

ЗАРОЖДЕНИЕ И РАЗВИТИЕ НАУЧНОЙ ИДЕИ (на примере создания самоорганизующегося струйно-эмульсионного реактора)

Цымбал В.П.

Аннотация

В статье в историческом плане рассматривается зарождения и развитие идеи, которая привела к созданию нового металлургического процесса и агрегата, при проектировании которого впервые в мировой металлургии была сделана попытка использования некоторых принципов теории самоорганизации. Созданные при этом процесс и агрегат обладают очень существенными преимуществами перед известными.

Практически одновременно с восьмидесятилетием университета исполняется 50 лет моей деятельности в науке. В январе 1960 года я с семьей переехал из Казахстана, где я работал начальником смены мартеновского цеха, и начал учиться в очной аспирантуре на вновь организованной кафедре автоматизации металлургических процессов.

Думаю, что начать нужно со школы. Несмотря на то, что город Темир-Тау, в котором я учился, был небольшой, однако в школе были очень квалифицированные преподаватели. Благодаря им были получены глубокие и прочные знания, особенно по математике, физике и химии. Следует подчеркнуть, что школьная программа тех лет была четко нацелена на то, чтобы дать фундаментальные знания о природе. Не в пример нынешней лоскутной системе обучения, когда напичканы какие-то слабо связанные друг с другом предметы, а химия, физика стали необязательными. В результате даже лучшие студенты не знают, например, почему не промерзает насквозь вода в озерах, и вообще не могут физично мыслить, не могут ответить на вопрос: и каких веществ состоит земля, по которой они ходят.

Не меньшую благодарность я испытываю к институтским преподавателям. Особенно я бы отметил Владимира Христофоровича Соболева, который преподавал математику настолько интересно и образно, что (в это сейчас трудно поверить) студенты из других потоков добровольно приходили, чтобы послушать его лекции.

Большую роль в моем становлении инженера (именно думающего инженера) сыграл Евгений Яковлевич Зарвин, заведующий кафедрой металлургии стали, который читал лекции, раскладывая буквально по полочкам все понятия. А его крылатая фраза «Сталеплавильщики – сердце завода» заставляла гордиться этой специальностью.

Первым моим шагом уже как ученого, я обязан, конечно, Петру Модестовичу Масловскому. Он руководил аспирантами ненавязчиво, но будучи широко образованным и интеллигентным человеком (интеллигентом старой волны) он мог направить в нужную сторону. По его совету я начал заниматься математическим моделированием процессов обезуглероживания в мартеновской печи. Эта тема была мне близка еще и потому, что работая начальником смены, я во время выпуска плавок занимался подбором рационального содержания марганца в стали при сифонной разливке мелких слитков (36 слитков на поддоне). Очень часто на этих слитках получалась большая головная обрезь (нарастал своеобразная «капуста») и начальникам смен соответственно обрезалась премия. Я заметил, что если удавалась попасть в содержание марганца порядка 0,25-0,30% в кипящей стали, то после разливки слитки очень красиво кипели мелким пузырем, по периферии головной части слитка постепенно намерзал ровный рант и слиток застывал ровной поверхностью. В данном случае исследование имело чисто утилитарный смысл - спастись от обрезки премии главным инженером. Но, тем не менее, определенный интерес к исследовательской работе при этом проявлялся. Может быть, это и явилось толчком для моего решения поступить в аспирантуру, несмотря на то, что следующей ступенью карьерного роста предполагалась должность заместителя начальника цеха.

Важным моментом первых научных успехов явился и тот факт, что на вновь организованной кафедре автоматизации были приобретены, только что начавшие выпускаться в стране в 1959 году аналоговые вычислительные машины (МН-7, ИПТ-5 и др.), цифровые ЭВМ в то время были очень слабыми, решать динамические задачи они не могли. Благодаря тому, что мы смогли оперативно покупать вновь появляющиеся АВМ, наш только что начавший зарождаться научный коллектив (В.Н.Буинцев, А.Ф.Саун и др.) оказался на передовых позициях в проблеме математического моделирования металлургических процессов.

После такого введения мемуарного плана, **вернемся к истокам зарождения идей самораскипания и самоорганизации.** Мне, по-видимому, повезло, что во время обучения в аспирантуре привелось участвовать в опытах Мирона Яковлевича Меджибожского по продувке мартеновской ванны сжатым воздухом. Зрелище самораскипающейся мартеновской ванны меня очень впечатлило и даже, можно сказать, заорожило на всю жизнь. Именно М.Я. Меджибожский одним из первых сделал предположение о возможности саморегулирования мартеновской ванны. Эти его идеи я продолжил сначала в кандидатской, а потом и в докторской диссертации. Мы их воплотили в жизнь благодаря тому, что нашим коллективом (В.Н.Буинцев, А.Г.Падалко, А.Ф.Саун, Е.Ф.Хорошавин – работник ЦЛАМ КМК и др.) были созданы простые аналоговые вычислительные устройства для непрерывного определения избытка воздуха в газовой фазе печи над теоретически необходимым для сжигания топлива.

Разработка оптимизированных тепловых инструкций к этим вычислительным устройствам и обучение персонала на созданном несколько позже тренажере сталевар позволили получить большой экономический эффект от 10 до 20 тысяч тонн топливного мазута в год. Это было достигнуто практически без затрат (если не считать небольших затрат на простые вычислительные устройства). При этом на 10-15% был снижен расход условного топлива и на 12% расход руды. Это было достигнуто за счет использования эффекта раскипания ванны, т.е. за счет поглощения ванной горячего избыточного кислорода из газовой фазы печи. Это был первый впечатляющий эффект самоорганизации. Причем он был получен в 70-75 годах, то есть еще до появления основополагающих трудов по теории самоорганизации.

В 1981 году в серии «Математика, кибернетика» вышла обзорная брошюра С.П. Курдюмова и Г.Г. Малинецкого «Синергетика – теория самоорганизации» [1]. Для меня это стало приятным сюрпризом. Потому что своей двадцатилетней предыдущей работой я был подготовлен к восприятию идей этой теории. Дело в том, что за время двадцатилетнего опыта математического моделирования и попыток применения моделей для управления, мы убедились, что управлять такими сложными термодинамическими объектами по заранее заданным траекториям (как, например, движением самолета или ракеты) невозможно. И в этом нас убедили уже первые шаги изучения синергетики, когда мы узнали, что такие сложные объекты как сталеплавильная ванна (по существу, заимствованные у природы) не могут управляться (как объекты механической природы) начальными условиями, и даже при управлении граничными условиями они могут выходить из подчинения.

Как было упомянуто выше, мы уже имели положительный опыт использования явления самораскипания. Возникла мысль попытаться создать новый металлургический процесс с использованием принципов теории самоорганизации.

Прежде чем перейти к последовательному изложению этого вопроса, **необходимо остановиться на роли теории самоорганизации** (синергетики). Нам иногда задают вопрос такого плана: «Вы создали интересный процесс, используя какие-то физические эффекты и удачные конструктивные решения, но причем здесь синергетика»? Должен сказать, что в этих решениях роль именно синергетической философии очень существенная. По выражению известного американского философа Олвина Тоффлера [2] синергетика в настоящее время становится важным разделом философии, интегрирующим представления целого ряда наук.

