшей разогревают до температур 1100 – 1200 °С на специальных стендах, отапливаемых природным газом. При разогреве наиболее часто используемых в настоящее время оксидноуглеродистых смолосвязанных футеровок одновременно протекает целый ряд взаимосвязанных тепломассообменных и физи-

* Работа выполнена согласно заданию на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках проектной части госзадания Минобрнауки РФ НИР № 1622ПГЗ

ко-химических процессов. Взаимное влияние тепло- и массообменных процессов затрудняет разработку рациональных и оптимальных технологических режимов разогрева футеровки. Эта задача становится все более сложной и многофакторной. Однако, она может быть решена с применением комплексных математических моделей. До настоящего времени учеными было разработано достаточно много различных моделей [2 – 5], однако большинство из них имеют ряд существенных недостатков. Например, рассматриваемые модели позволяют моделировать исключительно стационарные температурные поля или рассчитывать распределение температур только в одно- или двухслойной футеровках. Ряд имеющихся моделей носит не комплексный характер, например, моделируют тепловую работу стенда и футеровки только на стадии разогрева и не учитывают теплообменные процессы при транспортировании расплава, или не позволяют рассчитывать тепловой баланс стенда и расходы топлива на разогрев.

В связи с этим применение комплексных многофакторных детерминированных математических моделей, позволяющих исследовать тепловую работу стендов и футеровок на стадии разогрева, а также транспортирования расплава, является эффективным и относительно малозатратным методом теплотехнических исследований, а их разработка не теряет своей актуальности.

Для комплексного исследования тепловой работы ковшевых футеровок разработана детерминированная математическая модель [6]. Она имеет блочную структуру, включающую следующие основные (укрупненные) блоки:

- 1 – расчет процессов теплогенерации;
- 2 – расчет внешнего теплообмена излучением и конвекцией во внутреннем пространстве ковша;
- 3 – расчет внутреннего теплообмена, нестационарных температурных полей в футеровке;
- 4 – расчет глубины обезуглероженного слоя футеровки;
- 5 – расчет теплового баланса процессов разогрева футеровки и охлаждения расплава.

Структура математической модели, определяемые параметры и величины, перечень блоков, используемых для моделирования теплового состояния футеровки на различных технологических операциях представлены на рисунке 1.

При разработке детерминированной модели была поставлена задача комплексного рассмотрения стадий разогрева ковша, транспортирования расплава и охлаждения футеровки с возможностью учета изменения теплового состояния огнеупоров при промежуточных операциях, например, охлаждении футеровки после разогрева при транспортировании ковша под разливку.

Расчет полного горения газообразного топлива

Теплотехнический расчет полного горения газообразного топлива проводили по стандартной методике представленной в работе [7].

Содержание, % водяного пара в газе и значение коэффициента K пересчета определяли по следующим формулам:

$$H_2O = \frac{100d}{803,6 + d}, \quad (1)$$

$$K = 1 - 0,01 \cdot H_2O, \quad (2)$$

где d – влагосодержание газа, г/м³.



+ и – используемые и неиспользуемые блоки на соответствующих технологических операциях

Рисунок 1 – Структура математической модели

Содержание i -го компонента во влажном газе рассчитывали по выражению:

$$y_i^{gl} = y_i^c \cdot K, \quad (3)$$

где y_i^c – содержание компонента в сухом газе.

Низшую теплоту сгорания топлива, кДж/м³ определяли по формуле:

$$Q_n^p = 127,7 \cdot CO + 108 \cdot H_2 + 358 \cdot CH_4 + 590 \cdot C_2H_4 + 555 \cdot C_2H_2 + 636 \cdot C_2H_6 + 913 \cdot C_3H_8 + 1185 \cdot C_4H_{10} + 1465 \cdot C_5H_{12} + 234 \cdot H_2S, \quad (4)$$

где $CO, H_2, \dots$ – содержание компонента в газе, %.

Теоретическое количество, м³/м³ окислителя, необходимое для горения 1 м³ газа определяли по формуле:

$$L_0 = \frac{1}{O'_2} \cdot \left(0,5 \cdot H_2 + 0,5 \cdot CO + \sum \left(n + \frac{m}{4} \right) \cdot C_n H_m + 1,5 \cdot H_2S - O_2 \right), \quad (5)$$

где O'_2 – содержание кислорода в сухом окислителе, %.

Теоретическое количество, $\text{м}^3/\text{м}^3$ влажного окислителя находили по уравнению:

$$L_0^T = L_0 \cdot (1 + 0,001244 \cdot d'), \quad (6)$$

где d' – влагосодержание окислителя, $\text{г}/\text{м}^3$.

Действительное количество окислителя, подаваемое на горение, рассчитывали по соотношению:

$$L_n = n \cdot L_0^T, \quad (7)$$

где n – коэффициент избытка окислителя, зависящий от типа горелочного устройства и температурного режима разогрева.

Для полного горения газообразного топлива состав и количество продуктов сгорания определяли по выражениям:

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01 \cdot (\text{CO}_2 + \text{CO} + \sum n \cdot C_n H_m), \quad (8)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01 \cdot \left(\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2 + \text{H}_2\text{S} + \sum \frac{m}{2} \cdot C_n H_m \right) + 0,001244 \cdot d' \cdot L_n, \quad (9)$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,01 \cdot (\text{N}_2 + L_n \cdot \text{N}'_2), \quad (10)$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,01 \cdot (\text{H}_2\text{S} + \text{SO}_2), \quad (11)$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,01 \cdot \text{O}'_2 (n - 1) \cdot L_0^T, \quad (12)$$

где N'_2 – содержание азота в окислителе, %.

Суммарный объем продуктов сгорания

$$V_\partial = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2}. \quad (13)$$

Состав продуктов сгорания в объемных процентах рассчитывали по формулам:

$$R_i = \frac{V_i}{V_\partial} \cdot 100\%, \quad (14)$$

$$\sum R_i = 100\%$$

Калориметрическую температуру горения – максимальную температуру, которую могли бы иметь продукты сгорания при полном сгорании топлива в адиабатических условиях с учетом физического тепла топлива и окислителя, определяли по уравнению:

$$t_{\text{кл}} = \frac{Q_H^p + L_n \cdot c_B \cdot t_B + c_\Gamma \cdot t_\Gamma}{V_\partial \cdot c_\partial}, \quad (15)$$

где c_B , c_Γ и c_∂ – теплоемкости окислителя, газа и дыма соответственно, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$;

t_B и t_Γ – температуры подогрева окислителя и газа, $^\circ\text{C}$.

Поскольку $c_\partial = f(t_{\text{кл}})$, калориметрическую температуру горения находили в результате совместного решения следующих выражений:

$$i_0 = \frac{Q_H^p + L_n \cdot c_B \cdot t_B + c_\Gamma \cdot t_\Gamma}{V_\partial}; \quad i'_0 = c_\partial(t_{\text{кл}}) \cdot t_{\text{кл}}, \quad (16)$$

где $c_d(t_{\text{кл}})$, – теплоемкость продуктов сгорания при температуре $t_{\text{кл}}$, кДж/(м³·К);
 i_0 и i_0' – энтальпии, кДж/м³.

Теплоемкости C_i , кДж/(м³·К) индивидуальных газов в зависимости от температуры определяли по уравнениям, предложенным в работе [7]. Теплоемкость C , кДж/(м³·К) смеси газов определяем с учетом свойства аддитивности по формуле:

$$C = \sum_{i=1}^n 0,01 \cdot R_i \cdot C_i. \quad (17)$$

Итерационные процессы поиска температуры горения реализовали с помощью метода половинного деления.

Расчет внешнего теплообмена

При разогреве футеровки плотность q , Вт/м² теплового потока излучением и конвекцией от раскаленных продуктов сгорания, содержащих трехатомные газы, к поверхности футеровки, рассчитывали по соотношению [7]

$$q = C_0 \cdot \varepsilon_{np} \cdot \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] + \alpha_K \cdot (T_c - T_1), \quad (18)$$

где $C_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴) – коэффициент излучения абсолютно «черного» тела;
 ε_{np} – приведенная степень черноты в системе «серый» газ – «серая» кладка;
 T_c и T_1 – температуры среды и поверхности футеровки, К;
 α_K – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·К).

В зависимости от целей, в которых используется модель, расчеты можно проводить принимая граничные условия I рода на внутренней поверхности футеровки, т.е. температуру поверхности задают функцией от времени. Этот режим соответствует разогреву с постоянной скоростью увеличения температуры футеровки или выдержке при постоянной температуре поверхности. Модель можно использовать для расчетов нагрева при граничных условиях III рода. В этом случае температуру среды задают как функцию от времени.

При отличии закона изменения температуры t_1 поверхности футеровки или t_c среды во времени от линейного при моделировании использовали соотношение [7]

$$t = t_0 + A_1 \left(1 - \exp \left(-B_1 \frac{\tau_i}{\tau} \right) \right), \quad (19)$$

где t_0 – начальная температура поверхности или среды, °С;
 A_1, B_1 – эмпирические коэффициенты, зависящие от режима нагрева;
 τ_i – текущий i -ый момент времени от начала нагрева, мин;
 τ – суммарное время нагрева, мин.

Приведенную степень черноты в системе серый газ – серая кладка определяли по соотношению [7]

$$\varepsilon_{np} = \varepsilon_g (\varepsilon_\phi + 1)/2, \quad (20)$$

где ε_g и ε_ϕ – степень черноты газа (продуктов сгорания), находящихся в рабочем пространстве ковша и поверхности рабочего слоя футеровки.

Степень черноты продуктов сгорания, содержащих в своем составе CO_2 и H_2O , вычисляли с учетом свойства аддитивности:

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{CO_2} + \beta \varepsilon_{H_2O}, \quad (21)$$

где ε_{CO_2} и ε_{H_2O} – степени черноты соединений CO_2 и H_2O ;

β – поправочный коэффициент, учитывающий неодинаковую степень влияния толщины газового слоя и парциального давления P_{H_2O} на энергию излучения водяных паров.

Степень черноты излучающих газов CO_2 , H_2O и SO_2 рассчитывали по формулам [7]

$$\varepsilon_{R_{O_2}} = e^{\left(- \left(1,4918 + 0,3980 \cdot (P_{R_{O_2}} \cdot l_{\text{эф}})^{-0,2609} + (0,053 - 0,1239 \cdot (P_{R_{O_2}} \cdot l_{\text{эф}})^{0,1718}) \cdot 0,01 \cdot t_z + (0,003504 + 0,0009446 \cdot (P_{R_{O_2}} \cdot l_{\text{эф}})^{0,5470}) \cdot (0,01 \cdot t_z^2) \right) \right)}, \quad (22)$$

$$\varepsilon_{R_{H_2O}} = e^{\left(0,5708 - 1,2016 \cdot (P_{H_2O} \cdot l_{\text{эф}})^{-0,2146} - (0,0038 + 0,05133 \cdot (P_{H_2O} \cdot l_{\text{эф}})^{-0,2105}) \cdot 0,01 \cdot t_z \right)}, \quad (23)$$

$$\beta = 1 + \left(-0,5 + 5,3114 \cdot (P_{H_2O} \cdot l_{\text{эф}})^{-0,01191} \right) \cdot P_{H_2O}^{0,74 + 0,03705 \cdot (P_{H_2O} \cdot l_{\text{эф}})^{-0,1561}}, \quad (24)$$

где $P_{R_{O_2}} = P_{CO_2} + P_{SO_2}$ – парциальное давление соединений CO_2 и SO_2 , численно равное суммарной доле этих газов в продуктах сгорания при атмосферном давлении, бар;

$l_{\text{эф}}$ – эффективная длина пути луча, м;

t_z – температура газа, °С.

Эффективную длину пути луча определяли по соотношению:

$$l_{\text{эф}} = 3,6 \cdot \frac{V_{\text{в.п.}}}{F_{\text{кл}}}, \quad (25)$$

где $V_{\text{в.п.}}$ – объем внутреннего пространства ковша, м³;

$F_{\text{кл}}$ – площадь поверхности кладки, ограничивающей газовый объем, м².

Коэффициент α_k теплоотдачи конвекцией от раскаленных газов к футеровке в зависимости от конструкции стенда и горелочного устройства принимали равным от 30 до 80 Вт/(м²·К).

На внешней стороне кожухе футеровки ковша для всех случаев расчета задавали граничное условие III рода. Коэффициент теплоотдачи от кожуха в окружающую среду определяли по соотношению [1, 8]

$$\alpha_c = 4,8 (t_k - t_{o,c})^{0,25}, \quad (26)$$

где t_k – температура кожуха ковша, °С;

$t_{o,c}$ – температура окружающей среды, °С.

Расчет нагрева и охлаждения футеровки

Для моделирования температурных полей в футеровке использовали метод конечных разностей (МКР). С его помощью решали дифференциальное уравнение теплопроводности с одномерным температурным полем для многослойной пластины, слои которой выполнены из различных материалов с переменными теплофизическими свойствами:

$$c(t)\rho(t)\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \right), \quad (27)$$

где c – теплоемкость;
 t – температура;
 ρ – плотность;
 τ – время;
 λ – коэффициент теплопроводности;

$0 \leq x \leq X$, X – толщина футеровки.

Дифференциальное уравнение (27) дополнили следующими краевыми условиями:

1) *граничными*, – при разогреве футеровки реализованы несимметричный нагрев и охлаждение; граничные условия задавали для поверхностей рабочего «р» слоя и кожуха «к» индивидуально, при нагреве и охлаждении при граничных условиях III рода:

$$-\left(\lambda_p(t) \frac{\partial t_p}{\partial x}\right)_p = \alpha_\Sigma^p (t_c^p - t_1^p); \quad (28)$$

$$-\left(\lambda_k(t) \frac{\partial t_k}{\partial x}\right)_k = \alpha_\Sigma^k (t_c^k - t_{o.c}^k). \quad (29)$$

Коэффициенты теплоотдачи на внутренней поверхности футеровки и на кожухе рассчитывали, используя соотношения (18) и (26).

При транспортировании расплава на внутренней поверхности футеровки принимали граничные условия I рода

$$t_1^p = t_p, \quad (30)$$

где t_p – температура расплава стали, °С.

На границах слоев принимали идеальный тепловой контакт.

2) *теплофизическими*, – коэффициенты теплоемкости c , кДж/(кг · К), теплопроводности λ , Вт/(м · К), заданы функциями от средней температуры t_{cp} подслоя [7]; плотность слоев футеровки ρ , кг/м³, считали постоянной во всем исследуемом температурном интервале.

3) *начальными*, – нагрев футеровки проводят с холодного состояния, начальное распределение температуры по сечению футеровки задано равномерным ($t_0(x) = \text{const} = 20$ °С), возможно задание любого начального распределения температур ($\Delta t_0 \neq 0$) по сечению футеровки.

