

На правах рукописи



Калиногорский Андрей Николаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
НАНЕСЕНИЯ ОГНЕУПОРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ФУТЕРОВКУ  
БОЛЬШЕГРУЗНЫХ КОНВЕРТЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ВЫСОКОМАГНЕЗИАЛЬНЫХ ФЛЮСОВ**

Специальность 05.16.02 - Metallургия черных, цветных и редких металлов

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новокузнецк – 2016

Диссертационная работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет» на кафедре металлургии черных металлов.

Научный руководитель: Протопопов Евгений Валентинович,  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Смирнов Леонид Андреевич,  
доктор технических наук, профессор,  
ОАО «Уральский институт металлов»,  
научный руководитель института

Матвеев Максим Валерьевич,  
кандидат технических наук,  
АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский  
металлургический комбинат»,  
главный специалист по теплотехнике ЭСПЦ

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный  
университет (национальный исследовательский  
университет)»

Защита состоится 1 декабря 2016 г. в 10:00 на заседании диссертационного  
совета Д 212.252.01 при Сибирском государственном индустриальном  
университете по адресу: 654007 Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.  
СибГИУ  
Факс (3843) 46-57-92.  
E-mail: [ds21225201@sibsiu.ru](mailto:ds21225201@sibsiu.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке  
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет».

Автореферат разослан «    »                      2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.т.н., профессор



Нохрина Ольга Ивановна

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность темы исследования.**

Мировое производство стали в 2015 году составило ~ 1,60 млрд. т, при этом кислородно-конвертерный процесс занимает ведущую роль в структуре сталеплавленного производства. В соответствии с современными представлениями себестоимость конвертерной стали и производительность агрегатов в значительной степени определяются стойкостью футеровки и расходом огнеупоров. Поэтому проведение «горячих» ремонтов является важной составляющей службы эксплуатации футеровки, а технология нанесения шлакового гарнисажа рассматривается фактически как основное ресурсосберегающее мероприятие.

В настоящее время при выплавке стали в конвертерах широко используются высокомагнезиальные флюсы, что позволяет повысить содержание MgO в шлаке, снизить его агрессивное воздействие на футеровку и получить при раздувке подготовленного шлака огнеупорное защитное покрытие на футеровке. Однако при использовании высокомагнезиальных флюсов возникает целый ряд технологических проблем, связанных с ухудшением показателей шлакообразования и снижением рафинирующей способности конвертерных магнезиальных шлаков, особенно в большегрузных агрегатах.

В связи с этим разработка научных и технологических основ нанесения огнеупорных покрытий на футеровку большегрузных конвертеров с использованием высокомагнезиальных флюсов является важной научно-практической задачей, имеющей большое значение для отечественной металлургии.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки, технологий и техники в Российской Федерации по заданию Минобрнауки России при грантовой поддержке ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» (НИР № ГР 01201459343).

### **Степень разработанности темы исследования.**

Вопросам снижения расхода огнеупорных материалов на производство стали уделяется большое внимание исследователей в отечественной и мировой науке. Многочисленные публикации по этой теме свидетельствуют о перспективности технологии нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертеров, однако недостаточная научная проработка используемых в отрасли, особенно для большегрузных агрегатов, технологических режимов процесса не позволяет достичь мировых показателей по стойкости футеровки конвертеров. В данном случае возможным решением проблемы является разработка новых вариантов ресурсосберегающих технологий нанесения шлакового гарнисажа на футеровку агрегатов, обеспечивающих использование для раздувки гарнисажного шлака вихревых газовых и газопорошковых струй и применение высокостойких конструкций гарнисажных фурм с системой газового охлаждения дутьевого устройства.

### **Цели и задачи.**

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований процесса нанесения огнеупорных покрытий на футеровку кислородных конвертеров с использованием высокомагнезиальных флюсов разработать новые ресурсосберегающие технологии продления срока службы футеровки агрегатов с применением специальных дутьевых устройств для их реализации.

Основные задачи:

- выполнить экспериментальные и аналитические исследования нанесения огнеупорных покрытий на футеровку кислородного конвертера вихревыми газовыми струями;
- исследовать характеристики теплообмена и научно обосновать газовое охлаждения специальных дутьевых устройств для раздувки шлакового расплава в 350-т агрегатах АО «ЕВРАЗ ЗСМК»;
- исследовать особенности процессов шлакообразования, рафинирования металла и растворения огнеупоров для совершенствования технологии нанесения огнеупорных покрытий на футеровку большегрузных конвертеров с использованием высокомагнезиальных флюсов;
- опробовать результаты теоретических и экспериментальных исследований в технологической практике производства стали и использовать их при подготовке студентов вузов, обучающихся по направлению 22.03.02 – Metallurgy.

### **Научная новизна.**

1) Впервые установлен механизм и гидрогазодинамические режимы взаимодействия вихревых газовых струй со шлаковым расплавом. Изучены параметры движения капель шлака в объеме конвертера.

2) Определено оптимальное для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертера соотношение незакрученной и закрученной составляющих скорости вихревой газовой струи, равное 0,2 – 1,0 отн. ед.

3) Разработана методика анализа теплообменных процессов в рабочем пространстве конвертера и выполнено теоретическое обоснование газового охлаждения специальных дутьевых устройств для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку агрегата.

4) Определены температурные нагрузки на основные конструктивные элементы специальных дутьевых устройств при газовом охлаждении. Установлена возможность снижения при этом теплопередачи на внутренние элементы до 10 % от воспринимаемого теплового потока.

5) Определены фазовые и структурные превращения в шлаковом расплаве при растворении высокомагнезиального флюса, концентрация насыщения шлака оксидом магния по периодам конвертерной плавки.

### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

1) Установлена принципиальная возможность и определены технологические преимущества раздувки шлакового расплава вихревыми газовыми струями для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертеров.

2) На основании исследования теплообменных процессов при использовании

специальных дутьевых устройств для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертеров обосновано их охлаждение азотом, подаваемым на раздувку шлака.

3) Разработанная техническая документация на систему газового охлаждения специальных дутьевых устройств для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку большегрузных конвертеров передана к использованию в ККЦ № 2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

4) На основании исследований физико-химических характеристик конвертерных магнезиальных шлаков, установлено их соответствие требованиям к защитным огнеупорным покрытиям футеровки агрегатов.

5) На основании исследований кристаллохимических и кристаллофизических характеристик конвертерных магнезиальных шлаков определены технологические параметры шлакового режима конвертерной плавки с использованием высокомагнезиальных флюсов.

6) Разработаны и переданы к промышленному внедрению рекомендации по совершенствованию технологии выплавки стали и нанесения огнеупорных покрытий на футеровку 350-т конвертеров АО «ЕВРАЗ ЗСМК» с использованием высокомагнезиального флюса ФОМИ.

