

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

*На правах рукописи*

**Тупилко Ирина Владимировна**

**РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕЖИМОВ  
ВНЕПЕЧНОЙ ДЕАЗОТАЦИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В УСЛОВИЯХ  
ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА**

Специальность 05.14.04 – «Промышленная теплоэнергетика»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Донецк – 2021

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

Научный  
руководитель: **Захаров Николай Иванович,**  
доктор технических наук, доцент,  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк.

Официальные  
оппоненты:

Ведущая  
Организация:

Защита состоится \_\_\_\_\_ года в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 01.016.03 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Донецкий национальный университет» по адресу: 83001, г. Донецк, проспект Театральный, 13, ауд. \_\_\_\_\_.

Тел. факс: +38(062) 302-06-00. E-mail: d0101603-donnu@ya.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донецкий национальный университет» по адресу: 83001, г. Донецк, ул. Университетская, 24, \_\_\_\_\_.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 01.016.03,  
д-р физ.-мат. наук, доцент

Моисеенко И.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Проблема энергоресурсосбережения является одной из ключевых для металлургической промышленности, ввиду высокой энергозатратности этого производства на большинстве этапов технологической цепочки. Данная оценка в полной мере относится к технологической фазе улучшения качества металла, в которой находят широкое и эффективное применение установки внепечной дегазации.

Проведенный обзор современного состояния проблемы деазотации жидкого металла показал, что существенное влияние на состав металла в технологиях его деазотации имеют процессы конвективного теплопереноса атомов азота в расплаве. Авторы работ ставят проблему изыскания дополнительных способов интенсификации внепечной деазотации расплавов с учетом существующих разработок в этом направлении. Классическим вариантом внепечной дегазации металла является его продувка инертным газом в ковше. И.И. Борнацкий, В.И. Мачикин, В.С Живченко. на основании экспериментальных исследований нашли, что не интенсивность продувки, а количество пузырей аргона, внедряемых в металл в единицу времени, является фактором интенсификации процессов конвективного теплопереноса. По данным Н.М. Чуйко наиболее интенсивной по теплопереносу является продувка через пористые элементы днища ковша, которая обеспечивает распределение мелких пузырьков инертного газа по всему объему расплава. А.В. Кайбичев исследовал влияние электрического воздействия на расплав металла в процессе внепечной дегазации. Из зарубежных специалистов внепечной деазотацией занимались преимущественно японские ученые: А. Kazuo, Т. Harada, S. Tasisada.

В настоящее время отсутствует универсальный способ деазотации металла на уровне современных требований к качеству металлических изделий энергоресурсосберегающие режимы интенсификации процессов теплопереноса. В связи с этим актуальна тема диссертационной работы, которая посвящена разработке энергоресурсосберегающих режимов интенсификации процессов теплопереноса в условиях внепечной деазотации металла.

**Связь работы с научными программами, планами и темами.** Тема диссертационной работы непосредственно связана с научным направлением «Процессы теплопереноса и энергоресурсосберегающие режимы металлургических технологий» кафедры «Техническая теплофизика» факультета ме-

таллургии и теплоэнергетики ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» и включена в выполнение кафедральной темы Н 2020-8 «Математическое моделирование процессов тепломассопереноса и энергоресурсосберегающие режимы при внепечной дегазации жидкого металла».

**Цель и задачи исследования.** Целью работы являются разработка энергоресурсосберегающих режимов деазотации жидкого металла в условиях интенсификации процессов тепломассопереноса. Задачами исследования являются:

- разработка способа энергоресурсосбережения внепечной дегазации жидкого металла от растворенного азота комплексным воздействием в условиях интенсификации процессов тепломассопереноса;
- построение математической модели процессов тепломассопереноса азота в жидкой ванне в условиях продувки расплава аргоном через «пористое кольцо» в днище ковша при атмосферном давлении под слоем азотопроницаемого синтетического шлака;
- параметрическая идентификация этой модели относительно реального объекта по данным лабораторных исследований;
- проведение численных экспериментов на основе математической модели и разработка энергоресурсосберегающего режима технологии в условиях интенсификации процессов тепломассопереноса;
- проведение численных экспериментов и разработка энергоресурсосберегающего режима технологии деазотации в условиях интенсификации процессов тепломассопереноса при комплексном воздействии на металл вакуума, продувки инертным газом и электростатического поля.

**Объект исследования:** Процессы тепломассопереноса при внепечной дегазации жидкого металла от растворенного азота.

**Предмет исследования.** Обеспечивающие энергоресурсосбережение режимы продувки металла инертным газом в условиях комплексного воздействия на металл электростатического поля.

**Методология исследования.** Проведено теоретическое исследование процессов тепломассопереноса. При этом для расчётов использован конечно-разностный метод прогонки, реализующий решение дифференциального уравнения Фурье с граничными условиями 2, 3 и 4 рода.

Интегральное уравнение конвективной диффузии атомов азота в расплаве решалось по методу Ньютона-Котеса с учётом многообразия взаимосвязанных режимов всплывания пузырей аргона в жидком металле.

Проведен критериальный анализ рассматриваемого диффузионного процесса. С учётом его многофакторности, выделен перечень базовых критериев подобия, удовлетворение которых обеспечивает качественную идентичность результатов на лабораторной и математической моделях.

### **Научная новизна полученных результатов.**

1. Впервые при математическом моделировании конвективной диффузии удаляемого из жидкого металла газа при его внепечной обработке в условиях атмосферного давления учтён теплообмен расплава с атмосферой через слой синтетического шлака. Разработанная математическая модель применима к металлу с достаточно высокой температурой плавления и эффективно описывает растворение удаляемого азота в расплаве и ионизацию в нём атомов газа.

2. Впервые теоретически обоснован и экспериментально подтвержден эффект интенсификации молизионного звена  $2 [N] = \{N_2\}$  тепломассообменного процесса удаления азота из расплава металла, механизм которого состоит в формировании электростатическим полем области повышенной концентрации (локализованного сгустка) в области проекции границы электрода (источника электростатического поля) на межфазную поверхность "вакуум-металл".

3. Впервые в результате проведенных исследований установлены научные предпосылки реализации энергоресурсосберегающего режима технологии внепечной дегазации металла от растворенного в нем азота при участии молизионного звена в лимитировании тепломассообменного процесса.