4) *геометрическими*, – при разогреве и охлаждении футеровки решали несимметричную задачу внутреннего теплообмена, характерный размер принимали равным толщине футеровки.

Дифференциальное уравнение теплопроводности (27) аппроксимировали в прямоугольной системе координат по оси x . Схема расчетной сеточной модели с узлами на границах элементарных слоев и границах временных интервалов j представлена на рисунке 2. В качестве базового варианта модели использовали четырехслойную систему, т.е. футеровку состоящую из рабочего, арматурного, теплоизоляционного слоев и кожуха. Для моделирования температурных полей использовали равномерную ($\Delta x = \text{const}$) в пределах каждого слоя сетку. Каждый слой разбивали на пять подслоев. Шаг по координате в каждом слое определяли по соотношениям $\Delta x_p = \delta_p/5$; $\Delta x_a = \delta_a/5$; $\Delta x_m = \delta_m/5$; $\Delta x_k = \delta_k/5$; где δ_p , δ_a , δ_m и δ_k – толщины рабочего, арматурного, теплоизоляционного слоев и кожуха соответственно, м.

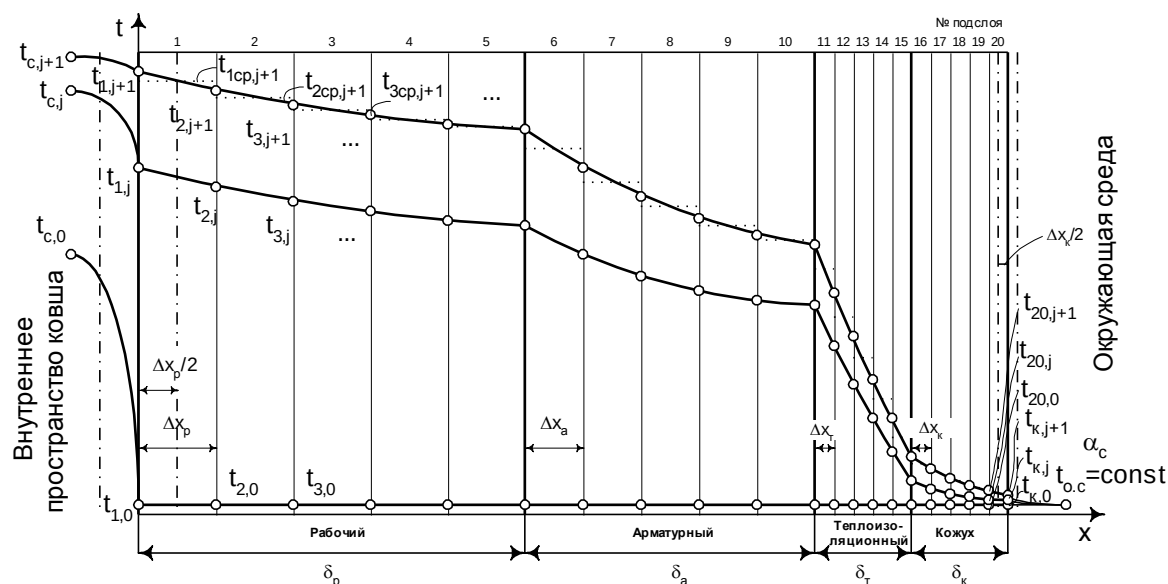


Рисунок 2 – Схема сеточной модели

Временные интервалы $\Delta \tau$ определяли из условий устойчивости решения [7].

Из аппроксимированного уравнения (27) находили температуры Δt_i во всех внутренних узлах сеточной модели, изменение которой в пограничных слоях определяли с учетом температур на границах сеточной области (поверхностях сопряжения).

Температуры на поверхностях сопряжения индивидуально для внутренней поверхности футеровки и кожуха находили из граничных условий, связывающих внешний и внутренний теплообмен. Коэффициент теплопроводности в пограничных слоях определяли при средней температуре в пограничном полуслое (рисунок 2 штрих-пунктирные линии), толщину которых равны $\Delta x_p/2$ и $\Delta x_k/2$. Искомые температуры поверхности находили с помощью метода последовательных приближений.

Расчет нового распределения температур в узлах сеточной области определяли по формуле

$$t_{i,j+1} = t_{i,j} + \Delta t_i. \quad (31)$$

Расчет физико-химических процессов обезуглероживания футеровки

Расчет глубины обезуглероженного слоя проводили на основе закона квадратного корня, который отражает диффузионный механизм обезуглероживания. Принимали, что глубина этого слоя в зависимости от времени нагрева рассчитывается по соотношению

$$\delta_{oo} = k \sqrt{\tau_e}, \quad (32)$$

где k – константа скорости обезуглероживания, мм/мин^{0,5};

τ_e – время выдержки огнеупора при постоянной температуре, мин.

Для выражения (32) принимали, что константа скорости окисления подчиняется уравнению Аррениуса, которое имеет вид

$$k = A \exp\left(-\frac{B}{T}\right), \quad (33)$$

где A и B – эмпирические коэффициенты, зависящие от химического состава огнеупора, атмосферы и других факторов, мм/мин^{0,5} [7, 9 – 11], К;

T – температура слоя, К.

Поскольку интенсификация обезуглероживания начинается приблизительно при температуре 600 °С, его расчет начинали в момент времени τ_0 при достижении заданной температуры $t_{ок}$ на поверхности огнеупора.

Уравнения (32) и (33) предназначены для расчета толщины обезуглероженного слоя при постоянной температуре поверхности огнеупора. В связи с этим непрерывную траекторию изменения температуры поверхности $t = f(\tau)$ заменяли отрезками продолжительностью $\Delta\tau$, при этом принимали, что на участке $\Delta\tau$ температура поверхности огнеупора t постоянна и равна средней температуре t_i^{cp} поверхности в i -ом временном интервале. Таким образом, на каждом i -ом временном интервале рассчитывали прирост толщины обезуглероженного слоя $\delta_{об.i}$.

Суммируя прирост обезуглероженного слоя на каждом временном интервале, определяли общий обезуглероженный слой за весь период нагрева по следующему выражению:

$$\delta_{об} = \sum_{i=1}^n \Delta\delta_{об.i} . \quad (34)$$

Расчет теплового баланса

Тепловой баланс рассчитывали за текущий временной интервал (шаг по времени) и суммарный – за весь период разогрева [8]. Принимали, что проводится разогрев предварительно просушенной футеровки, соответственно потери тепла на нагрев и испарение влаги близки к нулю.

Приходные статьи определяли по соотношениям:

1) Химическое тепло топлива, кДж,

$$Q_m^x = 3600 \cdot B_m \cdot Q_n^p \cdot \Delta\tau, \quad (35)$$

где B_m – расход топлива, м³/ч;

$\Delta\tau$ – временной интервал, с.

2) Физическое тепло воздуха (рассчитывается при наличии на стенде подогрева окислителя, идущего на горение), кДж,

$$Q_{\epsilon}^{\phi} = 3600 \cdot B_m \cdot L_n \cdot c_{\epsilon} \cdot t_{\epsilon} \cdot \Delta\tau. \quad (36)$$

3) Физическое тепло газа (рассчитывается при наличии на стенде подогрева газа, идущего на горение), кДж,

$$Q_g^{\phi} = 3600 \cdot B_m \cdot c_g \cdot t_g \cdot \Delta\tau. \quad (37)$$

4) Химическое тепло обезуглероживания огнеупора, кДж,

$$Q_{об}^x = 339 \cdot (C_n - C_k) \cdot \rho_p \cdot V_{об}, \quad (38)$$

где C_n и C_k – начальное и конечное (остаточное) содержание углерода в обезуглероженном слое огнеупора, % (по массе);

ρ_p – плотность рабочего слоя огнеупора, кг/м³;

$V_{об}$ – объем обезуглероженного слоя футеровки, м³.

Объем обезуглероженного слоя футеровки ($V_{об}^c$ стен и днища $V_{об}^д$) определяли по соотношению

$$V_{об} = V_{об}^c + V_{об}^д = 2 \cdot \pi \cdot 0,5 \cdot (R_1 + R_2) \cdot \delta_{об} \cdot h + \pi \cdot R_2^2 \cdot \delta_{об}, \quad (39)$$

где R_1 и R_2 – радиусы футеровки в верхней части ковша и в области днища соответственно, м;

$\delta_{об}$ – глубина обезуглероженного слоя футеровки, м;

h – высота стен ковша, м.

Расходные статьи рассчитывали по соотношениям:

1) Тепло, аккумулируемое футеровкой $Q_{акк.ф}$, кДж определяли как сумму тепла, аккумулированного рабочим $Q_{акк.р}$, кДж арматурным $Q_{акк.а}$, кДж теплоизоляционным $Q_{акк.т}$, кДж слоями и кожухом $Q_{акк.к}$, кДж

$$Q_{акк.ф} = Q_{акк.р} + Q_{акк.а} + Q_{акк.т} + Q_{акк.к}, \quad (40)$$

$$Q_{акк.р} = m_p \cdot (t_{p,ср}^к \cdot c_p^к - t_{p,ср}^н \cdot c_p^н), \quad (41)$$

$$Q_{акк.а} = m_a \cdot (t_{a,ср}^к \cdot c_a^к - t_{a,ср}^н \cdot c_a^н), \quad (42)$$

$$Q_{акк.т} = m_m \cdot (t_{m,ср}^к \cdot c_m^к - t_{m,ср}^н \cdot c_m^н), \quad (43)$$

$$Q_{акк.к} = m_k \cdot (t_{к,ср}^к \cdot c_k^к - t_{к,ср}^н \cdot c_k^н), \quad (44)$$

где m_p, m_a, m_m, m_k – масса слоев футеровки, кг;

$t_{p,ср}^к, t_{a,ср}^к, t_{m,ср}^к, t_{к,ср}^к$ – средние конечные температуры слоев футеровки, °С;

$t_{p,ср}^н, t_{a,ср}^н, t_{m,ср}^н, t_{к,ср}^н$ – средние начальные температуры слоев футеровки, °С;

$c_p^к, c_a^к, c_m^к, c_k^к$ – теплоемкости слоев футеровки при соответствующей конечной средней температуре слоев, кДж/(кг · К);

$c_p^н, c_a^н, c_m^н, c_k^н$ – теплоемкости слоев футеровки при соответствующей начальной средней температуре слоев, кДж/(кг · К).

2) Потери тепла теплопроводностью через футеровку в окружающую среду, кДж

$$Q_m = 0,001 \cdot \alpha_c \cdot (t_k - t_{o,c}) \cdot F_k \cdot \Delta \tau, \quad (45)$$

где F_k – площадь теплоотдающей поверхности (крышки, дна и стенок кожуха ковша), м².

3) Потери тепла с уходящим дымом, кДж

$$Q_d = 3600 \cdot B_m \cdot V_d \cdot t_{yx} \cdot c_{yx} \cdot \Delta \tau, \quad (46)$$

где t_{yx} и c_{yx} – температура и теплоемкость уходящих из полости ковша продуктов сгорания, °С и кДж/(м³ · К).

4) Потери тепла в результате химического недожога, кДж,

$$Q_{хн} = 3600 \cdot k_n \cdot B_m \cdot Q_n^p \cdot \Delta \tau, \quad (47)$$

где k_n – коэффициент учитывающий химический недожег (для газообразного топлива обычно не более 0,01 – 0,03); если химический недожег отсутствует, то $k_n = 0$.

5) Потери тепла с водой (определяются в случае наличия водоохлаждаемых элементов, горелка и т.п.), кДж,

$$Q_{вод} = G_{вод} \cdot c_{вод} \cdot \Delta t_{вод} \cdot \Delta \tau, \quad (48)$$

где $G_{вод}$ – расход воды, м³/с;

$c_{вод}$ – теплоемкость воды, кДж/(м³ · К);

$\Delta t_{вод}$ – разность температур воды на входе и выходе из системы водяного охлаждения, °С.

6) Потери тепла излучением через технологические щели (зазор между крышкой стенда и ковшом), кДж, определяли по соотношениям представленным в работе [7, 8]

$$Q_{изл} = 0,001 \cdot \varepsilon_n \cdot C_0 \cdot \varphi \cdot \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{o.c}}{100} \right)^4 \right) \cdot F_n \cdot \Delta \tau, \quad (49)$$

где ε_n – коэффициент излучения проема;

φ – коэффициент диафрагмирования, зависящий от высоты и глубины проема [8];

F_n – площадь проема, м².

7) Неучтенные тепловые потери принимали равными 10 % от суммы статей, которые не зависят от расхода топлива, и определяли по соотношению:

$$Q_n = 0,1 \cdot (Q_{акк.ф} + Q_m + Q_{вод}). \quad (50)$$

Для нахождения расхода топлива сумму приходных статей приравнивали к сумме расходных статей

$$Q_m^x + Q_v^{\phi} + Q_c^{\phi} + Q_{об}^x = Q_{акк.ф} + Q_m + Q_d + Q_{хн} + Q_{вод} + Q_{изл} + Q_n. \quad (51)$$

Расход топлива, м³/ч определяли по выражению:

$$\begin{aligned} B_m = & [m_p \cdot (t_{p,cp}^k \cdot c_p^k - t_{p,cp}^h \cdot c_p^h) + m_a \cdot (t_{a,cp}^k \cdot c_a^k - t_{a,cp}^h \cdot c_a^h) + m_m \cdot (t_{m,cp}^k \cdot c_m^k - \\ & t_{m,cp}^h \cdot c_m^h) + m_k \cdot (t_{k,cp}^k \cdot c_k^k - t_{k,cp}^h \cdot c_k^h) + 0,001 \cdot \alpha_c \cdot (t_k - t_{o.c}) \cdot F_k \cdot \Delta \tau + G_{вод} \cdot \\ & c_{вод} \cdot \Delta t_{вод} \cdot \Delta \tau + 0,001 \cdot \varepsilon_n \cdot C_0 \cdot \varphi \cdot \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{o.c}}{100} \right)^4 \right) \cdot F_n \cdot \Delta \tau + 0,1 \cdot (m_p \cdot (t_{p,cp}^k \cdot \\ & c_p^k - t_{p,cp}^h \cdot c_p^h) + m_a \cdot (t_{a,cp}^k \cdot c_a^k - t_{a,cp}^h \cdot c_a^h) + m_m \cdot (t_{m,cp}^k \cdot c_m^k - t_{m,cp}^h \cdot c_m^h) + m_k \cdot \\ & (t_{k,cp}^k \cdot c_k^k - t_{k,cp}^h \cdot c_k^h) + 0,001 \cdot \alpha_c \cdot (t_k - t_{o.c}) \cdot F_k \cdot \Delta \tau + G_{вод} \cdot c_{вод} \cdot \Delta t_{вод} \cdot \Delta \tau + \\ & 0,001 \cdot \varepsilon_n \cdot C_0 \cdot \varphi \cdot \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{o.c}}{100} \right)^4 \right) \cdot F_n \cdot \Delta \tau - 339 \cdot (C_n - C_k) \cdot \rho_p \cdot V_{об}] / [3600 \\ & \cdot Q_n^p \cdot \Delta \tau + 3600 \cdot L_n \cdot c_b \cdot t_b \cdot \Delta \tau + 3600 \cdot c_r \cdot t_r \cdot \Delta \tau - 3600 \cdot \\ & V_d \cdot t_{yx} \cdot c_{yx} \cdot \Delta \tau - 3600 \cdot k_n \cdot Q_n^p \cdot \Delta \tau]. \end{aligned} \quad (52)$$

Долю каждой приходной и расходной статей определяли в процентах от суммы прихода и расхода тепла соответственно.