7) Полученные в работе научные и технологические результаты внедрены ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» в учебный процесс студентов, обучающихся по направлению 22.03.02 – Metallurgy.

#### **Методология и методы исследования.**

Работа выполнена с привлечением комплекса современных теоретических и экспериментальных методов: физического моделирования, численного расчета раздувки шлака вихревыми газовыми струями и теплообмена в специальных дутьевых устройствах; исследования химического и фазово-минералогического составов, физических и технологических свойств шлаков и флюсов; проведения опытно-промышленных плавов в кислородных конвертерах с отбором проб металла и шлака; использования методов математической статистики и средств вычислительной техники с применением стандартного пакета прикладных программ Microsoft Office.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1) Результаты исследования характеристик вихревых газовых струй и аэродинамических закономерностей процесса при раздувке шлакового расплава на футеровку агрегата.

2) Результаты исследования теплообменных процессов в рабочем пространстве конвертера для условий раздувки шлакового расплава с использованием известных конструкций специальных дутьевых устройств.

3) Технические предложения по газовому охлаждению специальных дутьевых устройств для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку агрегата в условиях конвертерных цехов отрасли.

4) Результаты определения физико-химических характеристик шлака, выявленные фазовые и структурные превращения в шлаковом расплаве при растворении высокомагнезиального флюса по периодам конвертерной плавки.

### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности ВАК 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов по п. 6 «Газо- и аэродинамика в металлургических агрегатах»; п. 7 «Тепло и массоперенос в низко и высокотемпературных процессах»; п. 17 «Материало- и энергосбережение при получении металлов и сплавов».

### **Степень достоверности и апробация результатов.**

Достоверность и обоснованность полученных результатов, выводов и рекомендаций подтверждается использованием современных методов теоретического и экспериментального исследования процессов аэро-гидродинамики и тепломассообмена, качеством измерений их характеристик и статистической обработкой результатов; адекватностью разработанных математических моделей; применением широко распространенных разнообразных и апробированных методов анализа; сопоставлением полученных результатов с данными других исследователей; результатами промышленного опробования и высокой эффективностью предложенных решений.

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: Всероссийских научно-практических конференциях «Metallургия: технологии, управление, инновации, качество» (г. Новокузнецк, 2013, 2014 гг.); XVIII Международном научном симпозиуме имени академика М. А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 2014 г.); Инновационном конвенте «Кузбасс: образование, наука, инновации» (г. Кемерово, 2014 г.); Международной научно-практической конференции «Литье. Metallургия» (Украина г. Запорожье 2015 г.); IV Международной научно-практической конференции «Инновации в материаловедении и metallургии» (г. Екатеринбург, 2015 г.).

### **Публикации.**

По материалам диссертации опубликовано 16 печатных работ, в том числе 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК для опубликования результатов кандидатских и докторских диссертаций.

### **Структура и объем работы.**

Работа состоит из введения, четырех разделов, заключения и двух приложений. Изложена на 146 страницах, содержит 28 рисунков, 21 таблицу и список литературы из 164 наименований.

## **Основное содержание работы**

**Во введении** рассмотрены актуальность и степень разработанности темы исследования, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, отражены научная новизна и значимость работы, методология и методы исследования, изложены положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов диссертационной работы.

**В первой главе** выполнен анализ публикаций в научно-технической литературе и рассмотрено современное состояние вопроса по применению высокомагнетиальных флюсов для повышения стойкости футеровки кислородных

конвертеров, особенностях дутьевого и шлакового режимов конвертерной операции, способах нанесения огнеупорных покрытий на футеровку агрегатов.

Установлено, что перспективным направлением является использование специальных дутьевых устройств для раздувки конвертерного магнезиального шлака. Проанализированы современные технические решения этого вопроса. Определены основные проблемы, связанные с аэродинамическими и тепло-массообменными процессами. Отмечено недостаточное количество надежных сведений относительно организации охлаждения специальных фурм и обоснованных рекомендаций по технологическим параметрам продувки металла и раздувки шлака.

С учетом проанализированных данных определены основные направления исследований и сформулированы задачи, обеспечивающие достижение поставленной в работе цели – разработки новых ресурсосберегающих технологий продления срока службы футеровки агрегатов с применением специальных дутьевых устройств для их реализации.

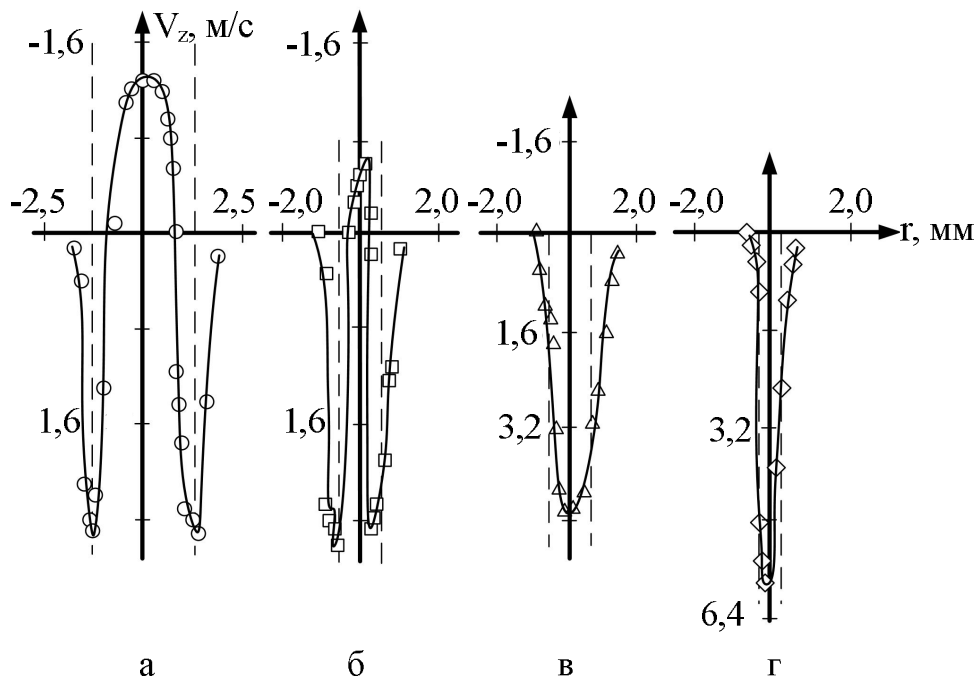
**Во второй главе** представлены результаты исследования аэрогидродинамических закономерностей раздувки шлакового расплава в том числе вихревыми газовыми струями, формирующимися в фурме при установке специального устройства.