4. Впервые получено обобщение соотношения закона Сиверта для постановки граничного условия к уравнению конвективной диффузии атомов азота в расплаве при исследовании в нём процессов тепломассопереноса. Обобщение достигнуто за счёт дополнительного учёта воздействия электростатического поля докритических напряженностей на межфазную поверхность «вакуум-металл» и степени ионизации атомов азота в расплаве.

5. Впервые проведена количественная оценка интенсивности тепломассообменного процесса азота в жидкой ванне при внепечной деазотации металла комплексным воздействием в условиях лимитирования этого процесса кинетической (молизионной) стадией.

**Теоретическая значимость работы** состоит в том, что

- обоснован эффект интенсификации молизионного звена  $2[N] = \{N_2\}$  тепломассообменного процесса удаления азота из расплава металла;
- обобщено соотношение закона Сивертса для постановки граничного условия к уравнению конвективной диффузии атомов азота в жидком металле с учётом воздействия электростатического поля докритических напряжённостей на межфазную поверхность «вакуум-металл» и степени ионизации атомов азота в расплаве.

**Практическая значимость работы** состоит в том, что разработанный энергоресурсосберегающий режим технологии в условиях интенсификации процессов конвективного тепломассопереноса в расплаве может быть внедрен на различных предприятиях по производству металла ответственного назначения. Практическая значимость подтверждается и использованием результатов работы при выполнении кафедральной темы, указанной выше.

**Положения, выносимые на защиту,** заключаются в том, что:

- установлен эффект интенсификации молизионного звена  $2[N] = \{N_2\}$  тепломассообменного процесса удаления азота из расплава металла;
- установлены соотношение закона Сивертса для постановки граничного условия к уравнению конвективной диффузии атомов азота в жидком металле с учётом воздействия электростатического поля докритических напряжённостей на межфазную поверхность «вакуум-металл» и степени ионизации атомов азота в расплаве;
- построена математическая модель процессов конвективного тепломассопереноса при внепечной дегазации жидкого металла продувкой инертным газом при атмосферном давлении под слоем синтетического шлака;
- разработан способ энергоресурсосбережения технологии внепечной дегазации жидкого металла от растворённого в нём азота интенсификации процессов тепломассопереносе.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались: на XVII международной научной конференции «Современные проблемы электрометаллургии стали» (Челябинск, 2017 г.); на региональных научно-технических конференциях «Металлургия глазами молодых» (2018 г., 2019 г., 2020 г., г. Донецк); на научных семинарах кафедры «Техническая теплофизика» ГОУ ВПО «ДОННТУ» (2016 – 2021 гг.).

**Публикации и личный вклад соискателя.** Основные результаты, полученные в работе, опубликованы в 13 научных работах [1 – 13], из которых 5 статей в рецензируемых журналах, в том числе 2 в журналах, включенных в перечень рецензируемых изданий ВАК ДНР [1 – 2], 1 патент на изобретение [6], 7 статей в материалах и тезисах конференций [7 – 13].

Основные результаты получены автором самостоятельно. В работах [1–13] соавтору Н.И. Захарову принадлежит участие в постановке рассматриваемых задач, выборе метода исследования и обсуждении получаемых результатов. В работах [1–13] автору принадлежит участие в выборе метода исследования, получение теоретических решений задач, проведение численных и лабораторных исследований с анализом их результатов. А в частности это проведение лабораторных исследований, анализа полученных данных при помощи математического моделирования и сопоставление этих данных с лабораторными данными японских ученых.

**Структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка использованной литературы. Общий объем диссертации составляет 123 страницы, из которых основной текст диссертации занимает 110 страниц, список литературы – 11 страниц, приложение – 2 страницы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

**Первый раздел работы** содержит общую характеристику процессов тепломассопереноса в условиях технологии внепечной дегазации жидкого металла от растворённых в нем газов. Приведены особенности деазотации расплавов. Изучено современное состояние вопроса энергоресурсосбережения при интенсификации процессов тепломассопереноса в жидкой ванне, обеспечивающие повышение производительности агрегатов внепечной обработки металла. Выявлено, что в настоящее время наиболее перспективными элементами рассмат-

риваемой технологии являются: продувка жидкого металла аргонem через пористое днище ковша при атмосферном давлении под слоем синтетического газопроницаемого шлака, а также вакуумирование с интенсификацией процессов тепломассопереноса в жидкой ванне сосредоточенной продувкой аргонem через днище ковша и электростатического поля, действующего на межфазную поверхность «вакуум-металл». Отмечено, что недостатками предшествующих исследований других авторов являются: неучёт при построении математических моделей диффузионных процессов теплообмена расплава с атмосферой через слой шлака, изменения по высоте жидкой ванны скорости всплывания пузырей аргона и плотности потока массы удаляемого газа на поверхность «аргон-металл». Кроме того, анализ второго элемента рассматриваемой технологии с участием электростатического поля докритических напряжённостей проведен лишь для водорода без оценки особенностей деазотации расплавов. Ожидается экономия аргона для продувки металла и электрической энергии при воздействии на него электростатического поля.

**Во втором разделе диссертационной работы** дано обоснование выбора направления научных исследований, связанного с актуальностью темы диссертации и реализацией её цели. Автором сформулирована энергоресурсосберегающая технология внепечной дегазации жидкого металла от растворённого азота комплексным воздействием продувки инертным газом, вакуума и электростатического поля докритических напряженностей в условиях интенсификации процессов тепломассопереноса. Усовершенствованный способ энергоресурсосбережения, лежащий в основе этой технологии включает следующие два этапа:

- продувка жидкого металла аргонem в период  $t_0 \leq t \leq t_B$ , а также продолжение продувки жидкой ванны в период  $t_B \leq t \leq t_M$ ;
- комплексное воздействие на расплав продувкой аргонem, вакуумом и электростатическим полем докритических напряжённостей при  $t_M \leq t \leq t_K$ .

При этом  $t_0, t_B, t_M, t_K$  – соответственно моменты начала продувки металла аргонem, окончания выпуска расплава в рафинировочную ёмкость с «пористым кольцом» в днище при атмосферном давлении под слоем наведенного азотопроницаемого синтетического шлака, наступления молизационного (кинетического) звена тепломассопереноса атомов азота в жидкой ванне и окончания обработки металла.