Восприятие идей этой теории позволило нам как-то раскрепостить мышление, уйти от наработанных догм, присущих традиционной металлургии, в которой с середины 19-го века преобладает экстенсивный подход. Стремление к гигантизму агрегатов завело эту металлургию в тупик. В этих условиях синергетическое мышление позволило найти ряд новых решений.

Далее я попытаюсь последовательно изложить, как развивалась идея создания нового металлургического процесса. После изучения первых книг И.Пригожина [3], Г.Хакена [4], а также книги А.Т. Филиппова «Многоликий солитон» [5], первой возникла идея формировать и использовать солитоны для интенсификации массопереноса. Конечно, это первое решение было очень примитивным (рисунок 1), но я решил его показать а том

виде, как оно было нарисовано, чтобы четче пояснить дальнейшую эволюцию идеи.

Здесь была сделана попытка реализовать в первом агрегате важнейший принцип синергетики и неравновесной термодинамики – существенное отклонение от термодинамического равновесия за счет перегрева и переокисления расплава, а также осуществить периодическое выталкивание через

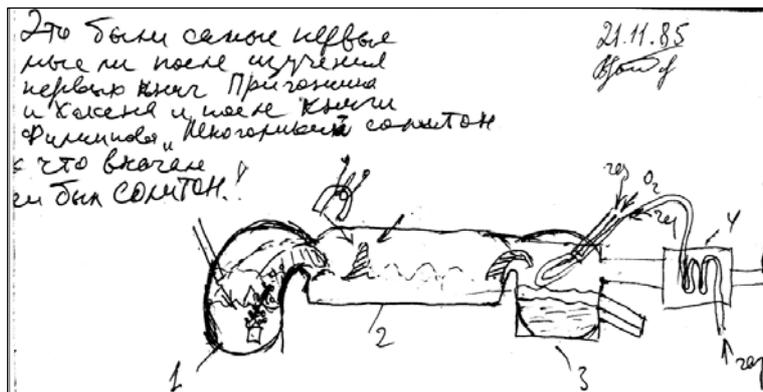


Рисунок 1- Самый первый примитивный замысел

узкий канал порций расплава, которые формировали бы во втором агрегате уединенные волны (сейчас это решение выглядит примитивно), ну а третий агрегат должен был играть роль агрегата доводки.

Скоро стало понятно, что это решение трудно осуществимо. Дальше начала выкристаллизовываться мысль: первый агрегат должен быть шарообразным, то есть иметь наименьшее отношение площади поверхности к объему. В таком агрегате проще обеспечить прочность при повышении давления, что необходимо для увеличения степени отклонения от термодинамического равновесия. И второе важное решение – в первом агрегате должен быть создан стабильный режим поддержания газшлакометаллической эмульсии, что в сочетании с повышенным давлением позволит создать вынужденное истечение эмульсии или газозвеси из первого агрегата. Один из промежуточных эскизов этих решений представлен на рисунке 2.

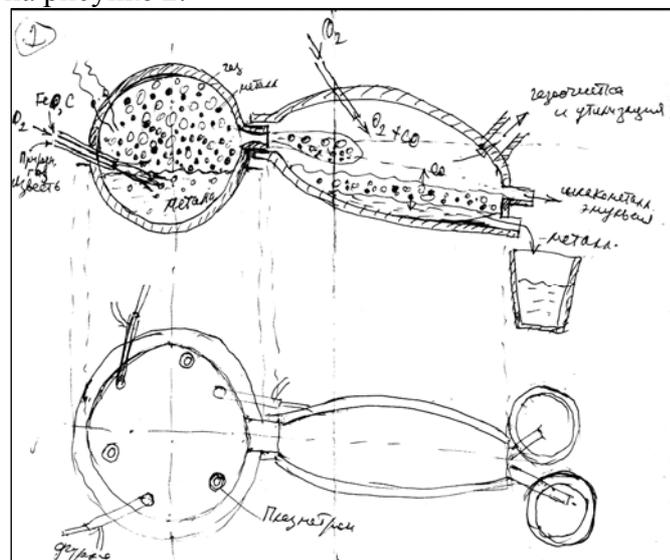


Рисунок 2 – Второй вариант решений

На рисунке 3 представлен еще один вариант решений, который уже в какой-то мере напоминает конструкцию установки, реализованной позже в виде опытного агрегата на Запсибе. Здесь есть даже опережающее решение в виде встречных потоков газшлакометаллической эмульсии во втором реакторе для погашения их кинетической энергии с целью защиты стен реактора, а также уменьшения запыленности отходящих газов. Второй реактор здесь пока еще не заполнен доверху эмульсией (пока еще не додумались). А шлак отбирается пока недалеко от поверхности металла.

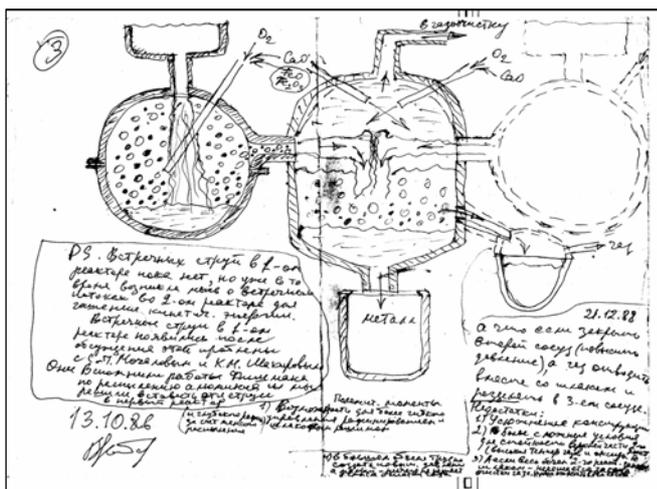


Рисунок 3 – Третий вариант решений и мысли о дальнейших шагах

Встречные струи в первом реакторе появились несколько позже, после обсуждения моей задумки создать новый процесс и агрегат в начавшемся постепенно формироваться творческом коллективе, в котором первыми были привлечены профессор К.М.Шакиров – заведующий кафедрой физической химии и молодой кандидат технических наук С.П.Мочалов, защитивший незадолго до этого кандидатскую диссертацию под нашим совместным руководством с К.М.Шакировым.

Здесь мне хочется сделать своеобразное отступление. Шел 1986 год – самое начало периода Горбачевской перестройки и гласности, период надежд на положительные изменения в Государстве. Был некоторый всплеск оптимизма, который возможно как-то подтолкнул меня на такой, скажем, нахальный замах: попытаться создать новый металлургический процесс и агрегат. Но, конечно, было понятно, что решить такую задачу в одиночку невозможно, и я начал привлекать сторонников сначала в своем ближайшем окружении, а затем среди проектировщиков (в то время еще существовавшего Сибгипромеза) и среди производственников Запсиба.

