

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»**

Кондрашенко Станислав Игоревич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СПОСОБА НАГРЕВА СТАЛЬНОЙ ЛЕНТЫ
СТРУЯМИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО АЗОТА**

05.16.02 - Metallurgy of black, colored and rare metals

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
Кандидат технических наук, профессор,
Прибытков Иван Алексеевич

Москва, 2019

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Как известно, доля металлургической промышленности в ВВП России составляет около 5 %, в промышленном производстве около 12 %. В состав чёрной металлургии входит более 1,5 тыс. предприятий и организаций, 70 % из них являются градообразующими, число занятых – более 650 тыс. человек. Согласно данным, опубликованным некоммерческой организацией World Steel Association, выплавка стали в России в 2018 году достигла отметки в 71,7 млн. т.

Одним из направлений дальнейшей переработки полученной стальной заготовки является производство холоднокатаного листа. За 2018 год в РФ было произведено 8,252 млн. тонн холоднокатаного листового проката. Лист холоднокатаный получают в процессе обработки стальной заготовки давлением. Большую часть холоднокатаного листа в нашей стране производят рулонным способом и на завершающей стадии подвергают светлomu (в защитных средах) рекристаллизационному отжигу в термических печах.

Термообработка способствует улучшению микроструктуры, достижению большей однородности металла, снятию внутренних напряжений, но является энергозатратной и требует повышения энергоэффективности технологического процесса и работы технологического оборудования.

Немаловажную роль играет и тот факт, что при нагреве, выдержке и охлаждении необходимо использование большого количества дорогостоящей защитной атмосферы для предотвращения окисления металла.

Направлением дальнейшего совершенства тепловой работы устройств для нагрева стальной ленты в процессе ее термообработки является разработка такого способа нагрева, при котором упрощается конструкция самого нагревательного устройства, уменьшаются капитальные затраты на его строительство, снижается тепловая инерционность при переходе с одного температурного режима на другой. Особо важным при этом является исключение из технологического процесса необходимости иметь специальные защитные атмосферы, препятствующие окислению поверхности ленты.

Теоретической основой для данной работы послужили труды в области нагрева металла с использованием атакующих (ударных) струй. В частности, публикации таких авторов, как Г.Н. Абрамович, В.Н. Асцатуров, П.Г. Краснокутский, М.А. Глишков, П.С. Берковская, И.А. Белов, В.Н. Аптерман, К.Н. Волков, В.М. Тымчак, Г.Н. Абрамович, Б.Н. Юдаев, Г.К. Маликов, В.Г. Лисиенко, В.А. Леонтьев, Е.М. Шлеймович, В.Л. Гусовский, А.Б. Усачев, В.И. Тимошпольский, И.А. Трусова, П.Э. Ратников, В.В. Курносов, И.А. Прибытков, В.А. Кривандин, А.Б. Бирюков, Y.J. Liu, J.D. Li и др.

Струйный конвективный нагрев является весьма перспективным способом организации процесса передачи теплоты от газообразного теплоносителя к нагреваемым изделиям. Его использование даёт ряд преимуществ по сравнению с другими схемами организации движения газообразного теплоносителя относительно поверхности нагреваемого изделия: высокие значения интенсивности теплообменного процесса, снижение времени нагрева, уменьшение габаритов нагревательных устройств и затрат на их строительство, облегчение условий работы теплового ограждения этих устройств, возможность создания малоинерционного перехода с одного температурного режима на другой.

Нагрев металла при термической обработке может сопровождаться не только окислением поверхности, но и науглероживанием или обезуглероживанием. Для предотвращения или уменьшения этих явлений в термических печах и создают газовые защитные атмосферы. Защитные атмосферы необходимы в первую очередь при термообработке высоколегированных сталей и сплавов.

В качестве защитных атмосфер используют азот, водород, аргон, диссоциированный аммиак и экзотермический газ.