При транспортировании и разливке расплава на основе теплового баланса определяли изменение средней температуры жидкой стали и скорость ее охлаждения. Для этого использовали балансовое уравнение

$$m_{cm} \cdot c_{cm} \cdot (t_{cm}^h - t_{cm}^k) = Q_{акк.ф} + Q_m + Q_n, \quad (53)$$

где m_{cm} и c_{cm} – масса и теплоемкость расплава стали, кг и кДж/(кг · К);

t_{cm}^h и t_{cm}^k – средние по объему начальная и конечная температуры жидкой стали, °С.

Среднюю температуру жидкой стали после нахождения в ковше в течение временного интервала $\Delta \tau$ определяли по соотношению

$$t_{cm}^k = t_{cm}^h - (Q_{акк.ф} + Q_m + Q_n) / (m_{cm} \cdot c_{cm}), \quad (54)$$

а скорость охлаждения расплава v_p , °С/с рассчитывали по формуле:

$$v_p = (t_{cm}^h - t_{cm}^k) / \Delta \tau. \quad (55)$$

Результаты проверки адекватности и точности математической модели представлены в работе [6] погрешность расчета расхода топлива не превышает 1 – 11 %. Погрешности расчетов температур: поверхности рабочего слоя не превышает в среднем $\pm 5 - 25$ °С, на стыке рабочего и арматурного слоев достигает 30 – 50 °С, кожуха в конце нагрева составила всего 5 – 10 °С. Глубина обезуглероженного слоя огнеупоров рабочего слоя футеровки по результатам моделирования составила 10,2 мм, при промышленных экспериментах – 9 – 11 мм [9 – 11]. Принимая во внимание комплексность математической модели, возможность учета взаимосвязи факторов и процессов, имеющих различную физическую природу, а также ее область применения и назначение, модель признана достоверной, а ее точность – удовлетворительной для прогнозных и инженерных расчетов.

С использованием разработанной математической модели проведены исследования влияния различных факторов (подогрева и обогащения дутья кислородом, наличия теплоизолированных крышек, геометрических размеров и емкости ковша) на тепловую эффективность стенов разогрева футеровок сталеразливочных ковшей [12 – 14], которые нашли практическое применение при совершенствовании температурных, тепловых режимов разогрева и конструкции стенов.

Библиографический список

1. Стариков В.С. Огнеупоры и футеровки в ковшевой металлургии / В.С. Стариков, М.В. Темлянец, В.В. Стариков. – М.: МИСиС, 2003. – 327 с.
2. Пфайфер Х. Тепловая модель нагрева сталеразливочных ковшей / Х. Пфайфер, Ф. Фетт, Х. Шеффер [и др.] // Черные металлы. – 1985. – № 14. – С. 3 – 8.
3. Шкляр Ф.Р. Математическая модель тепловой работы сталеразливочного ковша / Ф.Р. Шкляр, В.М. Малкин, В.А. Коршунов [и др.] // Изв. вузов Черная металлургия. – 1991. – № 2. – С. 91 – 93.
4. Стариков В.С. Моделирование тепловой работы футеровки металлургических ковшей / В.С. Стариков, М.В. Темлянец, Е.Н. Темлянцева [и др.] // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2002. – № 10. – С. 55, 56.
5. Заболотский А.В. Модель разогрева футеровки сталеразливочного ковша / А.В. Заболотский // Новые огнеупоры. – 2010. – № 8. – С. 32 – 34.
6. Матвеев М.В. Разработка математической модели тепловой работы стенов разогрева футеровок сталеразливочных ковшей / М.В. Матвеев, М.В. Темлянец, Е.М. Запольская, К.Е. Костюченко // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. – 2013. – № 31. – С. 31 – 44.
7. Перетягко В.Н. Нагрев стальных слывов / В.Н. Перетягко, Н.В. Темлянец, М.В. Темлянец, Ю.Е. Михайленко. – М. : Теплотехник, 2008. – 192 с.
8. Темлянец М.В. Огнеупоры и футеровки плавильных и литейных агрегатов алюминиевого производства / М.В. Темлянец, Е.Н. Темлянцева. – М.: Теплотехник, 2008. – 183 с.
9. Обезуглероживание периклазоуглеродистых огнеупоров при тепловой обработке футеровок сталеразливочных ковшей / М.В. Темлянец, М.В. Матвеев // Металлург. – 2010. – № 8. – С. 60 – 62.
10. Темлянец М.В. Исследование влияния различных факторов на обезуглероживание периклазоуглеродистых ковшовых огнеупоров / М.В. Темлянец, М.В. Матвеев, Е.Н. Темлянцева // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2011. – № 10. – С. 32 – 36.
11. Протопопов Е.В. Исследование высокотемпературного обезуглероживания алюмопериклазоуглеродистых ковшовых огнеупоров / Е.В. Протопопов, М.В. Темлянец, Е.М. Запольская, К.Е. Максакова, В.А. Дегтярь / Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2014. – Т. 57. – № 12. – С. 24 – 28.
12. Запольская Е.М. Анализ основных направлений повышения энерготехнологической эффективности стенов высокотемпературного разогрева футеровок сталеразливочных ковшей / Е.М. Запольская, М.В. Темлянец, К.Е. Костюченко // Вестник Россий-

ской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение. – 2013. – № 15. – С. 128 – 134.

13. Запольская Е.М. Влияние геометрических размеров и емкости сталеразливочных ковшей на тепловую эффективность стенов высокотемпературного разогрева / Е.М. Запольская, М.В. Темлянец, К.Е. Костюченко // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2013. – № 2 (4). – С. 28 – 32.

14. Запольская Е.М. Исследование эффективности использования кислорода при отоплении стенов высокотемпературного разогрева футеровок сталеразливочных ковшей / Е.М. Запольская, М.В. Темлянец, К.Е. Костюченко, М.В. Матвеев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2013. – № 6. – С. 3 – 7.

УДК 669.162.263

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЛОЕВЫХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ И АГРЕГАТОВ*

Швыдкий В.С., Спирин Н.А., Матюхин В.И., Лавров В.В., Фатхутдинов А.Р.

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
г. Екатеринбург, Россия, vshvit@isnet.ru

Аннотация. Рассмотрены основные подходы к математическому моделированию слоевых металлургических печей и агрегатов. Отмечено, что особую важность имеют знания механизмов и физической сущности процессов движения столба шихтовых материалов и газового потока в движущемся слое, а также закономерностей развития процессов тепло- и массообмена в них. Представлены постановка и математическое описание решения задачи потенциального течения газа в слоевой установке произвольного профиля. На основе предложенной математической модели выполнена программная реализация информационно-моделирующей системы газодинамики доменного процесса. Отражены результаты компьютерного моделирования неизоэнтальпийской задачи газодинамики доменной печи с учетом зоны когезии, газодинамики фурменного очага и расчета доменных воздухонагревателей.

Ключевые слова: слоевой процесс, теплообмен, плавление, безвихревое течение, математическое моделирование, доменная печь.

Abstract. The basic approaches to mathematical modeling of the layered steel furnaces and assemblies. It is noted that the particular importance have knowledge of the mechanisms and processes of the physical nature of the column of charge materials and movement of the gas flow in the moving bed, as well as patterns of development of heat and mass transfer in them. Presented statement and mathematical description of the solution of the problem of potential flow of gas in the layer setting an arbitrary profile. On the basis of the proposal by the mathematical model made software implementation of information-modeling system of gas dynamics blast furnace process. Reflects the results of computer modeling of non-isothermal gas dynamics problem of blast furnace based on the cohesion area, the gas dynamics of the blast chamber and calculating blast stoves.

Keywords: layered process, heat, melting, bezvikhrevoe for a mathematical description, mathematical modeling, blast furnace.

Одной из главных проблем развития теории слоевых металлургических процессов является обеспечение максимального использования объема агрегатов, теплового и восстановительного потенциалов газов и, в конечном счёте, достижение максимальной производительности печей и минимального расхода топлива.

С точки зрения этой проблемы исключительно большое значение имеет математическое описание физико-механических, тепловых и химических процессов, протекающих в слоевых металлургических печах и агрегатах, создание математических моделей агрегатов различного назначения.

* Работа выполнена при финансовой поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.А03.21.0006.

The work was supported by Act 211 Government of the Russian Federation, contract № 02.А03.21.0006

Напомним, что под математической моделью объекта обычно понимают некоторое упрощенное изображение процессов в агрегате, которое сохраняет наиболее существенные свойства реального объекта и передаёт их в математической форме. В этом смысле можно говорить о гомоморфизме объекта (агрегата или его составных частей) в его модель. В зависимости от поставленной задачи математическая модель учитывает разное число свойств и признаков объекта, и поэтому может быть широкой или узкой. Широкая модель полнее и точнее узкой отражает свойства объекта, однако и она, как уже отмечалось выше, является лишь идеализированным отображением реального объекта. В некоторой области эти модели гомоморфны, т.е. могут давать близкие или совпадающие результаты.

Математическая модель слоевой металлургической печи или агрегата должна быть, с одной стороны, достаточно простой, чтобы наглядно и отчётливо передавать все качественные стороны интересующего нас явления (только в этом случае можно, очевидно, сохранить «физический контроль» над используемой моделью), а с другой – достаточно точно передавать количественные закономерности протекания процесса. Указанные требования находятся в противоречии, так как без обстоятельного изучения свойств системы неясно, какие факторы существенны. Единственный рациональный компромисс может быть найден лишь на пути иерархического подхода, подсказываемого самой природой слоевого агрегата.

Слоевые металлургические печи и агрегаты, будучи сложными объектами, имеют многоступенчатую структуру, и их математические модели следует строить последовательно на основе предварительного построения моделей их составных частей. Исследование сложного процесса по частям даёт возможность перехода к модели более высокого уровня, включая в неё как составную часть узкую модель более низкого уровня. Однако этот переход будет корректным, если только выполнен ряд условий, а именно:

- известна вся интересующая нас область изменения зависимых и независимых переменных, входящих в более широкую модель моделей более низкого уровня (включая краевые условия);

- проанализирована узкая модель во всей этой области;

- показано, что узкая модель удовлетворительно описывает процесс на более низком уровне.

Указанный путь построения математических моделей слоевого агрегата по уровням предполагает, что при построении модели данного уровня глубоко изучены и экспериментально подтверждены все существенные физические и химические закономерности, определяющие свойства этого уровня. В таком случае закономерности приобретают предсказательную силу физических законов, они инвариантны в пространстве и автономны во времени. Отсюда следует принцип инвариантности составных частей модели к геометрическим размерам системы и автономности этих частей во времени [1]. Сформулировать его можно следующим образом: *Закономерности протекания процессов в составных частях данного уровня модели, а также закономерности взаимодействия между этими частями выражаются в форме, не зависящей от масштаба рассматриваемого уровня и момента времени*. Заметим, что в этом определении речь идёт об инвариантности и автономности именно закономерностей процессов на низшем уровне к процессам на высшем уровне, а не об инвариантности и автономности количественных зависимостей.

Для корректного перехода с низшего уровня на высший инвариантными относительно масштаба и автономными во времени должны оставаться не только закономерности, но и параметры, входящие в математическое описание составных частей высшего уровня и в граничные условия. Именно независимость закономерностей и параметров от масштаба уровня и времени свидетельствует об их объективности и позволяет предсказать протекание процесса в агрегатах практически любого типа и размера, поскольку ука-

занные параметры определяют значение чисел подобия процессов в агрегатах различного масштаба.

Последовательное построение математической модели от низшего уровня к высшему на основе принципов инвариантности и автономности составных частей модели открывает возможность независимого экспериментального определения неизвестных параметров этой модели в условиях, когда, во-первых, наблюдается большая чувствительность процесса к этим параметрам (и поэтому обеспечивается высокая точность экспериментов), и, во-вторых, практически исключено влияние на процесс большей части других факторов. Построение математической модели на основе указанных принципов не исключает, а наоборот предполагает математическую процедуру укрупнения, «сжатия» информации о какой-либо части уровня, представляя её в компактном, удобном для последующего анализа виде. В этом виде математическая модель может утратить физическую наглядность, могут появиться и появляются «следы эмпиризма», а коэффициенты становятся «эффективными».

Таким образом, разбиению сложного процесса в слоевой металлургической печи или агрегате на составные части должно предшествовать тщательное изучение сущности физических и химических явлений, что, в итоге, в дальнейшем приводит к работе исследователя не столько с математическими выражениями, сколько с независимыми от масштаба и времени физическими представлениями. От уровня развития этих представлений во многом зависит надёжность математических моделей и достоверность полученных на их основе результатов. В применении к слоевым металлургическим печам и агрегатам особую важность имеют знания механизмов и физической сущности процессов движения столба шихтовых материалов и газового потока в движущемся слое, а также закономерностей развития процессов тепло- и массообмена в них.

