

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Сибирский государственный индустриальный университет

*Посвящается 90-летию Сибирского
государственного индустриального университета*

**МЕТАЛЛУРГИЯ:
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО
«Металлургия – 2019»**

23 – 24 октября 2019 г.

*Труды
XXI Международной научно-практической конференции
Часть 2*

**Новокузнецк
2019**

УДК 669(06)+658.012.056(06)
М 540

Редакционная коллегия
академик РАН Л.А. Смирнов, д.т.н., профессор Е.В. Протопопов,
д.т.н., профессор М.В. Темлянцев, д.т.н., профессор Г.В. Галевский,
д.т.н., профессор Н.А. Козырев, д.т.н., профессор А.Р. Фастыковский,
к.т.н., доцент С.Г. Коротков

М 540 Металлургия: технологии, инновации, качество : труды XXI Международной
научно-практической конференции: в 2-х ч. Ч. 2 / под ред. Е.В. Протопопова;
Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2019. – 463 с. : ил.

ISSN 2542-1670

Труды конференции включают доклады по актуальным вопросам теории и
технологии производства, обработки и сварки металлов, энергоресурсосбережения,
рециклинга и экологии в металлургии.

ОРГАНИЗАТОРЫ И ПАРТНЕРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Администрация Кемеровской области
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»
АО «ЕВРАЗ ЗСМК»
АО «Русал Новокузнецк»
АО «Кузнецкие ферросплавы»
ОАО «Черметинформация»
Издательство Сибирского отделения РАН
Журнал «Известия вузов. Черная металлургия»
Журнал «Вестник СибГИУ»
Журнал «IOP conference series: materials science and engineering»
АО «Кузбасский технопарк»
Западно – Сибирское отделение Российской Академии естественных наук
Совет молодых ученых Кузбасса

ISSN 2542-1670

© Сибирский государственный
индустриальный университет, 2019

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПУЗЫРЬКОВ ОКСИДА УГЛЕРОДА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ГАЗОВОЙ СТРУИ И ВАННЫ РАСПЛАВА В КИСЛОРОДНОМ КОНВЕРТЕРЕ

Солоненко В.В., Протопопов Е.В., Сарычев В.Д., Грановский А.Ю., Темлянцев М.В.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия*

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы моделирования процессов взаимодействия газовых струй и расплава металла при продувке конвертерной ванны. Авторами разработана и реализована с помощью метода конечных элементов математическая модель, основанная на прямом численном решении уравнении Навье-Стокса без использования модели турбулентности. Эта модель позволила исследовать динамику поля скоростей и границу проникновения струи в металл. По результатам математического моделирования предположен механизм формирования пузырьков оксида углерода.

Ключевые слова: математическое моделирование, газовые струи, расплав металла, уравнение Навье-Стокса.

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF FORMATION OF CARBON MONOXIDE BUBBLES IN THE INTERACTION OF A GAS JET AND A MELT BATH IN AN OXYGEN CONVERTER

Solonenko V.V., Protopopov E.V., Sarychev V.D., Granovsky A.Yu., Temlyantsev M.V.

Siberian state industrial University, Novokuznetsk, Russia

Annotation. The article deals with the modeling of the interaction of gas jets and metal melt during the purge of the converter bath. The authors developed and implemented a mathematical model based on the direct numerical solution of the Navier-Stokes equation without using the turbulence model using the finite element method. This model allowed us to study the dynamics of the velocity field and the boundary of the jet penetration into the metal. According to the results of mathematical modeling, the mechanism of formation of carbon monoxide bubbles is suggested.

Keywords: mathematical modeling, gas jets, metal melt, Navier-Stokes equation.

В конвертере с верхним дутьем струю кислорода со сверхзвуковой скоростью направляют посредством фурмы на ванну расплавленного металла. При этом реализуется два процесса: формирование полости на поверхности ванны за счет динамического давления струи и образование вихревого течения в объеме все ванны. Размер, форма и граница полости являются важными параметрами, определяющими процесс обезуглероживания чугуна в ванне, сопровождающийся образованием монооксида углерода, который может вступать в реакцию с кислородом в верхнем пространстве конвертера с образованием диоксида углерода. Этот последний процесс обычно называют дожиганием или реакцией после сгорания (post-combustion reaction), экзотермический эффект которой в два раза превышает реакцию обезуглероживания [1]. Поэтому создание оптимальных условий для дожигания монооксида углерода в полости конвертера является актуальной научно-практической задачей [2].