Исследования проведены с использованием физического низкотемпературного моделирования. Предварительно, при разработке методики и установки моделирования, в качестве основных выделены критерии динамического подобия с учетом конструктивных особенностей фурм, обеспечивающих раздувку жидкости вихревыми и стационарными газовыми струями. Для проведения исследования использовали прозрачную плексигласовую модель конвертера, выполненную в масштабе 1:20 по отношению к 350-т агрегатам АО «ЕВРАЗ ЗСМК». В качестве моделирующей шлак жидкости использовали крахмальный клейстер, а продувочного газа – воздух.

Для определения оптимальных параметров раздувки шлака с применением вихревых газовых струй проведено исследование поля скоростей струи, при этом выходной диаметр сопла варьировали в пределах от 0,5 до 2,5 мм. Фактические замеры были осуществлены на расстоянии 5 мм от среза сопла с использованием лазерного доплеровского измерителя скорости. Распределение осевой компоненты скорости вихревой газовой струи на выходе из сопла фурмы представлено на рисунке 1.

Как видно, при диаметре выходного сечения сопла 0,5 мм профиль скорости вихревой газовой струи не отличается от профиля стационарной струи, при диаметре сопла 1,0 мм появляется возвратное течение при определенном расходе газа, а при диаметре 2,5 мм фиксируется зона интенсивного возвратного потока.

Экспериментально установлены два характерных режима взаимодействия вихревой газовой струи со шлаком: режим I – над поверхностью расплава создается вихрь, который втягивает шлак и отбрасывает его в сторону стенок конвертера, и режим II – струя в условиях «пробоя» оттесняет жидкость на периферию, и дробление происходит на некотором удалении от фурмы.



а, б, в, г – расход воздуха и диаметр сопла фурмы, 29,0 и 2,5; 9,1 и 1,0; 18,8 и 1,0; 9,1 и 0,5 г/ч и мм, соответственно. Штриховой линией показаны геометрические границы выходного сечения сопла

Рисунок 1 – Распределение осевой компоненты скорости вихревой газовой струи при выходе из сопла фурмы

В случае реализации взаимодействия по режиму I в центральную зону шлаковой ванны поступает расплав, который инжектируется в вихрь и распыляется по объему конвертера, при этом основной процесс реализуется в центре вихря. При реализации режима II по окружности возникает своеобразная кольцевая зона движения двухфазного потока, имеющего меньшую плотность, который в виде пены выносится потоком газа на стенки агрегата.

При взаимодействии вихревой газовой струи со шлаком дробление расплава на капли определяется затратами энергии на образование новой поверхности и преодоление сил вязкого трения при деформации капли. Часть энергии струи расходуется на разгон капель шлака, а другая сохраняется в виде кинетической энергии вихревого газового потока. Отмеченные закономерности описаны следующим критериальным уравнением:

$$\frac{D}{d} = 6\tau^{\frac{1}{3}} \left( We^{-1} + Re^{-1} \frac{\mu}{\mu_r} \right), \quad (1)$$

где  $We = \rho_r U^2 \frac{D}{\sigma}$  – число Вебера;  $Re = \frac{\rho U_r D}{\mu_r}$  – число Рейнольдса;  $D$  – диаметр капли;  $d$  – эффективный диаметр столба шлака;  $\rho_r$  – плотность газа;  $\rho$  – плотность жидкости;  $U_r$  – скорость газового потока;  $\tau$  – отношение объемных расходов жидкой фазы и газа;  $\mu_r$  – коэффициент динамической вязкости газа;  $\mu$  –

коэффициент динамической вязкости жидкости;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения.

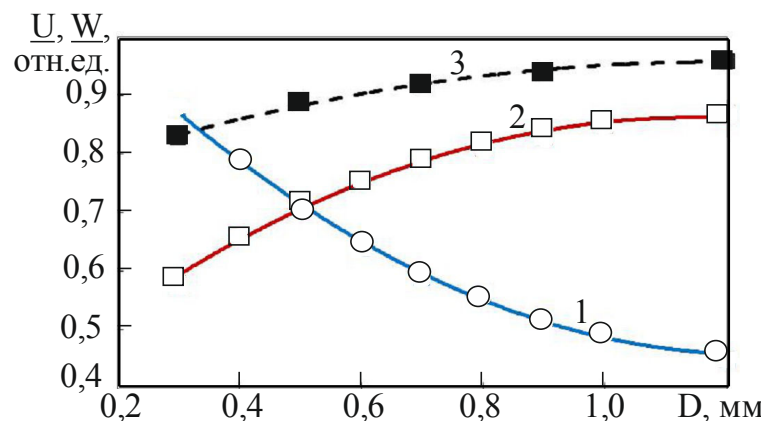
В соответствии с развиваемыми положениями проведены численные эксперименты по оценке размера капель, образующихся при дроблении жидкости и рассмотрено их движение по траектории из зоны диспергирования к футеровке конвертера. В данном случае, поток транспортирующего газа, несущий капли шлака, перемещается преимущественно вверх по спирали. Указанные закономерности движения капель можно описать системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} dW_{\varphi}/dt &= W_r W_{\varphi}/r - (W_{\varphi} - V_{\varphi}) V_s/L; \\ dW_r/dt &= W_{\varphi}^2/r - (W_r - V_r) V_s/L; \\ dW_z/dt &= -(W_z - V_z) V_s/L, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $W_{\varphi}$ ,  $W_r$ ,  $W_z$  и  $V_{\varphi}$ ,  $V_r$ ,  $V_z$  – тангенциальная, радиальная и вертикальная составляющие скорости капли шлака и газового потока, соответственно;  $V_s$  – относительная скорость обтекания капли шлака потоком газа;

$L = \frac{4}{3} \frac{\rho D}{\rho_r C_f}$  – характерное расстояние, на котором капля шлака разгоняется потоком транспортирующего газа,  $C_f$  – коэффициент сопротивления.

Радиальная безразмерная составляющая скорости капли шлака после ее отрыва от основного объема шлака рассчитана относительно радиальной составляющей скорости вихревой струи, а полная безразмерная скорость капли вблизи футеровки конвертера – относительно максимальной скорости капель шлака при их разгоне. Полученные результаты представлены на рисунке 2.