При исследовании процессов тепломассопереноса на первом этапе технологии к уравнению конвективной диффузии атомов азота в расплаве впервые присоединено уравнение теплопроводности, учитывающее теплообмен металла с атмосферой через слой шлака. Основные допущения, положенные в основу математической модели следующие:

- осевая симметричность системы;
- градиент температуры расплава в направлении вертикальной координаты  $z$  существенно выше аналогичной характеристики в направлении радиальной координаты  $r$ ;
- средние по объему жидкой ванны значения компонент  $V_z$  скорости металла и шлака равны скорости  $V_H$  наполнения расплавом рафинировочной емкости, а среднее по объему значение компоненты  $V_r$  равны нулю.

Математические модели процессов тепло- и массопереноса в расплаве в условиях его продувки инертным газом при атмосферном давлении под слоем синтетического шлака включают:

уравнение теплопроводности для металла и шлака

$$\rho_{эф} \cdot C_{эф} \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + V_H \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_{эф} \frac{\partial T}{\partial z} \right); \quad (1)$$

начальные условия

$$T_M(z, 0) = T_M^0; T_{ш}(z, 0) = T_{ш}^0; \quad (2)$$

граничные условия вида

$$T_M = T_{ш} \quad (3)$$

$$-\lambda_M^{эф} \frac{\partial T_M}{\partial z} = -\lambda_{ш}^{эф} \frac{\partial T_{ш}}{\partial z} \quad (4)$$

в случае границы «металл-шлак»;

$$-\lambda_M \frac{\partial T_M}{\partial z} = 0, \quad (5)$$

в случае основание рафинировочной емкости;

$$-\lambda_{ш} \frac{\partial T_{ш}}{\partial z} = \alpha(T_{ш} - T_{атм}) + \varepsilon_{пр-атм} C_0 \left[ \left( \frac{T_{ш}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{атм}}{100} \right)^4 \right] \quad (6)$$

в случае граница «шлак-атмосфера».

Уравнение конвективной диффузии азота в расплаве:

$$\varepsilon = \frac{1}{Q_H} \int_{\tau_0}^{\tau_E} \left( \frac{\dot{m} \cdot H}{m_0} \right) \left( \frac{I[T_M(z)]}{U(z)} \right)_{ср} d\tau + \frac{1}{Q_H} \int_{\tau_E}^{\tau} \left( \frac{\dot{m}}{m_0} \right) \left( \int_0^H \frac{I[T_M(z)] dz}{U(z)} \right) d\tau. \quad (7)$$

Здесь:  $T_M(z, \tau)$ ;  $T_{ш}(z, \tau)$  – распределения абсолютной температуры в расплавах металла и шлака;  $\rho_{эф}$ ,  $C_{эф}$ ,  $\lambda_{эф}$  – эффективные значения их плотности, удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности;  $\tau$  - время;  $T_M^0$ ;  $T_{ш}^0$  – начальные

значения распределения абсолютной температуры металла и шлака;  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи поверхности шлака в атмосферу;  $T_{\text{атм}}$  - абсолютная температура атмосферы;  $\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{ш-атм}}$  - приведенная степень черноты шлака;  $C_0$  - коэффициент излучения абсолютно черного тела;  $\lambda_m$  - коэффициент теплопроводности расплава металла;  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_{\text{сл}}$  - эффективность конвективной диффузии азота в расплаве металла (степень его дегазации), текущая и по завершению его слива в ковш;  $Q_H$  - начальное содержание азота в расплаве;  $\dot{m}$  - массовый расход аргона;  $m_0$  - его количество в единичном пузыре;  $H$  - высотный уровень жидкой ванны в ковше;  $U$  - скорость всплывания пузырей аргона;  $I$  - поток массы азота на поверхность единичного пузыря.

В уравнении конвективной диффузии дополнительно учитываются изменения по высоте жидкой ванны, скорости всплывания пузырей аргона и плотности потока массы атомов азота на поверхность пузырей в период  $t_b \leq t \leq t_m$ .

Система уравнений (1) – (7) определяет протекание процессов тепломассопереноса на первом этапе технологии в период  $t_0 \leq t \leq t_m$ .

Результаты компьютерного моделирования сопоставляются как с данными лабораторных исследований на «холодной» модели с участием автора, так и исследованиями японских авторов.

Методика диссертационного исследования включает проведение теоретического анализа влияния воздействия электростатического поля на интенсификацию процессов тепломассопереноса в жидком металле на втором этапе технологии. Это исследование проведено на основе теоретического обобщение закона Сивертса для азота на межфазной поверхности «вакуум-металл» в условиях воздействия на неё этого внешнего поля, а также экспериментальное подтверждение этих теоретических разработок.

**Третий раздел** посвящен численному исследованию процессов тепломассопереноса в жидком металле на основе математических моделей (1) – (7). Составлена программа реализации вычислительного процесса на языке Паскаль. Математическая модель теплового процесса численно исследована по явной схеме метода конечных разностей. На рис.1 показана зависимость потери средней температуры расплава железа в функции удельного расхода аргона при различных коэффициентах теплопроводности шлака. Как следует из графика, повышение коэффициента теплопроводности шлака приводит к снижению теплосодержания металла.

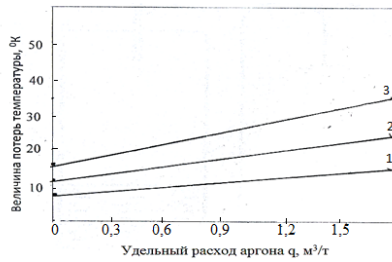


Рис. 1.

$$1 - \lambda_{\text{ш}} = \frac{\lambda_{\text{м}}}{10}; 2 - \lambda_{\text{ш}} = \frac{\lambda_{\text{м}}}{5}; \\ 3 - \lambda_{\text{ш}} = \frac{\lambda_{\text{м}}}{3}$$

чина изменения средней температуры металла за время  $\tau_{\text{пр}}$  продувки;  $\Delta T_{\text{Ar}}$  – величина повышения средней температуры аргона при входе в расплав;  $\dot{m}_{\text{Ar}}$  – массовый расход инертного газа;  $c_p^{\text{Ar}}$  – его удельная теплоемкость в условиях гидростатического давления расплава в районе локализации пор продувочного устройства.

Таким образом:

$$\Delta T_{\text{м}} = -\dot{m}_{\text{Ar}} \cdot \tau_{\text{пр}} \cdot c_p^{\text{Ar}} \cdot \Delta T_{\text{Ar}} / (M_{\text{м}} \cdot c_{\text{м}}) \quad (9)$$

Следовательно, снижение средней температуры расплава металла в ковше прямо пропорционально массовому расходу аргона и времени продувки, но обратно пропорционально массе расплава в ковше и начальной температуре аргона.