Экспериментальные исследования по проблеме соударения газовой струи с поверхностью жидкости, начиная с работы [3] в 60-х годах до более поздних экспериментов [4 – 6] были проведены с использованием уменьшенных холодных моделей, в которых кислород заменен воздухом, а расплавленная сталь заменялась водой. В этих экспериментах исследовали интегральные размеры и форму поверхности, тогда как локальная деформация границы

полости не рассматривалась.

Моделирование деформаций свободной поверхности ванны и течение в металле при воздействии струй рассматривалось в многочисленных работах, например в [7 – 12]. В [8] предложена физико-математическая модель неустойчивости поведения границы ванны. Модель [9] дает описание флуктуаций уровня расплава. В [10] представлено численное исследование взаимодействия между струями и шлако-металлической ванной с помощью трехфазной объемной модели жидкости. Численные результаты показывают, что профиль полости и границы раздела шлак/металл/газ остаются нестабильными в результате распространения поверхностных волн, что, вероятно, является главным фактором, определяющим генерацию металлических капель и их первоначальное пространственно-временное распределение. В недавних обзорах [11, 12] приводятся данные исследования взаимодействия кислородной струи с ванной расплава на основе метода объема жидкости (VOF) с использованием той или иной модели турбулентности. Модели турбулентности используют турбулентную вязкость, которая значительно превосходит молекулярную вязкость, что позволяет рассчитывать процессы перемешивания на большом промежутке времени в ванне расплава и в верхнем пространстве конвертора. Однако, это приводит к потере детализации течения. Если отказаться от использования турбулентно вязкости, то можно уловить важные детали процесса, например формирование пузырьков на временах порядка одной десятой секунды.

Работы о явлениях, происходящих в верхнем пространстве конвертера и о дожигании носят в основном эмпирический характер [13], где было установлено, что коэффициент дожигания в отработавших газах, определяемый как отношение концентрации диоксида углерода к суммарным концентрациям CO и CO₂, увеличивается с увеличением высоты фурмы, увеличение температуры и содержания углерода в ванне приводит к меньшим значениям этого показателя.

Постановка задачи и метод решения

Рассмотрим взаимодействие газовой струи конвертора движущейся со скоростью U_0 и ванны расплава с физическими характеристиками представленными в таблице 1.

Движение газа и расплава описывается уравнением Навье-Стокса для вязкой несжимаемой среды:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} &= -\nabla p + \mu \Delta \vec{u} + \vec{F}_g \\ \nabla \cdot \vec{u} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

где $\vec{u}$ - вектор скорости,

p - давление,

$\vec{F}_g$ - объемная сила тяжести,

ρ - плотность,

μ - динамическая вязкость.

Данная система решалась численно в плоской системе координат с помощью метода конечных элементов. Конечно-элементная сетка представлена на рисунке 1. Для отслеживания поверхности раздела между расплавом и газом использовался консервативный Level Set метод. Метод заключается в расчете скалярной функции ϕ на всей расчетной области:

$$\rho \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla(\phi \mathbf{u}) \right) = \chi \left[\varepsilon \nabla \cdot \nabla \phi - \nabla \cdot \left(\phi (1 - \phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) \right] \quad (2)$$

где ε - параметр определяющий толщину переходного слоя и равный половине размера ячейки сетки,

χ - стабилизирующий параметр равный максимальной скорости достигаемой в области расчета.

В переходной зоне производится аппроксимация плотности, вязкости:

$$\begin{aligned}\rho &= \rho_g + (\rho_m - \rho_g)\phi. \\ \mu &= \mu_g + (\mu_m - \mu_g)\phi\end{aligned}\quad (3)$$

Сила поверхностного натяжения рассчитывается по формуле:

$$\begin{aligned}\mathbf{F}_{st} &= \nabla \cdot \left[\left(\gamma (\mathbf{I} - \mathbf{n}\mathbf{n}^T) \right) \delta \right], \\ \mathbf{n} &= \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|}, \quad \gamma = |\phi(1 - \phi)| |\nabla \phi|\end{aligned}\quad (4)$$

где $\mathbf{I}$ - единичная матрица,

$\mathbf{n}$ - вектор нормали к поверхности,

γ - коэффициент поверхностного натяжения,

δ - дельта функция Дирака которая не равна нулю только на контактной поверхности.

