



# Уральский федеральный университет

имени первого Президента  
России Б.Н. Ельцина

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ)

ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002,  
факс: +7 (343) 375-97-78; тел.: +7 (343) 374-38-84  
контакт-центр: +7 (343) 375-44-44, 8-800-100-50-44 (звонок бесплатный)  
e-mail: rector@urfu.ru, www.urfu.ru  
ОКПО 02069208, ОГРН 1026604939855, ИНН/КПП 6660003190/667001001

Утверждаю

Проректор по науке УрФУ

В.В. Кружаев

2019 г.

25.12.2019 № 01.09-07/821

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_



«\_\_\_» \_\_\_\_\_  
Печать организации

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Кондрашенко Станислава Игоревича на тему:  
«Исследование и разработка способа нагрева стальной ленты струями  
высокотемпературного азота», представленную на соискание ученой степени кандидата  
технических наук по специальности 05.16.02 - «Металлургия черных, цветных и редких  
металлов»

Процесс термообработки стальных изделий является не только одним из важнейших этапов получения продукции высокого качества, но и одним из энергозатратных процессов. Использование в нагревательных устройствах высокотемпературного азота позволяет совместить одновременно две функции: теплотехническую как теплоносителя и технологическую как защитной атмосферы, а использование системы струйного нагрева высокотемпературным азотом - позволит повысить энергоэффективность промышленных агрегатов.

**Актуальность темы диссертации** заключается в том, что повышение эффективности работы металлургических агрегатов для термообработки стальной ленты требует других подходов к решению существующих проблем энергосбережения, позволяющих сократить производственные площади, снизить время нагрева, повысить интенсивность теплообменных процессов, организовать малоинерционный переход с одного температурного режима на другой. В этой связи диссертационная работа Кондрашенко Станислава Игоревича представляет научный и практический интерес, так как отражает возможность повышения энергоэффективности процесса нагрева стальной ленты и создания новых более современных конструкций нагревательных устройств.

Объем диссертации составляет 157 страниц печатного текста, 12 таблиц, 135 рисунков и одно приложение.

**Цель диссертационной работы** заключалась в исследовании и разработке способа безокислительного нагрева стальной ленты струями высокотемпературного азота на основе исследования аэродинамики и теплового состояния как одиночной струи, так и системы струй азота, взаимодействующих с поверхностью металла. Следует отметить, что основная идея, предложенная соискателем – использовать азот как носитель теплоты и одновременно как защитную атмосферу для обеспечения безокислительного нагрева стальной ленты – является вполне работоспособной и оригинальной.

Для достижения этой цели в диссертационной работе были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка численной модели исследования аэродинамики и температурного поля одиночной круглой струи, взаимодействующей с плоской поверхностью. Отличительной особенностью разработанной модели является

возможность учета зависимости свойств азота от его температуры как в струе, так и в веерном потоке, поскольку физические свойства азота влияют на интенсивность конвективной теплоотдачи. Модель позволяет учитывать изменение начальных условий истечения и конструктивных параметров, а также исследовать процесс динамики теплового состояния металла.

2. Разработка численной модели расчета аэродинамики и температурного поля системы круглых струй, взаимодействующих с плоской поверхностью. Отличительной особенностью разработанной модели также является возможность учета зависимости свойств азота от его температуры как в струе, так и в веерном потоке. Разработанная модель позволяет учитывать изменение начальных условий истечения и конструктивных параметров системы струй, а также исследовать процесс нагрева изделий стальной ленты.

3. Исследование влияния режимных и конструктивных факторов на аэродинамику и тепловое состояние как одиночной струи, так и системы струй. Приведены результаты этих исследований и определены наиболее рациональные интервалы изменения этих факторов.

4. Разработка инженерной методики расчета параметров веерного потока, формирующегося после взаимодействия струй с поверхностью металла, позволяющей проводить расчет начальной толщины и средней скорости течения в веерном потоке.

5. Разработка метода расчета конвективного теплообмена в области веерного потока с использованием введенного понятия «энергодинамический потенциал потока». Этот метод позволяет, основываясь на аэродинамических свойствах и тепловом состоянии веерного потока, оперативно рассчитать потенциально возможное количество теплоты в потоке.

6. Проведение основных расчетов режимов нагрева стальной ленты для агрегата непрерывного горячего алюминирования для условий ПАО «Северсталь». На основании полученных результатов предложена эффективная схема нагрева ленты струями высокотемпературного азота для агрегата непрерывного горячего алюминирования. Рассчитаны основные параметры установки, показано, что длина зоны нагрева сокращается примерно в 2 раза.

### **Структура и содержание работы**

**Во введении соискатель** аргументированно обосновывает актуальность работы, формулирует ее цель и задачи, отмечает научную новизну и практическую значимость, формулирует положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен аналитический обзор литературы по тематике исследования. Приведены развернутые описания методов нагрева металла струями перед операциями обработки металла давлением, термообработки, а именно: струйно-факельный нагрев (нагрев горячими струями), нагрев горячими струями, импульсно-скоростной нагрев. Описан способ получения и хранения азота, как основы защитной атмосферы, а в предложенном способе соискателя – еще и теплоносителя.

