

Министерство образования и науки
Донецкой народной республики
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Донецкий национальный технический университет»

На правах рукописи



Беззуб Александра Андреевна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ
ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ТЕХНОЛОГИИ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ
СТАЛИ**

05.14.04 - Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Донецк – 2022

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк.

**Научный
руководитель**

Захаров Николай Иванович,
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Дрёмов Владимир Владимирович
доктор технических наук, профессор,
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры», г. Макеевка,
профессор кафедры физики и прикладной химии

Миронова Надежда Александровна
кандидат технических наук, доцент,
Государственная организация высшего
профессионального образования «Донецкий
национальный университет экономики и торговли
имени Михаила Туган-Барановского», г. Донецк,
доцент кафедры оборудования пищевых
производств

Ведущая организация:

Государственное образовательное
учреждение высшего образования ЛНР
«Луганский государственный университет
имени Владимира Даля», г. Луганск

Защита состоится 22 февраля 2023 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 01.016.03 при ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет» по адресу: 83001, г. Донецк, проспект Гурова, 14, Главный корпус, ауд. 603.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет» по адресу: 83001, г. Донецк, ул. Университетская, 24, <http://science.donnu.ru>.

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.016.03
канд. физ.-мат. наук



А.Б. Мироненко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одну из доминирующих ролей в совершенствовании перспективных технологий металлургического производства, в том числе и металлургии стали, играют вопросы повышения эффективности процессов тепломассопереноса на различных этапах плавильного передела. С оптимизацией этих процессов связано как обеспечение повышенного качества металла, так и улучшение технико-экономических характеристик, экономии энергетических ресурсов, более высокие показатели энергоресурсосбережения. Общеизвестно, что на всех этапах сталеплавильного передела значительные резервы его совершенствования сосредоточены именно в технологических новациях, обеспечивающих повышение эффективности процессов тепломассопереноса, в том числе в применении инновационных решений по внепечной обработке расплавов, как неотъемлемой части технологической цепочки производства стали.

Особое место в структуре технологий внепечной обработки стали занимает продувка металла аргоном через днище ковша при атмосферном давлении под слоем синтетического шлака, предохраняющего расплав от переохлаждения и поступления в него газов из атмосферы, совершенствование способов которой может рассматриваться как задача нахождения оптимизированных параметров тепловых технологических процессов. В совершенствовании режимов продувки аргоном жидкой стали и температурного режима покровного шлака кроются значительные резервы энергоресурсосбережения. На необходимость решения проблемы энергоресурсосбережения при продувке жидкого металла аргоном в условиях внепечной дегазации указывал академик В.Л. Найдек. По данным Н.Н. Чуйко наиболее результативной для создания условий повышения эффективности тепломассопереноса на стадии внепечной обработки стали является именно продувка расплава аргоном через пористые элементы днища ковша, которая обеспечивает распределение мелких пузырьков инертного газа по всему объему жидкой ванны. Большое количество пузырей аргона, всплывающих в жидкой ванне и сформированных на порах продувочного устройства, обеспечивают значительную площадь поверхности «аргон-металл» и интенсивную конвективную диффузию атомов удаляемого из металла газа к этой поверхности и, далее, выброс этого газа в атмосферу через шлак пузырями аргона. И.И. Борнацким и В.С. Живченко на основании экспериментальных исследований показано, что продувка жидкого металла через пористые элементы днища ковша при атмосферном давлении под слоем газопроницаемого синтетического шлака не уступает по эффективности комплексной обработке с включением технологии вакуумирования. Также, весьма значительные успехи в области разработки технологий внепечной дегазации (в частности, деазотации) достигнуты японскими учёными А.Казуко, Т.Нарада, С.Тасисада и др.

Вместе с тем, при наличии согласованного мнения специалистов в отношении неоспоримых достоинств технологии продувки расплава аргоном через пористые элементы днища ковша, ряд вопросов ее совершенствования в

направлении повышения эффективности процессов тепломассопереноса и обеспечения энергоресурсосбережения, конструктивных структурных особенностей теплотехнического оборудования, которые обеспечивают снижение затрат материальных ресурсов на его изготовление, требуют дальнейшего исследования. Так, в частности, при практикуемых на данный момент различных вариантах распределения пористых элементов в днище ковша (равномерное распределение по всему днищу и «пористое кольцо» в центральной части днища), металлурги сталкиваются с усиленным износом части элементов его футеровки, вызванным инициированными продувкой вихревыми движениями потоков жидкой стали. Эта ситуация возникает по той причине, что до сих пор не решен вопрос выбора оптимизированного распределения пористых элементов (пористых пробок) в днище, который, с одной стороны, позволял бы достичь заданный уровень рафинирования металла, а, с другой стороны, уменьшение износа футеровки и экономии энергоресурсов.

Таким образом, применительно к технологии внепечной обработки стали изучение и совершенствование процессов тепломассопереноса при продувке жидкого металла аргоном через днище ковша является актуальной научной задачей промышленной теплоэнергетики, связанной с достижением повышенных показателей энергоресурсосбережения в металлургии стали.

Связь работы с научными программами, планами и темами. Диссертационная работа выполнена в рамках исследований по научному направлению «Процессы тепломассопереноса и энергоресурсосберегающие режимы металлургических технологий» кафедры «Техническая теплофизика» факультета металлургии и теплоэнергетики ГОУВПО «ДОННТУ», тема Н 2020-8 «Математическое моделирование процессов тепломассопереноса и энергоресурсосберегающие режимы при внепечной дегазации жидкого металла».

Объектом исследования являются технология внепечной высокотемпературной обработки стали путем продувки аргоном при атмосферном давлении.

Предметом исследования являются процессы конвективного тепломассопереноса в технологиях внепечной деазотации жидкого металла продувкой аргоном через днище ковша при атмосферном давлении под синтетическим азотопроницаемым шлаком в условиях локального распределения пористых пробок в днище.

Цель исследования заключается в создании обоснованных технологических приемов повышения эффективности процессов тепломассопереноса в энергоресурсосберегающих режимах внепечной деазотации жидкого металла продувкой аргоном через днище ковша с пористыми пробками при атмосферном давлении и наличии на поверхности расплава синтетического азотопроницаемого шлака.

Для реализации поставленной цели решались следующие задачи:

– разработка компьютерной модели конвективного тепломассопереноса в жидком металле в условиях рассматриваемого варианта технологий;

- установление адекватности этой модели путём сравнения расчётных и экспериментальных данных;
- численное исследование динамики нагрева шлака погружёнными в него электродами;
- численное исследование разрушающей способности вихревого движения жидкого металла, воздействующего на стенки ковша в процессе деазотации расплава;
- численное исследование конвективной диффузии атомов азота в жидкой ванне в процессе деазотации расплава железа;
- разработка энергоресурсосберегающих режимов рассматриваемого варианта технологий.