На рис.2 приведен график зависимости эффективности  $\varepsilon$  конвективной диффузии азота в расплаве железа (степени его дегазации) в функции интенсивности  $\Omega$  продувки аргоном через «пористое кольцо» в днище при различных значениях диаметра  $d_n$  пор продувочного устройства.

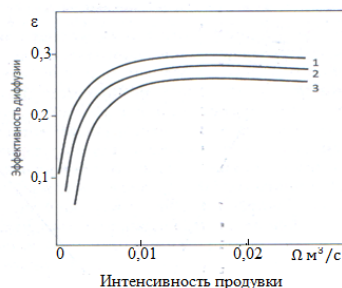


Рис. 2.

$$1 - d_n = 0,1 \text{ см}; 2 - d_n = 0,2 \text{ см}; 3 - d_n = 0,3 \text{ см}$$

Однако, при некотором оптимальном значении  $\Omega = \Omega_{\text{опт}}$   $\varepsilon$  достигает максимума и дальнейший рост этой величины прекращается. Существование  $\Omega_{\text{опт}}$  связано с

Вдувание в жидкий металл аргона, начальная температура которого равна температуре атмосферы, снижает температуру расплава в ковше.

Уравнение теплового баланса имеет вид:

$$\dot{m}_{\text{Ar}} \cdot \tau_{\text{пр}} \cdot c_p^{\text{Ar}} \cdot \Delta T_{\text{Ar}} = -M_{\text{м}} \cdot c_{\text{м}} \cdot \Delta T_{\text{м}} \quad (8)$$

Здесь:  $M_{\text{м}}$  – масса металла в ковше;  $c_{\text{м}}$  – его удельная теплоемкость;  $\Delta T_{\text{м}}$  – величина

Как следует из этого графика, при увеличении интенсивности продувки эффективность  $\varepsilon$  возрастает вследствие увеличения количества пузырей аргона, внедряемого в жидкую ванну в единицу времени. Од-

наличием противоположной тенденции увеличению площади поверхности контакта «аргон-металл» при росте  $\Omega$ , а именно, снижению времени контакта пузырей аргона с жидкой ванной, вследствие чего рафинирующая способность каждого из пузырей уменьшается. Следовательно, режим продувки при  $\Omega = \Omega_{\text{опт}}$  является энергоресурсосберегающим. Зависимость  $\varepsilon(d_n)$  является убывающей, так как при снижении диаметра пор продувочного устройства при фиксированном значении  $\Omega = \Omega_{\text{опт}}$  площадь поверхности контакта «аргон – металл» возрастает. При этом, как показали исследования, массовый расход аргона для обеспечения  $\Omega_{\text{опт}}$  снижается с уменьшением  $d_n$ .

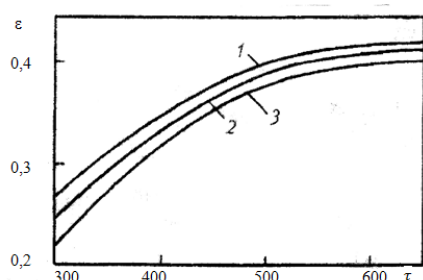


Рис.3. Зависимость эффективности конвективной диффузии азота в расплаве железа от времени продувки после заполнения

ковша расплавом:

1 —  $[S] = 0,025\%$ ;

2 —  $[S] = 0,030\%$ ;

3 —  $[S] = 0,035\%$ .

$\tau_{\text{пр}} = 300 \text{ с};$

$\Omega_{\text{опт}} = 0,015 \frac{\text{м}^3}{\text{с}};$

$d_n = 0,3 \text{ см.}$

На рис.3 изображен график зависимости  $\varepsilon$  от длительности продувки после наполнения ковша расплавом. Из графика следует, что продувка жидкой ванны с расчетной энергоресурсосберегающей интенсивностью в этот период менее эффективна (рост  $\varepsilon$  менее значителен). Это связано со снижением интенсивности перемешивания металла ввиду прекращения воздействия в этот период на расплав струи металла, падающей из плавильной печи.

В четвертом разделе работы исследована и подтверждена адекватность разработанной математической модели путем сравнения полученных результатов с данными лабораторных исследований японских авторов.

На рис.4 приведены лабораторные исследования японских авторов (кривая 1), результаты расчетных данных, полученных с помощью разработанной математической модели (кривая 2) и результаты математического моделирования процесса дегазации в условиях пренебрежения наличием в расплаве поверхностно-активных серы и кислорода (кривая 3).

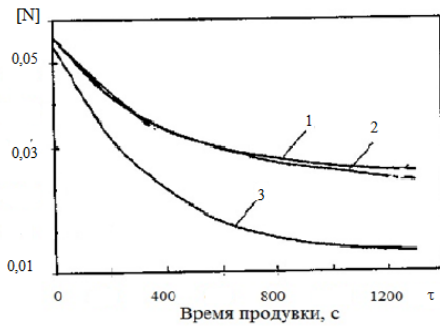


Рис.4. Зависимость концентрации азота в расплаве железа от времени продувки

$H=5,4 \text{ см}; d_n = 0,1 \text{ см};$

$\Omega_{\text{опт}} = 1,43 \text{ см}^3/\text{с}; M=376 \text{ г};$

$[S]=0,052\%; [O]=0,028\%;$

$[C]=0,0\%.$

Сопоставление кривых лабораторных (1) и наших расчетных (2) результатов говорит об их согласовании. При этом качественное поведение кривых идентично. Расхождение в количественном отношении не превышает  $\sim 5\%$  и объясняется известным отклонением системы «железо – азот» от состояния термодинамического равновесия, положенного в основу построения математической модели.

В соответствии с теорией подобия технология внепечной дегазации может быть охарактеризована следующим минимальным набором определяющих критериев:

$$Eu = \frac{P_0}{\rho_{\text{ж}} \cdot U^2}; We = \frac{\sigma_{\text{ж}}}{L \cdot P_0}; Re = \frac{U \cdot L}{v_{\text{ж}}}. \quad (10)$$

Здесь  $P_0$ ,  $L$ ,  $U$  – масштабы гидростатического давления в жидкой ванне, ее уровня и скорости всплывания в ней пузырей аргона;  $v_{\text{ж}}$ ,  $\sigma_{\text{ж}}$ ,  $\rho_{\text{ж}}$  – кинематическая вязкость, поверхностное натяжение и плотность жидкости.