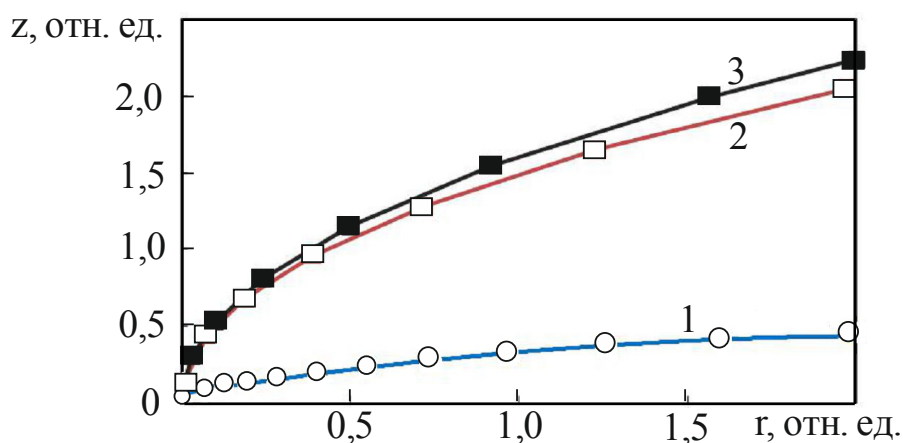
1 – радиальная безразмерная составляющая скорости капли после отрыва от основного объема шлака; 2 и 3 – полная безразмерная скорость капли у футеровки агрегата при нормальных условиях и при температуре 600 °C

Рисунок 2 – Влияние диаметра капли шлака на скорость ее движения

Таким образом, на разгон капли шлака высокоскоростным потоком транспортирующего газа значительное влияние оказывает ее размер. Крупные частицы шлака приобретают меньшую скорость и, видимо, будут подниматься на меньшую высоту при нанесении на футеровку, по сравнению с мелкими каплями, вследствие своей большей инерции при взаимодействии с потоком газа.

При рассмотрении режима взаимодействия с оттеснением расплава от дна, следует дополнительно учитывать вспенивание газошлаковой эмульсии, в связи с чем, капли шлака выносятся из зоны взаимодействия со скоростью, не превышающей скорость распространения звука в смеси.

На рисунке 3 показано изменение относительной высоты, на которую поднимается капля на участке ее разгона при раздувке шлака вихревой газовой струей. Расчеты выполнены для вихревых струй газа с различным отношением незакрученной и закрученной составляющих скорости потока.



Линии 1, 2, 3 соответствуют значениям диаметра капли и отношения незакрученной и закрученной составляющих скорости вихревого газового потока 0,3 – 1,2 и 0,2; 0,3 и 1,0; 1,2 и 1,0; мм и отн. ед.

Рисунок 3 – Изменение траектории движения капли шлака на участке ее разгона

Установлено, что на параметры движения мелких капель шлака большое влияние оказывает аэродинамика потока газа, поведение крупных капель шлака зависит от скорости газового потока только в начале движения, в дальнейшем его влияние становится незначительным, а снижение вязкости расплава способствует уменьшению минимального размера частиц. При этом траектория движения капель шлака независимо от их размера определяется соотношением незакрученной и закрученной составляющих скорости вихревой газовой струи, и при оптимальном его значении, равном 0,2 – 1,0 отн. ед. обеспечивает высокую эффективность нанесения огнеупорных покрытий на футеровку кислородных конвертеров.

**В третьей главе** рассмотрены результаты исследования теплообменных процессов в рабочем пространстве конвертера при использовании специальных дутьевых устройств для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку агрегатов, в частности торкрет-гарнисажной и газопорошковой гарнисажной фурм для 350-т кислородных конвертеров АО «ЕВРАЗ ЗСМК», разработана методика и выполнено теоретическое обоснование их газового охлаждения азотом, подаваемым на раздувку шлака.

При введении в конвертер торкрет-гарнисажная фурма подвергается нагреву, в основном, излучением от внутренней поверхности футеровки и,

незначительно, свободной конвекцией от газов, заполняющих рабочее пространство агрегата. При подаче технологических газов через фурму в конвертере начинается процесс горения кокса торкрет-массы с выделением продуктов горения, которые разбавляются азотом, подаваемым на раздувку шлака, но, тем не менее, излучают тепло как на футеровку конвертера, так и на торкрет-гарнисажную фурму (см. рисунок 4).

Азот, с начальной температурой  $t_{Нн}$ , получает тепло конвекцией ( $Q_{ФН}$ ) от наружной трубы фурмы, нагревается до температуры  $t_{Нк}$  и отдает часть тепла ( $Q_{НВ}$ ) внутренней трубе, по которой подается кислород с торкрет-массой. При этом внутренняя труба получает тепло ( $Q_{ФВ}$ ) еще и излучением от наружной трубы, так как азот прозрачен для тепловых лучей, как двухатомный газ. Тепло, получаемое внутренней трубой, идет на нагрев торкрет-массы и кислорода до температуры  $t_b$ . Таким образом, азот аккумулирует энергию ( $Q_N$ ), затраченную на его нагрев до  $t_{Нк}$  и обеспечивает охлаждение дутьевого устройства.

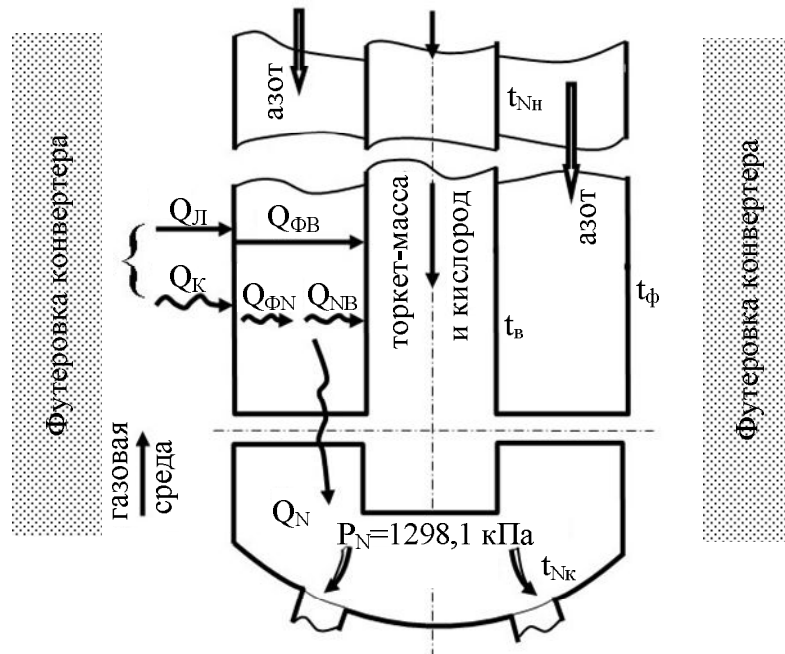


Рисунок 4 – Схема теплообмена для условий эксплуатации газоохлаждаемой торкрет-гарнисажной фурмы