Методы исследования. В исследовании применялись апробированные теоретические модели конечно-разностного метода переменных направлений для численного анализа пространственных краевых задач моделей тепловых процессов, включая 3-мерные дифференциальные уравнения Фурье и Навье-Стокса с граничными условиями 2,3 и 4 рода; методы решения интегральных уравнений конвективной диффузии атомов азота в жидком металле; методы компьютерной программной реализации вычислительных алгоритмов анализа рассматриваемых математических моделей промышленной теплоэнергетики; методы лабораторного экспериментального анализа.

Достоверность полученных результатов, сформулированных научных положений и выводов обеспечивается корректным использованием при решении заданий работы строгих обоснованных математических методов; контролем точности реализуемых численных исследований; согласованностью полученных результатов в отдельных частных случаях с опубликованными результатами исследований других авторов; сопоставлением ряда установленных расчетно-теоретических результатов с экспериментальными данными лабораторных и заводских исследований; соответствием между полученными результатами и подтвержденными данными практического внедрения.

Научная новизна полученных результатов.

1. Впервые проведено учитывающее пространственную структуру температурного поля в расплаве и несимметричность расположения продувочных устройств в днище ковша компьютерное моделирование процессов конвективного теплопереноса атомов азота в жидком металле при его внепечной деазотации, согласующееся с данными заводских и лабораторных исследований.

2. Получили развитие научные представления о влиянии характера нагрева шлака, покрывающего жидкий металл, на его температурный режим. Показано, что режимы нагрева шлака с периодическим включением и отключением электродов обеспечивают как поддержание температуры металла на необходимом уровне, так и сокращение энергозатрат при его внепечной обработке.

3. Впервые исследована разрушающая способность вихревого движения жидкого металла, вызывающего истощение футеровки ковша. Выявлены области наиболее подверженные фактору данных высокотемпературных деструктивных воздействий. Показано, что разработка защитных мер, по усилению этих областей

повышает длительность эксплуатации футеровки стенок ковша, и, таким образом, является фактором ресурсосбережения.

4. Впервые получена допускающая определение экстремальных значений и являющаяся основой в достижении максимального показателя энергоресурсосбережения зависимость степени деазотации расплава железа от интенсивности продувки аргоном через несимметрично расположенные в днище ковша пористые элементы.

Теоретическая значимость работы заключается в получении и развитии научных представлений о влиянии характера нагрева шлака на его температурный режим; о разрушающей способности вихревого движения разогретого жидкого металла, вызывающего высокотемпературное истощение футеровки стенок ковша; о характере зависимости степени деазотации расплава железа от интенсивности продувки в условиях рассматриваемого варианта технологий.

Практическая значимость работы состоит в разработке рекомендаций по обеспечению оптимизированных параметров энергоресурсосбережения при нагреве шлака, покрывающего расплав металла; о необходимости принятия и характере защитных мер для минимизации факторов разрушительного воздействия вихревого движения разогретого жидкого металла на футеровку стенок ковша; по выбору оптимизированных параметров интенсивности продувки жидкой ванны аргоном. Получен акт № 43204-337 от 07.12.2022 о внедрении результатов диссертационного исследования в условиях ООО «ЮГМК» Филиала №2 «Енакиевский металлургический завод»

На защиту выносятся научные положения и результаты исследований, включающие:

- установленные закономерности влияния локального распределения пористых пробок в днище ковша на параметры конвективного теплопереноса атомов азота в жидком металле при его внепечной деазотации продувкой аргоном при атмосферном давлении под слоем синтетического азотопроницаемого шлака;
- сформулированные научные представления и выявленные количественные закономерности влияния характера нагрева шлака, покрывающего жидкий металл, на его температурный режим;
- выявленные и систематизированные данные о деструктивных воздействиях вихревого движения расплава при внепечной обработке, вызывающих истощение футеровки стенок ковша;
- сформированные рекомендации относительно условий обеспечения энергоресурсосберегающих режимов рассматриваемого варианта технологии.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ряде научно-технических конференций, в числе которых «XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики» (г. Уфа, 19-24 августа 2019 г.), «Всероссийская научная конференция школы для молодых ученых (с международным участием)» (г. Таганрог, 4 – 5 октября 2019 г.), «Донецкие чтения 2020: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности» (г. Донецк, 17-18 ноября 2020 г.), «Донецкие чтения 2021: образование, наука,

инновации, культура и вызовы современности» (г. Донецк, 26-28 октября 2021 г.), а также на заседаниях расширенного профильного научного семинара по проблемам промышленной теплоэнергетики ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» и ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет» (2022 г.).

Публикации и личный вклад соискателя. Основные результаты диссертации опубликованы в 6 научных работах, из которых 3 статьи в рецензируемых журналах, включённых в перечень рецензируемых изданий ВАК ДНР [1-3], 1 статья в ведущем рецензируемом журнале [4], а также 2 публикации в материалах и тезисах научно-технических конференций [5-6].

Основные результаты получены автором самостоятельно. В работах, включённых в перечень рецензируемых изданий ВАК ДНР, научному руководителю принадлежат постановка рассматриваемых задач, участие в выборе методологии исследования и обсуждения полученных результатов.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх разделов, перечня основных результатов и выводов, списка использованной литературы. Общий объём диссертации составляет 118 страниц, из которых основной текст занимает 108 страниц, список литературы – 10 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, дана её связь с тематикой научных исследований кафедры «Техническая теплофизика» факультета металлургии и теплоэнергетики, ДонНТУ, сформулированы цель и задачи работы, определены объект и предмет исследований, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных в диссертации результатов, положения, выносимые на защиту, а также личный вклад автора.

Первый раздел работы содержит общую характеристику процессов тепломассопереноса при внепечной дегазации жидкого металла от растворённых в нём газов. Приведены особенности деазотации жидкой ванны. Проработано современное состояние вопроса энергоресурсосбережения при внепечной дегазации расплава продувкой аргоном через пористые элементы днища ковша при атмосферном давлении в условиях покрытия свободной поверхности металла специально наведённым синтетическим газопроницаемым шлаком.

Отмечено, что проблема энергоресурсосбережения является одной из важнейших для металлургии. Решение этой проблемы ведётся в различных направлениях в том числе в форме разработки энергоресурсосберегающих режимов металлургических технологий.