Введем масштабные коэффициенты:

$$m_L = \frac{L_H}{L_M}; m_p = \frac{P_{0,H}}{P_{0,M}}; m_{Re} = \frac{Re_H}{Re_M}, \quad (11)$$

где индексы «н» и «м» относятся соответственно к натуральному объекту и его модели.

Условия подобия гидродинамических процессов запишется в виде:

$$\frac{P_{0,H}}{\rho_{\text{ж},H} \cdot U_H^2} = \frac{P_{0,M}}{\rho_{\text{ж},M} \cdot U_M^2}; \frac{\sigma_{\text{ж},H}}{L_H \cdot P_{0,H}} = \frac{\sigma_{\text{ж},M}}{L_M \cdot P_{0,M}}; m_{Re} = 1. \quad (12)$$

Производя математические выкладки, можно получить:

$$m_L = \left( \frac{\sigma_{\text{ж},H} \cdot \rho_{\text{ж},M}}{\sigma_{\text{ж},M} \cdot \rho_{\text{ж},H}} \right)^{\frac{1}{2}}, m_p = \left( \frac{\sigma_{\text{ж},H} \cdot \rho_{\text{ж},H}}{\sigma_{\text{ж},M} \cdot \rho_{\text{ж},M}} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

В этом случае масштабные коэффициенты выразятся значениями:

$$m_L = 1,8; m_p = 12,7 \quad (13)$$

Исследования проводились на лабораторной установке кафедры «Металлургия стали» (рис.5). Измерение концентрации хлора в воде проводились по методике в соответствии с ГОСТ 18190-72. В соответствии с параметрами разработанной «холодной» модели значения масштабных коэффициентов оказались близкими своим теоретическим значениям:

$m_L = 2,0$  (вместо 1,8);  $m_P = 13,8$  (вместо 12,7);  $m_{Re} = 1,12$  (вместо 1,0).

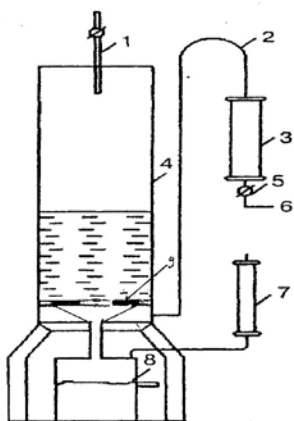


Рис. 5. Модель лабораторной установки: 1 – водопровод; 2 – воздухопровод; 3, 7 – ротаметры; 5 – кран; 6 – магистраль; 8 – отстойник; 9 – «пористое кольцо».

Таким образом, гидродинамическая структура течения в лабораторных условиях и математическая модель, отражающая реальную технологию, близки друг другу. В обоих вариантах режим продувки должен быть пузырьковым, а не струйным или переходным. Можно утверждать лишь о качественном (а не о количественном) соответствии процессов модели и реального объекта.

Экспериментальным путем исследовалась зависимость эффективности  $\varepsilon$  конвективной диффузии хлора в водяной ванне в зависимости от основных параметров:

$F_0, \tau, V, \beta = D/\delta(U)$ . При этом комплексный безразмерный параметр эффективности конвективной диффузии был представлен в виде:

$$Z = (\beta \cdot F_0 \cdot \tau) / V. \quad (14)$$

Графическая зависимость  $\varepsilon(Z)$  с использованием метода наименьших квадратов может быть представлена в диапазоне  $Z \in [0, 0; 4, 0]$  в виде:

$$\varepsilon = 0,85 \cdot Z - 0,17 \cdot Z^2 \quad (15)$$

Коэффициент корреляции определен стандартной статистической программой: на уровне 0,87. Однородность разброса экспериментальных точек (однородность дисперсии) проверялась по критерию Фишера при доверительной вероятности 0,95. Количество опытов равно 30. Проверка значимости коэффициентов соотношения (17) определялась критерием Стьюдента. Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 6 и 7.

Как следует из рис. 7, при увеличении интенсивности продувки эффективность  $\varepsilon$  конвективной диффузии хлора в водном растворе возрастает. Это следует из факта увеличения при этом количества пузырей воздуха, внедряемых в единицу времени в жидкую ванну. Однако, при некотором оптимальном значении  $\Omega_{\text{опт}} \approx 4,0 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с дальнейший рост  $\varepsilon$  (по достижению максимума) прекращается. Существование  $\Omega_{\text{опт}}$ , как излагалось ранее, связано с наличием противоположной тенденции: снижение времени контакта пузырей с жидкой ван-



ной при росте  $\Omega$ , вследствие чего рафинирующая способность каждого из пузырей уменьшается.

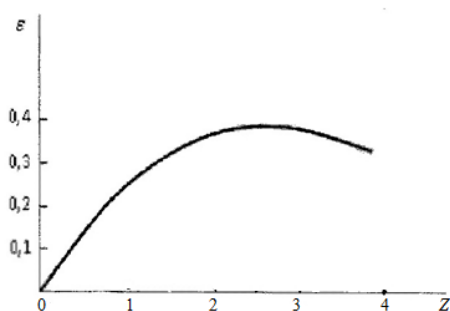


Рис. 6. Зависимость эффективности конвективной диффузии хлора в водном растворе от значений параметра  $Z$

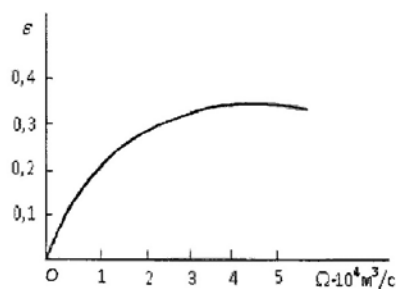


Рис. 7. Зависимость эффективности конвективной диффузии хлора в водном растворе от интенсивности продувки

На рис.8 построена зависимость эффективности конвективной диффузии хлора в воде от времени продувки.

