

**Заключение диссертационного совета Д 01.016.03**  
**на базе Государственного образовательного учреждения высшего**  
**профессионального образования «Донецкий национальный университет»**  
**Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики**  
**по диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук**  
аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета Д 01.016.03 от «22» октября 2021 г. № 39.

**О ПРИСУЖДЕНИИ**

**Тупилко Ирине Владимировне**  
**ученой степени кандидата технических наук**

Диссертация «Разработка энергоресурсосберегающих режимов внепечной деазотации жидкого металла в условиях интенсификации процессов тепломассопереноса» по специальности 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика принята к защите 30 июня 2021 года, Протокол № 38 диссертационным советом Д 01.016.03 на базе Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донецкий национальный университет», 283001, г. Донецк, ул. Университетская 24 (Приказ МОН ДНР № 117 от 08.02.2016 г. с изменениями согласно Приказам МОН ДНР № 442 от 25.04.2017 г., № 1280 от 16.09.2020 г., № 600 от 08.07.2021 г.).

**Соискатель** – Тупилко Ирина Владимировна, 1989 года рождения, в 2012 году окончила с отличием Донецкий национальный технический университет по специальности «Обработка металла давлением» и получила квалификацию магистра.

Тупилко И.В. работает учителем математики в школе № 138 г. Донецка и завершает обучение без отрыва от производства в аспирантуре по специальности 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального

образования «Донецкий национальный технический университет» Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики, г. Донецк.

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

**Научный руководитель** – Захаров Николай Иванович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технической теплофизики Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк.

**Официальные оппоненты:**

1. Толстых Виктор Константинович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры компьютерных технологий Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донецкий национальный университет» (г. Донецк);

2. Бабанин Анатолий Яковлевич, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» (г. Макеевка).

**Ведущая организация:** Государственное образовательное учреждение высшего образования «Луганский национальный университет имени Владимира Даля» (г. Луганск, Луганская Народная Республика).

Ведущая организация в своем положительном заключении, подписанном на основании обсуждения и одобрения на заседании кафедры вентиляции, теплогазо- и водоснабжения Института строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства Государственного образовательного учреждения высшего образования «Луганский национальный университет имени Владимира Даля» (23.09.2021 г., Протокол №3, подписан заведующим кафедрой вентиляции, теплогазо- и водоснабжения, д.т.н., профессором Н.Д. Андрийчуком и профессором этой же кафедры, д.т.н., профессором Я.А.

Гусенцовой, утвержден проректором по научной работе и инновационной деятельности ГОУ ВО «Луганский национальный университет имени Владимира Даля» д.т.н., профессором В.А. Витренко 24.09.2021 г.) указала, что диссертационная работа выполнена на достаточно высоком научном уровне и имеет практическое значение. Новые научные результаты, полученные И.В. Тупилко, имеют существенное значение для металлургической теплоэнергетики, состоящее в повышении производительности агрегатов внепечной обработки металлов путем интенсификации процессов тепломассопереноса энергоресурсосберегающими способами.

Рекомендации, изложенные в диссертации, а также общие выводы достаточно обоснованы.

Диссертационная работа полностью отвечает паспорту научной специальности 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика, в частности:

- разработка научных основ, методов и средств интенсивного сбережения энергетических ресурсов в промышленных теплоэнергетических устройствах и использующих теплоту системах и установках;
- теоретические, компьютерные и экспериментальные исследования механизмов и закономерностей процессов тепло- и массопереноса в тепловых системах и установках, использующих теплоту. Разработка и совершенствование методов расчета процессов переноса теплоты с потоками жидкости и газа в тепловых сетях, в элементах энергетических машин, технологических устройств и установок с целью улучшения их технико-экономических характеристик, экономии энергетических ресурсов;
- оптимизация параметров тепловых технологических процессов и разработка оптимальных схем установок, использующих теплоту, с целью экономии энергетических ресурсов и улучшения качества продукции в технологических процессах;
- разработка аналитических и численных методов расчета, методов математического и компьютерного моделирования гидродинамических и тепломассобменных процессов в различных отраслях промышленного

производства.

Работа отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика.

**Основные результаты диссертационных исследований** опубликованы в 13 научных работах, из которых 5 статей в рецензируемых научных изданиях, в том числе 2 в журналах, в которых согласно нормативным документам ВАК МОН ДНР могут публиковаться результаты диссертационных исследований по специальности 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика, 1 патент на изобретение, 7 публикаций в материалах и тезисах конференций.

Наиболее значимые работы по теме диссертации.

**В рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК МОН ДНР  
по специальности 05.14.04**

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.

**В других научных изданиях**

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



теплотемассопереноса 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 теплотемассопереноса 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.

**На автореферат поступило 4 отзыва.** Все отзывы положительные с замечаниями.

Обзор поступивших отзывов.

1. **Карнаух В.В.**, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры холодильной и торговой техники имени Осокина В.В. ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского», г. Донецк.

**Отзыв положительный с замечаниями:**

1) уравнение конвективной диффузии атомов азота в расплаве металла не позволяет определить распределение этих частиц по высоте жидкой ванны;

2) проблематичность использования на практике рекомендаций по экономии электрической энергии ввиду ненадежности электрооборудования высоких напряжений;

3) затруднено чтение приведенных графических зависимостей ввиду их низкого разрешения (стр. 15, 16, 18);

2. **Максимова А.Ю.**, кандидат технических наук, ученый секретарь Государственного учреждения «Институт прикладной математики и механики», г. Донецк.