Важнейшим звеном этих технологий стала внепечная обработка металлов. Существенным её элементом является внепечная деазотация расплавов, в которых азот растворим, продувкой аргоном через днище ковша.

По данным Н.Н. Чуйко наиболее эффективной является продувка аргоном через пористые элементы днища ковша, которая обеспечивает распределение мелких пузырьков инертного газа по всему объёму жидкой ванны.

И.И. Борнацкий и В.С. Живченко на основании экспериментальных исследований нашли, что продувка жидкого металла через пористые элементы днища ковша при атмосферном давлении под слоем газопроницаемого синтетического шлака не уступает по эффективности комплексной обработке с включением технологий вакууммирования.

Внепечной деазотацией расплавов занимались преимущественно японские учёные А.Казуко, Т.Нарада, С.Тасисадаи др.

На необходимость решения проблемы энергоресурсосбережения при продувке жидкого металла аргоном в условиях внепечной дегазации указывал академик В.Л. Найдек.

Недостатками существующих разработок в частности является неучёт в исследованиях многомерности распределения температуры по объёму расплава и несимметричности расположения пористых элементов в днище ковша. Устранению этих недостатков посвящена данная диссертационная работа.

Во втором разделе диссертационной работы дана математическая постановка задачи и методология научных исследований, связанных с актуальностью темы диссертации и реализации её цели.

Рассматривается следующая технология внепечной деазотации жидкого металла продувкой аргоном через днище ковша при атмосферном давлении в условиях наличия на поверхности расплава синтетического азотопроницаемого шлака. При этом инертный газ вводится в металл через 2 пористые пробки, расположенные на окружности коаксиальной к днищу ковша. Продувка жидкой ванны аргоном начинается с момента выпуска расплава из плавильной печи в ковш и продолжается по завершению этого этапа. В данной задаче предусматривается возможность подогрева металла в ковше электродами, расположенными в шлаке. В этом случае внепечной агрегат приобретает функцию установки «печь-ковш».

Уравнение конвективной диффузии атомов азота в расплаве:

$$\frac{1}{Q_H} \int_{\tau_0}^{\tau} \left(\frac{m^* \cdot H}{m_o} \right) \left(\frac{I[T_M(z)]}{U(z)} \right)_{cp} d\tau + \frac{1}{Q_H} \int_{\tau_0}^{\tau} \left(\frac{m^*}{m_o} \right) \left(\int_0^H \frac{I[T_M(z)]}{U(z)} \right) d\tau - \varepsilon = 0, \quad (1)$$

где: ε – эффективность конвективной диффузии атомов азота в расплаве металла (степень его дегазации); Q_H – начальная концентрация азота в расплаве; m^* – массовый расход аргона; m_o – его количество в единичном пузырьке; H – высотный уровень жидкой ванны в ковше; U – скорость всплывания пузырей аргона; I – поток массы атомов азота на поверхность единичного пузырька; τ – время; « cp » – символ осреднения по объёму металла в момент τ .

Уравнение (1) является интегральным и определяет время τ , необходимое для достижения заданного значения ε степени деазотации расплава.

Потоки массы атомов азота к поверхности всплывающих в металле пузырей аргона существенно зависят от коэффициента диффузии D_N атомов азота в жидкой ванне. В свою очередь этот коэффициент определяется температурой расплава в области локализации соответствующего пузырька аргона.

В период выпуска металла из плавильной печи в ковш температурное поле в каждый момент времени считаем однородным по причине воздействия на расплав двух перемешивающих факторов. Это потоки всплывающих в металле пузырей аргона, сформированных на порах продувочного устройства. Вторым перемешивающим фактором является воздействие на жидкую ванну струи расплава, выпускаемого в ковш из плавильной печи.

Специально подготовленный азотопроницаемый синтетический шлак, покрывающий поверхность металла с момента $\tau=0$, считаем обладающим достаточно высоким тепловым сопротивлением. Таким образом, охлаждение расплава в этот период происходит за счет поступления в металл аргона, имеющего начальную температуру, равную температуре окружающей среды.

Величина этого охлаждения определяется формулой:

$$\Delta T_M = \Delta T_{Ar} \times \left(\frac{C_p^{Ar}}{C_M} \right) \times \left(\frac{m_{Ar}^{\bullet}}{M_M^{\bullet}} \right). \quad (2)$$

Здесь: ΔT_{Ar} – величина нагрева аргона, поступающего в металл; C_p^{Ar}, C_M – удельные теплоёмкости аргона и металла; $m_{Ar}^{\bullet}, m_M^{\bullet}$ – их массовые расходы в рассматриваемый период.

После заполнения ковша расплавом, во втором периоде технологии, температурное поле является неоднородным. Это связано с отсутствием в этот период мощного перемешивающего металл фактора, а именно, падение струи расплава из плавильной печи в ковш. Процесс конвективного переноса теплоты в ковше описывается системой 3-мерных дифференциальных уравнений Фурье, Навье-Стокса и неразрывности:

$$c\rho \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] = \lambda \Delta T, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \quad (5)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial y} + \frac{\partial w^2}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \bar{g} \beta \Delta T + \bar{g} \beta_{\Gamma}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (7)$$

где c – удельная теплоемкость аргоно-металлической смеси при постоянном давлении; ρ – её плотность; T – температура; t – время; u, v, w – компоненты скорости вдоль координат x, y, z соответственно; λ – коэффициент теплопроводности этой смеси; P – давление; g – ускорение свободного падения; β – коэффициент объемного расширения; β_T – коэффициент газосодержания.

На внутренних стенках ковша выполняются условия прилипания и непроницаемости для компонент скорости. Между теплоизолирующими слоями стенок ковша выполняются граничные условия 4 рода:

$$\lambda_i \frac{\partial T}{\partial n} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T}{\partial n}, T_i = T_{i+1}, \quad (8)$$

где: λ_i – коэффициент теплопроводности i -го слоя футеровки.

На внешней границе стенок ковша выполняются граничные условия вида:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha(T_{\sigma} - T_{cp}), \quad (9)$$

где: T_{σ} – температура стальной брони; T_{cp} – температура окружающей среды; α – коэффициент теплоотдачи. Коэффициент α находится по формуле М.А. Михеева $Nu = C(Gr Pr)^n$.