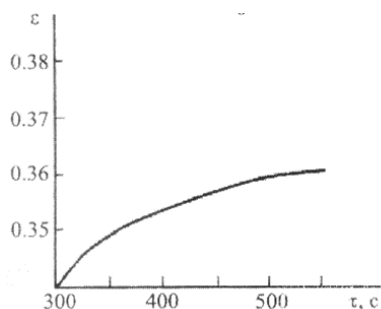


Рис.8. Зависимость эффективности конвективной диффузии хлора в воде от времени продувки ( $\tau \geq \tau_{\text{в}}=300$  с)

Таким образом, результаты экспериментальных исследований согласуются с соответствующими результатами математического моделирования. Энергоресурсосберегающий режим технологии определяется компьютерной программой, построенной на основе разработанной математической модели.

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

**Пятый раздел** содержит результаты теоретического исследования процессов тепломассопереноса в жидком металле во второй период технологии, а также выявление фактора энергоресурсосбережения при интенсификации этих процессов. В этот период лимитирующим звеном тепломассопереноса атомов азота в жидкой ванне является молизионное (кинетическое):  $2[N] = \{N_2\}$ .

Учитывая, что выделение азота из жидкой ванны происходит как в пузыри аргона, так и через поверхность «вакуум-металл», получено следующее выражение:

$$\frac{1}{c(\tau)} - \frac{1}{c_0} = \left[ \left( \frac{F_{Ar}}{F_0} \right) \cdot k_{0,Ar} + \left( \frac{F_E}{F_0} \right) \cdot k_{0,E} \right] \cdot \tau / H. \quad (16)$$

Здесь:  $c(\tau)$ ,  $c_0$  – текущее в момент времени  $\tau$  и начальное содержание азота в расплаве;  $F_0$ ,  $F_E$  – общая площадь поверхности «вакуум-металл» и ее часть, в которой концентрация атомов азота на этой поверхности  $c_n^i > c_n$ ;  $F_{Ar}$  – площадь поверхности «аргон-металл»;  $k_{0,Ar}$ ,  $k_{0,E}$  – константы скорости реакции молификации на этих поверхностях. При этом, в соответствии с законом Сивертса:

$$C_n = K_N \cdot \sqrt{P_{N_2}}, \quad (17)$$

где  $K_N$  – константа равновесия для азота;  $P_{N_2}$  – парциальное давление молекул азота в газовой фазе;  $H = V/F_0$  – высота жидкой ванны;  $V$  – ее объем.

Предложено следующее соотношение для концентрации атомов азота на межфазной поверхности «вакуум-металл» в условиях воздействия на эту поверхность электростатического поля докритических напряженностей:

$$C_{n(r)}^i = K_N \cdot \sqrt{P_{N_2}} [(1-i) + i \cdot \Phi(r)]. \quad (18)$$

Физический смысл  $\Phi(r)$  – отношение  $C_{n(r)}^i / C_n$ , т.е. отношение распределения концентрации полностью ионизированных ( $i=1$ ) атомов азота к однородному распределению неионизированных ( $i=0$ ) частиц. При этом предполагается, что геометрическая система «ковш-вакуум камера» обладает осевой симметрией с радиальной координатой  $r$ .

На рис.9 показана схема плоского жидкометаллического проводника и источника электростатического поля в виде отрицательно заряженной пластины, локализованной в вакуум-камере. При этом проводник (расплав металла) перемещается относительно источника, а их плоскости параллельны.

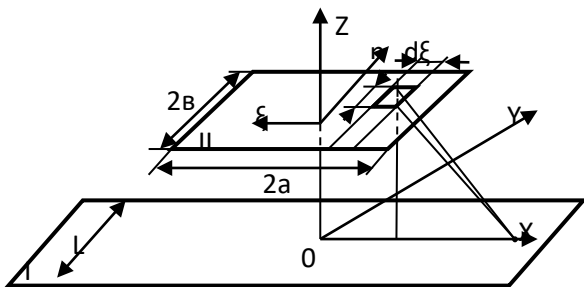


Рис.9. Схема плоского жидкометаллического проводника и источника электростатического поля в виде заряженной пластины

Как следует из полученного расчетным путем распределения ионов азота на межфазной поверхности «вакуум-металл» (рис.10), в области проекции на эту поверхность границы электрода, являющегося источником электростатического поля докритических напряженностей, имеет место повышенная концентрация ионов азота (сгусток), величина

которой возрастает с увеличением напряженности этого внешнего поля (рис.10) и степени ионизации атомов азота (рис.11).



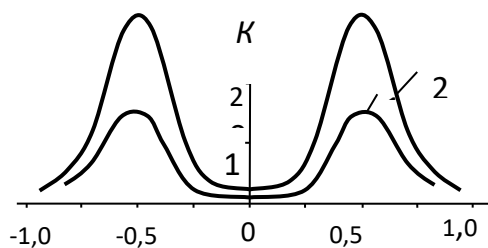


Рис. 10. Распределение концентрации ионов азота по межфазной границе при  $E=1(1)$  и  $2$  кВ/см (2)

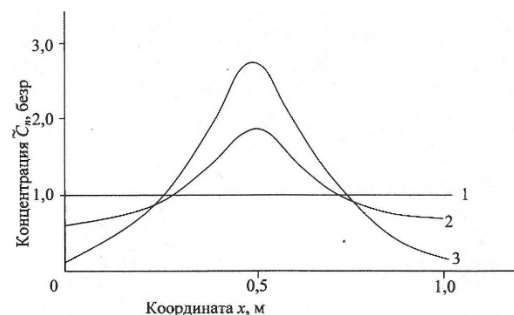


Рис. 11. Распределение безразмерной концентрации  $\tilde{C}$  и ионов азота на межфазной поверхности «металл-вакуум» при  $E=2,0$  кВ/см и  $i=0$  (1),  $0,5(2)$  и  $1$  (3)

Одним из звеньев удаления азота является молизационное звено, предполагающее объединение ионов азота в молекулы на рассматриваемой межфазной поверхности. Это звено может лимитировать общую скорость процесса удаления азота.

Если при внепечной дегазации металла от растворенного азота молизационное (кинетическое) звено участвует в лимитировании процесса тепломассопереноса, то подключение электростатического поля докритических напряжений (источник которого локализован в вакуум-камере) приведет к эффекту интенсификации технологии. Механизм этого эффекта состоит в формировании этим полем области повышенной концентрации (сгустка) ионизированной части атомов азота, находящихся в состоянии непрерывного перераспределения при перемешивании расплава. Сгусток локализован в области проекции границы электрода на межфазную поверхность «вакуум-металл».