**В второй главе** диссертационной работы автором рассмотрены различные варианты методов исследования технологического процесса. Для дальнейшего исследования выбран метод численного моделирования на основе программно-вычислительного комплекса FloEFD, включающего в себя необходимые модули расчета гидрогазодинамики и теплообмена с настройкой необходимых условий однозначности. Подробно обоснован выбор способа моделирования турбулентности. Выбрана k-ε модель турбулентности, так как она является наиболее экономичной в плане компьютерных ресурсов и достоверной в плане полученных результатов. Представлены модели исследуемых процессов с описанием решаемых в модели дифференциальных уравнений.

**В третьей главе** приведены результаты исследования структуры и полей скорости струи, взаимодействующей с плоской поверхностью. Представлены две области течения газа – область струйного течения и область веерного потока. Сделан вывод о том, что

толщина веерного потока меньше диаметра струи на всем расстоянии от среза сопла до поверхности, а скорость газа уменьшается по мере развития струи из-за потери начальной энергии на вовлечение в движение неподвижного окружающего газа. По мере растекания веерного потока скорость газа снижается. Представлены результаты исследования изменения конструктивных параметров исследуемой системы. Показано, что увеличение относительного расстояния от среза сопла изменяет картину течения - струя распространяется практически как свободная; увеличение начальной скорости истечения газа приближает к поверхности область более высоких скоростей как в самой струе, так и в веерном потоке; высокие скорости увеличивают общую толщину веерного потока и снижают толщину гидродинамического пограничного слоя, которая возрастает по мере удаления от критической точки. Исследование структуры температурных полей при различных условиях истечения показало, что увеличение начальной скорости истечения газа приближает к поверхности область более высоких температур как в самой струе, так и в веерном потоке, а при понижении температуры истекающего азота эпюра температур на оси выравнивается. При уменьшении расстояния между соплом струи и металлом повышается локальность нагрева, в то время как повышение скорости истечения способствует интенсификации нагрева.

Достоинством работы, несомненно, является то, что автором дополнительно проведены экспериментальные исследования процесса конвективной теплоотдачи. Результаты экспериментального исследования подтвердили правильность выбранной структуры потока при взаимодействии струи с ограничивающей поверхностью, состоящего из области струйного течения, переходной области и области веерного потока.

**В четвертой главе** соискателем была исследована аэродинамика и тепловое состояние при взаимодействии системы струй с поверхностью при различном расстоянии от сопла до поверхности, а также при изменении расстояния между соплами. Автором подробно представлены распределения температуры и скорости в поперечном сечении потока для системы струй азота, взаимодействующих с поверхностью, а также изменения температуры поверхности металла для различных конструктивных параметров системы. Отмечается, что при небольших расстояниях от сопел до поверхности металла, не превышающих длину начального участка струи, раскрытие струй не происходит и интенсификация теплообмена во всей системе струй возможна лишь за счет взаимодействия веерных потоков каждой из струй. Увеличение расстояния от сопел до поверхности, превышающего начальный участок струй, приводит к раскрытию струй с образованием одной большей струи, но с температурой ниже, чем температура истечения каждой струй в отдельности.

**В пятой главе** автором вводятся новые понятия: «энергодинамический потенциал» и «энергодинамическая мощность потока», которые позволяют корректно определить интенсивности конвективной теплоотдачи, так как описывают веерный поток с его основными начальными параметрами. В работе показано отличие понятий плотности теплового потока и энергодинамического потенциала, которое заключается в том, что понятие плотности теплового потока для задач конвективной теплоотдачи означает количество теплоты, которое переносится от жидкости к твердой поверхности (или наоборот) за единицу времени через единицу площади поверхности теплообмена. Энергодинамический потенциал характеризует свойство потока как источника или носителя теплоты. На основе данных понятий автором предложена методика расчета теплообмена при взаимодействии высокотемпературной струи с нагреваемым металлом, отличающаяся тем, что в качестве определяющих параметров используются параметры веерного потока.

**В шестой главе** описывается возможное практическое применение результатов исследования. Предложенный автором способ нагрева струями высокотемпературного азота для агрегата непрерывного горячего алюминирования позволяет уменьшить производственные площади, отказаться от использования дополнительной защитной

атмосферы за счет использования высокотемпературного азота, совмещающего в себе две функции – теплотехническую и технологическую. Приводится схема компактного устройства для нагрева азота. В заключении автор подводит итоги проделанной работы и формулирует общие выводы по всей диссертационной работе.

Анализ содержательной части диссертационной работы позволяет сделать вывод о том, что автором использован комплексный подход к проведению исследования и решения поставленных задач и утверждать обоснованность основных результатов, полученных в ходе исследования.

В диссертационной работе Кондрашенко С.И. получен ряд оригинальных **научных результатов**. К наиболее значимым научным результатам можно отнести следующие:

1. Разработан способ нагрева стальной ленты в процессе ее термообработки струями высокотемпературного азота, отличительной особенностью которого является использование нагретого азота, выполняющего одновременно две функции – теплотехническую и технологическую.