Подробный обзор современного состояния теории теплофизических процессов в металлургических агрегатах с плотным слоем с обширной библиографией представлен в монографиях [2–4]. Поэтому сформулируем здесь лишь основные выводы, следующие из указанного обзора и в значительной степени определяющие содержание данной статьи:

1) несмотря на обилие экспериментальных данных и наличие физически обоснованного механизма истечения сыпучих сред через отверстие, до настоящего времени отсутствует достаточно логичная и надёжная математическая модель, описывающая движение материала в шахтных печах;

2) экспериментальные исследования газомеханики слоя продолжают интенсивно развиваться. Предложены новые методы измерения скоростей и давлений газа в слое, позволившие перейти к изучению процессов движения газов в реальных печах, а многочисленные эксперименты, проведённые на печах и моделях, дали возможность уточнить зависимость перепада давления от скорости газа и выявить влияние различных параметров шахтных печей на газораспределение в них, а также предложить различные методы управления газовым потоком. Вместе с тем, экспериментальным методам присущи известные недостатки (большая трудоёмкость, сложность условий, существующих в шахтных печах и затрудняющих проведение исследований, трудности создания достаточно большого разнообразия физических моделей печей и т.д.), которые заставляют обращаться к расчётно-теоретическим исследованиям газомеханики слоя;

3) в настоящее время расчётно-теоретические исследования движения газов в слое вообще и в шахтных печах в частности весьма интенсивно развиваются; сейчас известно уже несколько металлургических центров в мире, которые занимаются математическим описанием газомеханики слоя кусковых материалов. Наибольшей полнотой характеризуется модель движения газов в слое, предложенная работниками кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» УрФУ (см. приведённые выше источники);

4) теория теплообмена в слое достигла огромных успехов. Можно констатировать [2–4, 5], что к настоящему времени одномерная задача теплообмена в слое практически исчерпала себя. В то же время следует учитывать, что в реальных слоевых металлургиче-

ских печах и агрегатах движение газов, как правило, многомерно, причём неравномерность распределения скоростей газа в объёме слоя и по поперечному сечению агрегатов весьма существенна.

Проблема разработки комплексных математических моделей слоевых металлургических печей и агрегатов состоит в том, чтобы получить уравнения течения газа в движущемся слое, связывающие среднюю скорость в межкусковом пространстве (*истинную* скорость), его действительное давление и температуру, так как именно от этих величин зависит интенсивность протекания физико-химических превращений. При этом должны выполняться законы сохранения массы, количества движения и энергии. По-видимому, решение этой проблемы должно быть основано на достижениях современной теории сплошной среды [6] с использованием параллели между течением газа в слое и движением гипотетической жидкости, занимающей весь объём аппарата, включая и объём кусковых материалов. Последовательное удовлетворение требования равенства динамических свойств этой жидкости локальным усреднённым параметрам действительной неоднородной среды (совокупность кусковых материалов и газов) позволяет свести сложную проблему движения газов в слое переменной структуры к относительно простой задаче движения однородной жидкости, преодолевающей, однако, некоторое добавочное сопротивление.

Усреднённые уравнения неразрывности, движения и энергии газа в слое

Подробный вывод всех уравнений газомеханики слоя приведён в работах [2–4], поэтому здесь ограничимся лишь иллюстрацией реализации аналогии течения газа в реальном слое и гипотетической однородной жидкости на примере уравнения неразрывности. Остальные уравнения приведём без вывода.

Итак, пусть шахтная печь произвольного профиля заполнена кусковым материалом с порозностью ε и просветностью ε_n . В общем случае ε и ε_n являются функциями формы загруженных кусков и координат. Снизу в слой через фурмы или иным образом вдувается газ. Теплофизические свойства среды являются функциями давления, температуры и координат. Газ отдаёт теплоту материалу, может вступать с ним в химическое взаимодействие. Требуется найти распределение скоростей, давлений, температур и концентраций компонентов газа по высоте и сечению печи.

Выделим в слое элементарный объём V (м^3). Газ в этом объёме занимает V' (м^3). Если его плотность ρ (кг/м^3), то масса газа в выделенном объёме составит $\rho V'$ (кг).

Рассмотрим баланс массы в элементе объёма V . Изменение массы газа в этом объёме равно

$$\frac{d}{d\tau} \int_{V'} \rho dV' = \int_V \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\rho \frac{dV'}{dV} \right) dV = \int_V \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho \varepsilon) dV, \quad (1)$$

где ε — средняя порозность слоя в объёме V :

$$\varepsilon = \frac{dV'}{dV} = \frac{1}{dV} \int_V \varepsilon_n dV, \quad (2)$$

где ε_n — локальное (местное) значение порозности.

Изменение массы равно её потоку через замкнутую поверхность S' (контур) объёма V' , причём полный поток массы в этом случае составляет

$$\oint_{S'} (\rho \vec{v}) d\vec{S}' = \oint_S (\rho \vec{v}) \left(\frac{dS'}{dS} \right) d\vec{S} = \oint_S (\rho \varepsilon_n \vec{v}) d\vec{S} = \oint_S (\rho \varepsilon_n \vec{v}) \cdot \vec{n} dS. \quad (3)$$

Здесь ε_n – средняя просветность слоя в объёме V , а $\mathbf{n}$ – нормаль к поверхности контура S' .

Учитывая действие внутренних источников (стоков) массы мощностью q_V (образование массы вследствие физико-химических превращений), после преобразования поверхностного интеграла в объёмный по формуле Остроградского – Гаусса [7–9] получаем

$$\int_V \left[\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \varepsilon_n \vec{v}) - q_V \right] dV = 0, \quad (4)$$

откуда из-за произвольности объёма V находим

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \varepsilon_n \vec{v}) = q_V. \quad (5)$$

Сопоставляя выражение (5) с уравнением неразрывности гипотетического сплошного потока [10 ÷ 12]

$$\frac{\partial \rho_*}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho_* \vec{v}_*) = q_V, \quad (6)$$

находим, что соотношения (5) и (6) становятся эквивалентными, если выполняются равенства

$$\rho_* = \varepsilon \rho; \quad \mathbf{v}_* = (\varepsilon_n / \varepsilon) \mathbf{v} \quad (7)$$

Таким образом, как показано в [13, 14], физический смысл содержания равенств (7) заключается в следующем. Для описания процессов, протекающих в слое, возможно использование уравнений, полученных для сплошной среды, если известны эффективные значения её теплофизических параметров. Совершенно очевидно, что эти значения не равны значениям параметров реального газа. Следует также подчеркнуть то обстоятельство, что любая математическая модель движения газа в слое описывает закономерности изменения среднестатистических характеристик поля течения.

При выводе уравнений движения обычно принимают в качестве постулата принцип напряжений Коши [5, 6, 10], утверждающий, что для любой замкнутой поверхности Ω существует распределение вектора напряжений $\mathbf{t}$ с результирующей и моментом, эквивалентными полю сил, действующую на сплошную среду, заключённую внутри Ω , со стороны среды, расположенной вне этой поверхности. Предполагается, что в данный момент времени вектор $\mathbf{t}$ зависит только от положения и ориентации элемента поверхности dS , т.е. если обозначить через $\mathbf{n}$ внешнюю нормаль к поверхности Ω , то $\mathbf{t} = \mathbf{t}(\mathbf{x}, \tau, \mathbf{n})$.

Напомним теперь основной принцип динамики движения жидкости, называемый принципом сохранения количества движения [5, 6, 10]: скорость изменения количества движения жидкости, заключённой в движущемся объёме Σ , равна результирующей сил, действующих на эту жидкость.

Аналитическим выражением этого принципа является уравнение

$$\frac{d}{d\tau} \int_{\Sigma} \rho_* \vec{v}_* dV = \int_{\Sigma} \rho_* \vec{f} dV + \int_{\Omega} \vec{t}_* dS, \quad (8)$$

где $\mathbf{f}$ – поле внешних сил, отнесённое к единице массы.

Выполняя усреднение этого уравнения по объёму V , как мы это делали для уравнения баланса массы (детали см. в [4]), приходим к промежуточной форме уравнений движения

$$\varepsilon \rho \frac{d}{d\tau} (\varepsilon_n \bar{\mathbf{v}} / \varepsilon) = \varepsilon \rho \bar{\mathbf{g}} - \text{grad}(\varepsilon_n p) - \frac{2}{3} \text{grad}[\varepsilon_n \mu \text{div}(\varepsilon_n \bar{\mathbf{v}} / \varepsilon)] + 2 \cdot \text{div}(\varepsilon_n \mu \mathbf{D}) + \mathbf{R}. \quad (9)$$

Здесь p – давление газа, μ – коэффициент динамической вязкости газа, $\mathbf{R}$ – дополнительное сопротивление, возникающее при переходе от реального газа к однородной жидкости, и $\mathbf{D}$ – тензор скорости деформации с компонентами

$$D_{ij} = 0.5(\partial v_i / \partial x_j + \partial v_j / \partial x_i), \quad (10)$$

где $i, j = 1, 2, 3$; $x_1 = x$, $x_2 = y$, $x_3 = z$; $v_1 = u$, $v_2 = v$, $v_3 = w$. Отметим, что в уравнении (9) $d/d\tau$ характеризует, так называемую, *полную* или *субстанциональную* производную, т.е. $d/d\tau = \partial/\partial\tau + u(\partial/\partial x) + v(\partial/\partial y) + w(\partial/\partial z)$.

Последнее слагаемое правой части (9), представляющее собой дополнительное сопротивление движению газа через слой, при современном уровне развития знаний невозможно выразить в квадратурах. Единственным способом определения значения $\mathbf{R}$ является эксперимент. Ясно, однако, что сопротивление $\mathbf{R}$ должно быть однозначной функцией порозности слоя, т.е. $\mathbf{R} = \mathbf{R}(1 - \varepsilon)$, так как в отсутствии твёрдых частиц ($\varepsilon = 1$) величина $\mathbf{R} \equiv 0$. В литературе [2–4, 15–17] обсуждаются различные аппроксимации результатов экспериментального определения $\mathbf{R}$. В работе [4] утверждается, что наиболее достоверной зависимостью для условий работы шахтных металлургических печей является следующая:

$$\begin{aligned} \mathbf{R} = & -2 \text{div}(\varepsilon_n \mu \mathbf{D}) + (2/3) \text{grad}[\varepsilon_n \mu \text{div}(\varepsilon_n \mathbf{v} / \varepsilon)] - 150 \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon d_k \Phi} \right)^2 \mu \frac{\varepsilon_n^2}{\varepsilon} \mathbf{v} - \\ & - 1,75 \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon d_k \Phi} \right) \rho \frac{\varepsilon_n^2}{\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon} |\mathbf{v}| \right) \mathbf{v} / \end{aligned} \quad (11)$$

Последние два слагаемые соотношения (11) для $\mathbf{R}$ определяют, так называемый, закон сопротивления С. Эргана.

С использованием (11) уравнения движения (9) упрощаются и принимают вид

$$\varepsilon \rho \frac{d}{d\tau} \left(\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon} \mathbf{v} \right) = \varepsilon \rho \bar{\mathbf{g}} - \text{grad}(\varepsilon_n p) - \left[150 \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon d_k \Phi} \right) \mu + 1,75 \rho \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon} |\mathbf{v}| \right] \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon d_k \Phi} \frac{\varepsilon_n^2}{\varepsilon} \mathbf{v}. \quad (12)$$

Вместо соотношения С. Эргана можно применять любую экспериментальную зависимость [2–4, 15–17].

Уравнение энергии выводится аналогичным изложенному в [4] способом. При этом необходимо дополнительно учесть два обстоятельства. Во-первых, перенос теплоты теплопроводностью осуществляется не только в газе, но и от газа к поверхности частиц материала. Поскольку для оценки последней составляющей теплопереноса нужны данные по выявлению закономерностей развития теплового и динамического пограничных слоёв, то целесообразно заменить это слагаемое законом Ньютона для теплоотдачи конвекцией. Во-вторых, наличие дополнительной силы сопротивления в уравнениях движения приводит к появлению в уравнении энергии слагаемого, характеризующего переход механиче-

ской энергии в тепловую. Опуская промежуточные выкладки (детали см. в [2–4]), запишем окончательный результат

$$\varphi C_v \frac{dT}{d\tau} = \varphi q_R + \text{div}(\varepsilon_n \lambda \text{grad} T) - \alpha_v (T - t) - \varepsilon_n p \text{div}(\varepsilon_n \mathbf{v} / \varepsilon) - (2/3) \varepsilon_n \mu [\text{div}(\varepsilon_n \mathbf{v} / \varepsilon)]^2 + 2 \varepsilon_n \mu \sum_{i,j} D_{i,j}^2 + q_e', \quad (13)$$

где C_v – теплоёмкость газа (кДж/(кг·К));
 λ – коэффициент теплопроводности газа (Вт/(м·К));
 α_v – объёмный коэффициент теплообмена (Вт/(м³·К));
 q_R – скорость притока теплоты за счёт излучения (Вт/кг),
 q_e' – источник (сток) теплоты, действующий в газе (Вт/м³).

Это слагаемое, как уже отмечалось, включает также диссипацию механической энергии, происходящую на поверхности частиц материала.

Первые три слагаемых правой части уравнения (13) характеризуют три вида теплопередачи: излучение, теплопроводность и конвекцию. Для условий работы металлургических шахтных печей теплопроводностью газов можно пренебречь [2]. Обычно теплопроводность газа принимают равной нулю в направлении его движения и бесконечности – поперёк потока. Поскольку эффективная длина луча в межкусковом пространстве незначительна, а ослабляющая способность запылённых потоков газа велика, можно не учитывать также и лучистый перенос. Данное допущение тем более обосновано, что коэффициент теплообмена α_v определяют, как правило, экспериментально. По этой причине трудно поддающаяся расчёту лучистая составляющая оказывается включённой в α_v через зависимость последнего от температуры. Тем не менее, необходимо отметить, что данное упрощение не приводит к заметным ошибкам лишь для областей слоя, в которых температура теплоносителей не превышает 500 °С [9].

Последующие три слагаемых правой части уравнения (13) описывают работу сил давления и диссипацию механической энергии (газодинамический нагрев). Указанные величины становятся соизмеримыми с конвективным теплопереносом лишь при до- и сверхзвуковых скоростях газа. В шахтных металлургических печах таких скоростей нет, значит без ущерба для точности расчётов этими слагаемыми можно пренебречь.

Таким образом, для условий тепловой и газодинамической работы шахтных металлургических печей уравнение энергии трансформируется уравнение теплообмена

$$\varphi C_v \frac{dT}{d\tau} = (\varphi q_R) - \alpha_v (T - t) + q_e, \quad (14)$$

где q_e – источники (стоки) теплоты, обусловленные физико-химическими реакциями, протекающими в газе.

Первое слагаемое правой части проставлено в скобках, чтобы подчеркнуть необходимость использования численных методов решения при учете теплообмена излучением.