Температурные нагрузки на конструктивные элементы торкрет-гарнисажной фурмы определены с использованием приведенных коэффициентов излучения:

$$C_{пр1} = \frac{C_0 \cdot \varepsilon_{\phi} \cdot \varepsilon_{\Gamma} (1 + \varphi_{кф} - \varphi_{кф} \cdot \varepsilon_{\Gamma})}{\varepsilon_{\Gamma} (1 + \varphi_{кф} - \varphi_{кф} \cdot \varepsilon_{\Gamma}) + \varphi_{кф} \cdot \varepsilon_{\phi} (1 - \varepsilon_{\Gamma})^2}, \quad (3)$$

$$C_{пр2} = \frac{C_0 \cdot \varepsilon_{\phi} \cdot \varepsilon_{\phi}}{\varepsilon_{\phi} + \varphi_{фв} \cdot \varepsilon_{\phi} (1 - \varepsilon_{\phi})}, \quad (4)$$

где  $C_{пр1}$  и  $C_{пр2}$  – приведенные коэффициенты излучения на наружные и внутренние элементы фурмы, соответственно;  $C_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела;  $\varepsilon_{\phi}$  – степень черноты труб торкрет-гарнисажной фурмы;  $\varphi_{кф}$  – угловой коэффициент излучения с футеровки на фурму;  $\varepsilon_{\Gamma}$  – степень

черноты газа;  $\varphi_{\text{фв}}$  – угловой коэффициент излучения с поверхности наружной трубы на поверхность внутренней.

Расчет теплового потока, передаваемого конвекцией, выполнен с учетом продольного обтекания фурмы газом. При этом общее число Нуссельта рассчитано следующим образом:

$$Nu = 0,5(0,3 + \sqrt{Nu_L^2 + Nu_T^2}), \quad (5)$$

где  $Nu_L = 0,664\sqrt{Re} \cdot \sqrt[3]{Pr}$  – число Нуссельта для ламинарного течения;

$Nu_T = \frac{0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr}{1 + 2,443 \cdot Re^{-0,1} \cdot (Pr^{2/3} - 1)}$  – число Нуссельта для турбулентного течения,

при этом  $Re = \frac{W_c \cdot l_{\text{оп}}}{\nu_c}$  – число Рейнольдса;  $Pr$  – число Прандтля;  $W_c$  – средняя по высоте скорость газа;  $l_{\text{оп}}$  – характерный размер;  $\nu_c$  – кинематическая вязкость газа.

В кольцевом канале фурмы число Нуссельта рассчитано по формуле:

$$Nu = 0,017 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} (Pr/Pr')^{0,25} \cdot (d_H/d_B)^{0,18}, \quad (6)$$

где  $Pr$  – число Прандтля для средней по длине фурмы температуры азота;  $Pr'$  – число Прандтля, для азота, нагретого до средней температуры наружной трубы;  $d_H$  и  $d_B$  – диаметр наружной и внутренней труб, соответственно.

Схема теплообмена для условий эксплуатации газоохлаждаемой газопорошковой гарнисажной фурмы представлена на рисунке 5.

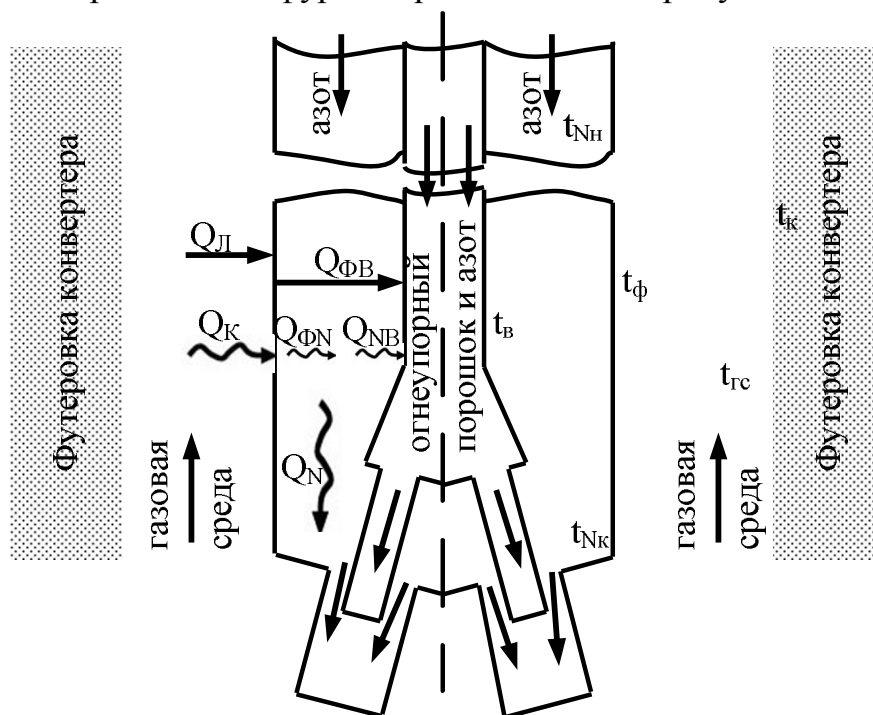


Рисунок 5 – Схема теплообмена для условий эксплуатации газоохлаждаемой газопорошковой гарнисажной фурмы

Источником теплового излучения в этом случае является высокотемпературная футеровка конвертера, а также жидкий шлак. При этом азот, подаваемый для раздувки шлака газопорошковыми струями, нагревается после выхода из сопла и передает тепло конвекцией.

Расчет приведенного коэффициента излучения, воспринимаемого газопорошковой гарнисажной фурмой, выполнен с учетом углового коэффициента излучения от футеровки в соответствии с выражением 4.

Результаты численного исследования тепловой работы газоохлаждаемых гарнисажных фурм представлены в таблице 1. При этом расчетом тепловых потоков установлена возможность снижения теплопередачи на внутренние элементы специальных дутьевых устройств для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку 350-т конвертера до 10 % от воспринимаемого фурмой теплового потока, остальное тепло расходуется на нагрев азота, подаваемого для раздувки шлака.

Таблица 1 – Результаты численного исследования тепловой работы специальных дутьевых устройств

№ п/п	Наименование	Торкрет- гарнисажная фурма		Газопорошковая гарнисажная фурма	
		кВт	%	кВт	%
1	Тепловой поток, воспринимаемый фурмой, в том числе: излучением конвекцией	3533,5	100	3389,5	100
		3440,9	97,4	3337,2	98,5
		92,6	2,6	52,3	1,5
2	Тепловой поток на нагрев азота, подаваемого на раздувку шлака	3164,2	89,5	3168,3	93,5
3	Тепловой поток на внутренние элементы фурмы	369,3	10,5	221,2	6,5

Расчет температурных нагрузок на конструктивные элементы газоохлаждаемой торкрет-гарнисажной фурмы показал, что при наиболее теплонапряженных условиях процесса температура нагрева наружной трубы может достигать 700 – 750 °С, при этом средняя температура составляет 670 – 675 °С, что позволяет сохранить конструктивную прочность фурмы при отсутствии в агрегате жидкого металла и ограниченном времени ее нахождения в высокотемпературных условиях. Азот перед соплами Лавалья имеет расчетную температуру около 150 °С. Основной нагрев торкрет-массы происходит после выхода ее из сопел, когда к струе примешиваются окружающие газы.