Математическое описание распределения температуры по толщине шлака находилось из условия, что он представляет собой плоскопараллельный диск, лежащий на границе металла. При этом граничное условие на верхней границе шлака суть 3-го рода, связывающего её температуру с температурой окружающей среды. Граничное условие на нижней границе шлака относится к 4-му роду и определяет равенство температуры шлака и металла на поверхности их стыка. Мощность тепловыделения электродов учитывалась формулой:

$$P = I^2 \times R, \quad (10)$$

где I – величина, подводимого к электродам тока; R – их электрическое сопротивление, определяемое формулой:

$$R = \sigma \times l / S, \quad (11)$$

где σ – удельное электрическое сопротивление материала электродов; l – их длина; S – площадь поперечного сечения ($S = \pi r^2$, где r – радиус электродов).

Считаем, что кинематическая вязкость шлака, покрывающего поверхность расплава, существенно выше его аналогичной характеристики. Поэтому условия прилипания и непроницаемости распространены и на межфазную поверхность «металл-шлак».

В области пористых элементов днища ковша начальная скорость всплывания пузырей аргона равна нулю. Скорость жидкой ванны рассчитывается с учётом скорости этих частиц, локализованных в соответствующей области объёма ковша.

Потоки пузырей аргона перемешивают металл, интенсифицируют в нём процесс конвективного теплопереноса.

Для реализации математической модели использован «двухполевой метод», основанный на переходе к функции тока ψ и вихрю скорости ω .

При разработке компьютерной программы выбран метод конечных разностей (метод сеток). При этом область непрерывного изменения аргумента заменяется дискретным множеством точек (узлов), которые образуют пространственно-временную конечно-разностную сетку.

Предпочтительно применение неявной разностной схемы для уравнений переноса, которая позволит повысить устойчивость алгоритма, а также увеличить допустимые значения шага. При переходе к неявным аппроксимациям увеличивается время счета на каждом слое, однако общий расчет машинного времени сокращается из-за уменьшения числа расчетных слоев. Неявные схемы, как известно, имеют более сложную конструкцию, чем явные и требуют дополнительных усилий при разработке компьютерной программы.

Неявные методы переменных направлений, основанные на идее экономичных методов, позволяют свести решение многомерных задач к решению последовательности одномерных задач.

Учёт пространственной неравномерности тепловыделений в шлаке расчётным путём проводилось следующим образом. При прогонке вдоль линий сетки, пересекающих электроды с отсечением их элементарных частей, их локальное тепловыделение вычислялось в предположении её равномерности по объёму электродов.

Автором реализована математическая модель теплового процесса на языке Delphi на конечно разностной сетке.

Третий раздел работы содержит результаты компьютерного моделирования теплового баланса процесса конвективного переноса теплоты в жидком металле, а также рекомендации по энергоресурсосбережению при внепечной деазотации расплава продувкой аргоном через пористые пробки, расположенные в днище ковша по схеме на рис 1.

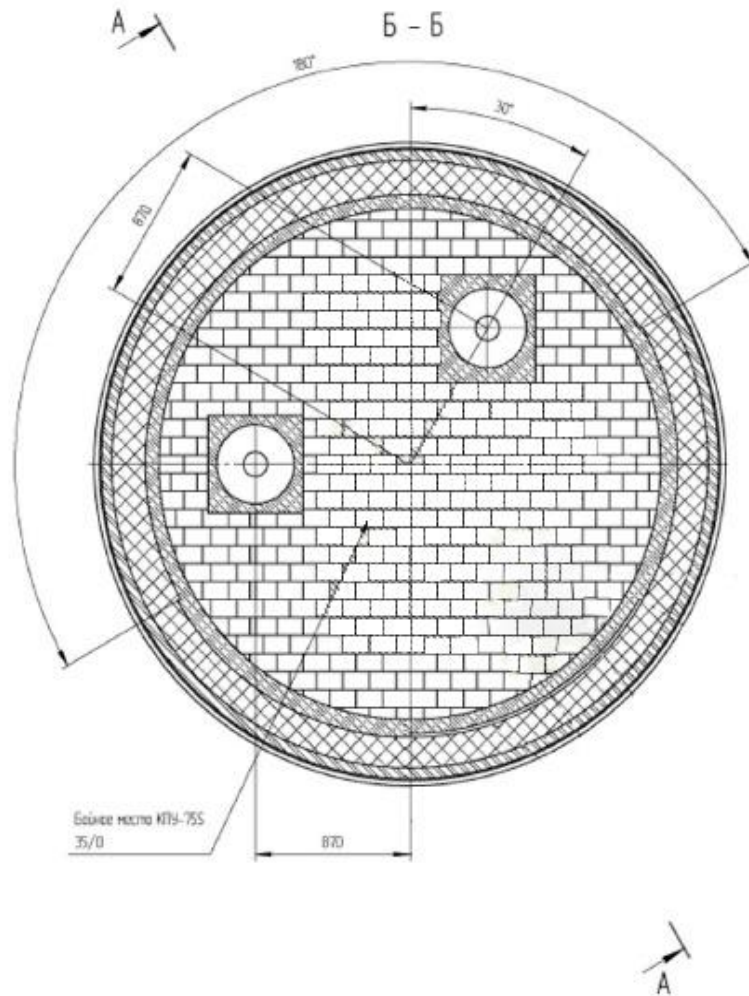


Рис. 1. Схема расположения пористых пробок в днище ковша

При этом поверхность металла покрыта специально разработанным синтетическим азотопроницаемым шлаком, предохраняющим расплав от переохлаждения и поступления в него газов из окружающей среды.

В компьютерную модель закладывались следующие значения параметров:

Таблица 1. Исходные данные с завода

Высота ковша, м	4,0
Диаметр ковша, м	3,5
Толщина рабочей футеровки, м	0,170
Начальная температура металла, К	1850
Расход аргона, м ³ /ч	35
Режим продувки	Пузырьковый
Диаметр пробок, м	0,15
Время прогонки, с	2700
Диаметр электродов, м	0,45
Металл	
Температура плавления, К	1812
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	39
Удельная теплоёмкость, кДж/(кг·К)	0,835

Плотность, кг/м ³	7040
Футеровка	
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	1,4
Удельная теплоёмкость, кДж/(кг·К)	1,04
Плотность, кг/м ³	2000
Броня (кожух)	
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	31,82
Удельная теплоёмкость, кДж/(кг·К)	0,691
Плотность, кг/м ³	7600

В компьютерной модели предусмотрена возможность изменения уровня концентрации углерода в расплаве от нулевого значения (жидкое железо) до конкретной марки стали с корректировкой физических характеристик металла (ЗСП).

На рис. 2 представлены результаты численного моделирования модуля вихря скорости.