Так, например, контактируя с начальником сталеплавильного отдела Гипромеза А.И.Тороповым, и его директором Н.И.Михеевым я узнал, что прорабатывается проект создания Восточно-Сибирского металлургического завода. В рамках этих проектных исследований они приняли решения за счет своих внутренних средств сделать эскизный проект предложенного нами нового металлургического процесса и агрегата. В течение нескольких месяцев в 1989-90 годах под руководством Н.И.Михеева в Гипромезе собирались еженедельные оперативные совещания, и в результате первый эскизный проект агрегата был создан, что, конечно, явилось хорошей основой для его дальнейшего продвижения. Своими задумками я поделился с директором Запсиба Борисом Александровичем Кустовым и с главным инженером Рафиком Сабировичем Айзатуловым, которые, не будучи формальными хозяевами комбината, на самом деле могли решать и решали любой сложности вопросы, как организационного так и финансового плана. Они действительно обладали чувством нового, и при них Запсиб являлся полигоном для реализации новых технологий. Я рассказал Б.А.Кустову, что задуман процесс на новой теоретической основе, что он существенно отличается от известных процессов и, что непривычно для металлургов, находится под давлением (для начала порядка 3-5 атмосфер). В качестве одного из главных преимуществ задумки представлялась возможность переработки без окомкования пылевидных отходов (шламов газоочисток, омазученной окалины, графита, пылевидной извести и т.д.). Взяв время подумать, он уже во время второй нашей встречи сказал: «Давай будем делать твою «бомбу». А если вы сможете перерабатывать хотя бы 25% шлама и окалины от веса чугуна, я вам памятник поставлю на заводе». Создание агрегата и процесс для переработки пылевидных материалов и стало нашей главной целью. Тогда мы еще не мечтали, что позже

Несколько позже, после ряда обсуждений в творческом коллективе, высота второго (колонного) реактора была существенно увеличена, струя из первого реактора во второй стала подаваться по газодинамически запираемому каналу снизу (под весь столб эмульсии). А шлаковую летку подняли почти под купол второго реактора, где газосодержание эмульсии максимальное, а содержание оксидов железа в шлаке минимальное.

сможем создать процесс для прямой переработки 100% металлосодержащего сырья (без жидкого чугуна).

В.А.Кустов и Р.С.Айзатулов, безусловно, сыграли решающую роль в создании крупномасштабной опытной установки, которую удалось построить во втором конверторном цехе на месте резервной установки для перелива чугуна. С их помощью была создана творческая группа специалистов-технологов и проектировщиков под руководством начальника сталеплавильного производства Валерия Васильевича Соколова, которая просуществовала десять лет с 1991 по 2001 годы. Мы еженедельно собирались у В.В.Соколова по четвергам, а перед проведением очередного эксперимента еще чаще. Благодаря существованию этой группы, плюс административный ресурс, создавалась и совершенствовалась установка. К деятельности этой группы мы еще будем возвращаться.

Теперь же вернемся к вопросу: с помощью, каких конкретных физических и технических решений удалось реализовать несколько важнейших принципов теории самоорганизации?

Вернемся к упомянутой выше проблеме создания газшлакометаллической эмульсии, что должно было, во-первых резко увеличить скорость гетерогенных химических реакций, во-вторых облегчить задачу реализации значительного отклонения процессов от термодинамического равновесия. Во время одного из обсуждений этой проблемы К.М.Шакиров и С.П.Мочалов предложили распылять падающую сверху в шарообразный реактор шихту встречными струями кислорода, вспомнив опыты (ныне покойного) Б.Д. Фишмана по диспергированию встречными струями жидкого алюминия для получения мелких гранул. Использование этого эффекта оказалось плодотворным, но потребовало серьезных исследований.

В месте встречи струй их кинетическая энергия превращается в потенциальную энергию и образуется упругий диск, по краям которого как бы выплескивается энергия. Во время низкотемпературного моделирования этого эффекта в цехе изложниц в 1989 году мы могли даже потрогать этот диск рукой, при продувке холодного азота через встречные сопла (рисунок 4). Здесь же нам удалось организовать (опять же благодаря поддержке Б.А. Кустова) довольно сложный и рискованный эксперимент по продувке жидкого чугуна встречными струями (рисунок 5). При попадании струи чугуна на образующийся при встречных струях диск происходит интенсивное диспергирование чугуна. Изменяя давление азота в сети, мы нашли режимы продувки: когда струя прорывается через этот диск и когда импульс встречных струй становится больше импульса струи жидкого чугуна и он за счет взаимодействия с упругим диском дисперсируется, что и необходимо для создания в первом реакторе больших поверхностей взаимодействия реагентов.

Успех этого эксперимента вселил в нас определенную уверенность и, главное, позволил выбрать рациональные диаметры сопел и расстояния между ними для

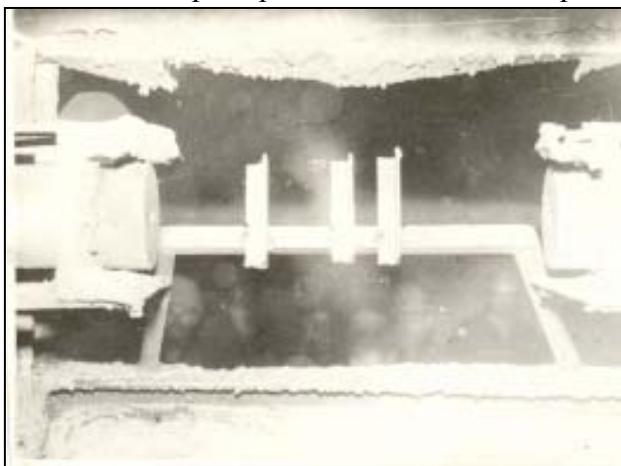
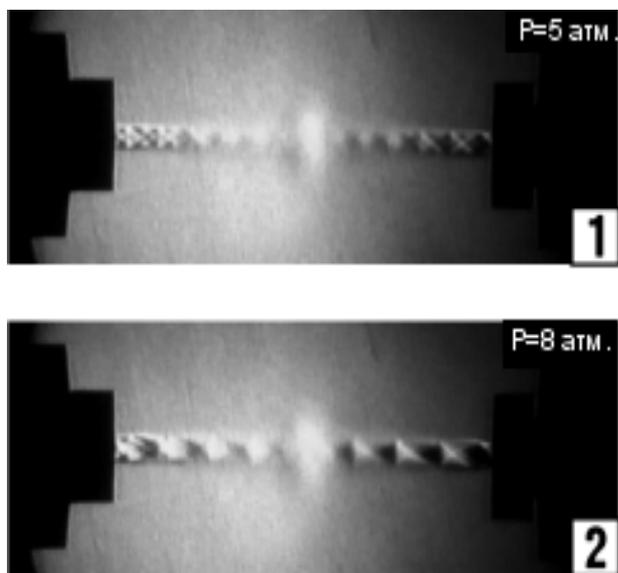


Рисунок 4 – Встречные струи азота



Рисунок 5 – Обдув чугуна встречными струями

проектируемого шарообразного реактора. Несколько позже, уже после первых экспериментов на опытной установке, исследования взаимодействия встречных струй были продолжены на аппарате Теплера (рисунок 6). В этих исследованиях участвовали С.П.Мочалов, Е.И.Ливерц, а также сотрудники Института теоретической и прикладной механики СО РАН г.Новосибирск В.П.Фомичев, С.С.Кацнельсон. Целью этих экспериментов было исследование точности поддержания давления перед каждым из встречных сопел, поскольку это могло быть причиной смещения диска от центра, а, следовательно, и прогара шарообразного реактора.