Таблица 1 – Геометрические и физические характеристики

Обозначение	Величина	Описание
H	5,254 м	Расчетная высота конвертера
H_m	2,27 м	Высота слоя расплава
D	7,42 м	Диаметр конвертера
U_0	500 м/с	Скорость газа
ρ_g	0,23 кг/м ³	Плотность газа
μ_g	0,73 · 10 ⁻⁴ Па · с	Динамическая вязкость газа
ρ_m	8136 кг/м ³	Плотность расплава
μ_m	0,0058 Па · с	Динамическая вязкость расплава
D_{out}	50 мм	Диаметр сопла фурмы
T_0	1812 K	Начальная температура
σ	1 Н/м	Коэффициент поверхностного натяжения

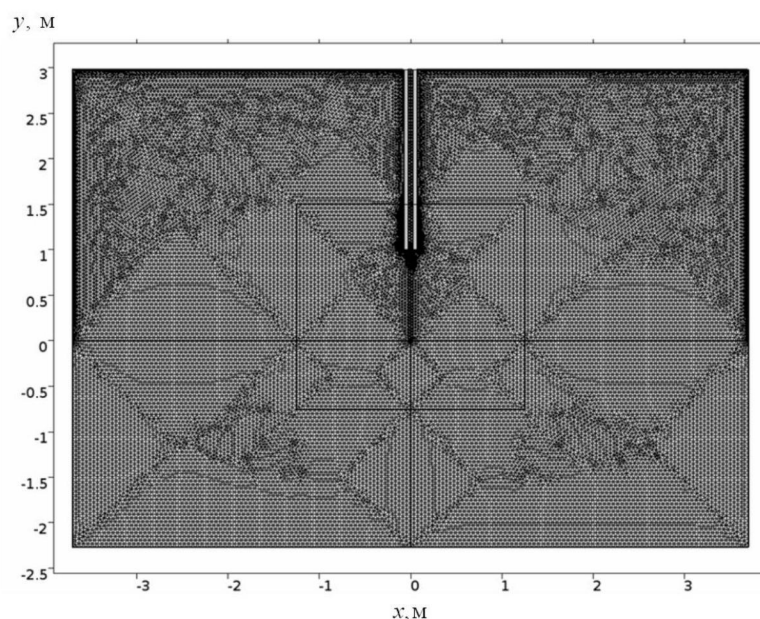


Рисунок 1 – Расчетная конечно-элементная сетка

Начальные и граничные условия:

В начальный момент времени расплав находится в покое, а газ натекает со скоростью U_0 . На стенках фурмы задается условие прилипания:

$$\mathbf{u} = 0 \quad (5)$$

На рисунке 2 представлены результаты расчетов поля скоростей проникновения струи в металл для различных моментов времени, из которых следует неустойчивость границы раздела. Развитие неустойчивости приводит к формированию капель металла (рисунок 2 а-в) и пузырька газа внутри жидкости (рисунок 2 в). Это позволяет предположить механизм формирования пузырьков оксида углерода. Сформированный за счет неустойчивости пузырек, кислород которого взаимодействует с углеродом (гетерогенная реакция) превращается в оксид углерода. Под действием архимедовых сил этот пузырек поднимается к поверхности и лопается. Затем восходящее гидродинамическое течение выносит оксид углерода в верхнее пространство конвертера.