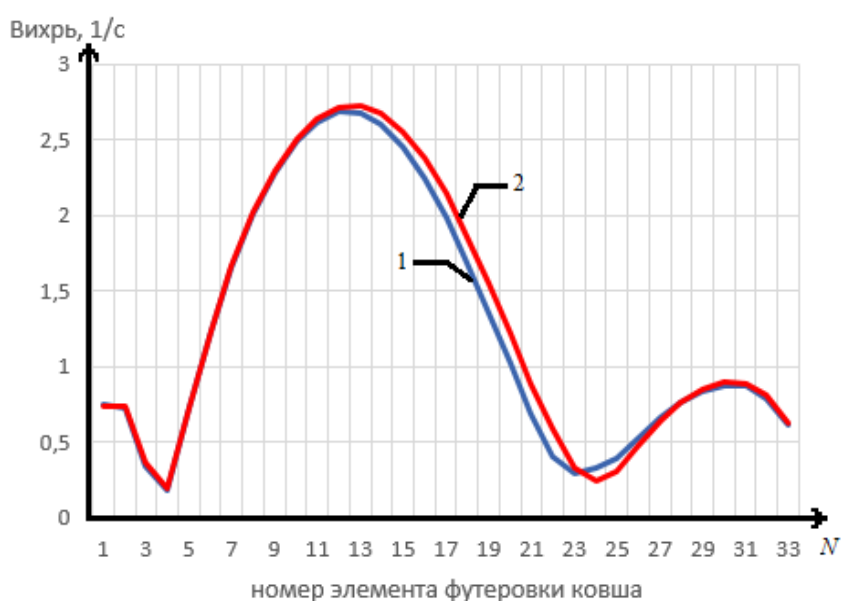


Рис. 2. Зависимость модуля вихря скорости от высотного уровня футеровки ковша
1: $\gamma = 0^\circ$; 2: $\gamma = 180^\circ$; $L = 0,7 \cdot R$.

На этом рисунке представлен характерный график зависимости модуля вихря скорости от высотного положения элемента футеровки ковша (кирпич). При этом, как показали исследования на ПЭВМ, удалённость L от центра ковша, равную $0,7R$ следует считать нежелательной. Кривые графика соответствуют углам $\gamma = 0^\circ$ и 180° и элементам футеровки, лежащим на противоположной стороне ковша. При увеличении модуля вихря скорости, как известно, наблюдается рост интенсивности вихревого движения расплава и, соответственно, увеличение коэффициента теплоотдачи от расплава металла футеровке ковша.

Как показали исследования, с маркой стали ЗСП в области №№11-13 элементов кладки футеровки ковша наблюдается максимум модуля вихря, что согласуется с данными Енакиевского металлургического завода, представленными на рис. 3.

Как показало компьютерное моделирование, в этой области и наблюдаются значительные теплотери.

Ряд					
33	149	150	149	147	149
32	149	151	152	151	149
31	147	148	149	149	148
30	145	146	148	148	143
29	140	143	145	144	141
28	133	136	138	139	132
27	122	124	127	128	121
26	111	116	117	120	115
25	110	113	110	113	109
24	110	113	109	109	105
23	109	112	109	109	106
22	109	113	105	107	109
21	111	112	100	106	108
20	106	104	85	89	102
19	105	99	79	84	101
18	104	93	76	81	99
17	100	93	75	75	94
16	101	90	69	66	92
15	97	91	70	67	88
14	95	91	73	69	89
13	89	92	71	66	85
12	92	93	70	64	80
11	96	96	75	71	84
10	99	96	79	73	86
9	101	99	85	79	92
8	104	98	89	83	96
7	105	101	93	85	98
6	106	105	98	90	100
5	110	107	102	93	104
4	111	107	108	98	108
3	125	125	121	114	124
2	139	143	143	143	146
1	159	158	160	160	163

Рис. 3. Заводские данные по средней топографии износа футеровочного слоя стенки ковша

В рассматриваемой области создаются условия для значительного износа футеровки ковша. Таким образом, разработка защитных мер по укреплению этой зоны повышает длительность эксплуатации футеровки стенок ковша и является фактором энергоресурсосбережения.

Вместе с тем, расположение пористых пробок в области от 0,45R до 0,55R, как показали исследования, способствует существенно меньшему износу футеровки ковша вследствие значительно меньшего значения модуля вихря скорости в этой области.

Выявленное в результате компьютерного моделирования расчётное распределение температуры в шлаке при его нагреве в различные моменты времени представлено на рис. 4.