Таким образом, в результате проведенных исследований вскрыты научные предпосылки интенсификации технологии внепечной дегазации металла от растворенного азота, если молизационное (кинетическое) звено участвует в лимитировании тепломассообменного процесса, что обеспечивает получение ответственных марок металла специального назначения.

Учитывая квадратичную зависимость константы скорости реакции моликации:  $2[N] = \{N_2\}$  от концентрации атомов азота на межфазных поверхностях «аргон-металл» и «вакуум-металл», получено выражение:

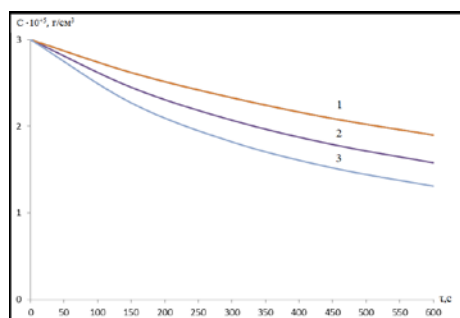
$$K_{0,E} = K_{0,Ar} \cdot (P_{N_2}^E / P_{N_2}^{Ar}) [(1 - i) + i \cdot \Phi(r)]^2. \quad (19)$$

При этом  $K_{0,Ar}$  определяется экспериментальным путем.

$$K_{0,Ar} = \frac{0,9745}{1+28,4[O]+5,34[S]} \quad (20)$$

Здесь:  $[O]$ ,  $[S]$  – концентрация растворенных в расплаве железа, кислорода и серы, %;  $P_{N_2}^E$ ,  $P_{N_2}^{Ar}$  – средние по времени электрического воздействия на расплав металла парциальные давления азота в пузырях аргона и вакуум-камере, соответственно.

С учетом формулы (20) на основе соотношения (19) построен график (рис.12) зависимости концентрации растворенного азота в жидкой ванне от времени при различных значениях  $E$ .



1:  $E = 0,1 \text{ МВ /м ;}$

2:  $E = 0,2 \text{ МВ /м ;}$

3:  $E = 0,3 \text{ МВ /м ;}$

Рис. 12. Зависимость концентрации азота в расплаве от напряжённости электростатического поля и времени

Как показали результаты исследований, в кинетической (молизационной) области лимитирования тепломассопереноса азота в жидком металле на интенсификацию этого процесса самое существенное влияние оказывает площадь межфазной поверхности «аргон-металл», которая зависит от интенсивности  $\Omega$  продувки и диаметра пор продувочного устройства. При значительных  $\Omega$  это обуславливает высокую производительность установки внепечной обработки металла. При умеренных и малых значениях  $\Omega$  на производительность этих установок влияет напряженность внешнего электростатического поля, вклад которого возрастет

при увеличении напряженности  $E$  этого поля.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В диссертации на основе проведенного комплекса исследований по актуальной задаче развития научных основ энергоресурсосбережения при совершенствовании технологии внепечной дегазации жидкого металла в условиях интенсификации процессов тепломассопереноса в расплаве получены научные результаты, заключающиеся в обобщении теории и математической модели изучаемых процессов, разработке научных предпосылок энергоресурсосберегающего повышения производительности агрегатов внепечной обработки металлов, в которых азот растворим.

2. Разработана математическая модель, которая применима к металлу с достаточно высокой температурой плавления, обеспечивающей растворение удаляемого азота в расплаве и, хотя бы, частичную ионизацию в нём атомов этого газа.

3. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден эффект интенсификации молизионного звена  $2 [N] = \{N_2\}$  тепломассообменного процесса удаления азота из расплава металла.

4. Обобщен закон Сивертса для постановки граничного условия к уравнению конвективной диффузии атомов азота в расплаве при исследовании в нём процессов тепломассопереноса за счёт дополнительного учёта воздействия электростатического поля докритических напряженностей на межфазную поверхность «вакуум-металл» и степени ионизации атомов азота в расплаве.

5. Получена формула, связывающая конечную концентрацию азота в расплаве с начальной концентрацией этого газа, площадью поверхностей тепломассообмена и временем обработки металла.

6. Предложен способ энергоресурсосбережения при интенсификации процессов тепломассопереноса в условиях внепечной деазотации металла. Способ отличается от известных экономией энергии в двух периодах технологии:

- снижением до рационального уровня интенсивности рассредоточенной продувки расплава аргоном через «пористое кольцо» в днище ковша при атмосферном давлении под слоем синтетического шлака (первый период);

- своевременным подключением источника электростатического поля докритических напряженностей, локализованного в вакуум-камере (второй период), не ранее достижения кинетической (молизионной) стадии тепломассопереноса атомов азота в жидкой ванне (стадия 2:  $2[N] = \{N_2\}$ ). Показано, что влияние этого внешнего поля на конвективную диффузию атомов азота в расплаве пренебрежимо мало. Вместе с тем имеет место молизионной стадии (для стали при  $E=1$  кВ/см ~в 2,5 раза, при  $E=2$  кВ/см ~в 6 раз).

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

– *публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК ДНР специальности «Промышленная теплоэнергетика»:*

1. Захаров Н.И. Математическое моделирование конвективной диффузии в энергосберегающем режиме дегазации расплава металла комплексным воздействием / Н.И. Захаров, И.В. Тупилко // Инженерно-физический журнал. – 2019. – Т. 92, – № 1. – С. 269-272.
2. Захаров Н.И. Энергоресурсосбережения в условиях интенсификации процессов тепломассопереноса при дегазации жидкого металла от растворенного в нем азота комплексным воздействием / Н.И. Захаров, И.В. Тупилко // Вестн. ДонНУ. Сер. Г. Технические науки. – 2021. – Вып. № 2. – С. 94–99.
- *публикации в других ведущих рецензируемых журналах:*
3. Захаров Н.И. К вопросу о постановке граничного условия к уравнению конвективной диффузии азота в жидком металле при воздействии на него электростатического поля докритических напряженностей / Н.И. Захаров, А.Б. Бирюков, И.В. Тупилко // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2018. – № 1. – С. 26-33.
4. Захаров Н.И. Приложение закона Сиверта к исследованию процессов тепломассопереноса при дегазации расплавов металлов от растворенного азота в электростатическом поле докритических напряженностей / Н.И. Захаров, И.В. Тупилко // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2018. – Т. 61, № 11. – С. 920-921.
5. Захаров Н.И. Численное моделирование процессов тепломассопереноса при внепечной дегазации жидкого металла продувкой инертным газом и энергоресурсосберегающий режим технологии/ Н.И. Захаров, А.Б. Бирюков, И.В. Тупилко, В.А. Шатович // Вестн. ДонНУ. Сер. Г. Технические науки. – 2020. – Вып. № 1. – С. 72-84.
- *патент на изобретение:*
6. Патент № 117970. Спосіб дегазації металевого розплаву в рафінувальній ємкості / М.І Захаров, І.В Волкова, І.В Тупілко // 25.10.2018. – Бюл. №20.
- *материалы научно-технических конференций:*
7. Захаров Н.И. О компьютерном моделировании процессов тепломассопереноса при внепечной дегазации жидкого металла от растворенного в нем азота в электростатическом поле докритических напряженностей / Н.И. Захаров, А.А. Троянский, А.Б. Бирюков, И.В. Тупилко // Современные проблемы электрометаллургии: Матер. Междунар. науч.-техн. конф., Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – С. 67-73.