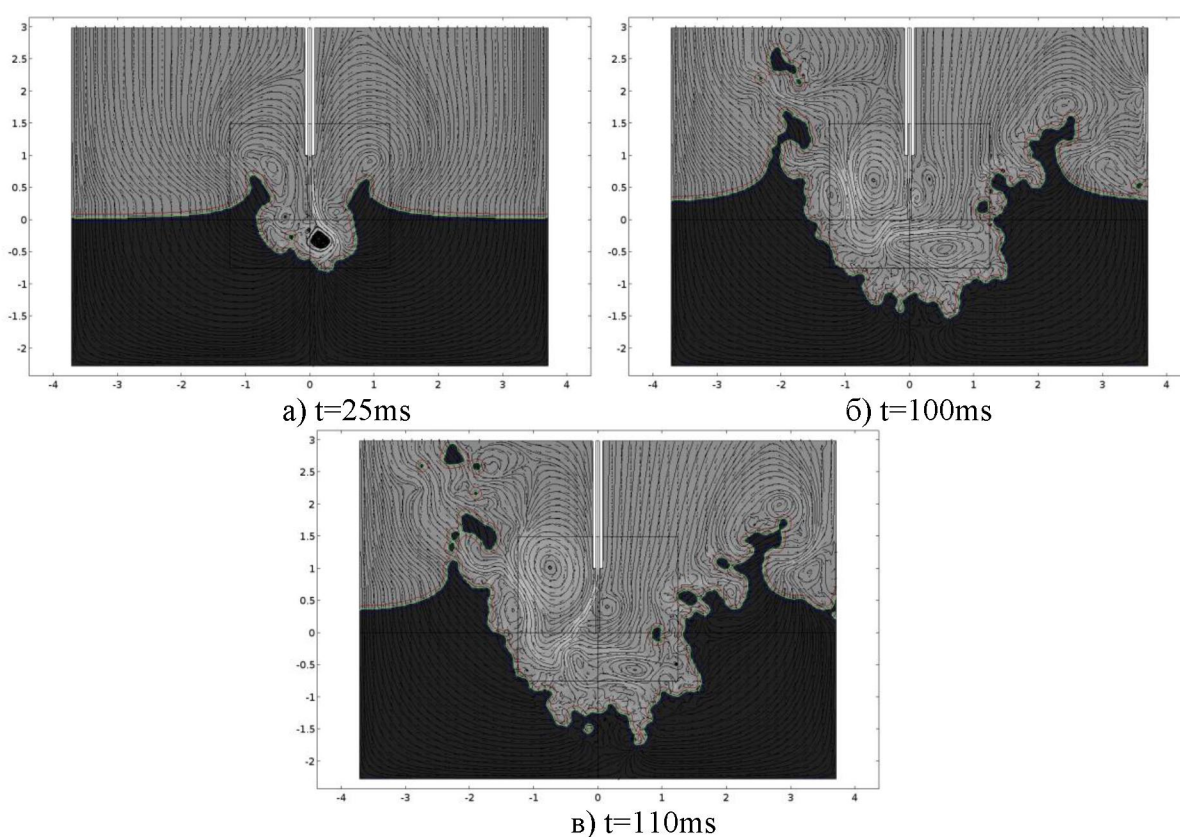


Рисунок 2 – Поля скоростей при проникновении струи в металл

Выводы

Прямым методом численного моделирования уравнений Навье-Стокса решена задача о взаимодействии сверхзвуковой газовой струи с жидким металлом. Получены распределения поля скоростей, и геометрия границы раздела газ – жидкость для различных моментов времени. Полученная форма граница раздела доказывает, что на ней реализуются гидродинамические неустойчивости, приводящие к формированию частиц металла в газе и пузырьков газа в металле. Анализ гидродинамической ситуации позволил предложить механизм формирования пузырьков оксида углерода.

Библиографический список

1. Doh, Y., Chapelle, P., Jardy, A. et al. Toward a Full Simulation of the Basic Oxygen Furnace: Deformation of the Bath Free Surface and Coupled Transfer Processes Associated with the Post-Combustion in the Gas Region // Metall and Material Trans B (2013) 44: 653.

<https://doi.org/10.1007/s11663-013-9817-9>.

2. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Фейлер С.В., Вакульчук В.В., Сокол А.Н. Исследование особенностей формирования металлошлаковых настывей на двухъярусных кислородных фурмах при продувке конвертерной ванны // Известия вузов. Черная металлургия. 2015. т. 58. №4 С. 248 – 257.

3. Banks R.B., Chandrasekhara D. V. Experimental investigation of the penetration of a high-velocity gas jet through a liquid surface // J. Fluid Mech., 1963, vol. 15, pp. 13-35. DOI:<https://doi.org/10.1017/S0022112063000002>

4. Nordquist A, Kumbhat N, Jonsson L, et al. The effect of nozzle diameter, lance height and flow rate on penetration depth in a top-blown water model. Steel Res Int. 2006;77:82–90. DOI: 10.1002 / srin.200606358

5. Hwang, H.Y.; Irons, G.A. A water model study of impinging gas jets on liquid surfaces. Metall. Mater. Trans. B Process Metall. Mater. Process. Sci. 2012, 43, 302–315.