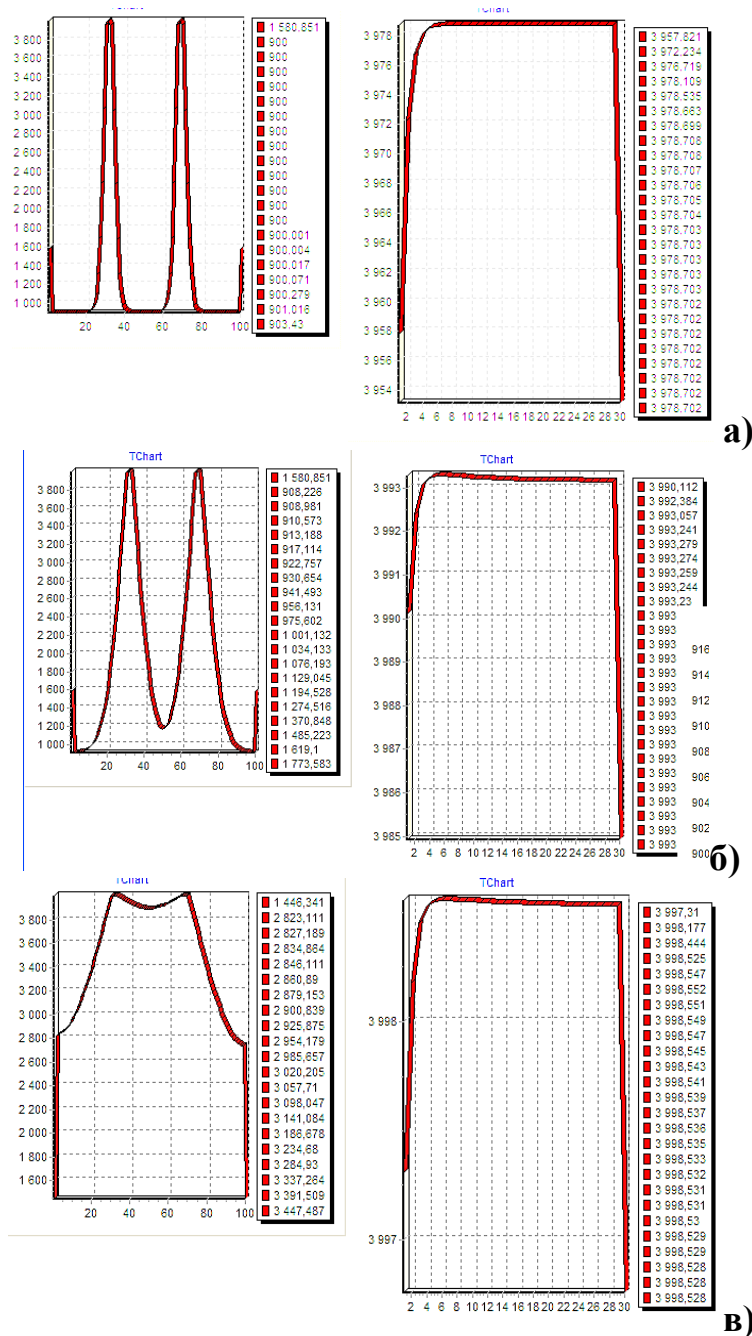


Рис. 4. Расчётное распределение температуры в плоскостях XZ (правый рисунок) и YZ (левый рисунок) в центральной части в моменты времени 10 с, 5 мин и 10 мин.

Три электрода, погруженные в шлак, в первые секунды показывают четкую границу нагрева. Уже через 10 минут жидкий шлак накрывает всю зону.

На рис. 5 показано распределение температуры для различных режимов нагрева электродов. Рассматривалась интегральная температура на границе металл – шлак.

$$T_{in} = \int_x \int_y T dx dy. \quad (12)$$

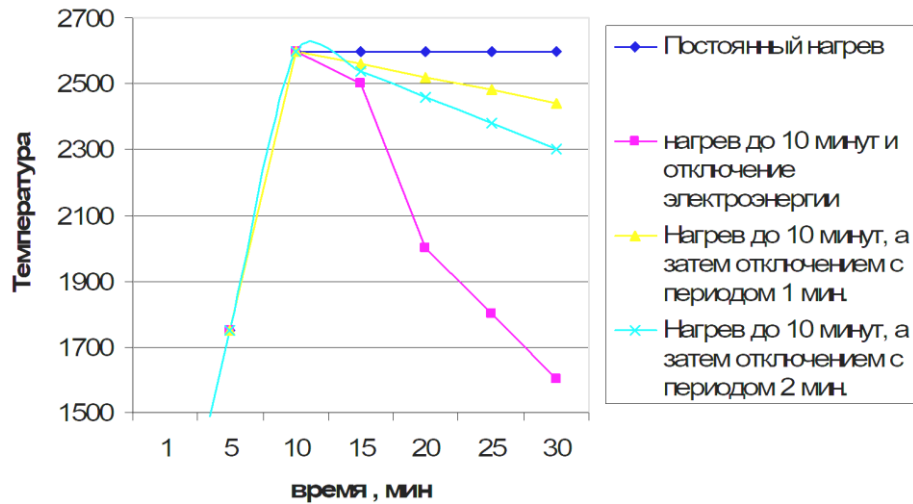


Рис. 5. Расчетное распределение температуры для различных режимов нагрева шлака

Из рисунка 5 видно, что если нагреть шлак до определенной температуры, а затем его не подпитывать электроэнергией, то он начинает остывать за счет конвективного перемешивания, вызванного барботажем. Другие два режима с периодическим отключением и включением электродов показали, что температура нижней поверхности шлака существенно выше температуры плавления металла, что и требуется. Таким образом, наименее энергозатратным является режим при нагреве до 10 минут, а затем отключении электроэнергии с периодом в 2 минуты. При этом режиме температура шлака в течении всего технологического процесса не падает ниже необходимой, а именно 2200 К.

Четвёртый раздел диссертации содержит результаты компьютерного моделирования процесса конвективной диффузии атомов азота в жидком железе при его внепечной деазотации продувкой аргоном через установленные в днище ковша 2 пористые пробки (рис. 1) при атмосферном давлении в условиях покрытия расплава азотопроницаемым синтетическим шлаком.

Рассмотрены вопросы энергоресурсосбережения, связанные с экономией аргона и энергоресурсами теплоэнергетической воздуходелительной установки по его получению.

На рис. 6 приведен график зависимости эффективности ε конвективной диффузии атомов азота в расплаве железа (степени его дегазации) в функции интенсивности Ω_0 продувки аргоном на единичную пору в момент завершения выпуска металла из печи в ковш при различных значениях диаметра d_n пор продувочного устройства.

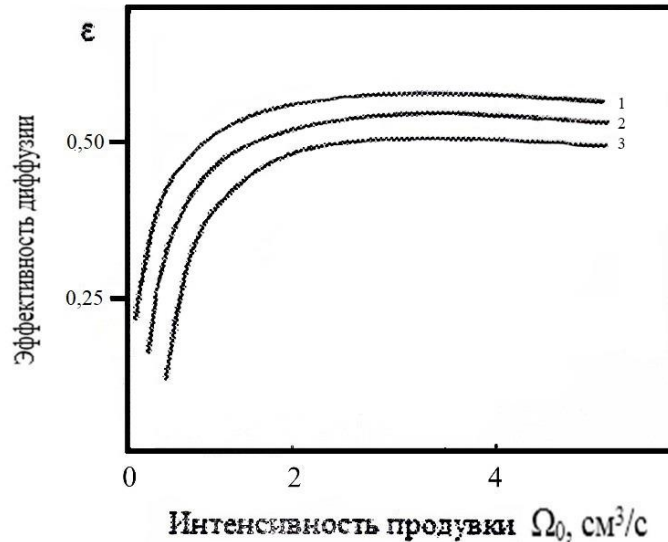


Рис. 6. Зависимость эффективности ε конвективной диффузии атомов азота в расплаве железа (степени его дегазации) в функции интенсивности Ω_0 продувки аргоном на единичную пору в конце выпуска металла из плавильной печи в ковш
 1 $-d_n = 0,6$ мм; 2 $-d_n = 0,8$ мм; 3 $-d_n = 1,0$ мм;
 $[S] = 0,03$ %; $D_N = 0,9 \cdot 10^{-4}$ см²/с.