Для замыкания системы необходимо добавить уравнения:

– состояния газа

$$\rho = f(T, p); \quad (15)$$

– нагрева кусков материала

$$(1 - \varepsilon) \rho_m C_m \frac{dT}{d\tau} = \alpha_v (T - t) + q_m; \quad (16)$$

– закономерности изменения вязкости и теплопроводности газа

$$\mu = \mu(T, p); \lambda = \lambda(T, p), \quad (17)$$

– а также массообмена

$$\frac{dC}{d\tau} = -K_{\Sigma} f[C(1+K) - K \cdot \Sigma] \quad (18)$$

и

$$\frac{d\varphi}{d\tau} = n \frac{dC}{d\tau}. \quad (19)$$

В этих выражениях ρ_m – плотность материала (кг/м³), C_m – удельная теплоёмкость материала (кДж/(кг·К)), q_m – источники (стоки) теплоты, действующие в материале (Вт/м³); C – концентрация восстановителя в газе (м³/м³), $\bar{K}$ – константа равновесия, K_{Σ} – эффективная константа скорости реакции (м/с), f – величина реакционной поверхности (м²/м³), Σ – равновесная концентрация, φ – степень восстановления оксидов (доли ед.), n – отношение массоемкости потока газа W_g^* к массоемкости потока материала W_m^* .

В силу существенной нелинейности уравнений (5), (12), (14)–(19) их совместное решение может быть выполнено только численно. По этой причине для получения достаточно надёжного результата целесообразно использовать итерационный метод. Сначала для произвольно заданного начального температурного поля, решается задача газомеханики слоя, затем – уравнения теплообмена и массообмена. Итерации ведутся до обеспечения заданной точности расчёта полей температур в слое. Очевидно, в практическом плане более эффективно применять не уравнения движения (12), а более удобные упрощённые выражения, учитывающие особенности движения газа в слое для данного агрегата.

Возможные упрощения модели газомеханики движущегося слоя

Потенциальное течение. Одним из возможных упрощений модели является предположение о потенциальном (безвихревом) характере течения газа. Математическим условием отсутствия завихренности является соотношение $\text{rot } \mathbf{v} = 0$. Из теории поля [7, 8] известно, что если это условие выполняется, то существует такая скалярная функция $\varphi(\mathbf{x})$, называемая *потенциальной функцией*, градиент которой равен скорости $\mathbf{v}$, т.е.

$$\mathbf{v} = \text{grad } \varphi. \quad (20)$$

Знак «минус» означает, что поток движется от большего потенциала к меньшему. Подставив выражение (30) в уравнение (5) получим уравнение для отыскания потенциальной функции φ :

$$\text{div}(\varepsilon_n \rho \text{ grad } \varphi) = 0. \quad (21)$$

Компоненты скорости газа рассчитывают по известному полю φ при помощи соотношения (20). Зная значения скоростей, можно определить на основе уравнений движения давления газа. Для безвихревых течений уравнение (12) примет вид:

$$-\text{grad}(\varepsilon_n p) = \rho \varepsilon_n \text{ grad}(q^2/2) - \rho \varepsilon \mathbf{v} [\mathbf{v} \text{ grad}(\varepsilon_n/\varepsilon)] + (A_1 + A_2 q) \mathbf{v} - \rho \varepsilon \mathbf{g}. \quad (22)$$

Здесь

$$A_1 = 150.0 \left[\frac{(1-\varepsilon)\varepsilon_n}{\varepsilon d_3 \Phi} \right]^2 \frac{1}{\varepsilon} \mu; \quad A_2 = 1,75 \frac{(1-\varepsilon)\varepsilon_n^2}{\varepsilon^2 d_3 \Phi} \rho; \quad q = |\mathbf{v}|.$$

Сложность расчётов по уравнениям (20)–(22) заключается в том, что для вычисления потенциала φ требуется знание плотности ρ , которая зависит от давления, просветности и порозности слоя. Давление же газа можно определить по полям скорости $\mathbf{v}$ и плотности ρ . Естественным выходом из положения является использование итераций.

В случае плоского или осесимметричного (двумерного) течения удобно использовать функцию тока ψ , вводимую соотношениями:

$$\rho \varepsilon_n u = \partial \psi / \partial y; \quad \rho \varepsilon_n v = - \partial \psi / \partial x \quad (23)$$

и представляющую собой массовый расход газа.

При введении этой функции уравнение неразрывности тождественно удовлетворяется, а условие отсутствия завихренности $\partial u / \partial y - \partial v / \partial x = 0$ приводит к уравнению для определения ψ

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\rho \varepsilon_n} \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\rho \varepsilon_n} \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) = 0. \quad (24)$$

Граничные условия уравнений (21), (22) и (24) определяются профилем агрегата и геометрией устройств ввода и вывода газа.

Иллюстрация использования вышеприведённых уравнений безвихревого течения, сопоставление результатов их решения с данными, полученными на основе имеющихся в литературе математических моделей газомеханики слоя, а также проверка адекватности математической модели потенциального движения реальной картине течения газа освещены в работах [2–4, 14–17] и в работах, приведённых в обширной библиографии [3].

Показано, что математическая модель потенциального течения газа в слое может быть эффективно использована при выборе оптимальных с точки зрения равномерности газораспределения параметров геометрии фурменного устройства и шахтной печи (профили печи). Что же касается абсолютных значений скоростей и давлений, точное значение которых необходимо для расчёта процессов тепло- и массообмена, протекающих в слоевых металлургических печах и агрегатах, то погрешность их определения, характерная для потенциальной модели, должна быть специально установлена путём сопоставления решений задач вихревого и потенциального движений.

Вихревые течения. Принципиально расчёт вихревых течений возможен на основе уравнений (5) и (12) если ввести векторный потенциал скорости $\boldsymbol{\psi}$ соотношением $\rho \varepsilon_n \mathbf{v} = \text{rot} \boldsymbol{\psi}$ (детали использования такого подхода см. на стр. 18–19 работы [3]). Практика расчётов показывает, однако, что данный способ малоэффективен, поскольку численные схемы конечных разностей сходятся очень медленно. Поэтому целесообразно так преобразовать уравнения (5) и (12), чтобы они непосредственно включали завихренность потока $\boldsymbol{\omega} = \text{rot} \mathbf{v}$.

При изучении движения газов через слой кусковых материалов приходится иметь дело с двумя типами проявления вихревой природы потока:

– *микровихренность*, т.е. с вихрями, масштаб которых соизмерим со средними размерами межкускового пространства (порядка диаметра частиц слоя); появление этих вихрей всецело обусловлено трением газа о поверхность частиц;

– *макротовихренность*, т.е. с вихрями, масштаб которых соизмерим с рабочим объёмом печи; эти вихри обусловлены геометрией рабочего пространства агрегата (профилем печи), наличием фурменных очагов (зон циркуляции) и т.п.

Прежде всего отметим, что согласно теореме Лагранжа [10] вихри не могут образоваться внутри области движения: они либо вносятся в неё, либо формируются на её границах. Образование вихрей на границе области течения обусловлено явлением прилипания, т.е. наличием касательных напряжений. С другой стороны, задание условия прилипания в качестве граничного при решении уравнений движения возможно лишь в том случае, когда последнее имеет второй порядок, в то время как уравнение (12) является дифференциальным уравнением 1-го порядка.

Таким образом, внесение вихрей в область движения обусловлено вихревым характером течения газа через фурмы. При поступлении газа в развитую зону циркуляции завихренность потока может усиливаться. Однако, если газ из фурмы истекает в плотный слой, то первоначальные вихри, вероятно, быстро гасятся.

Вместе с тем это положение требует специального рассмотрения, поскольку в данном случае интерес вызывает, в основном, принципиальный вопрос возможности при анализе газораспределения пренебречь вихревым характером газового потока. В этом случае целесообразно упростить уравнения движения газа в слое (5) и (12) до модели двумерного движения несжимаемого газа в слое постоянной порозности. Заметим, кстати, что данные упрощения (несжимаемый газ и слой постоянной порозности) не принципиальны, так как при итерационном методе решения определяющих уравнений не представляет затруднений учёт изменения этих характеристик.

Для возможности обобщения результатов введём безразмерные координаты

$$\tilde{x} = x/R, \quad \tilde{z} = z/R \quad (25)$$

и скорости

$$\tilde{v}_x = v_x/v_0; \quad \tilde{v}_z = v_z/v_0, \quad (26)$$

где R – радиус печи;

$v_0 = Q_v/R$ – средняя расходная скорость (скорость на пустую шахту);

Q_v – расход дутья.

Здесь мы координату по высоте печи обозначили через z , чтобы в дальнейшем иметь возможность перехода к трёхмерным задачам. Учитывая, что для двумерной задачи завихренность потока $\omega = \text{rot } \mathbf{v}$ представляет собой скаляр $\tilde{\omega} = \partial \tilde{v}_x / \partial \tilde{z} - \partial \tilde{v}_z / \partial \tilde{x}$, из (5) получаем первое уравнение модели:

$$\frac{\partial^2 \tilde{\psi}}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2 \tilde{\psi}}{\partial \tilde{z}^2} = \tilde{\omega}, \quad (27)$$

где $\tilde{\omega} = \omega R/v_0 = \omega R^2/Q_v$.

Уравнение (27) содержит две неизвестные функции, следовательно, для решения задачи необходимо ещё одно соотношение, а именно уравнение движения (12), которое после несложных преобразований можно записать в форме уравнения Громека – Лэмба [10], дополненной силами сопротивления

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \tilde{x}} \left(\tilde{\omega} \frac{\partial \tilde{\psi}}{\partial \tilde{z}} \right) - \frac{\partial}{\partial \tilde{z}} \left(\tilde{\omega} \frac{\partial \tilde{\psi}}{\partial \tilde{x}} \right) + M(\tilde{q}) \tilde{\omega} = \\ & = -1,75 \left(\frac{\partial \tilde{\psi}}{\partial \tilde{x}} \cdot \frac{\partial \tilde{q}}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial \tilde{\psi}}{\partial \tilde{z}} \cdot \frac{\partial \tilde{q}}{\partial \tilde{z}} \right), \end{aligned} \quad (28)$$

где $M(q) = A_1 + A_2 q$.

Система дифференциальных уравнений (27), (28) описывает вихревое движение газа в слоевой установке любого профиля. Поэтому конкретизируем задачу и выберем профиль печи, представленный на рисунок 1 (типичный двумерный профиль шахтной печи).

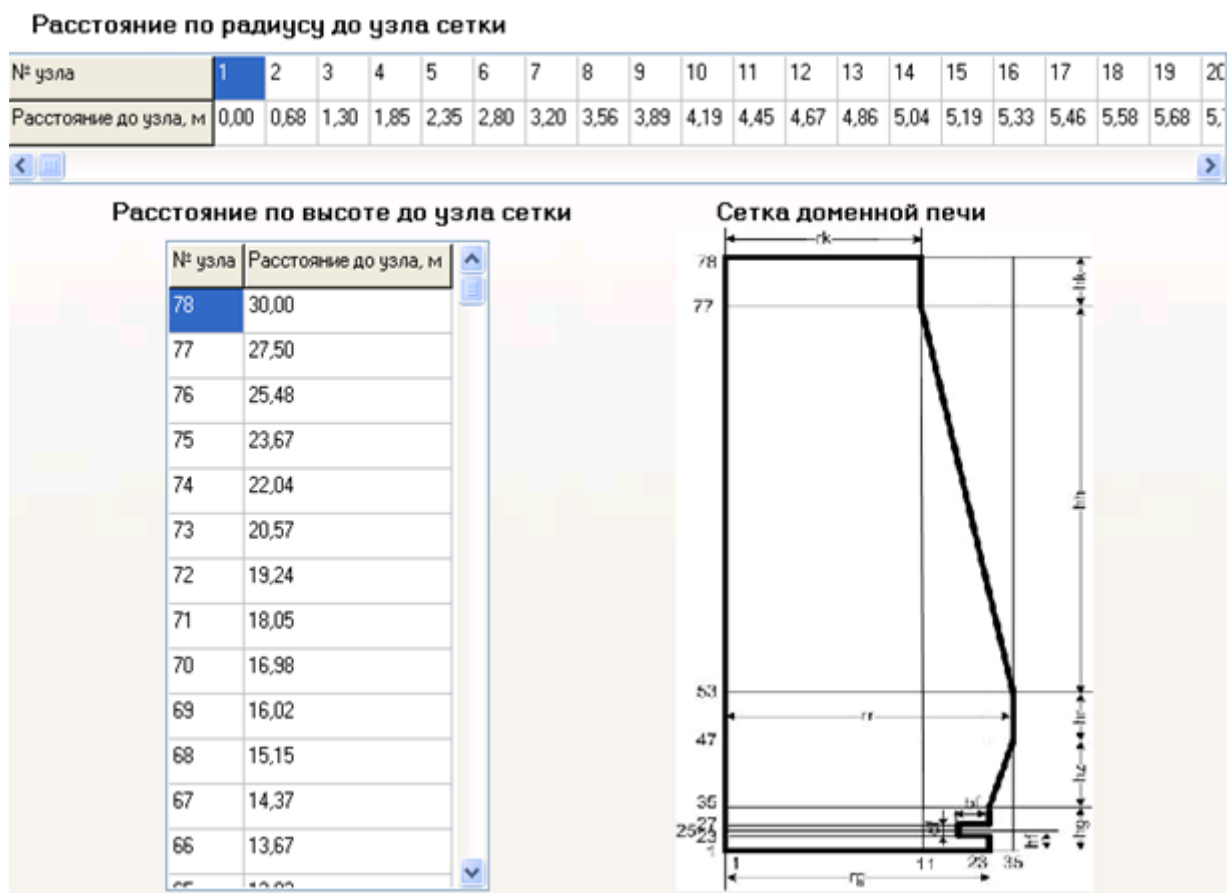


Рисунок 1 – Профиль шахтной печи и координаты узлов конечно-разностной сетки

Для схемы рисунка 1 граничные условия по $\tilde{\psi}$ запишутся следующим образом:

$$\tilde{\psi} = 0 \quad \text{при} \quad \begin{cases} \tilde{x} = 0, & 0 \leq \tilde{z} \leq H; \\ 0 \leq \tilde{x} \leq \tilde{x}_{\max}, & \tilde{z} = 0; \\ \tilde{x} = \tilde{x}_{\max}, & 0 \leq \tilde{z} \leq \tilde{L} - \tilde{r}_{\phi}; \end{cases} \quad (29)$$

$$\tilde{\psi} = 1 \quad \text{при} \quad \tilde{x} = \tilde{x}_{\max}, \quad \tilde{L} + \tilde{r}_{\phi} \leq \tilde{z} \leq H; \quad (30)$$

$$\frac{\partial \tilde{\psi}}{\partial \tilde{z}} = 0 \quad \text{при} \quad 0 \leq \tilde{x} \leq \tilde{x}_{\max}, \quad \tilde{z} = H. \quad (31)$$

Значение $\tilde{\psi}$ на срезе фурмы, т.е. при $\tilde{x} = \tilde{x}_{\max}$, $\tilde{L} - \tilde{r}_{\phi} \leq \tilde{z} \leq \tilde{L} + \tilde{r}_{\phi}$ определяется режимом движения дутья в фурме. Для ламинарного режима профиль скорости описывается квадратичной параболой, причём отношение средней скорости к максимальной равно 0,5. Для условий рисунка 1

$$\tilde{v}_x = -\frac{3}{4} \tilde{r}_{\phi}^3 [\tilde{L}^2 - \tilde{r}_{\phi}^2 - \tilde{z}(2\tilde{L} - \tilde{z})].$$

Поскольку $\tilde{v}_x = \partial \tilde{\psi} / \partial \tilde{z}$, то учитывая, что ниже фурмы $\tilde{\psi} = 0$, после интегрирования при $\tilde{x} = \tilde{x}_{\max}$, $\tilde{L} - \tilde{r}_\phi \leq \tilde{z} \leq L + \tilde{r}_\phi$ находим

$$\tilde{\psi} = 0,75 \tilde{r}_\phi^3 \left[(\tilde{L} + 2\tilde{r}_\phi)(\tilde{L} - \tilde{r}_\phi)^2 - (\tilde{L}^2 - \tilde{r}_\phi^2)\tilde{z} + \tilde{L}\tilde{z}^2 - \frac{1}{3}\tilde{z}^3 \right],$$

т.е. профиль $\tilde{\psi}$ на фурме представляет собой кубическую параболу.