Остановимся еще на одном очень важном решении, которое позволило совместно с предыдущими решениями создать, так называемый, реактор-осциллятор, в котором оказалось возможным реализовать сразу несколько принципов теории самоорганизации (синергетики): большое отклонение от термодинамического равновесия, принцип наименьшего принуждения (Ле-Шателье-Брауна), принцип круговой подчиненности. Это в свою очередь позволило создавать и автоматически поддерживать неравновесный колебательный стационарный режим на любом (в пределах возможности агрегата) уровне.

Рисунок 6 - Вид взаимодействия струй

Для того, чтобы иметь возможность повышать давление в шарообразном реакторе, нужно было найти способ, как управлять истечением двухфазной среды (газовзвеси или эмульсии) из этого реактора. Были даже мысли (вытекающие из традиционного мышления) поставить в соединительном канале какую-то заслонку, защищенную высокоогнеупорным материалом, взятым, например, из космических технологий. Но, случайно, а может быть и неслучайно, было найдено очень простое и интересное решение.

Во время семинара, приглашенного в наш институт из Института теплофизики СО АН СССР, профессора И.Шрейбера, он на примере аварии на атомной электростанции под Киевом (это было незадолго перед Чернобыльской катастрофой) рассказал, что для того, чтобы при разрыве трубопроводов, подающих охлаждающую жидкость к тепловыделяющим элементам атомного реактора, эта жидкость не смогла быстро вытечь, через определенные промежутки по длине трубопроводов делаются сужения. При аварии за счет парообразования создается двухфазная среда, которая имеет критическую скорость истечения, зависящую от газосодержания смеси.

Поскольку до этого я долго размышлял над проблемой управления давлением в шарообразном реакторе, для меня это явилось приятным сюрпризом. Я понял, что это как раз то, что нам нужно, особенно, после того как изучил очень интересную и содержательную монографию В.Е. Накорякова, Б.Г. Покусаева, И.Р. Шрейбера “Волновая динамика газо- и парожидкостных сред” [6]. Использование этого эффекта позволило создать газодинамически запираемый канал, в котором скорость движения двухфазной среды может изменяться в зависимости от ее объемного газосодержания, примерно в 10 раз. В сочетании с ранее описанными решениями это позволило замкнуть задачу создания реактора-осциллятора, схема которого представлена на рисунке 7.

Внутренний механизм его функционирования осуществляется следующим образом.

Химические реакции протекают здесь на диспергированных встречными струями микрочастицах: каплях, пузырьках, твердых частичках (при подаче в реактор пылевидных отходов). Эти частицы играют роль микрореакторов, которые в ансамбле совокупностей создают в объеме реактора поле давлений, концентраций, температур, которое в свою очередь действует по обратной связи на процессы в каждом из микрореакторов. Таким образом, здесь конкретно реализуется принцип круговой подчиненности (и параметров порядка) – один из фундаментальных принципов синергетики (подробнее см. в [4,7,8]).

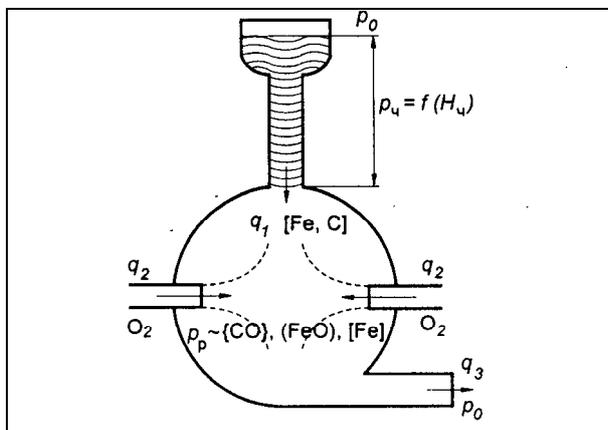


Рисунок 7 - Реактор-осциллятор: p_0 , p_p , $p_ч$ – соответственно давление атмосферное, в реакторе и столба шихты; q_1 , q_2 , q_3 – потоки шихты, кислорода и истекающей из реактора двухфазной среды

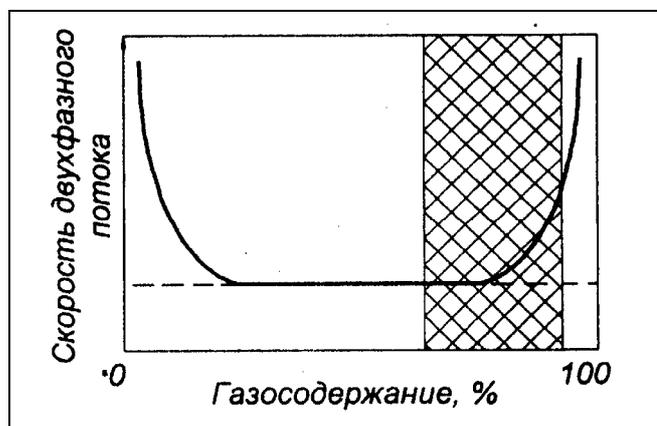


Рисунок 8 - Зависимость скорости двухфазного потока от газосодержания

Реализация важного принципа синергетики – значительного отклонения системы от состояния термодинамического равновесия – достигается за счет выбора площади сечения соединительного канала таким образом, чтобы скорость истечения двухфазного потока q_3 находилась в нелинейной области зависимости скорости этого потока от газосодержания

$$\alpha_{\Gamma} = \frac{V_{CO}}{V_{CO} + V_{KФ}}, \quad q_3 = VS_k = \begin{cases} f(P_p - P_0), \text{ при } V < V_{кр} \\ V_{кр} = f(\alpha_{\Gamma}), \text{ при } V > V_{кр} \end{cases}$$

Эта зависимость иллюстрируется рисунке 8 – заштрихованная область.

В течении двух лет (1987 – 88 годов) было составлено весьма обстоятельное описание к патентной заявке (более 25 страниц). Большой вклад при составлении заявки внесли С.П. Мочалов и К.М. Шакиров. Эта заявка была принята патентным ведомством практически без корректировок с приоритетом от 24.11.88 г. В 1993 году на основе международной заявки PCT/RV/00325 этот процесс был запатентован в основных металлопроизводящих странах: США, Япония, Республика Корея, страны Европы. Кроме обычных для изобретения признаков (в виде последовательности операций и добавлений элементов в конструкцию агрегата) в описание к этому патенту была включена совокупность из девяти физических эффектов, среди которых можно выделить:

- использование свойств саморегулирования реакций прямого и косвенного окисления углерода в системе под давлением;
- создание в первом реакторе условий для значительного отклонения системы гетерогенных реакций от термодинамического равновесия;
- создание в первом реакторе повышенного пульсирующего давления путем использования эффекта “самозапираания” соединительного канала в режиме критического истечения двухфазной среды;
- создание высоких удельных поверхностей контакта фаз за счет распыления потока шихты встречными струями;

- использование высокого слоя шлаковой пены во втором реакторе и соединительных каналах в качестве “мокрой” газоочистки.