6. Мордасов М.М., Савенков А.П., Чечетов К.Е. Методика исследования взаимодействия струи газа с поверхностью жидкости. Журнал Технической Физики. 2016. Т.:86 № 5, С. 20-29.

7. Милошевич Х., Рычков А.Д. Численное моделирование процесса взаимодействия струи кислорода с жидким металлом в сталеплавильном конвертере // Вычислительные технологии. 1998. Том 3, № 6, С. 54 – 62.

8. Olivares O., Elias A., Sanchez R., Diaz-Cruz M., Morales R. Physical and mathematical models of gas-liquid fluid dynamics in LD converters // Steel Res., 2002, vol. 73, pp. 44–51. DOI: 10.1002 / srin.200200172

9. Odenthal H., Kempken J., Schluter J., Emling W. Advantageous numerical simulation of the converter blowing process// Iron Steel Technol., 2007, vol. 4, pp. 71–89.

10. Li, Q., Li, M., Kuang, S. et al. Numerical simulation of the interaction between supersonic oxygen jets and molten slag-metal bath in steelmaking BOF process // Metall and Materials Trans B. 2015. 46: 1494. <https://doi.org/10.1007/s11663-015-0292-3>

11. Cao L., Wang Z., Liu Q., Feng X. Physical and Mathematical Modeling of Multiphase Flows in a Converter // *ISIJ International*, 2018. 58(4), 573–584p. doi:10.2355/isijinternational.isijint-2017-680.

12. Ersson M., Tillander A. Review on CFD Simulation and Modeling of Decarburization Processes // Wiley in steel research international steel research international. 2018.Vol. 89; doi:10.1002/srin.201700108.

13. Huber, J.-C., Lehmann, J., Cadet, R. Comprehensive dynamic model for BOF process: a glimpse into thermal efficiency mechanisms // Revue de Métallurgie, 2008. 105(3), 121–126p. doi:10.1051/metal:2008024

УДК 621

СТРОИТЕЛЬСТВО ПЕЧЕЙ ОБЖИГА ИЗВЕСТНЯКА В ЕВРАЗ ЗСМК

Леонтьев А.С.

ЕВРАЗ ЗСМК, Россия, Новокузнецк, aleksey.leontiev@evraz.com

***Аннотация.** В работе рассмотрен опыт проработки инвестиционного проекта по строительству современного производства извести в условиях Западно-Сибирского металлургического комбината, проработана модель расчета экономического эффекта и алгоритм по снижению капитальных затрат на строительство.*

***Ключевые слова:** Двухшахтные печи, известь, конвертерное производство стали.*

CONSTRUCTION OF LIMESTONE KILNS IN EVRAZ ZSMK

Leontiev A.S.