Расчетные данные максимальной и средней температуры наружной трубы газоохлаждаемой газопорошковой гарнисажной фурмы составляют 632 и 613 °С, соответственно, что надежно обеспечивает ее эксплуатационную стойкость.

С использованием полученных результатов выполнено теоретическое обоснование газового охлаждения специальных дутьевых устройств для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку большегрузных конвертеров. Разработанная техническая документация передана к использованию в ККЦ № 2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

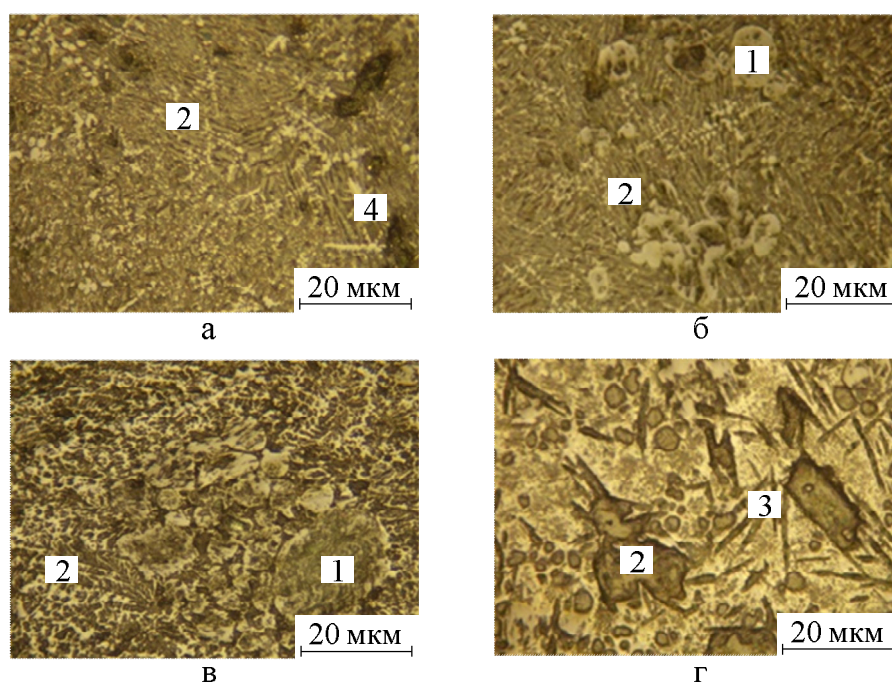
**В четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований и определения рациональных параметров технологии продувки металла и нанесения огнеупорных покрытий на футеровку агрегата с использованием высокомагнезиальных флюсов в 350-т конвертерах АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

Технология выплавки стали предусматривает формирование шлака за счет присадки извести, алюминиевой выбойки с содержанием 50 % С, 35 %  $\text{CaF}_2$ , 12 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и высокомагнезиального флюса ФОМИ, содержащего не менее 66 %  $\text{MgO}$ . Присадку флюса в конвертер (15 – 18 кг/т) выполняют вместе с известью в завалку на металлический лом до его нагрева для ускорения процесса шлакообразования. Раздувку шлака на футеровку агрегата осуществляют струями азота через кислородную фурму.

Для исследования особенностей шлакообразования проведены опытные плавки с промежуточными повалками при выплавке низко- и среднеуглеродистых марок стали. Химический анализ отобранных проб показал, что при использовании флюса растворение извести протекает медленнее: содержание  $\text{CaO}$  в течение всей продувки на 5 – 10 % ниже обычных значений несмотря на повышенную окисленность шлака. Экспериментально подтверждено увеличение температуры плавления шлакового расплава в течение всей продувки металла, обусловленное увеличением содержания  $\text{MgO}$ , и установлено снижение рафинирующей способности шлака.

В соответствии с отмеченным, на основе диаграммы четырехкомпонентной оксидной системы  $\text{CaO}'\text{-MgO}'\text{-FeO}'\text{-SiO}_2'$  выполнен теоретический анализ фазовых превращений в шлаке по ходу продувки конвертерной ванны. В рассматриваемых условиях установлено, что оксидные системы, соответствующие шлакам начала продувки, содержащие большое количество  $\text{SiO}_2$ , как правило, кристаллизуются с образованием силикатов, вюститита и незначительного количества периклаза. В оксидных системах, соответствующих шлакам середины продувки, возрастает содержание периклаза. В заключительный период продувки расплав кристаллизуется с образованием извести, твердого раствора магнезиевюститита и двухкальциевого силиката –  $(\text{CaO})_2\text{SiO}_2$ . При этом, происходит перераспределение  $\text{MgO}$  между фазами: в начале продувки  $\text{MgO}$  преимущественно находится в составе силикатов, а в конце продувки – в виде периклаза магнезиевюститита. Необходимо отметить, что для расплава начала продувки характерна высокая концентрация насыщения  $\text{MgO}$  (20 – 25 %), и соответствующие оксидные системы способны дополнительно растворить еще 8 – 14 % оксида магния. В середине продувки обеспечивается формирование расплава с концентрацией  $\text{MgO}$  близкой к области насыщения, а в конце продувки – в области пересыщения магнезиевюстититом (до 9 %).

Для уточнения установленных закономерностей выполнили экспериментальное исследование изменения минерального состава, текстурно-структурных, кристаллохимических и кристаллофизических характеристик шлака по периодам конвертерной плавки. Микроструктура образцов шлака характерной опытной плавки представлена на рисунке 6.



1 – периклазиды; 2 – оливины; 3 – пироксены; 4 – шпинелиды

Рисунок 6 – Микроструктура образцов шлака, отобранных на 4-ой (а), 12-ой (б) минутах, по окончании продувки (в), после нанесения гарнисажа (г)

Выделение реликтового периклаза и извести наблюдали во всех образцах. Их наличие свидетельствует о том, что большая часть этих тугоплавких минералов, оплавляясь с периферии, прошла стадию перекристаллизации с уплотнением внутренних объемов периклаза и извести. При этом микроструктура гарнисажного шлака (рисунок 6, позиция г) имеет значительно больше крупных тугоплавких кристаллов двухкальциевого силиката и периклазидов, которые вместе с нерастворившимися зернами периклаза и извести образуют каркасную структуру и формируют гарнисаж за счет затвердевания шлакового расплава на поверхности футеровки. Определено что для повышения стойкости огнеупорного покрытия необходимо увеличение в шлаке количества крупных кристаллов двухкальциевого силиката и обеспечение рационального соотношения фаз.