Реализация совокупности этих эффектов позволила создать своеобразный металлургический реактор – осциллятор, который обладает свойствами универсальности, может быть использован не только в черной и цветной металлургии, но и в других технологических процессах, где продукты реакции могут представлять смесь (эмульсию или газозвесь) газообразной и конденсированной или твердой фазы.

После того, как концептуально были определены, описанные выше задачи и возможности использования идей и принципов теории самоорганизации, следующей важнейшей ступенью реализации этой схемы явилась необходимость создания взаимосвязанной системы математических моделей разных уровней, описывающих: материальные и энергетические потоки через агрегат в целом; процессы, протекающие внутри отдельных реакторов и на поверхностях раздела фаз; процессы в микрореакторах (микрочастицах). Некоторый задел мы имели по опыту моделирования мартеновской и конвертерной плавки, но здесь встала более сложная задача. Нужно было создавать математические модели для еще не существующих процессов, тем более что в создаваемом процессе, мы ушли от пространственно разделенных металла и шлака в область газозвеси и эмульсии, тем самым соприкоснувшись с задачами, решаемыми в ракетной отрасли.

Эта сложная и трудоемкая задача решалась в докторской диссертации С.П. Мочалова и в выполненных под его руководством кандидатских диссертациях нескольких молодых выпускников нашей кафедры: В.И. Кожемяченко, С.Ю. Красноперова, И.А. Рыбенко, Л.А. Ермаковой, а также в докторской диссертации С.Н. Калашникова.

В докторской диссертации С.П. Мочалова, в частности решена важная задача: конкретизация математической модели течения двухфазной среды в канале для высокотемпературных условий, что позволило оценивать критическую скорость истечения в соединительном канале реактора-осциллятора.

В диссертации В.И. Кожемяченко разработана инструментальная система, позволяющая рассчитывать технологические параметры нового непрерывного металлургического процесса во взаимосвязи с основными конструктивными параметрами агрегата, что создает основу для автоматизации проектирования вновь создаваемых агрегатов.

С.Н. Калашников совместно с С.Ю. Красноперовым создали на основе развития Excel–приложений очень удобную для пользователей инструментальную систему моделирования краевых задач тепло- и массообмена по физической постановке близкую к аналоговой. С.Ю. Красноперов, А.Г. Падалко и Е.И. Ливерц совместно со специалистами Запсиба создали систему автоматизации эксперимента с наглядным отображением информации для опытной установки.

Автоматизацию расчетов для широкого круга задач на основе известной базы термодинамических данных “Астра”, разработанной в МВТУ, одной из первых на кафедре освоила И.А. Рыбенко. Эта программная система с участием В.Ю. Климова и В.И. Кожемяченко под руководство С.П. Мочалова была очень существенно доработана: дополнена базой данных о тепловых эффектах наиболее распространенных в металлургии химических реакций. С помощью этой программной системы, начиная с 1991 года, И.А. Рыбенко были просчитаны сотни вариантов технологических режимов различных технологий для создаваемого металлургического процесса и агрегата. Следует отметить также работы Ермаковой Л.А., основное содержание ее диссертации связано с моделированием массообменных процессов в дисперсных частицах.

Таким образом, для решения широкого круга вопросов, связанных с разработкой и оптимизацией нового металлургического процесса и агрегата понадобилось создать несколько крупных пакета прикладных программ: тепло- и массообмен, газодинамика двухфазных потоков (скорости, давления) во взаимосвязи с параметрами элементов агрегата, расчеты равновесий и оптимизация режимов статики. Добавим сюда упомянутую выше систему математических моделей самого процесса, а также компьютерную систему

отображения и управления. Это дает основания утверждать, что разрабатываемая технология относится к разряду наукоемких, информационных.

Неслучайно, что это нашло отражение в очень малых удельных объемах новых агрегатов (в 10-15 раз меньше, чем в традиционной технологической схеме), низкой энергоемкости (в 1,5 раза) и было с интересом воспринято на ряде международных конгрессов, особенно на конгрессах R'97 и R'99 Recovery. Recycling. Re-integration в Женеве [9], где стенд Запсибметкомбината с видео-демонстрацией нового процесса посетили все руководители секций и семинаров, имеющих отношение к термопроцессам в металлургии. А на заключительном пленарном заседании конгресса его председатель Баррадж сказал, что русские (это мы) привезли металлургический процесс третьего тысячелетия.

Параллельно с математическим моделированием велись также работы по физическому моделированию (Е.И. Ливерц, А.Г. Падалко, И. Коколевский), что давало возможность проверять адекватность концептуальных и математических моделей, хотя бы по некоторым параметрам, и переносить результаты для проверки на опытной установке. Следует также отметить направление, связанное с исследованием химсостава и свойств полученных на опытной установке материалов (металла и шлака) до и после их расплавления и выдержки в индукционной печи (Ливерц Е.И., Лубяной Д.А.), которая рассматривается нами в качестве одного из вариантов устройства для доводки металла.

Еще раз хотелось бы вернуться к роли творческих групп проектировщиков и производственников. Сформировавшаяся в процессе работы над новым агрегатом группа проектировщиков Сибгипромеза под руководством А.А. Рыбушкина в составе: Суздальцева Е.В., Фадеева Ю.П., Дьякова М.И., Омельченко Е.Д., Тигаева С.В. и др., несколько позже, в связи с трудностями, которые испытывали проектные организации, была приглашена директором комбината Б.А. Кустовым на Запсиб в качестве отдельного подразделения: Инженерного центра производства новых технологий. Таким образом, появилась возможность оперативной коррекции различных конструкторских и проектных решений.

Важнейшей составляющей процесса внедрения стало постепенное формирование с помощью руководства комбината творческой группы технологов–производственников на основе ведущих специалистов сталеплавильного производства, а также ряда отделов и лабораторий завода. Руководителями этого коллектива явились главный инженер (а позднее генеральный директор) комбината Р.С. Айзатулов и начальник сталеплавильного производства В.В. Соколов. Начиная с 1991 года эта группа практически еженедельно собиралась на совещаниях, где принимались решения о дальнейших шагах совершенствования опытной установки.

Большую роль в практической реализации конструктивных и технологических решений играл начальник техотдела сталеплавильного производства С.В. Щипанов, а его подчиненная Т.П. Щапова за эти годы создала несколько томов протоколов, через которые ведется контроль принимаемых решений, и архив рабочей документации. По решению руководства комбината (Б.А. Кустова и Р.С. Айзатулова) была создана бригада по обслуживанию установки во главе с В.П. Тютюльниковым в составе: Гилев В.И., Семушкин В.В., Ватолин Н.А., Воронов В.В. и др.

Роль этой бригады и особенно начальника установки В.П. Тютюльникова трудно переоценить. Этому небольшому коллективу пришлось участвовать в сложнейших экспериментах в условиях весьма скоротечного процесса и многое делать впервые в металлургии. Благодаря их большому производственному опыту удавалось в условиях ограниченных возможностей находить относительно простые решения в процессе постепенного совершенствования элементов конструкции установки.