При турбулентном течении газа в трубе лучше всего согласуется с опытными данными по всему турбулентному ядру течения вплоть до оси трубы следующее уравнение [21]:

$$\tilde{v}_x = 0,2 \frac{\tilde{d}_\phi}{\text{Re}^{1/8}} \left\{ 5,5 + 2,5 \ln \left[0,2 \text{Re}^{7/8} \frac{\tilde{z} - \tilde{L} + \tilde{d}_\phi / 2}{\tilde{d}_\phi} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \frac{1,5[1 + (\tilde{L} - \tilde{z}) / \tilde{r}_\phi]}{1 + 2[(\tilde{L} - \tilde{z}) / \tilde{r}_\phi]} \right] \right\}. \quad (32)$$

Здесь $\tilde{d}_\phi = 2\tilde{r}_\phi$. Тогда при $\tilde{x} = \tilde{x}_{\max}$, $\tilde{L} - \tilde{r}_\phi \leq \tilde{z} \leq L + \tilde{r}_\phi$ получим

$$\tilde{\psi} = \int_{\tilde{L} - \tilde{r}_\phi}^{\tilde{L} + \tilde{r}_\phi} \tilde{v}_x(\tilde{x}_{\max}, \tilde{z}) d\tilde{z}.$$

В пределах ламинарного подслоя справедливы соотношения:

– при $\tilde{z} < \tilde{L} - \tilde{r}_\phi + [\tilde{d}_\phi / (0,04 \text{Re}^{7/8})]$ $\tilde{v}_x = 0,04 \text{Re}^{3/4} (\tilde{z} - \tilde{L} + \tilde{r}_\phi) / \tilde{d}_\phi^2$;

– при $\tilde{z} > \tilde{L} - \tilde{r}_\phi - [\tilde{d}_\phi / (0,04 \text{Re}^{7/8})]$ $\tilde{v}_x = 0,04 \text{Re}^{3/4} (\tilde{L} + \tilde{r}_\phi - \tilde{z}) / \tilde{d}_\phi^2$.

Перейдём к граничным условиям по завихренности ω . При $\tilde{x} = \tilde{x}_{\max}$ и $\tilde{L} - \tilde{r}_\phi \leq \tilde{z} \leq L + \tilde{r}_\phi$, т.е. на срезе фурмы $\tilde{v}_z = \partial \tilde{v}_x / \partial \tilde{x} = 0$ и $\tilde{\omega} = \partial \tilde{v}_x / \partial \tilde{z}$. Для ламинарного режима $\tilde{\omega} = 1,25(\tilde{L} - \tilde{z}) / r_\phi^3$.

При турбулентном режиме на нижней стенке фурмы $\tilde{\omega} = 0,04 \text{Re}^{3/4} / \tilde{d}_\phi^2$, а на верхней $\tilde{\omega} = -0,04 \text{Re}^{3/4} / \tilde{d}_\phi^2$. Для ядра потока завихренность находится путём дифференцирования уравнения (32) по $\tilde{z}$:

$$\tilde{\omega} = \partial \tilde{v}_x / \partial \tilde{z} = 2,24(\tilde{L} - \tilde{z}) \tilde{r}_\phi / \{ \text{Re}^{1/8} [\tilde{r}_\phi^2 - (\tilde{L} - \tilde{z})^2] [\tilde{r}_\phi^2 + 2(\tilde{L} - \tilde{z})^2] \}.$$

На оси печи при $\tilde{x} = 0$ и $0 \leq \tilde{z} \leq \tilde{H}$ $\tilde{v}_x = \partial \tilde{v}_x / \partial \tilde{z} = 0$, т.е. $\tilde{\omega} = -\partial \tilde{v}_z / \partial \tilde{x}$. Однако мы рассматриваем симметричную задачу, а в этом случае симметричен и профиль вертикального компонента скорости. Но тогда $\partial \tilde{v}_z / \partial \tilde{x} = 0$ и $\tilde{\omega}(0, \tilde{z}) = 0$.

Выражение (28) с учётом уравнения неразрывности $\partial \tilde{v}_x / \partial \tilde{x} + \partial \tilde{v}_z / \partial \tilde{z} = 0$ можно представить в виде:

$$\tilde{v}_x \frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial \tilde{x}} + \tilde{v}_z \frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial \tilde{z}} + (A_1 + A_2 \tilde{q}) \tilde{\omega} = A_2 \left(\tilde{v}_z \frac{\partial \tilde{q}}{\partial \tilde{x}} - \tilde{v}_x \frac{\partial \tilde{q}}{\partial \tilde{z}} \right).$$

На стенке печи при $\tilde{x} = \tilde{x}_{\max}$ и $0 \leq \tilde{z} \leq \tilde{L} - \tilde{r}_\phi$ или $\tilde{L} + \tilde{r}_\phi \leq \tilde{z} \leq \tilde{H}$ $\tilde{v}_x = 0$ и $\tilde{q} = |\tilde{v}_z|$. Отсюда

$$\tilde{v}_z \frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial \tilde{z}} + (A_1 + A_2 |\tilde{v}_z|) \tilde{\omega} = A_2 \tilde{v}_z \frac{\partial |\tilde{v}_z|}{\partial \tilde{x}}. \quad (33)$$

Располагая значениями $\tilde{\omega}$ на срезе фурмы, решая уравнение (33), можно определить завихренность вдоль стенки печи вверх от фурмы до уровня засыпи и вниз от фурмы до днища. На днище при $\tilde{z} = 0$ и $0 \leq \tilde{x} \leq \tilde{x}_{\max}$ $\tilde{v}_z = 0$ и $\tilde{q} = |\tilde{v}_x|$. Тогда

$$\tilde{v}_x \frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial \tilde{x}} + (A_1 + A_2 |\tilde{v}_x|) \tilde{\omega} = -A_2 \tilde{v}_x \frac{\partial |\tilde{v}_x|}{\partial \tilde{z}}. \quad (34)$$

На уровне засыпи также справедливо соотношение (34).

Конечноразностная аппроксимация вышеприведённых уравнений в переменных «завихренность – функция тока» составляет численную модель вихревого движения газового потока в слое кускового материала. Практика вычислений показала, что наиболее рационально решать уравнения этой модели методом последовательной верхней релаксации (ПВР) [2–4, 11, 18–24].

Пример решения уравнений модели вихревой задачи для доменной печи

Для условий работы доменной печи высотой (по слою) 30 м с распаром диаметром 6,55 м была разработана информационно-моделирующая система газодинамики доменного процесса. Система включала решение задачи неизотермического вихревого течения в доменной печи при заданном поле порозности с учётом зоны когезии, задачу газодинамики фурменного очага и программу расчёта доменного воздухонагревателя. Программная реализация системы выполнялась в пакетах Delphy релиза 7 и Compaq Visual Fortran. К сожалению, в рамках Windows 7 второй пакет не функционирует, поэтому проиллюстрировать работу системы в нём не представляется возможным. Тем не менее, в приложении представлены все программные модули системы в Compaq Visual Fortran, так как, например, в рамках Windows XP этот пакет отлично функционирует.

В Delphy система запускается командой **Gazodin_DP.exe**, которая открывает исходную форму (см. рисунок 2). При выборе решаемой задачи, например, «Расчёт неизотермической задачи газодинамики с учётом зоны когезии» открывается форма с геометрическими и режимными параметрами анализируемой доменной печи (рисунок 3).

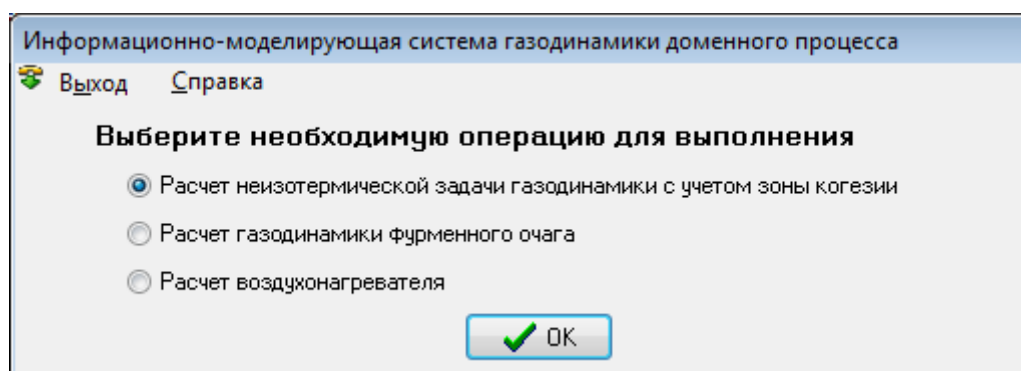


Рисунок 2 – Форма запуска работы системы

Расчет неизоэнтальпической задачи газодинамики (ввод исходных данных)

Файл Справка

r_k , м	4,45	r_r , м	6,55	r_g , м	6	h_k , м	2,5
h_h , м	19,6	h_r , м	2,3	h_z , м	3,4	h_g , м	2,2
h_f , м	1,5	d_f , м	0,18	b_f , м	0	n_f , штук	28
q_0 , м/с	90	d_{z1}	1	d_{z2}	1	d_{z3}	1
d_{z4}	1	d_{z5}	1	l , м	1,25	akf , доли	1,2
ρ_0 , кг/м ³	1,293	μ_0 , 10 ⁻⁶ Н·с/м ²	17,08	dk , м	0,03	$form$, доли	0,9
$dpsi$	0,0025	dom	0,005	dpg	0,001	dtg	0,001
p_0 , 10 ⁻⁵ Па	4	t_{g0} , °C	1400	t_{m0} , °C	100	lmd_0 , Вт/(м ² ·K)	0,0244
c_{v0} , Дж/(м ³ ·K)	1002	ρ_{m0} , кг/м ³	1500	qm , кг/с	55		

Отображение результатов

Пояснения:

Рисунок 3 – Задание параметров работы доменной печи

На этой форме r_k , r_r , r_g – соответственно радиусы колошника, распара и горна; h_k , h_h , h_r , h_z , h_g , h_f – соответственно высоты колошника, шахты, распара, заплечиков и горизонта расположения фурм. Аналогично dk – диаметр кусков шихты; d_f – диаметр фурм; q_0 – скорость истечения дутья из фурмы; $dpsi$, dom , dpg , dtg – точность вычисления (критерии сходимости итераций) функции тока, завихренности, давления газа и температуры газа. Остальные величины стандартные и не требуют пояснения.

Как можно видеть из данных рисунка 3, форма параметров предполагает открытие двух страниц. При открытии страницы «Файл» создаётся возможность ввести такие же данные для другой печи или другие показатели работы для той же самой печи. При нажатии на кнопку «Отображение результатов» выполняется расчёт по уравнениям численной модели и производится выдача результатов в табличной форме (рисунок 1). Первой выдаётся форма с координатами узлов конечноразностной сетки, из которой видно, что по высоте печи (до 30 м) выделяется 78 узлов, а по радиусу печи в районе распара (до 6,55 м) 35 узлов. Отметим, что размеры ячеек конечноразностной сетки не одинаковы – они минимальны вблизи фурменного очага и возрастают по мере приближения к уровню засыпи. Данная форма представлена на рисунке 1, поэтому здесь не приводится.

При открытии страницы «Результаты расчёта» открывается форма, позволяющая ознакомиться с распределением в объёме слоя девяти параметров газодинамики (рисунок 4).

Три параметра (функция тока, температура газа и температура материала) могут быть отображены графически после нажатия на кнопку «Показать диаграмму». При выделении на форме запуска опции «Расчёт газодинамики фурменного очага» открывается форма с указанием параметров работы фурменного очага (рисунок 6). Отметим, что теория работы фурменного очага доменной печи и подробный вывод определяющих уравнений газодинамики и теплообмена представлен в наших работах [25, 26]. Что же касается обозначений на рисунке 6, то, по нашему мнению, пояснения требует лишь параметр l – высов фурмы, т.е. расстояние среза фурмы от внутренней стенки горна, t_{rec} – температура рециркулята или, другими словами, газа, уходящего от фурмы, но возвращающегося в фурменный очаг вследствие завихренности потока, и $PartRec$ – доля рециркулята от общего количества фурменного газа.