Для нагрева стальной ленты в разрабатываемом способе предполагается использовать нагретый азот, выполняющий одновременно две функции: теплотехническую как носитель теплоты для нагрева ленты и технологическую – роль защитной атмосферы.

Целью работы является исследование и разработка способа безокислительного нагрева стальной ленты струями высокотемпературного азота на основе исследования аэродинамики и теплового состояния струй азота и системы струй азота, взаимодействующих с поверхностью металла.

Для достижения этой цели были решены следующие **задачи**:

1. Разработана численная модель исследования аэродинамики и температурного поля одиночной круглой струи, взаимодействующей с плоской поверхностью.
2. Разработана численная модель исследования аэродинамики и температурного поля системы круглых струй, взаимодействующих с плоской поверхностью.
3. Исследовано влияние режимных и конструктивных факторов на аэродинамику и тепловое состояние как одиночной струи, так и системы струй.
4. Разработана инженерная методика расчета параметров веерного потока, формирующегося в взаимодействии струи с поверхностью металла.
5. Проведены экспериментальные исследования по определению распределения плотности теплового потока в области взаимодействия струй с поверхностью стальной ленты и влияния на них основных факторов.

6. Разработан метод расчета конвективного теплообмена в области веерного потока с использованием понятия энергодинамический потенциал потока.

7. Проведены основные расчеты режимов нагрева стальной ленты для реальных условий работы агрегата непрерывного горячего алюминирования для условий ПАО «Северсталь»

Научная новизна:

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 результатов работы:

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).

На защиту выносятся:

- способ нагрева стальной ленты струями высокотемпературного азота
- результаты численного моделирования аэродинамики и теплообмена при взаимодействии струи и системы струй с поверхностью нагреваемой ленты;
- результаты физического моделирования теплообмена при взаимодействии струи с поверхностью нагреваемой ленты;
- инженерная методика расчета параметров веерного потока, образующегося после взаимодействия струи с поверхностью металла;
- методика расчета конвективного теплообмена, основанная на понятии энергодинамического потенциала.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на:

- III Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (ТИМ'2014), посвященной 150-летию со дня рождения Владимира Ефимовича Грум-Гржимайло, Екатеринбург, 27-29 марта 2014 г.
- IV Всероссийской научно-практической конференции «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (ТИМ-2015) с международным участием, посвященной 95-летию основания кафедры и университета, Екатеринбург, 26-27 марта 2015 г.
- VII международной научно-практической конференции «Энергосберегающие Технологии в Промышленности. Печные Агрегаты. Экология», Москва, 15-17 октября 2014 г.
- II Всероссийской специализированной научно-практической конференции молодых специалистов «Современные технологии в энергетике» (с международным участием), Москва, 29-30 марта 2018 г.
- 19-ой Всероссийской научно-практической конференция студентов, аспирантов и специалистов «Энергетики и металлургии настоящему и будущему России», Магнитогорск, 22-24 мая 2018 г.
- VII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (ТИМ'2018) «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве», Екатеринбург, 17-18 мая 2018 г.
- X Международной научно-практической конференции «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология», Москва, 12-14 декабря 2018 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 работ. Из них 2 статьи - в журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ и переведены на английский язык и опубликованы в журнале, входящем в международную библиографическую базу данных «Scopus», 4 статьи опубликованы в сборниках научных трудов конференций.

Личный вклад автора: непосредственное участие в разработке основного предложения, обсуждаемого в работе, формулировке целей и задач исследования, в проведении численного эксперимента с применением программного продукта, разработка экспериментального стенда, проведение физического эксперимента на стенде. В обобщении и обсуждении результатов исследования и разработке рекомендаций для практического использования, в написании статей и подготовке докладов на конференции.

Достоверность результатов: подтверждается применением современных методик исследования, объемом литературных и собственных данных, которые позволяют сделать обоснованные выводы. Текст диссертации и автореферат проверен на отсутствие плагиата с помощью программы «Антиплагиат» (<http://antiplagiat.ru>).