Как следует из этого графика при увеличении единичной и общей интенсивности продувки эффективность ε возрастает вследствие увеличения количества пузырей аргона, внедряемого в жидкую ванну в единицу времени. Однако при некотором оптимальном значении $\Omega_0 = \Omega_{opt}$ величина ε достигает максимума и дальнейший рост этой величины прекращается. Существование Ω_{opt} связано с наличием противоположной тенденции увеличению площади поверхности контакта «аргон-металл» при росте Ω_0 , а именно, снижению времени контакта пузырей аргона с жидкой ванной, вследствие чего рафинирующая способность каждого из пузырей уменьшается. Следовательно, режим продувки при $\Omega_0 = \Omega_{opt}$ является энергоресурсосберегающим. Зависимость $\varepsilon(d_n)$ является убывающей, так как при снижении диаметра пор продувочного устройства при фиксированном значении $\Omega_0 = \Omega_{opt}$ площадь поверхности контакта «аргон-металл» возрастает. Как показали исследования, массовый расход аргона для обеспечения Ω_{opt} снижается с уменьшением d_n .

Количество пор единичной пробки, которые могут обеспечить заданную общую интенсивность продувки $\Omega_{общ}$ определяем из формулы:

$$N_n = \Omega_{общ} / (2 \times \Omega_0). \quad (13)$$

Например, по данным Енакиевского металлургического завода $\Omega_{общ} = 35$ м³/ч, то $N_n = \frac{35 \cdot 10^6 \text{ см}^3}{3600 \text{ с} \cdot 3 \text{ см}^3 / \text{с} \cdot 2} \approx 1,5 \times 10^3$.

Предельная интенсивность продувки, обеспечивающая переход из пузырькового в струйный режим продувки для единичной поры диаметром 0,6 мм

по данным В.М. Шевелева равна $7 \text{ см}^3/\text{с}$. При диаметре пробки этого завода $d = 15 \text{ см}$ каждая пора размещается в среднем на площади $\pi d^2 / (4 * N_n) \approx 0,15 \text{ см}^2 = 15 \text{ мм}^2$.

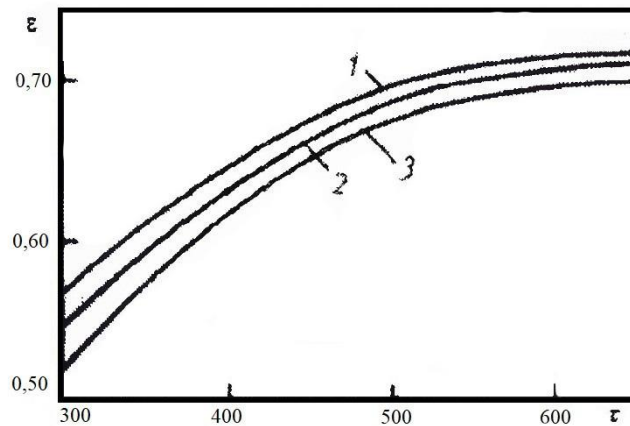


Рис. 7. Зависимость эффективности конвективной диффузии азота в расплаве железа от времени продувки после заполнения ковша расплавом:

1 – [S] = 0,025 %;	$\tau_g = 300 \text{ с};$
2 – [S] = 0,030 %;	$\Omega_o = 3 \text{ см}^3/\text{с};$
3 – [S] = 0,035 %;	$d_n = 0,6 \text{ мм}.$

На рис. 7 изображен график зависимости ε от длительности продувки после наполнения ковша расплавом. Из графика следует, что продувка жидкой ванны с оптимальной интенсивностью в этот период менее эффективна (рост ε менее значителен). Это связано со снижением интенсивности перемешивания металла в этот период ввиду прекращения воздействия на расплав струи металла, падающей из плавильной печи в ковш.

Вместе с тем в этот период достигается дальнейшее увеличение ε .

В диссертационной работе исследована и подтверждена адекватность разработанной компьютерной модели путём сравнения полученных результатов моделирования с данными лабораторных исследований японских авторов. На рис. 7 приведены данные лабораторных исследований М.Казуми и др. (кривая 1), результаты расчета, полученные с помощью разработанной математической модели (кривая 2) и данные компьютерного моделирования процесса деазотации в условиях пренебрежения наличием в расплаве поверхностно-активных серы и кислорода (кривая 3).

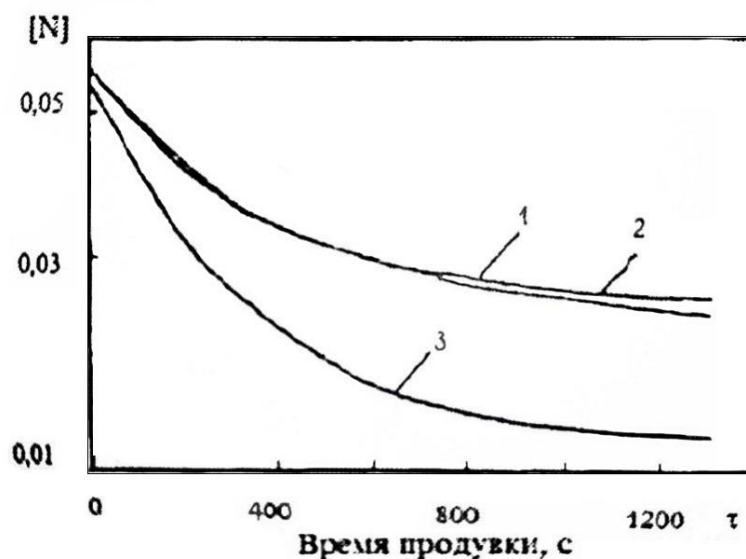


Рис. 8. Зависимость концентрации азота в расплаве железа от времени продувки

$$H = 5,4 \text{ см}; d_n = 0,1 \text{ см}; \Omega_0 = 1,43 \text{ см}^3/\text{с}; M = 376 \text{ г};$$

$$[S] = 0,052 \text{ \%}; [O] = 0,028\%; [C] = 0,0\%.$$

Сопоставление кривых лабораторных (1) и расчётных (2) результатов говорит об их согласовании. Качественное поведение кривых идентично. Расхождение в количественном отношении не превышает $\sim 3\%$ и объясняется известным отклонением системы «железо-азот» от состояния термодинамического равновесия, положенного в основу разработки компьютерной модели.

Снижение интенсивности продувки до уровня Ω_{opt} экономит дорогостоящий аргон.

Рассмотренный вид энергоресурсосбережения сводится к экономии ресурсов теплоэнергетической воздухоразделительной установки по получению аргона, который получают параллельно с кислородом из атмосферного воздуха путём его глубокого охлаждения и перевода в жидкое состояние.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В диссертации на основе проведённого комплекса исследований по актуальной задаче развития научных основ энергоресурсосбережения при совершенствовании технологии внепечной деазотации жидкого металла на базе компьютерного моделирования 3-мерных процессов тепломассопереноса в расплаве получены научные результаты, заключающиеся в разработке энергоресурсосберегающих режимов функционирования агрегатов внепечной обработки металлов продувкой аргоном при локальном несимметричном распределении пористых элементов в днище рафинировочной ёмкости.