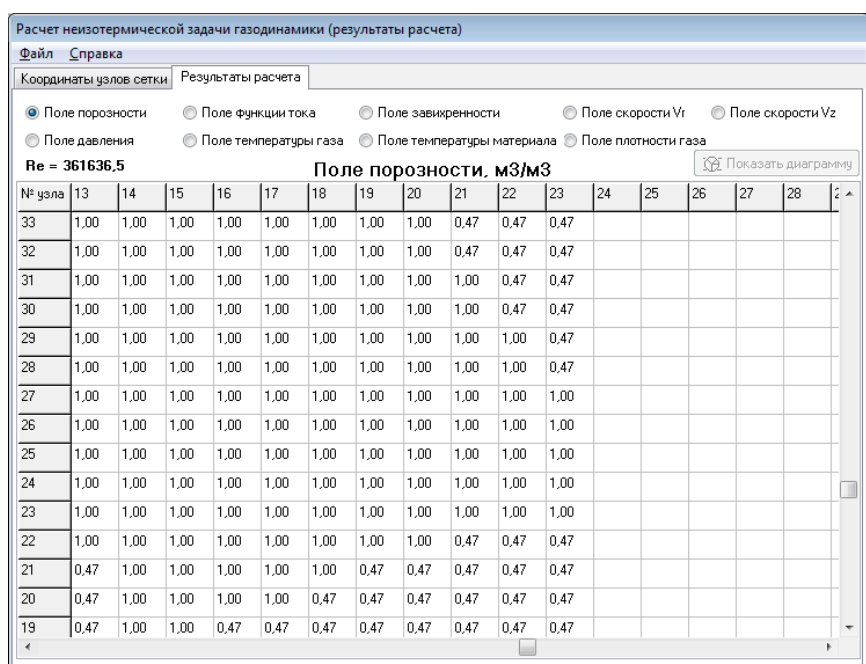


Рисунок 4 – Форма представления результатов решения неизоэтермической задачи газодинамики

Расчет неизотермической задачи газодинамики (диаграмма)

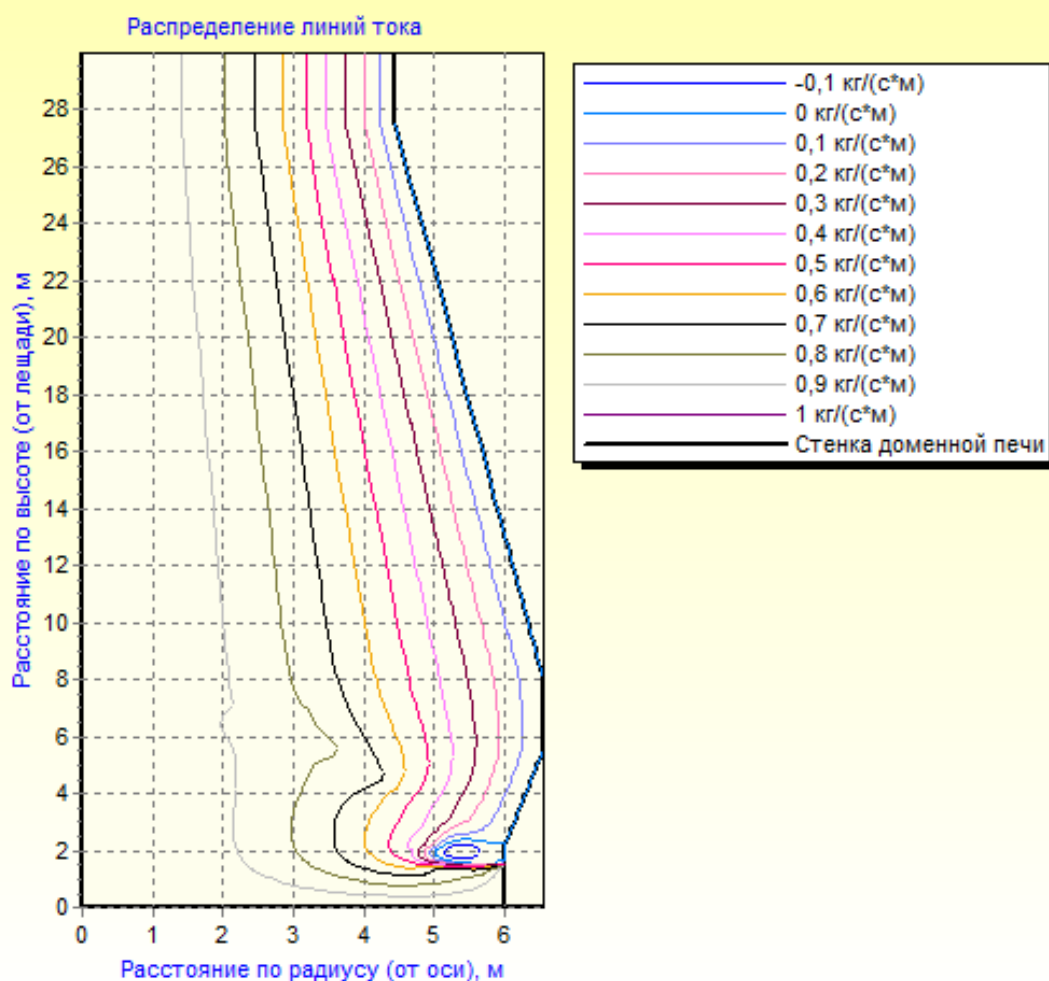


Рисунок 5 – Картина течения газов в доменной печи

Расчет газодинамики фурменного очага (ввод исходных данных)

Файл Справка

L, м 100	V_blast, м3/с 35	t_blast, C 1200	W_coal, г/м3 0
W_o2, м3/м3 0,05	W_st, г/м3 24	W_ng, м3/м3 0	p, атм 3,5
Ro_ob, кг/м3 1050	beta, доли 0,85	dg, м 9,5	df, м 0,16
nf, штук 24	Ksi, доли 0,15	t_cocks, C 1600	Epsi, доли 0,5
Poig, доли 0,55	O2crit, доли 0,03	dk_ob, м 0,045	f_form, доли 0,875
t_rec, C 1977	PartRec, доли 0,2	X_in, м 1,6	X_out, м 1,8
d_cd, мм 0,1	ro_cd, кг/м3 1320	por_cd, доли 0,12	F_ud, м2/кг 3000
Cr_cd, массовый % 74,5	Hr_cd, массовый % 4,82	Or_cd, массовый % 8,01	Vola_cd, массовый % 38,7
Ar_cd, массовый % 7,1	Vx, м/с 75	Vy, м/с 0	t0_cd, C 1050

Отображение результатов

Пояснения:

Рисунок 6 – Параметры работы фурменного очага ДП

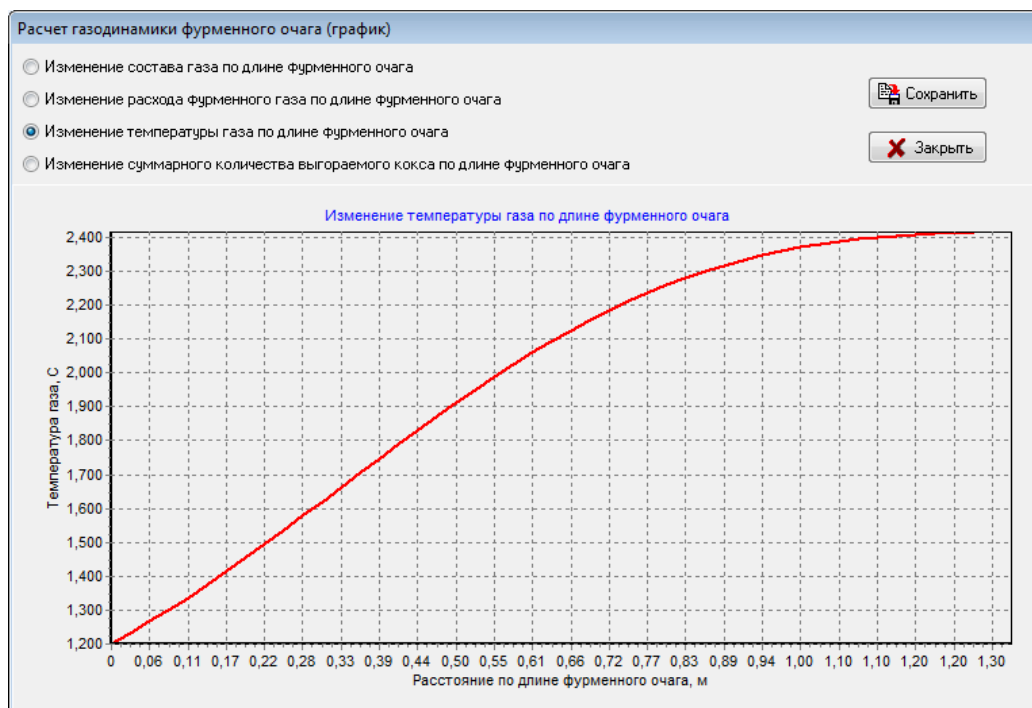


Рисунок 9 – Изменение температуры фурменных газов по длине фурменного очага

Библиографический список

1. Матрос Ю.Ш. Нестационарные процессы в каталитических реакторах. – Новосибирск: Наука, 1982. – 228 с.
2. Теплотехника доменного процесса /Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Е.Л. Суханов, Ю.Н. Овчинников, В.С. Швыдкий. – М.: «Металлургия», 1978. – 248 с.
3. Тепловая работа шахтных печей и агрегатов с плотным слоем /Я.М. Гордон, Б.А. Боковиков, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко. – М.: Металлургия, 1989. – 120 с.
4. Механика движения материалов и газов в шахтных печах /Я.М. Гордон, Е.В. Максимов, В.С. Швыдкий. – Алма-Ата: Наука, 1989. – 144 с.
5. Лыков А. В. Тепломассообмен (справочник). – М.: Энергия, 1972 – Раздел пятый. – С. 338–467.
6. Слеттери Дж. С. Теория переноса импульса, энергии и массы в сплошных средах: Пер. с англ. – М.: Энергия, 1978. – 448 с.
7. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Т. 1 – М.: «Наука», 1955. – 480 с.
8. Мышкис А.Д. Лекции по высшей математике. – М.: Наука, 1969. – 640 с.
9. Математические методы теплофизики: Учебник для вузов /В.С. Швыдкий, М.Г. Ладыгичев, В.С. Шаврин. – М.: «Машиностроение», 2001. – 232 с.
10. Серрин Дж. Математические основы классической механики жидкости. – М.: ИЛ, 1963. – 256 с.
11. Механика жидкости и газа: Учебное пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. / В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко, Я.М. Гордон, В.С. Шаврин, А.С. Носков; под редакцией В.С. Швыдкого. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 464 с.
12. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 586 с.
13. Prager S. Viscous flow through Porous Media // Phys. of Fluids, 1961, N4, p. 1477 – 1485.
14. Гольдштик М.А. Процессы переноса в зернистом слое. – Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1984. – 164 с.

15. Богданди Л.Ф., Энгель Г.Д. Восстановление железных руд. – М.: Metallurgy, 1971. – 520 с.
16. Brauer H. Resistance law for irrigated vertical columns with countercurrent gas flow // Chem. Ing. Tech., 1960, V.32, p. 585 – 590.
17. Газодинамика и теплотехника доменного процесса //Р. Ешар, Р. Бредегефт, М. Мавродис идр. – Чёрные металлы, 1971, № 12. – С.1 – 40.
18. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
19. Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 544 с.
20. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1987. – 492 с.
21. В.М. Кэйс. Конвективный тепло- и массообмен. Пер. с англ. – М.: «Энергия», 1972. – 448 с.
22. Хейгеман Л., Янг Д. Прикладные итерационные методы: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 448 с.
23. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
24. Численные методы исследования течений вязкой жидкости /А.Д. Госмен, В.М. Пан, А.К. Ранчел, Д.Б. Сполдинг, М. Вольфштейн – М.: Мир, 1972. – 328 с.
25. Теплообмен и повышение эффективности доменной плавки //Н.А. Спирин, Ю.Н. Овчинников, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко, под ред. Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 1995. – 243 с.
26. Введение в системный анализ теплофизических процессов металлургии: Учебное пособие для вузов // Н.А. Спирин, В.С. Швыдкий, В.И. Лобанов, В.В. Лавров. – Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 1999. – 205 с.

СПИСОК АВТОРОВ

К

Kongoli F. 6, 41

А

Алексеев А.Н. 74
Ансимов А.А. 190
Арсеньева А.А. 268

Б

Баклушина И.В. 206
Барсукова Е.Ю. 186
Баус С.С. 223
Белый А.М. 160
Бородулин А.В. 261
Буинцев В.Н. 325, 388
Буркова Е.В. 170
Бурнышева Т.В. 93
Бурыкин А.А. 179
Бухмиров В.В. 357
Бякова М.В. 70, 179

В

Венгер К.Г. 273
Веревкин В.И. 226, 229
Веревкин С.В. 226, 229
Воевода А.А. 285
Воробьева Л.А. 362
Вячкин Е.С. 132
Вячкина Е.А. 138

Г

Гилёва А.Е. 128
Голодова М.А. 112, 117
Горохов Ю.В. 154
Гребнева Н.В. 310, 319
Гупало Е.В. 362
Гурин И.А. 70, 179, 250

Д

Дмитриев А.Н. 17
Домрачев А.Н. 211
Дорофеев Г.А. 13, 186, 268, 294

Е

Евтушенко В.Ф. 158, 170
Ерёмин А.О. 362
Ермакова Л.А. 27, 99, 106, 329, 334
Ерофеев В.А. 268

З

Зайцев В.Н. 144
Запольская Е.М. 393
Зоря И.В. 339

И

Инатович Ю.В. 245
Истомин А.С. 179, 250, 256

К

Калашников С.Н. 27, 226, 229, 334
Каледин В.О. 123, 132, 138
Каледин Вл.О. 123
Киселев Е.В. 310, 319
Кожемяченко В.И. 27, 41
Кожухов А.А. 47, 197
Королькова Л.Н. 190
Красноперов С.Ю. 27, 99, 201
Крафт Л.Н. 190, 215, 304
Крыштопин Д.В. 165
Куделин С.П. 245

Л

Лавров В.В. 6, 70, 179, 256, 310, 319, 405
Лаптева А.В. 367
Лекомцев Д.Г. 240
Леонтьев И.А. 158, 273
Лисиенко В.Г. 315, 367
Лысенко Н.А. 158

М

Максакова К.Е. 393
Маликов Г.К. 315
Матюхин В.И. 405
Мельников Е.Н. 47, 197
Меркер Э.Э. 190, 215, 304
Миникаев С.Р. 278
Мочалов С.П. 27, 99, 329, 334
Мышляев Л.П. 102, 158, 273

Н

Никитин А.Г. 282
Нохрина О.И. 112, 117

О

Оленников А.А. 27, 41, 52, 85, 206, 373, 378, 384
Онорин О.П. 250, 256

П

Павлова Л.Д.	21, 160, 175
Падалко А.Г.	27, 85, 201
Парахин Я.О.	47, 197
Перегятыко В.Н.	235, 290
Потапенко А.С.	154

Р

Решетникова Е.В.	128
Риб С.В.	211
Рожихина И.Д.	112, 117
Рыбенко И.А.	27, 36, 41, 112, 117, 325, 388
Рыболовлев В.Ю.	179

С

Сеченов П.А.	52, 59, 64, 85, 378
Сибатуллин М.И.	278
Сидоров М.В.	278
Синельников В.А.	13
Скуратов А.П.	154
Сметанин С.В.	235, 290
Спирин Н.А.	6, 70, 179, 250, 256, 405
Степанов В.А.	304
Степанов Я.М.	13, 186
Стерлигов В.В.	339, 343, 348, 351, 355
Сулейманов М.Г.	357

Т

Тагильцев-Галета К.В.	282
Темлянец М.В.	393
Терехова А.Ю.	299
Титаев А.А.	315
Трошина Г.В.	285

У

Ульянов А.Д.	123
--------------	-----

Ф

Файрушин Ш.А.	158
Фатхутдинов А.Р.	74, 405
Федяев Ю.С.	165
Филиппова М.В.	235, 290
Фрянов В.Н.	21

Х

Харитонов Ю.В.	294
Харламов Д.А.	190, 304
Харченко Е.О.	278
Хасанова Д.Д.	278

Ц

Цветков А.Б.	175
Циряпкина А.В.	273
Циряпкина И.В.	102
Цымбал В.П.	3, 27, 41, 52, 59, 64, 85, 378, 384

Ч

Чапаев Д.Б.	206, 378
Челнокова В.Д.	245
Черемискина Н.А.	310, 319
Черменев Е.А.	215
Чесноков Ю.Н.	367

Ш

Шадринцева Д.А.	343
Шаталов Н.Н.	47, 197
Швачка А.И.	261
Швыдкий В.С.	6, 74, 405
Штейнбрехер О.А.	149

Щ

Щивка Е.	294
----------	-----

Я

Янговский П.Р.	13, 186
----------------	---------

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

Цымбал В.П.