2. Разработаны численные модели для исследования аэродинамики и теплового состояния одиночной круглой струи и системы круглых струй, взаимодействующих с ограничивающей поверхностью, которые, в частности, позволяют учесть зависимость свойств азота в вытекающей струе и в окружающем струю пространстве от его температуры, что существенно влияет на интенсивность конвективной теплоотдачи.

3. Для расчета конвективной теплоотдачи при взаимодействии струй высокотемпературного азота с поверхностью металла предложены понятия «энергодинамический потенциал потока» и «энергетическая мощность потока». Предложенные понятия позволяют охарактеризовать поток как носителя теплоты.

4. Разработана методика расчета конвективного теплообмена при струйном нагреве, в которой определяющими факторами являются параметры веерного потока: распределение скорости движения азота в пограничном слое, профили температур в веерном потоке, толщина веерного потока. Методика основана на использовании введенных понятий «энергодинамический потенциал потока» и «энергодинамическая мощность потока».

#### **Практическая значимость представленной работы заключается в следующем:**

1. Разработана схема устройства для нагрева ленты высокотемпературными струями азота, позволяющая сократить время нагрева, снизить капитальные затраты и сократить удельный расход топлива.

2. Предложены рациональные режимы и конструктивные параметры струйных систем с учетом реальных условий взаимодействия струй и окружающей их среды.

3. Разработана инженерная методика расчета параметров веерного потока, образующегося после взаимодействия струи с поверхностью металла.

4. Получены данные о характере распределения скорости в пристеночном пограничном слое веерного потока.

5. Результаты и рекомендации, изложенные в работе, приняты для использования при проектировании, реконструкции и строительстве установок струйного нагрева в ООО «КОМАС» (Протокол технического совещания прилагается).

#### **Достоверность результатов и обоснованность выводов**

Достоверность результатов и обоснованность выводов автора не вызывают сомнений. Для проведения исследований использовалось современное программное обеспечение, оригинальные и взаимодополняющие методики, соответствующие современному научному уровню. Анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод о правильности выбора методики исследования проблемы и предложенных решений проблемы. Основные выводы диссертации обоснованы и логически вытекают из содержания работы.

Результаты могут быть рекомендованы для использования на металлургических предприятиях ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» и другие.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Основное содержание опубликовано в 6 статьях, 2 из них – в журналах, входящих в перечень ВАК. Результаты доложены на 7 международных и всероссийских конференциях.

**По диссертационной работе можно сделать следующие замечания:**

1. Глава 3. Не совсем понятно, коррелируют ли результаты экспериментальных исследований с результатами при расчете по существующим на сегодняшний день методикам.

2. Раздел 6.3. Не достаточно внимания уделено процессу нагрева азота до необходимой температуры. Как известно, азот является лучепрозрачным газом и его нагрев до высоких температур представляет собой весьма сложную проблему, что может оказаться на эффективности предлагаемого способа нагрева ленты.

3. Глава 6. При сравнении с существующей схемой нагрева не рассмотрен экономический эффект от предложенной технологии нагрева струями высокотемпературного азота.

4. Все результаты исследования получены для случая истечения азота из сопел круглого поперечного сечения, хотя возможны и другие варианты. В работе отсутствует обоснованность выбора автором сопел только круглого поперечного сечения.

Тем не менее, указанные замечания не снижают теоретической и практической значимости выполненной Кондрашенко С.И. диссертационной работы, а полученные результаты соответствуют поставленной цели.

**Заключение**

Диссертационная работа Кондрашенко С.И. «Исследование и разработка способа нагрева стальной ленты струями высокотемпературного азота» представляет собой завершенную научно-квалификационную работу на актуальную тему, в которой изложены научно обоснованные технологические решения задачи, имеющей существенное значение для промышленности.

Диссертация написана грамотным научно-техническим языком, логично структурирована. Выводы, изложенные в работе, основаны результатами исследований и полностью соответствуют содержанию диссертации.

Автореферат в полной мере отражает содержание и объем выполненных исследований.

Изложенные автором результаты исследования можно рекомендовать к использованию на металлургических предприятиях, таких как ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» и другие.

Диссертационная работа соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС», а ее автор **Кондрашенко Станислав Игоревич** заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 - «Металлургия черных, цветных и редких металлов».

Отзыв рассмотрен, обсужден и одобрен на заседании кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» 19 декабря 2019 года, протокол № 26.

Отзыв подготовлен заведующим кафедрой «Теплофизика и информатика в металлургии» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», доктором технических наук, профессором Спириным Николаем Александровичем.

Заведующий кафедрой «Теплофизика и информатика в металлургии» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», доктор технических наук, профессор

Ученый секретарь кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», доцент, кандидат технических наук



Н.А. Спирин

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»)

Адрес: 620002, Уральский федеральный округ, Свердловская область, г.Екатеринбург, ул. Мира, 19. Телефон: +7 (343) 375-44-44

Адрес электронной почты: contact@urfu.ru

Подписи Спирина Н.А. и Гольцева В.А. заверяю

Ученый секретарь УрФУ



Спирин Гольцов В.А.



(Печать)