Реализация, совершенствование и эксплуатация установки в условиях действующего цеха была бы невозможна без непосредственного участия специалистов производства: по механическому оборудованию – Григорьев В.А. (в начальный период строительства установки эти обязанности выполнил Щапов С.М.), электрооборудованию Гигенов В.А., Шаталов А., Конев Ю.В., энергообеспечению Сопов Н.И., Пастухов А.Б., Суетов В.Г.,

Горшков Е.Б., КИП и автоматике – Мельников А.Ф., Казаков В.В., АСУ и ВТ – Кузнецов В.В., Зудин И.В.

В составе творческой группы принимали активное участие представители теплотехнической лаборатории – Семахин В.В., Вяльшина Л.Е., ИЦ “Керамика” – Пресняков А.П., ЦЗЛ – Горбачев В.П., Бабенко Л.Д., Веремей Э.П., Демченко Е.М., Клепиков А.Г. и др., а также заводских отделов главного механика Гайдук В.В., электрика – Блинов В.А., метролога – Алимов А.И., нач. цеха КИП – Матвеев Н.И., АСУ ВТ – Лачков В.А., оборудования – Волховицкий В.А., отдела снабжения – Старосельцев А.Я., технического отдела – Маслаков А.А., Буймов В.А., литейного цеха – Чичков В.И., цеха изложниц – Макаров Э.С., производственных технологий – Селезнев Ю.А. Некоторые результаты совместной работы по созданию и совершенствованию установки и технологии представлены в трудах научно-практических конференций.

Такое сотрудничество ученых, проектировщиков и производителей принесло достаточно хорошие плоды. Несмотря на ограниченные возможности, удалось уже в конце декабря 1992 года выйти на полностью автоматизированный и компьютеризированный эксперимент с первым реактором (пока без второго реактора - отстойника). Этот эксперимент напоминал запуск ракеты (рисунок 9), поскольку из первого реактора вылетала двухфазная струя с объемным газосодержанием порядка 98-100% со взвешенными окисленными частицами металла и шлака. Этот уникальный эксперимент позволил подтвердить правильность основных концептуальных представлений о возможности создания давления в реакторе за счет критической скорости истечения двухфазного потока (был “подвешен” столб чугуна в футерованном литнике высотой более четырех метров). Получены данные о скорости истечения двухфазной струи, ценнейшие данные о гранулометрическом и химическом составе вылетающих частиц и т.д.



В 1993 году удалось выйти на эксперименты с присоединенным к первому реактору упрощенным вариантом второго реактора (рафинирующего отстойника). В одном из этих экспериментов был получен металл с весьма низким содержанием углерода (0,02-0,03%) при содержании оксидов железа в шлаке 9-10%.

В 1994-95 годах в связи с остротой марганцевой проблемы были сделаны попытки прямого восстановления марганца из пылевидного концентрата путем его добавления к струе чугуна в первом реакторе.

Рисунок 9 – Газошлакометаллическая струя из первого реактора

Было получено содержание марганца в металле порядка 8% (близко к стали Гадфильда). В 1995 была сделана попытка прямого получения марганца из пылевидных отходов (без участия чугуна) комбинированным карбо-силико- алюмотермическим способом. При этом получен нестандартный силико-марганец (36% Si, 29% Mn).

После этого появилась надежда, что таким же путем можно выйти на прямое получение железа из пылевидных отходов (омазученной окалины, шламов газоочисток т.д.). Путем термодинамических расчетов удалось получить состав шихты и продувочный режим, открывающий возможность поддержания режима автогенного процесса. Таким образом,

была подтверждена возможность прямого получения железа и других сплавов из пылевидных материалов, минуя стадию окомкования. С 1996 года в качестве основной отрабатывается технология переработки окалины и конвертерных шламов, эту технологию с учетом полученных экспериментальных результатов можно считать достаточно реальной.

В 2000 году были проведены эксперименты по переработке титано-магнетитовых концентратов, что может иметь большое значение для черной, цветной металлургии и оборонной промышленности, так как этот агрегат открывает возможность безотходной переработки таких руд с получением железа и титанистого шлака – сырья для производства титана.

За период с декабря 1992 года по ноябрь 2001 года на опытной установке было проведено 40 экспериментов, каждый из которых являлся важной ступенью для принятия решений по дальнейшему совершенствованию конструкции агрегата и технологии процесса.

Эти работы выполнялись по хоздоговорам между Запсибметкомбинатом и Научно-инновационной фирмой “Синергетис”, которая была организована нашим творческим коллективом в 1992 году и сыграла определенную положительную роль в решении этой задачи, поскольку открылась возможность гибкого расходования заработанных средств.

По окончании этих экспериментов стало ясно, что для дальнейшего продвижения процесса необходимо создание пилотного образца промышленного исполнения. В начале 2001 управляющим директором Запсиба А.Г. Смоляниновым и исполнительным директором Р.С. Айзатуловым было принято решение о создании совместно с машиностроительным заводом “Сибэлектротерм” пилотного образца агрегата СЭР, который планировалось установить в цехе изложниц для переработки пылевидных отходов (шламов и окалины) с машиностроительным заводом.

Опытная же установка на Запсибе, к сожалению, покрылась толстым слоем пыли, но свою большую роль она сыграла, позволив подтвердить реальность основных замыслов по созданию нового процесса и возможности реализации новых технологий.

В последующие годы в рамках научной школы продолжались фундаментальные исследования по разработке моделей синергетических процессов и синергетической концепции создания новых металлургических процессов и агрегатов.

В данном агрегате реализована идея своеобразного внутреннего пневмотранспорта промежуточных продуктов из реактора в реактор: из реакционной камеры в рафинирующий отстойник, а затем в шлакоприемник, котел-утилизатор и другие устройства для утилизации вторичных энергоресурсов. Выведение процессов в газофазную область в сочетании с повышенным давлением и замкнутостью процесса от атмосферы позволили полностью использовать работу расширения реакционных газов. Это привело к значительному сокращению удельного объема агрегата и капитальных затрат, позволило избавиться от необходимости использования ряда промежуточных механических устройств (например, шнековых питателей, как в агрегате Корекс), дымососов и т.д. При этом резко снижается энергоемкость

Агрегат обладает достаточной универсальностью, может использоваться в черной и цветной металлургии. Вместо последовательной схемы из крупномасштабных агрегатов традиционной металлургии на основе агрегата типа СЭР создаются технологические схемы из нескольких параллельно работающих модулей, не требующих тяжелого кранового и сменного оборудования.

При разработке нового процесса и агрегата впервые удалось реализовать ряд идей и принципов теории самоорганизации (синергетики), что в сочетании с использованием ряда физических эффектов (диспергация на встречных струях, газодинамическое запираание каналов) позволило, наряду с отмеченными выше преимуществами, создать, по существу, универсальный агрегат – **«самоорганизующийся струйно-эмульсионный реактор-осциллятор»**, пригодный для эффективной реализации целого ряда новых технологий, которые и предлагается довести до промышленной реализации при организации планируемого полигона:

1. Прямое восстановление пылевидных руд и отходов (шламов, окалины, хвостов обогащения и т.п.) с получением, например, шихтовой заготовки.