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ТЕОРИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	4
О ВЛИЯНИИ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ КВАРЦИТОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАВКИ КРЕМНИЯ И ВЫСОКОПРОЦЕНТНОГО ФЕРРОСИЛИЦИЯ <i>Ёлкин К.С., Рожихина И.Д., Нохрина О.И., Сивцов А.В., Кашилев И.М., Карлина А.И., Ёлкин Д.К.</i>	4
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПОЛУЧЕНИЯ АКТИВНОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ <i>Ёлкин Д.К., Ёлкин К.С., Сивцов А.В.</i>	13
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ КОЛЕСНОЙ СТАЛИ КАЛЬЦИЕМ И БАРИЕМ НА МОДИФИЦИРОВАНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ <i>Гайворонский А.В., Павлова Н.В.</i>	16
ТЕРМОДИНАМИКА РАСТВОРОВ КИСЛОРОДА В РАСПЛАВАХ NI-CO <i>Александров А.А., Дашевский В.Я.</i>	23
РАЗВИТИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ДЕФЕКТОВ МЕТАЛЛА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РЕЗУЛЬТАТЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ <i>Жуков Д.В., Коновалов С.В.</i>	29
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ МАРГАНЦА ПРИ КАРБО- И МЕТАЛЛОТЕРМИИ <i>Есенгалиев Д.А., Исагулов А.З., Байсанов С.О., Байсанов А.С., Заякин О.В.</i>	33
ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ НАГРЕВОМ МЕТАЛЛА В ПЕЧАХ <i>Стерлигов В.В., Михайличенко Т.А.</i>	38
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ВЫСОКООСНОВНЫХ БОРСОДЕРЖАЩИХ ШЛАКОВ <i>Бабенко А.А., Шартдинов Р.Р., Уполовникова А.Г., Сметанников А.Н., Гуляков В.С.</i>	43
АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ И ПРАКТИКА ОЧИСТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ И КРЕМНИСТЫХ ФЕРРОСПЛАВОВ ОТ НЕЖЕЛАТЕЛЬНЫХ ПРИМЕСЕЙ <i>Ёлкин К.С., Кашилев И.М., Карлина А.И.</i>	47
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПУЗЫРЬКОВ ОКСИДА УГЛЕРОДА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ГАЗОВОЙ СТРУИ И ВАННЫ РАСПЛАВА В КИСЛОРОДНОМ КОНВЕРТЕРЕ <i>Солоненко В.В., Протопопов Е.В., Сарычев В.Д., Грановский А.Ю., Темлянцева М.В.</i>	53
СТРОИТЕЛЬСТВО ПЕЧЕЙ ОБЖИГА ИЗВЕСТНЯКА В ЕВРАЗ ЗСМК <i>Леонтьев А.С.</i>	57
НАУЧНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕЗОНАНСНО-ПУЛЬСИРУЮЩЕГО РАФИНИРОВАНИЯ МЕТАЛЛА <i>Лубяной Д.А., Толстикова Ю.А., Буймов Д.В., Мусохранов В.В., Кузин Е.Г., Марченко И.А.</i>	62
ЛИНЕЙКА ДЛЯ РАСЧЕТА ШИХТЫ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ КУЗЬМИЧЕВА И.Я. – ПРООБРАЗ СОВРЕМЕННЫХ КОМПЬЮТЕРОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ШИХТЫ <i>Лубяной Д.А.</i>	62
ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕСКОВ ПРИБАЙКАЛЬЯ В КАЧЕСТВЕ СУХИХ БАРЬЕРНЫХ СМЕСЕЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ АЛЮМИНИЯ <i>Немчинова Н.В., Яковлева А.А., Тютрин А.А., Гудкова О.П.</i>	71
РАСЧЕТ СЕРОПОГЛОТИТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ШЛАКА ДСП В РАЗЛИЧНЫЕ ПЕРИОДЫ ПЛАВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКОЙ ОСНОВНОСТИ <i>Журавлев А.А.</i>	76
РАСЧЕТ УДАЛЕНИЯ АЗОТА ИЗ СТАЛИ ШЛАКОВЫМИ СМЕСЯМИ С ВЫСОКОЙ НИТРИДНОЙ ЕМКОСТЬЮ <i>Журавлев А.А.</i>	77
ВЛИЯНИЕ ВНЕДРЕНИЯ НАНОПОРОШКА W НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИТЕЙНОГО СПЛАВА МАРКИ АК12 <i>Башев В.С.</i>	79
ДИВЕРСИФИКАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА И ПЕРЕРАБОТКА ПЫЛЕВИДНЫХ ОТХОДОВ И РУД НА ОСНОВЕ СТРУЙНО-ЭМУЛЬСИОННОГО АГРЕГАТА СЭР <i>Цымбал В.П., Рыбушкин А.А., Рыбенко И.А., Кожемяченко В.И., Калашников С.Н., Ермакова Л.А.</i>	85

Научное издание

**МЕТАЛЛУРГИЯ:
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО**
«Металлургия – 2019»

Труды XXI Международной научно-практической конференции

Часть 2

Под общей редакцией профессора Е.В. Протопопова

Технический редактор	В.Е. Хомичева
Компьютерная верстка	Н.В. Ознобихина

Подписано в печать 04.10.2019 г.

Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага офисная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 27,0 Уч.-изд. л. 29,4 Тираж 300 экз. Заказ № 236

Сибирский государственный индустриальный университет
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42
Издательский центр СибГИУ