2. На базе проведённых исследований показано, что режимы нагрева шлака, покрывающего поверхность жидкого металла, с периодическим включением и отключением электродов обеспечивают как поддержание

температуры металла на необходимом уровне, так и сокращение энергозатрат внепечной деазотации расплава.

3. Исследована разрушительная способность вихревого движения жидкого металла вблизи футеровки ковша, вызывающего его истощение. Выявлены области наиболее подверженные этому фактору, устранение которого экономит ресурсы рассматриваемой технологии.

4. Выявлен фактор энергоресурсосбережения при внепечной деазотации жидкого железа. Основой экономии аргона и ресурсов теплоэнергетической установки по его получению является обнаружение в процессе исследований максимум зависимости степени деазотации этого металла от интенсивности продувки аргоном через локально и несимметрично расположенные элементы в днище ковша.

5. Проведён сравнительный анализ схем получения аргона в теплоэнергетических воздуходелительных установках. Проведён расчёт теплофизических параметров воздуходелительной установки «Linde», используемой на Енакиевском металлургическом заводе.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК ДНР по специальности «Промышленная теплоэнергетика»:

1. Беззуб А.А. Исследование воздействия конвективного движения расплава на футеровочный слой стенки ковша-печи / А.А. Беззуб, Ф.В. Недопёкин // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г. Технические науки. – 2021. – № 1. – С. 91-99.

2. Беззуб А.А. К вопросу об энергосбережении при внепечной обработке стали продувкой аргоном / А.А. Беззуб, В.В. Белоусов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г. Технические науки. – 2021. – № 3. – С. 78-85.

3. Беззуб А.А. Математическое моделирование процессов тепломассопереноса и энергоресурсосберегающие режимы внепечной деазотации жидкого металла в условиях неоднородного поля температур / А.А. Беззуб, Н.И. Захаров, С.М. Стриченко, В.В. Белоусов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г. Технические науки. – 2022. – № 1. – С. 106-115.

В других изданиях

4. Беззуб А.А. Моделирование гидродинамических и теплофизических процессов в ванне агрегата ковш-печь / А.А. Беззуб, В.В. Белоусов // Журнал теоретической и прикладной механики – 2018. – №1-2. – С. 54-61.

5. Беззуб А.А. Численное моделирование физических процессов в агрегате ковш-печь / А.А. Беззуб, Ф.В. Недопёкин, В.И. Бондаренко, В.В. Бодряга // Материалы V Международной научной конференции. Донецкие чтения 2020: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности. Физико-математические и технические науки. – 2020. – Часть 2. – С. 5-7.

6. Беззуб А.А. Разработка энергосберегающего режима нагрева шлака при внепечной обработке стали / А.А. Беззуб. – Материалы VI Международной научной конференции. Донецкие чтения 2021: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности. Физические и технические науки. – 2021. – Том 2– С. 7-10.

АННОТАЦИЯ

Беззуб А.А. Повышение эффективности процессов тепломассопереноса в технологии внепечной обработки стали. Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика. ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», Донецк, 2022.

В диссертации на основе проведённого комплекса исследований по актуальной задаче развития научных основ энергоресурсосбережения при совершенствовании технологии внепечной деазотации жидкого металла на базе компьютерного моделирования 3-мерных процессов тепломассопереноса в расплаве получены научные результаты, заключающиеся в разработке энергоресурсосберегающих режимов функционирования агрегатов внепечной обработки металлов продувкой аргоном при локальном несимметричном распределении пористых элементов в днище рафинировочной ёмкости. На базе проведённых исследований показано, что режимы нагрева шлака, покрывающего поверхность жидкого металла, с периодическим включением и отключением электродов обеспечивают как поддержание температуры металла на необходимом уровне, так и сокращение энергозатрат внепечной деазотации расплава. Исследована разрушительная способность вихревого движения жидкого металла вблизи футеровки ковша, вызывающего её истощение. Выявлены области наиболее подверженные этому фактору, устранение которого экономит ресурсы рассматриваемой технологии. Выявлен фактор энергоресурсосбережения при внепечной деазотации жидкого железа. Основой экономии аргона и ресурсов теплоэнергетической установки по его получению является обнаружение в процессе исследований максимума зависимости степени деазотации этого металла от интенсивности продувки аргоном через локально и несимметрично расположенные элементы в днище ковша. Проведён сравнительный анализ схем получения аргона в теплоэнергетических воздуходелительных установках. Проведён расчёт теплофизических параметров воздуходелительной установки «Linde», используемой на Енакиевском металлургическом заводе.

Ключевые слова: энергоресурсосбережение, тепломассоперенос, жидкий металл, продувка аргоном, компьютерное моделирование, внепечная деазотация.

ABSTRACT**Bezzub A.A. Improving heat and mass transfer processes efficiency in extra-furnace steel treatment technology. Manuscript.**

The dissertation for the degree of candidate of technical sciences in the specialty 05.14.04 – industrial heat power engineering. State Educational Institution of Higher Professional Education "Donetsk National University", Donetsk, 2022.

In the dissertation, on the basis of a set of studies carried out on the urgent task of developing the scientific foundations of energy and resource saving while improving the technology of out-of-furnace denitrogenation of liquid metal, based on computer simulation of 3-dimensional processes of heat and mass transfer in the melt, scientific results were obtained, which consist in the development of energy-resource-saving modes of operation of units for out-of-furnace processing of metals by purging with argon with a local asymmetric distribution of porous elements in the bottom of the refining tank. On the basis of the conducted studies, it has been shown that the modes of heating the slag covering the surface of the liquid metal, with the periodic switching on and off of the electrodes, provide both the maintenance of the metal temperature at the required level and the reduction of energy consumption of the out-of-furnace denitrogenation of the melt. The destructive ability of the vortex motion of liquid metal near the ladle lining, which causes its depletion, has been studied. The areas most susceptible to this factor are identified, the elimination of which saves the resources of the technology under consideration. The factor of energy and resource saving in out-of-furnace denitrogenation of liquid iron has been revealed. The basis for saving argon and the resources of a thermal power plant for its production is the discovery in the process of research of the maximum dependence of the degree of denitrogenation of this metal on the intensity of argon blowing through locally and asymmetrically located elements in the bottom of the ladle. The calculation of the thermophysical parameters of the Linde air separation unit used at the Metallurgical Plant in the Yenakiyevo was carried out.

Key words: energy saving, heat and mass transfer, liquid metal, argon blowing, computer simulation, out-of-furnace degassing.