Коротко это представляется следующим образом (рис. 10). В реакторе – осцилляторе на встречных струях кислорода и природного газа осуществляется диспергация шихты и частичное сжигание топлива. Приготовленная в этом реакторе газовзвесь с объемным газосодержанием порядка 0,99 через газодинамически запираемый канал подается в нижнюю часть колонного реактора под высокий слой газшлаковой эмульсии, где происходит преимущественное восстановление оксидов железа. К нижней части колонного реактора пристыковывается индукционно подогреваемый копильник, в котором накапливается восстановленное из оксидов железа и другие металлы, а обезжелезненный сильно вспененный шлак выталкивается под давлением из верхней части колонного реактора в гранулятор и может использоваться как сырье для производства цемента, в качестве адсорбента или мало теплопроводного заполнителя и т.д. Если ставится задача получения шихтовой заготовки, то металл из копильника подается на конвейерную разливочную машину.

2. Переработка относительно бедных (20-30% Mn) пылевидных железомарганцевых руд (без окомковывания).

При этом можно получать прямым путем из пылевидной железо-марганцевой руды ферромарганец, высокомарганцовистые стали (типа стали Гадфильда), в том числе, по-видимому, безникелевую нержавейку, а также сплавы типа *Fe-Mn-Al*.

Можно создать абсолютно изолированный от окружающей среды, экологически чистый агрегат, в котором вместо дыма, получается энергетический газ. Например, для прямого восстановления марганца нужно иметь в атмосфере колонного реактора около 90% *CO*. Такой газ, кроме энергетической ценности, достаточно легко превратить в синтез-газ путем пропускания через решетку с раскаленным коксом. При этом одновременно осуществляется химическая регенерация физического тепла отходящих газов и получается еще более ценный газ, пригодный для переработки, например, в синтетическое моторное топливо.

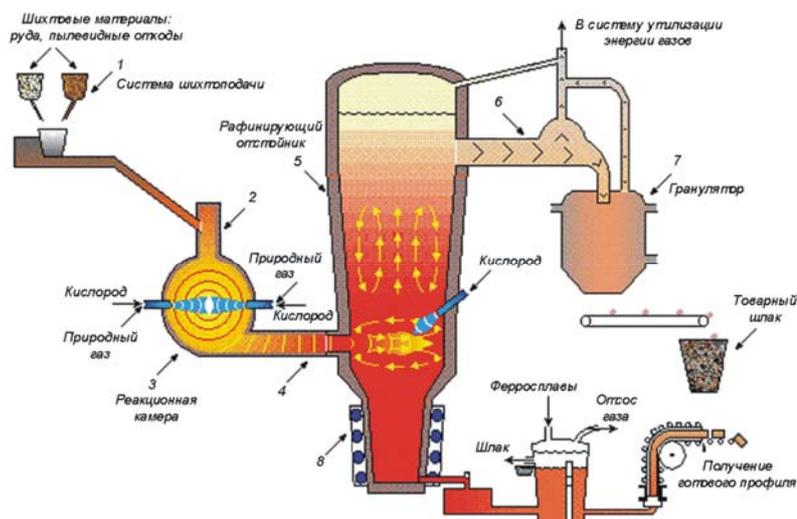


Рисунок 10 - Технологическая схема агрегата СЭР

3. Безотходная переработка титаномагнетитовых руд и концентратов с получением железа, легированного рядом элементов (Mn, V и др.), и высокотитанистого шлака (порядка 46-48 % TiO_2), который в горячем состоянии может быть восстановлен кремнием и алюминием до ферротитана или выдаваться в гранулированном виде как дешевое (отход производства стали) и удобное для переработки сырье для титановой промышленности. Мы имеем патент на эту технологию.

4. Переработка бытового мусора. Наиболее эффективно эта задача решается в комплексе с описанной выше технологией путем подачи брикетированного мусора в колонный реактор, в слой шлаковой эмульсии, состоящей из оксидов железа, кремния, кальция и др. При этом углерод и водород мусора играют роль восстановителей, отбирая кислород у оксидов железа, что позволяет вдвое уменьшить расход кислорода по сравнению с простым сжиганием мусора, например, в котельных агрегатах. Из-за полной замкнутости процесса обеспечивается его экологичность. Мусор сгорает внутри слоя пенистой газошлако-металлической эмульсии, при этом такие экологически вредные вещества как бенз-а-пирены разлагаются на более простые вещества.

5. Газификация и комплексная переработка пылеугольного топлива и хвостов обогащения. При этом в первом реакторе создается газовзвесь, а в колонном реакторе осуществляется эффективное сжигание и газификация пылевидного угля в шлаковом слое. Получаемый газ может использоваться как товарный или корректироваться до кондиционного состава синтез-газа, который может быть превращен в диметилвый эфир – экологически чистое дизельное топливо. Реальность такого превращения обсуждалась с Институтом нефтехимического синтеза РАН.

При сжигании 1-й тонны угля можно получить порядка 6 МДж физического тепла (товарная вода или пар), 1000 кубометров газа с теплосодержанием 15 МДж, 15-20 кг металла в виде ценной природнолегированной шихтовой заготовки и 200 кг обезжелезенного сильно вспененного шлака.

6. Создание малогабаритных (или даже мобильных) энергетических установок – мини-котельных с возможностью выработки горячей воды, газа, электрической энергии, сжатого воздуха для шахт, рудников и небольших рабочих поселков.

Возможно несколько вариантов использования вторичной энергии рассмотренного выше металлургического агрегата, который теперь, по существу, превращается в **энерго-металлургический агрегат** (рис. 11):

- котел – утилизатор, паровая турбина;
- котел – утилизатор, группа циклонов, газовая турбина, сушило сырья, утилизаторы низкопотенциальной энергии;
- реформер дымовых газов с получением синтез-газа и, возможно, моторного топлива.

В период после 2000 года продолжались работы по созданию математических моделей и программно-инструментальных систем для разработки новых металлургических технологий и учебного процесса. Разработан комплекс математических моделей и автоматизированная система проектирования гарнисажного охлаждения металлургических агрегатов, что позволяет одновременно решать задачи обеспечения стойкости агрегатов с утилизацией тепла и большой экономии огнеупоров.

Продолжалось патентование процесса и агрегата типа СЭР. В 2004 году получен патент на **«Способ получения металлов из рудных материалов и агрегатов для его осуществления»**, реализация которого позволит, например, создать безотходную технологию переработки титано-магнетитовых руд с одновременным получением железа и кондиционного сырья (титанистого шлака) для титановой промышленности. В 2009 году получен патент на **«Способ прямого восстановления металлов с получением синтез газа и агрегат для его осуществления»**. Реализация этого изобретения (рисунок 12) позволит полностью исключить выбросы газа из металлургического агрегата, превращая их в энергетический или синтез-газ с его последующей подачей в агрегат каталитического синтеза для превращения в экологически чистое моторное топливо, стоимость которого соизмерима со стоимостью получаемого металла [10].