**Отзыв положительный с замечанием:**

- Отсутствие анализа фактора наличия азота в металле в виде нитридных включений, которые усложняют методологию. Кроме того, в реальных условиях в расплавах тугоплавких металлов кроме азота присутствуют и другие

газы (водород, кислород), что требует расширения фронта исследований.

**3. Семергей В.А.**, кандидат технических наук, Инженер службы эксплуатации оборудования, зданий и сооружений ГУП ДНР «ДОНБАССТЕПЛОЭНЕРГО» ФИЛИАЛ «ГОРЛОВКАТЕПЛОСЕТЬ», г. Горловка.

**Отзыв положительный с замечанием:**

- Трудности в реализации практических рекомендаций, которые предполагают, как наличие надежных пористых вставок для продувки металла аргоном, так и устойчивость работы электрооборудования для создания высоких электрических напряжений. Кроме того, в настоящее время отсутствуют сведения о степени ионизации атомов азота в расплавах металлов.

**4. Фролова С.А.**, кандидат химических наук, заведующий кафедрой физики и физического материаловедения ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка.

**Отзыв положительный с замечаниями:**

- 1) недостаточно подробное рассмотрение энергоресурсосберегающих практических рекомендаций;

- 2) проблематичность быстрого внедрения результатов работы.

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации** обосновывается компетентностью оппонентов и сотрудников ведущей организации по теме рассматриваемой диссертационной работы, наличием у них весомых научных публикаций, связанных с теплоэнергетическими аспектами процессов дегазации стали, конвективной диффузии и математическим моделированием сложных тепломассообменных процессов.

**Диссертационный совет отмечает, что по своей направленности диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.14.04 –промышленная теплоэнергетика, а именно в части следующих направлений исследований:**

3.1. Разработка научных основ, методов и средств интенсивного сбережения энергетических ресурсов в промышленных теплоэнергетических устройствах и использующих теплоту системах и установках;

3.4. Теоретические, компьютерные и экспериментальные исследования механизмов и закономерностей процессов тепло- и массопереноса в тепловых системах и установках, использующих теплоту. Разработка и совершенствование методов расчета процессов переноса теплоты с потоками жидкости и газа в тепловых сетях, в элементах энергетических машин, технологических устройств и установок с целью улучшения их технико-экономических характеристик, экономии энергетических ресурсов;

3.5. Оптимизация параметров тепловых технологических процессов и разработка оптимальных схем установок, использующих теплоту, с целью экономии энергетических ресурсов и улучшения качества продукции в технологических процессах;

3.11. Разработка аналитических и численных методов расчета, методов математического и компьютерного моделирования гидродинамических и тепломассообменных процессов в различных отраслях промышленного производства;

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

- установлена и раскрыта сущность эффекта интенсификации молекулонного звена тепломассообменного процесса удаления азота из расплава металла;

- разработан способ использования закона Сивертса, позволяющий учесть электростатические поля докритических напряжённостей на межфазную

поверхность «вакуум-металл» и степень ионизации атомов азота в расплаве при постановке граничного условия к уравнению конвективной диффузии атомов азота в жидком металле;

- построена математическая модель процессов конвективного теплообмена 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 путем интенсификации процессов теплообмена.

### **Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

- обобщено соотношение закона Сиверта 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.

- 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.

- впервые теоретически обоснован и экспериментально подтвержден эффект интенсификации молекулярного звена  $2 [N] = \{N_2\}$  теплообменного 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".



- 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.

**1. Значение полученных соискателем результатов исследования для практики** подтверждается тем, что: разработанный энергоресурсосберегающий режим технологии в условиях интенсификации процессов конвективного тепломассопереноса в расплаве может быть внедрен на различных предприятиях по производству металла ответственного назначения. 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 аргонem 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: ). 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  $\sim$  2,5 раза, при  $E=2$  кВ/см  $\sim$  6 раз).

**Достоверность результатов исследования** подтверждается тем, что для его проведения использованы базовые теоретические представления об исследуемых процессах и апробированные методы. В результате сопоставления результатов лабораторных исследований, математического моделирования и данных натурных экспериментов, полученных японскими учеными, показано их полное качественное и (на достаточном уровне) количественное

соответствие. 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.

**Основные результаты диссертации** 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.).

**Личный вклад соискателя** заключается в выборе метода исследования, получении теоретических решений задач, проведении численных и лабораторных исследований с анализом их результатов; разработке практических рекомендаций по определению параметров энергоресурсосберегающих режимов внепечной деазотации жидкого металла в условиях интенсификации процессов тепломассопереноса.

На заседании от «22» октября 2021 года диссертационный совет принял решение присудить Тупилко Ирине Владимировне ученую степень кандидата технических наук

При проведении открытого голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, в том числе 3 в удаленном интерактивном режиме, из них 3 доктора наук по специальности рассматриваемой диссертации,

участвовавших в голосовании, из **21** человек, входящих в состав совета, проголосовали:

- за – 14;
- против – 0;
- воздержались – 0.

Председатель

диссертационного совета Д 01.016.03,  
доктор технических наук, профессор

В.И. Сторожев

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 01.016.03  
доктор физико-математических наук, доцент

И.А. Моисеенко



25.10.2021г.