8. Тупилко И.В. Исследование на основе математической модели процессов тепло- и массопереноса при внепечной дегазации расплава металла от растворенного азота в условиях продувки аргоном в ковше с пористым днищем / И.В. Тупилко, И.В. Григоренко, Н.И. Захаров // Наука глазами молодых: Матер. Регион. конф., Донецк 23 мая 2018 г. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – С. 307-309.
9. Тупилко И.В. Экспериментальное исследование конвективной диффузии при внепечной дегазации жидкого металла от растворенного в нем азота / И.В. Тупилко, Е.В. Сапронова, Н.И. Захаров // Наука глазами молодых: мат. Регион. конф., Донецк, 23 мая 2018 г. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – С. 23-26.
10. Тупилко И.В. Математическое моделирование тепломассопереноса азота в расплаве металла при его внепечной дегазации комплексным воздействием продувки аргоном и электростатического поля / И.В. Тупилко, М.В. Мельниченко, Н.И. Захаров // Наука глазами молодых: мат. Регион. конф., Донецк 23 мая 2018 г. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – С.17-18.
11. Тупилко И.В. Исследование процесса охлаждения воздуха в теплообменнике в условиях холодильного цикла при получении аргона для металлургии / И.В. Тупилко, М.В. Мельниченко, Н.И. Захаров // Наука глазами молодых: Матер. Регион. конф., Донецк 23 мая 2019 г. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – С. 308-311.
12. Тупилко И.В. Об энергоресурсосбережении при внепечной дегазации жидкого металла комплексным воздействием / И.В. Тупилко, Н.В. Останин, Н.И. Захаров // Наука глазами молодых: Матер. Регион. конф., Донецк 20 мая 2020. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – С. 24-26.
13. Тупилко И.В. Интенсификация теплообмена в системе «труба в трубе» и обсуждение проблемы получения аргона / И.В. Тупилко, Е.В. Сапронова, Н.И. Захаров // Наука глазами молодых: Матер. Регион. конф., Донецк 20 мая 2020. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – С. 298-300.

## АННОТАЦИЯ

**Тупилко И.В. Разработка энергоресурсосберегающих режимов внепечной деазотации жидкого металла в условиях интенсификации процессов тепломассопереноса. – Рукопись.**

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.04. «Промышленная теплоэнергетика», ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», Донецк, 2021.

Учтён теплообмен расплава с атмосферой через слой синтетического шлака. Разработанная математическая модель применима к металлу с достаточно высокой температурой плавления, обеспечивающая растворение удаляемого азота в расплаве и хотя бы частичную ионизацию в нём атомов этого газа. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден эффект интенсификации молизионного звена  $2 [N] = \{N_2\}$  тепломассообменного процесса удаления азота из расплава металла.

Получено обобщение соотношения закона Сивертса для постановки граничного условия к уравнению конвективной диффузии атомов азота в расплаве при исследовании в нём процессов тепломассопереноса. Обобщение достигнуто за счёт дополнительного учёта воздействия электростатического поля докритических напряженностей на межфазную поверхность «вакуум-металл» и степени ионизации атомов азота в расплаве. Получена формула, связывающая конечную концентрацию азота в расплаве с начальной концентрацией этого газа, площадью поверхностей тепломассообмена и временем обработки металла.

Предложен способ энергоресурсосбережения при интенсификации процессов тепломассопереноса в условиях внепечной деазотации металла.

**Ключевые слова:** энергоресурсосбережение, интенсификация процесса тепломассопереноса, диффузия, молизация, межфазная поверхность, лимитирующее звено, вакуум, электростатическое поле, продувка аргоном.

## ABSTRACT

**Tupilko I.V. Development of energy-saving modes of off-furnace deazotation of liquid metal under conditions of intensification of heat and mass transfer processes. – Manuscript.**

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in the specialty 05.14.04. "Industrial Heat Power Engineering," GOU VPO "Donetsk National University," Donetsk, 2021.

Heat exchange of melt with atmosphere through layer of synthetic slag is taken into account. The developed mathematical model is applicable to a metal with a sufficiently high melting point, which ensures the dissolution of the removed nitrogen in

the melt and at least partial ionization of the atoms of this gas in it. Theoretically justified and experimentally confirmed the effect of intensification of the molisation unit  $2 [N] = \{N_2\}$  heat-mass exchange process of nitrogen removal from the metal melt.

A generalization of the relation of the Siverts law is obtained to set the boundary condition to the equation of convective diffusion of nitrogen atoms in the melt when studying heat and mass transfer processes in it. The generalization was achieved due to additional consideration of the effect of the electrostatic field of subcritical stresses on the vacuum-metal interfacial surface and the degree of ionization of nitrogen atoms in the melt. Formula is obtained linking final concentration of nitrogen in melt with initial concentration of this gas, area of heat and mass exchange surfaces and metal treatment time.

Disclosed is a method of energy saving at intensification of heat and mass transfer processes under conditions of off-furnace metal deazotation. The results of the dissertation work were introduced into the educational process of the Technical Thermophysics Department of Donetsk National Technical University and can be used in the organization of rational technology for off-furnace metal processing. The developed computer computing module frees the user from the need to conduct large-scale experimental and industrial research.

**Keywords:** energy saving, intensification of heat and mass transfer process, diffusion, moalization, interfacial surface, limiting link, vacuum, electrostatic field, argon blowing.