Единство научного и образовательного процессов. к 35-летию образования кафедры..... 3

Kongoli F.

Sustainable Development and the Role of Modeling and Information Technology in Technical, Social and Economic Systems 6

Спирин Н.А., Швыдкий В.С., Лавров В.В.

Математическое моделирование теплофизических процессов в информационных системах металлургии 6

Дорофеев Г.А., Янтовский П.Р., Степанов Я.М. Синельников В.А.

Концепция энергометаллургического комплекса ORIEN..... 13

Дмитриев А.Н.

Использование информационных технологий в разработке и совершенствовании пиromеталлургической переработки железорудного сырья 17

Фрянов В.Н., Павлова Л.Д.

Обоснование по результатам численного моделирования формы и размеров подземных выработок 21

Цымбал В.П., Кожемяченко В.И., Рыбенко И.А., Мочалов С.П., Падалко А.Г., Калашников С.Н., Красноперов С.Ю., Ермакова Л.А., Оленников А.А.

Предпосылки и принципы создания самоорганизующегося струйно-эмульсионного металлургического реактора..... 27

Рыбенко И.А.

Использование принципов неравновесной термодинамики для повышения эффективности металлургических процессов..... 36

СЕКЦИЯ 1. Методы и программно-инструментальные системы математического, физического моделирования и идентификации

Tsymbol V.P., Olennikov A.A., Kozhemyachenko V.I., Rybenko I.A., Kongoli F.

Efficient utilization of fuel energy in the steel industry using a spray-emulsion reactor within a new structure of energy and metallurgical units 41

Кожухов А.А., Мельников Е.Н., Шаталов Н.Н., Парахин Я.О.

Разработка математической модели процесса вспенивания сталеплавильного шлака с использованием теории фракталов и перколяции..... 47

Цымбал В.П., Сеченов П.А., Оленников А.А.

Имитационное моделирование диссипативных структур в струйно-эмульсионном металлургическом реакторе 52

Цымбал В.П., Сеченов П.А.

Имитационное моделирование гравитационного сепаратора в колонном реакторе струйно-эмульсионного агрегата..... 59

Сеченов П.А., Цымбал В.П.

Программная реализация имитационной модели гравитационного сепаратора в колонном струйно-эмульсионном металлургическом реакторе..... 64

Гурин И.А., Спирин Н.А., Лавров В.В., Бякова М.В. Решение оптимизационных задач на языке программирования Visual C# с использованием математических пакетов.....	70
Швыдкий В.С., Фатхутдинов А.Р., Алексеев А.Н. К математическому моделированию шахтных печей с плавлением материалов	74
Цымбал В.П., Сеченов П.А., Оленников А.А., Падалко А.Г. Имитационное моделирование гетерогенного потока в колонном реакторе СЭР и механизм турбулентной вязкости.....	85
Бурнышева Т.В. Применение методологии вычислительного эксперимента при идентификации анизотропных композиционных конструкций	93
Ермакова Л.А., Мочалов С.П., Красноперов С.Ю. Моделирование процесса тепломассообмена в дисперсных системах	99
Мышляев Л.П., Циряпкина И.В. О способах идентификации натуральных структур материалов	102
Ермакова Л.А. Изучение восстановительных процессов для условий получения металла из пылевидных материалов в струйно-эмульсионном агрегате непрерывного действия	106
Голодова М.А., Рожихина И.Д., Нохрина О.И., Рыбенко И.А. Термодинамическое моделирование процесса восстановления элементов конвертерного ванадиевого шлака	112
Голодова М.А., Рожихина И.Д., Нохрина О.И., Рыбенко И.А. Использование методов термодинамического моделирования для описания процессов восстановления элементов из чистых оксидных систем	117
Каледин В.О., Ульянов А.Д., Каледин Вл.О. Моделирование термонапряженного состояния тонкостенных кольцевых конструкций при высокотемпературном нагреве.....	123
Гилёва А.Е., Решетникова Е.В. Функционально-объектная реализация расчета прочности осесимметричных конструкций из полимерных композиционных материалов	128
Каледин В.О., Вячкин Е.С. Модель деформирования многослойной упругой конструкции, содержащей податливые объемно несжимаемые слои	132
Каледин В.О., Вячкина Е.А. Математическая модель процесса горения строительных объектов с учетом химического состава конструкционных и отделочных материалов	138
Зайцев В.Н. О построении банка цифровых фильтров для обработки сейсмоакустических сигналов на основе дискретных вейвлетов.....	144
Штейнбрехер О.А. О решении задачи оптимизации сетчатых конструкций.....	149

Скуратов А.П., Горохов Ю.В., Потапенко А.С. Применение САД систем при моделировании тепловых процессов в установке непрерывного литья и прессования цветных металлов	154
Мышляев Л.П., Евтушенко В.Ф., Файрушин Ш.А., Леонтьев И.А., Лысенко Н.А. Интеграция математических моделей внутренних механизмов и вход-выходных зависимостей объектов	158
Белый А.М., Павлова Л.Д. Обоснование использования программной среды для моделирования процесса миграции флюидов при техногенном воздействии на геомассив	160
Крыштопин Д.В., Федяев Ю.С. Численный метод решения задачи об эволюции границы раздела разнотязких жидкостей в поступательном потоке	165
Буркова Е.В., Евтушенко В.Ф. Численное исследование совместного подобию объектов и воздействий в подобных системах управления	170
Цветков А.Б., Павлова Л.Д. Разработка комплекса программ для исследования нелинейной математической модели напряженно-деформированного состояния газоносного геомассива	175
СЕКЦИЯ 2. Моделирование и наукоемкие информационные технологии в металлургии, добыче сырья и обогащении	
Лавров В.В., Спирин Н.А., Бурыкин А.А., Рыболовлев В.Ю., Истомин А.С., Гурин И.А., Бякова М.В. Технология и программный инструментарий для разработки информационно-моделирующих систем доменного производства ОАО	179
Дорофеев Г.А., Янтовский П.Р., Степанов Я.М., Барсукова Е.Ю. Совершенствование технологии выплавки стали в дуговых сталеплавильных печах на основе применения наукоемких информационных материалов нового поколения	186
Ансимов А.А., Крахт Л.Н., Королькова Л.Н., Харламов Д.А., Меркер Э.Э. Применение метода и модели оценки эффективности управления режимом обжига известняка во вращающейся печи	190
Кожухов А.А., Мельников Е.Н., Шаталов Н.Н., Парахин Я.О. Исследование факторов влияющих на устойчивость вспененного шлака с использованием теории фракталов и перколяции	197
Красноперов С.Ю., Падалко А.Г. Автоматизированная система контроля и управления крупномасштабной опытной установкой СЭР	201
Чапаев Д.Б., Оленников А.А., Баклушина И.В. К вопросу о моделировании внутреннего коррозионного износа трубопроводов тепловых сетей	206
Домрачев А.Н., Риб С.В. Синтез 2D и 3D моделей для прогноза устойчивости неоднородных цепоиков на угольных шахтах	211

Меркер Э.Э., Крахт Л.Н., Черменев Е.А. Разработка математической модели и алгоритма расчета процесса обезуглероживания металла в дуговой сталеплавильной печи	215
Баус С.С.223 Программное обеспечение для моделирования процессов нефтедобычи с применением штанговых глубинных насосов (ШГН).....	223
Веревкин В.И., Калашников С.Н., Веревкин С.В. Математическое моделирование источника электрохимической коррозии обшивок судов.....	226
Веревкин В.И., Калашников С.Н., Веревкин С.В. Математическое моделирование поля потенциалов при электрохимической коррозии обшивок судов.....	229
Перетятко В.Н., Сметанин С.В., Филиппова М.В. Энергоэффективная технология прокатки трамвайных рельсов в четырехвалковых калибрах.....	235
Лекомцев Д.Г. Работа совершенной скважины в ортотропном кусочно-однородном пласте грунта	240
Инатович Ю.В., Куделин С.П., Челнокова В.Д. Моделирование технологии сортовой прокатки с применением элементов искусственного интеллекта.....	245
Онорин О.П., Спирин Н.А., Истомин А.С., Гурин И.А. Применение в системах управления исследований переходных процессов доменной плавки	250
Спирин Н.А., Истомин А.С., Онорин О.П., Лавров В.В. Разработка компьютерной системы для диагностики отклонения доменной плавки от нормального режима.....	256
Швачка А.И., Бородулин А.В. Развитие теплоэнергетической модели и повышение энергоэффективности доменной плавки	261
Арсеньева А.А., Дорофеев Г.А., Ерофеев В.А. Численное решение физико-математической модели электродуговой сталеплавильной печи	268
Циряпкина А.В., Мышляев Л.П., Венгер К.Г., Леонтьев И.А. Моделирование систем управления объектами с рециклом	273
Харченко Е.О., Сидоров М.В., Сибгатуллина М.И., Минакаев С.Р., Хасанова Д.Д. Совместный нагрев окатышей и агломерата с коксом при изменении объемной доли железорудной части шихты.....	278
Никитин А.Г., Тагильцев-Галета К.В. Система аварийного управления дробильного агрегата, использующая совместную оценку состояния	282
Воевода А.А., Трошина Г.В. Влияние ошибок в параметрах объекта на точность оценивания вектора состояния	285

Филиппова М.В., Сметанин С.В., Перетяцько В.Н. Компьютерное моделирование прокатки шаров в винтовых калибрах	290
Харитонов Ю.В., Дорофеев Г.А., Щивка Е. Экспериментальные исследования и анализ поведения синтикома с дисперсной основой в процессе нагрева и плавления	294
СЕКЦИЯ 3. Моделирование теплоэнергетических процессов	
Терехова А.Ю. Моделирование гидродинамики фурменной зоны печей Ромелт и Ванюкова	299
Меркер Э.Э., Степанов В.А., Крахт Л.Н., Харламов Д.А. К вопросу о построении математической модели дожигания горючих газов в дуговой сталеплавильной печи	304
Гребнева Н.В., Черемискина Н.А., Лавров В.В., Киселев Е.В. Компьютерный анализ работы водо-воздушных теплообменных аппаратов в пакете ANSYS для проведения лабораторных работ	310
Лисиенко В.Г., Маликов Г.К., Титаев А.А. Математическое моделирование и повышение эффективности нагрева непрерывнолитой заготовки для производства труб	315
Черемискина Н.А., Гребнева Н.В., Лавров В.В., Киселев Е.В. Автоматизированный инженерный анализ тепловых режимов пластинчатого теплообменника с использованием пакета ANSYS при проведении лабораторного практикума.....	319
Рыбенко И.А., Буинцев В.Н. Математическое моделирование процесса горения метана	325
Ермакова Л.А., Мочалов С.П. Методика расчета тепломассообмена в реакторах агрегата типа СЭР для условий прямого получения металла из дисперсных материалов.....	329
Ермакова Л.А., Калашников С.Н., Мочалов С.П. Уточнение физико-химической модели горения капель ВУТ	334
Стерлигов В.В., Зоря И.В. Обобщенная модель теплового сопротивления элементов зданий.....	339
Стерлигов В.В., Шадринцева Д.А. Изучение на физической модели характеристик горелки со встроенным радиационным рекуператором.....	343
Стерлигов В.В. Создание обобщенных моделей на основе аффинных преобразований	348
Стерлигов В.В. Математическое и физическое моделирование стагнации воздушного слоя для теплоизоляции.....	351
Стерлигов В.В. Математическое и физическое моделирование теплового сопротивления элементов остекления зданий	355
Бухмиров В.В., Сулейманов М.Г. Численное решение задачи внутреннего теплообмена в садовой печи	357

Ерёмин А.О., Гупало Е.В., Воробьёва Л.А. Моделирование тепловой работы кольцевой печи с регенеративными горелками	363
Лисиенко В.Г., Чесноков Ю.Н., Лаптева А.В. Энергетический и парниковый анализ процессов прямого легирования стали.....	367
Оленников А.А. Программный комплекс для моделирования схем утилизации вторичной энергии от отходящих газов металлургических агрегатов	373
Оленников А.А., Цымбал В.П., Сеченов П.А., Чапаев Д.Б. Виртуальная лабораторная установка для исследования процесса сушки в аппаратах кипящего слоя.....	378
Оленников А.А., Цымбал В.П. Моделирование температурных полей фрагмента системы гарнисажного охлаждения агрегата сэр при помощи программного комплекса Ansys	384
Рыбенко И.А., Буинцев В.Н. Моделирование процесса горения пылеугольной смеси.....	388
Темлянцев М.В., Запольская Е.М., Максакова К.Е. Математическое моделирование тепловой работы стендов разогрева футеровок металлургических ковшей	393
Швыдкий В.С., Спирин Н.А., Матюхин В.И., Лавров В.В., Фатхутдинов А.Р. Математическая модель слоевых металлургических печей и агрегатов	405
СПИСОК АВТОРОВ.....	424
СОДЕРЖАНИЕ	426

Научное издание

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И НАУКОЕМКИЕ
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНО-
ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

*Труды IV Всероссийской научно-практической конференции
с международным участием*

12–15 апреля 2016 г.

Часть 1

Под общей редакцией

д.т.н., проф. В.П. Цымбала,
д.т.н., проф. Т.В. Киселевой

Техническое редактирование и компьютерная верстка В.И. Кожемяченко

Напечатано в полном соответствии с авторским оригиналом

Подписано в печать 22.03.2016 г.

Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 25.66. Уч.-изд. л. 27.26. Тираж 300 экз. Заказ 290.

Сибирский государственный индустриальный университет
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.
Издательский центр СибГИУ