Схема энерго-металлургического комплекса на основе агрегата типа СЭР

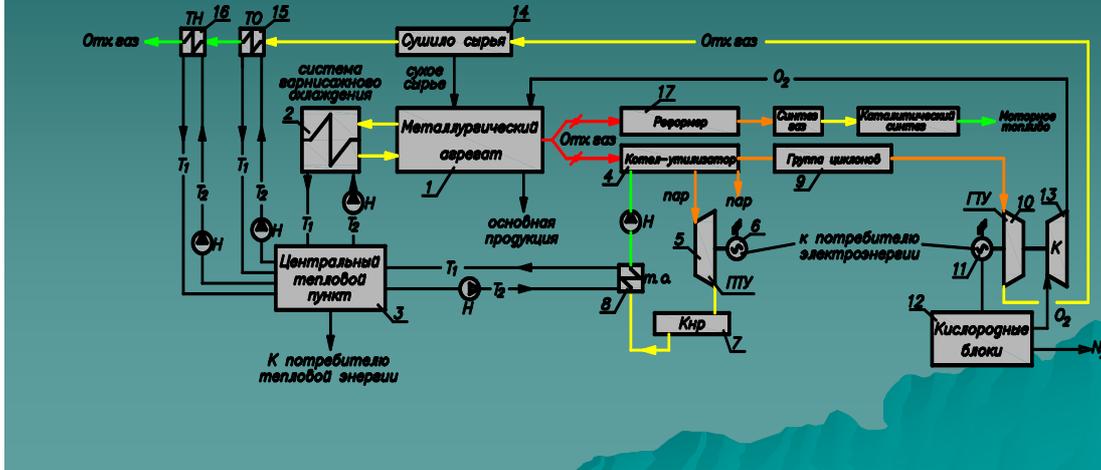


Рисунок 11 - Схема энерго-металлургического комплекса

Надеясь, что заинтересованный читатель за более подробными разъяснениями обратится к первоисточнику [10], здесь мы остановимся лишь на нескольких основных моментах. Газошлаковая эмульсия из рафинирующего отстойника 5 по каналу 11 выжимается под давлением в шлакоприемник 12, в который через канал 12 подается пар, который используется для осаждения и грануляции шлака, а затем через решетку 15 выжимается через слой коксика или угля в реформер газа 14 вступая в реакцию $C+H_2O=CO+H_2$, которая является эндотермической. Это позволяет осуществить химическая регенерация физического тепла дымовых газов, то есть снизить температуру продуктов горения и шлака с 1550-1600°C до 750-800°C. Одновременно с этим повышается энтальпия газа за счет обогащения его водородом и несколько увеличивается его объем. Таким образом продукты горения преобразуются в ценный энергетический или даже в синтез-газ.

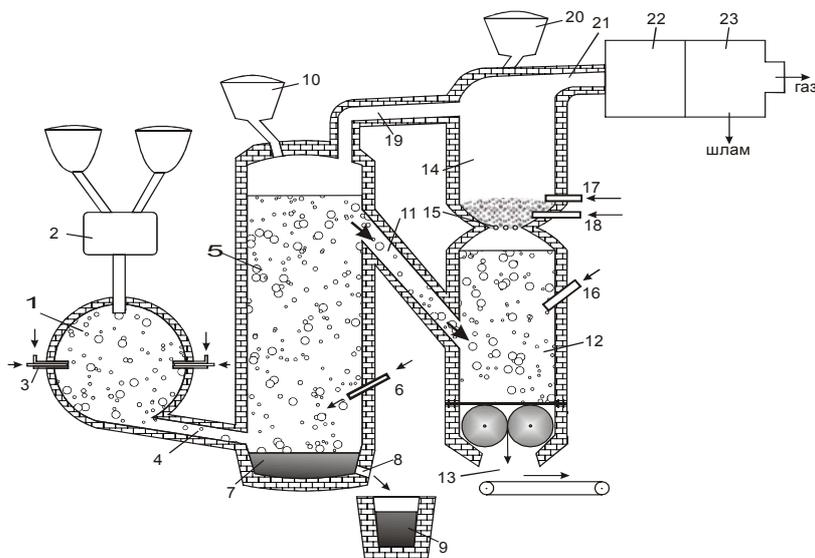


Рисунок 12 - Агрегат прямого восстановления железа с одновременным получением синтез-газа

В последние годы рамках научной школы продолжают фундаментальные исследования по разработке моделей синергетических процессов и синергетической концепции создания новых металлургических процессов и агрегатов. В 2004-2005 годах коллективом авторов: В.П. Цымбалом, С.П. Мочаловым, С.Н. Калашниковым выпущен трехтомник «Модели и механизмы самоорганизации в технике и технологиях», в котором наряду с обобщением и систематизацией известных работ, связанных с теорией самоорганизации и синергетикой, представлены и наши оригинальные результаты.

В настоящее время проводится информационная и рекламная компания по внедрению в производство разработанного коллективом научной школы нового металлургического процесса и агрегата типа «Самоорганизующийся струйно-эмульсионный реактор» (СЭР). В связи с нарастающими трудностями в традиционной металлургии в последнее время нарастает понимание необходимости существенного изменения ее научно-технического уровня и структуры. Это вселяет надежду на возможность реализации описанных разработок в ближайшем будущем. Появляется возможность включиться совместно с заводом «Сибэлектротерм» в программу государственно-частного партнерства с 50-ти процентным бюджетным финансированием. Это позволит создать пилотный образец технологического мини-модуля на основе агрегата СЭР промышленного исполнения, о чем мы давно мечтаем.

Литература

1. Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Синергетика – наука о самоорганизации, – М.: Знание, 1983. – 48 с. – (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Математика, кибернетика», № 6).
2. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой: Пер. с англ. / под общ. ред. В.И. Аршинова, Ю.Л. Климонтовича, Ю.В. Сачкова.- М.: Прогресс, 1986. – 432 с.
3. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. - М.: Мир, 1979. – 512 с.
4. Хакен Г. Синергетика. – М.: Мир, 1980. – 406 с.: ил.
5. Филиппов А.Т. Многоликий солитон. – М.: Наука, 1989. – 224 с.
6. Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р. Волоновая динамика газо- и парожидкостных сред. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 248 с.
7. Цымбал В.П. Введение в теорию самоорганизации. С примерами из металлургии : учебное пособие / В.П. Цымбал. – Изд. 2-е., стер. – Новокузнецк : СибГИУ, 2001. – 251 с.
8. Цымбал В.П., Мочалов С.П., Калашников С.Н. Модели и механизмы самоорганизации в технике и технологиях. В 3 ч. Ч. III. Примеры реализации идей и принципов синергетики: учеб. пособие / под ред. В.П. Цымбала ; СибГИУ. – Новокузнецк, 2005. - 264 с.
9. Tsymbal V.P., Mochalov S.P., R.S Aizatulov a.e. // Recovery. Recycling. Re-integration Collected papers of the R-97, R-99 International Congress. – Geneva. – Switzerland. – 1997, Vol. 1.- P. 168 – 172. 1999. Vol. 5. – P. 162 – 167.
10. Пат. 2272849 Россия С1. 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. - 2007144892/02; Заявлено 03.12.2007; Опубл. 27.10.2009, Бюл. № 30; Приоритет 03.12.2007.-12с.: ил.