Структура диссертационной работы состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 111 наименований. Диссертация изложена на 157 страницах машинописного текста, содержит 12 таблиц, 135 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** раскрыта актуальность научного исследования, сформулированы цель работы и решаемые задачи, научная новизна и практическая значимость.

В **первой главе** приведены результаты поиска, структурирования и обработки литературных источников по методам нагрева металла струями перед операциями обработки металла давлением, термообработки и термохимической обработки, а именно: струйно-факельному нагреву (нагреву горящими струями), нагреву горячими струями, импульсно-скоростному нагреву.

Исследования в области струйно-факельного нагрева начали проводить с 60-х годов XX века. Впервые данный способ был предложен во ВНИИМТ и УРФУ. Основоположниками исследования аэродинамических факторов, конструктивных особенностей и проведение первых экспериментов были Г.К. Маликов и В.Г. Лисиенко. Проведя анализ работ по применению струйно-факельного нагрева, можно выделить его основные преимущества: снижение веса футеровки печного агрегата; использование теплоты горения факела в большей степени на нагрев металла за счет сжигания на поверхности изделия; возможность использования многосопловых неохлаждаемых горелок; обеспечение высоких значений коэффициента

теплоотдачи на поверхности нагреваемого изделия за счет высоких скоростей истечения смеси; резкое сокращение эмиссии оксидов азота вследствие снижения температуры рабочего пространства и уменьшение локальных зон перегрева металла. Работы по использованию струйно-факельного нагрева ведутся во многих странах мира, в том числе Индии, Германии, США, России, а использование современных струйно-факельных устройств позволяет работать в широком диапазоне изменения коэффициента расхода воздуха. Недостатком струйно-факельного способа нагрева является возможный локальный перегрев изделия за счет того, что горение происходит локально на поверхности, а продукты сгорания топлива имеют высокий импульс и температуру.

В отличие от струйно-факельного, нагрев горячими струями продуктов завершеного горения топлива требует отсутствия горения топлива после выхода его из горелки. В литературе, при описании данного способа, отличительными особенностями его считается уменьшение удельного расхода топлива до 50% в сравнении с традиционными технологиями. В основу данного способа нагрева заложен метод использования высокотемпературного потока продуктов сгорания, который обеспечивает высокую интенсивность процесса теплообмена с нагреваемым металлом. Расширение применения данного метода нагрева в металлургии, а именно в печестроении дало появление скоростных горелочных устройств. С появлением рекуперативных скоростных горелочных устройств возможность экономии топлива увеличилась еще больше. Недостатком рассматриваемого способа является высокая стоимость горелочных устройств данного типа, окупаемость которых затруднительна даже при экономии топливных ресурсов.

Третьим способом нагрева с использованием струйных технологий является импульсно-скоростной нагрев, работы по исследованию которого велись московской и украинской теплотехническими школами. Основная суть данного метода – это применение чередующихся во времени периодов интенсивного нагрева и выдержки металла. Применение данного метода широко используется при нагреве массивных в тепловом отношении изделий, что позволяет прогреть до нужной температуры изделие с минимальными топливными ресурсами, а также без потери качества.

Таким образом, использование струйных способов нагрева изделий получило довольно широкое применение в металлургических печных агрегатах, а, например, в протяжных или колпаковых печах для повышения эффективности нагрева применение струйного-конвективного нагрева является практически единственным вариантом повышения энергоэффективности работы нагревательных устройств.

Одним из требований к устройствам для нагрева стальной ленты является необходимость исключения окисления поверхности металла в процессе его нагрева. С этой

целью используются специальные защитные атмосферы, а топливо сжигается в радиантных трубах, что препятствует смещению указанных газообразных агентов.

Необходимость использования защитной атмосферы приводит к усложнению конструкции нагревательного устройства и повышению себестоимости продукции. Нагрев ленты с использованием струй высокотемпературного азота объединить две функции – теплотехническую и технологическую в одном газообразном агенте – азоте.