Экспериментально установлено, что при присадке (в среднем 2,9 кг/т стали) высокомагнезиального флюса для подготовки конвертерного шлака к раздувке происходит увеличение температуры плавления шлакового расплава, обусловленное изменением количества и состава твердого раствора магнезиовюстита, а также снижение содержания двухкальциевого силиката, что обеспечивает повышение стойкости огнеупорного покрытия на футеровке агрегата.

С использованием теоретических разработок и полученных экспериментальных данных определены рациональные параметры дутьевого и шлакового режимов конвертерной плавки для условий работы 350-т агрегатов АО «ЕВРАЗ ЗСМК»: рекомендовано на металлический лом перед его подогревом присаживать не более трети необходимого количества высокомагнезиального флюса, остальное количество флюса вводить не ранее 4 – 5 минуты продувки

после изменения дутьевого режима плавки. Основные технологические показатели опытных и сравнительных плавов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные технологические показатели продувки металла в 350-т конвертере с использованием высокомагнезильного флюса ФОМИ

Показатели	Опытные плавки	Сравнительные плавки
Количество плавов	72	150
Расход металлолома, кг/т	288	281
Расход чугуна, кг/т	812	819
Температура чугуна, °С	1400	1399
Химический состав чугуна, %		
Si	0,54	0,57
Mn	0,43	0,41
S	0,018	0,017
P	0,090	0,091
Присадки в конвертер, кг/т		
ФОМИ	16,9	17,7
Известь	52,3	51,2
Уголь	6,5	6,0
Алюминиевая выбойка	3,4	3,5
Температура на повалке, °С	1619	1622
Химический состав металла на повалке, %		
C	0,051	0,053
Mn	0,101	0,097
S	0,018	0,020
P	0,009	0,010
Химический состав шлака, %		
CaO	36,7	36,4
SiO <sub>2</sub>	11,4	11,7
FeO	25,8	27,2
MgO	12,05	12,3
MnO	4,41	4,2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,41	1,46
S	0,078	0,085
Основность	3,22	3,11
Коэффициенты распределения:		
(S)/ [S]	4,33	4,25
(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )/[P]	157	146

Необходимо отметить, что на опытных плавках, проведенных в соответствии с разработанными рекомендациями, обеспечиваются более благоприятные условия для окислительного рафинирования металла и

формирования гарнисажного шлака. Выполненные в течение опытно-промышленной кампании замеры остаточной толщины футеровки подтвердили высокую стойкость огнеупорного покрытия.

Анализ полученных результатов позволяет утверждать о перспективности предлагаемых технологических рекомендаций по совершенствованию технологии нанесения огнеупорных покрытий на футеровку большегрузных агрегатов. Прогнозируемый годовой экономический эффект от повышения стойкости футеровки 350-т конвертеров АО «ЕВРАЗ ЗСМК» составляет 8,4 млн. руб.

**Заключение** содержит основные выводы по работе.

**В приложениях** приведены справка о применении в производстве и акт о внедрении в учебный процесс результатов работы.

### **Заключение**

В процессе выполнения диссертационной работы, направленной на разработку новых ресурсосберегающих технологий продления срока службы футеровки кислородных конвертеров с применением высокомагнезиальных флюсов, получены следующие основные результаты:

1) Методами физического моделирования высокотемпературных процессов исследованы особенности взаимодействия газовых струй с жидкостью при реализации технологии раздувки шлака на футеровку конвертера. Установлен механизм и гидрогазодинамические режимы взаимодействия вихревой газовой струи со шлаковым расплавом.

2) Численными экспериментами установлено, что при реализации технологии нанесения защитного покрытия на футеровку конвертера с использованием вихревой раздувки шлакового расплава размер частиц, выносимых из зоны взаимодействия, определяется скоростью газового потока и расходом газа, при этом снижение вязкости расплава способствует уменьшению минимального размера частиц.

3) Проанализированы особенности движения капель шлака, образующихся при раздувке расплава вихревыми газовыми струями в кислородном конвертере. Установлена зависимость между параметрами движения брызг шлака различного диаметра и характеристиками вихревой струи. Определено оптимальное для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертера соотношение незакрученной и закрученной составляющих скорости вихревой газовой струи, равное 0,2 – 1,0 отн. ед.

4) Установлено, что на параметры движения мелких капель шлака большое влияние оказывает аэродинамика транспортирующего газа, а поведение крупных капель шлака зависит от скорости газового потока только в начале движения, в дальнейшем его влияние становится незначительным. При этом траектория движения капель шлака независимо от их размера определяется соотношением незакрученной и закрученной составляющих скорости вихревой газовой струи.

5) Проанализированы современные разработки и направления совершенствования конструкций специальных дутьевых устройств для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку 350-т конвертеров АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

Определены основные технические решения по обеспечению повышенной стойкости агрегатов.

6) Показана принципиальная возможность расчета температурных нагрузок на конструктивные элементы специальных газоохлаждаемых дутьевых устройств для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертеров. Разработана методика анализа теплообменных процессов в рабочем пространстве конвертера и выполнено теоретическое обоснование газового охлаждения специальных дутьевых устройств.

7) С использованием разработанной методики выполнены расчеты и установлена возможность снижения теплопередачи на внутренние элементы газоохлаждаемых торкрет-гарнисажной и газопорошковой фурм до 10 % от воспринимаемого специальными дутьевыми устройствами теплового потока. Выданы практические рекомендации для условий 350-т конвертеров АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

8) Выполнено опытно-промышленное исследование технологии нанесения огнеупорных покрытий на футеровку 350-т агрегатов АО «ЕВРАЗ ЗСМК» с использованием высокомагнезиального флюса ФОМИ. Установлено, что формируемые конвертерные шлаки содержат 11 – 13 %  $MgO$ , при этом ухудшаются условия шлакообразования: растворение извести протекает медленнее, содержание  $CaO$  в течение всей продувки на 5 – 10 % меньше обычных значений, наблюдается быстрое увеличение содержания  $MgO$  в шлаке при его повышенной окисленности.

9) Определены фазовые превращения в шлаковом расплаве при растворении высокомагнезиального флюса с использованием диаграммы состояния четырехкомпонентной оксидной системы  $CaO-MgO-FeO_x-SiO_2$ . Экспериментально, минералографическими исследованиями, подтверждено изменение минерального состава, текстурно-структурных, кристаллохимических и кристаллофизических характеристик шлака по периодам продувки конвертерной ванны. Установлено перераспределение  $MgO$  между фазами шлака в зависимости от концентрации оксида магния и основности шлака. Выполнена оценка изменения концентрации насыщения шлакового расплава оксидом магния в различные периоды продувки металла.

10) Выполнено экспериментальное исследование фазовых и структурных превращений в шлаковом расплаве при присадке высокомагнезиального флюса ФМ-1 для подготовки к раздувке на футеровку конвертера. Установлено увеличение температуры плавления шлакового расплава, обусловленное изменением количества и состава твердого раствора магнезиевюситита, а также снижение содержания двухкальциевого силиката, что обеспечивает повышение стойкости огнеупорного покрытия на футеровке агрегата.

11) Определены рациональные параметры технологии с использованием высокомагнезиальных флюсов, позволяющей обеспечить рафинирование металла от вредных примесей, снижение окисленности шлака и формирование надежного защитного покрытия. Проведены опытно-промышленные плавки, отработан дутьевой и шлаковый режим ведения конвертерной операции. Переданы к промышленному внедрению рекомендации по совершенствованию технологии

выплавки стали и нанесения огнеупорных покрытий на футеровку 350-т конвертеров АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Прогнозируемый годовой экономический эффект составит 8,4 млн. руб.

### Список работ, опубликованных по теме диссертации

*Статьи в рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Протопопов, Е.В. Исследование особенностей формирования гарнисажа на футеровке большегрузных конвертеров при использовании высокомагнезиальных флюсов / Е.В. Протопопов, А.А. Пермяков, **А.Н. Калиногорский** // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2013. – № 4. – С. 32 – 35.

2. Амелин, А.В. Формирование гарнисажа магнезиальных шлаков на футеровке большегрузных конвертеров / А.В. Амелин, Е.В. Протопопов, **А.Н. Калиногорский**, С.В. Фейлер // Сталь. – 2014. – № 7. – С. 22 – 25.

3. Протопопов, Е.В. Тепловая работа торкрет-гарнисажной фурмы для горячих ремонтов футеровки кислородных-конвертеров / Е.В. Протопопов, А.Г. Чернятевич, С.В. Фейлер, **А.Н. Калиногорский** // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2014. – № 4. С. 21 – 25.

4. **Калиногорский, А.Н.** Исследование особенностей применения вихревых технологий для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертеров. Сообщение 1. Особенности дробления жидкого шлака при раздувке вихревой фурмой / **А.Н. Калиногорский**, Е.В. Протопопов, А.Г. Чернятевич, С.В. Фейлер, В.И. Багрянцев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2015. – Т. 58 – № 10. – С. 756 – 760.

5. **Калиногорский, А.Н.** Исследование особенностей применения вихревых технологий для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертеров. Сообщение 2. Характеристики и параметры движения капель шлака / **А.Н. Калиногорский**, Е.В. Протопопов, А.Г. Чернятевич, С.В. Фейлер, В.И. Багрянцев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2015. – Т. 58 – № 12. – С. 896 – 900.

6. Фейлер, С.В. Изучение особенностей применения вихревых течений для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертеров / С.В. Фейлер, Е.В. Протопопов, А.Г. Чернятевич, **А.Н. Калиногорский**, В.И. Багрянцев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2014. – № 8. – С. 28–33.

*Статьи в иностранных журналах:*

7. **Kalinogorskii, A.N.** Application of refractory coatings to converter linings by swirling technology. 1. Breakup of liquid slag with a swirling lance / **A.N. Kalinogorskii**, E.V. Protopopov, A.G. Chernyatevich, S.V. Feiler, V.I. Bagryantsev // Steel in Translation. – 2015. – Vol. 45. – № 10. – P. 743 – 746.

8. **Kalinogorskii, A.N.** Application of refractory coatings to converter linings by swirling technology. 2. Motion of slag droplets / **A.N. Kalinogorskii**, E.V. Protopopov, A.G. Chernyatevich, S.V. Feiler, V.I. Bagryantsev // Steel in Translation. – 2015. – Vol. 45. – № 12. – P. 923 – 926.

9. Amelin, A.V. Formation of magnesia-slag coating on the lining of large converters / A.V. Amelin, E.V. Protopopov, **A.N. Kalinogorskiy**, S.V. Feiler // Steel in Translation. – 2014. – Vol. 44. – № 7. – P. 513 – 516.

*Труды периодических изданий и научно-практических конференций:*

10. Протопопов, Е.В. Исследование минерального состава конвертерных магнезиальных шлаков для повышения изнosoустойчивости формируемого на футеровке гарнисажа / Е.В. Протопопов, В.В. Соколов, А.А. Пермяков, **А.Н. Калиногорский** // Металлургия: технологии, управление, инновации, качество : труды XVII Всероссийской научно-практической конференции – Новокузнецк : Изд. Центр СибГИУ. – 2013. – С. 96 – 100.

11. Протопопов, Е.В. Перспективы применения вихревых технологий для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертеров / Е.В. Протопопов, А.Г. Чернятевич, С.В. Фейлер, **А.Н. Калиногорский** // Литье. Металлургия. 2014: Материалы Юбилейной X Международной научно-практической конференции. – Запорожье : ЗТПП. – 2014. – С. 377 – 378.

12. Протопопов, Е.В. Исследование минерального состава конвертерных магнезиальных шлаков для формирования изнosoустойчивого гарнисажа на футеровке агрегата / Е.В. Протопопов, **А.Н. Калиногорский** // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XVIII Международного научного симпозиума имени академика М. А. Усова. – Томск. – 2014. – С. 138 – 140.

13. Протопопов, Е.В. Особенности шлакового режима конвертерной плавки при использовании высокомагнезиальных флюсов / Е.В. Протопопов, **А.Н. Калиногорский** // Металлургия: технологии, управление, инновации, качество : труды XVIII Всероссийской научно-практической конференции – Новокузнецк : Изд. Центр СибГИУ. – 2014. – С. 106 – 111.

14. Протопопов, Е.В. Формирование магнезиальных шлаков для повышения стойкости футеровки кислородных конвертеров / Е.В. Протопопов, **А.Н. Калиногорский** // Инновационный конвент «Кузбасс: образование, наука, инновации»: материалы конвента. – Кемерово. – 2014. – С. 363 – 366.

15. Протопопов, Е.В. Исследование аэродинамики вихревой газовой струи для совершенствования технологии нанесения огнеупорных покрытий на футеровку сталеплавильных агрегатов / Е.В. Протопопов, С.В. Фейлер, **А.Н. Калиногорский** // Инновации в материаловедении и металлургии: материалы IV Международной интерактивной научно-практической конференции. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та. – 2015. – С. 47 – 50

16. Протопопов, Е.В. Исследование фазовых равновесий в сложных оксидных системах для оптимизации формирования конвертерных магнезиальных шлаков рационального состава / Е.В. Протопопов, Н.Ф. Якушевич, **А.Н. Калиногорский** // Литье. Металлургия. 2015: Материалы XI Международной научно-практической конференции. – Запорожье : ЗТПП. – 2015. – С. 377 – 378.

Подписано в печать 2016 г. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага 80 г/м<sup>2</sup>. Усл. печ. л. . Тираж экз. Заказ № .

654007, Новокузнецк, ул. Кирова, 42.

Издательский центр СибГИУ