Описаны способы получения и хранения азота, как основного теплоносителя для разрабатываемого способа безокислительного струйного нагрева, который будет использован также в качестве защитной атмосферы.

Во **второй главе** описан выбор метода компьютерного моделирования для проведения исследования теплофизических особенностей нагрева стальной ленты струями нагретого азота.

Проведен анализ использования программных продуктов при исследовании и оптимизации технологических процессов, в результате которого была получена информация о применении таких программных продуктов, как: программные продукты Ansys от компании Cadfem, FlowVision от компании ТЕСИС, Comsol Myltiphsics от компании COMSOL Group, FloEFD и FloSimulation от компании CADFlow.

При проработке возможной методики исследования было проведено изучение моделирования турбулентностей, которые в струйном процессе нагрева присутствуют в явном виде. Использование на сегодняшний день, имеющийся информации позволяет сделать вывод о том, что наиболее популярными подходами к решению задачи расчета турбулентности являются: прямое численное моделирование Direct numerical simulation (далее - DNS), моделирование крупных вихрей Large-Eddy Simulation (далее – LES); Моделирование, основанное на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса Reynolds Averaged Navier–Stokes (далее - RANS). Для дальнейшего исследования выбран подход RANS с использованием полуэмпирической теории турбулентности, которая позволит замкнуть полученную систему уравнений исследуемого процесса. Выбрана стандартная модель $k-\epsilon$, согласно которой турбулентная вязкость рассчитывается с помощью дифференциальных уравнений для кинетической энергии турбулентных пульсаций k и скорости ее диссипации ϵ , отнесенных к единице массы. При проведения численного исследования был выбран программно-вычислительный комплекс FloEFD, который широко применяется в задачах авиационной, нефтегазовой и химической промышленности.

Были разработана 3D-модель исследования для одиночной высокотемпературной струи азота, вытекающей из круглого сопла, а также 3D-модель для исследования системы струй, вытекающих из круглых сопел и взаимодействующих с поверхностью., а также условия

однозначности. Схемы истечения и развития структуры потоков азота для одиночной струи показана на рисунке 1.

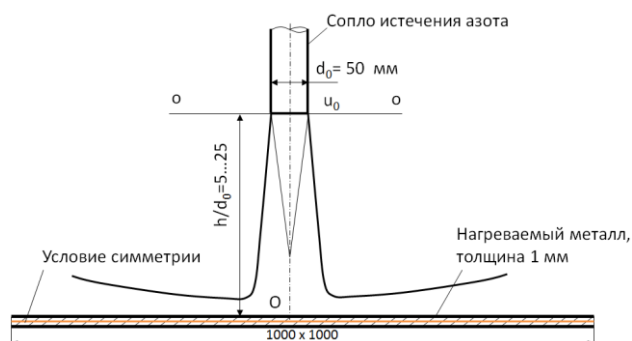


Рисунок 1- Схема развития структуры струйного потока одиночной струи

Струи азота «атакуют» поверхность стальной ленты. При струйном конвективном нагреве основное количество теплоты к металлу передается за счет конвективной теплоотдачи.

Для исследования одиночной струи выбранные размеры поверхности следующие: длина и ширина 1000 мм, толщина нагреваемого металла 1 мм, диаметр сопла истечения азота 50 мм, относительная высота от сопла до нагреваемого металла изменяется в пределах $(5 \dots 25 h/d_0)$.

Температура истекающего азота $T_0 = 700 \text{ }^\circ\text{C}$; Начальная температура в камере исследования и температура металла $= 20 \text{ }^\circ\text{C}$; Скорость истечения азота принималась равной 30 и 100 м/с; материал металла – Сталь Ст3.

В работе было принято, что изменение теплофизических свойств металла представлено функцией кусочно-линейного вида; не рассматривается процесс нагрева азота, считается, подается заданной температуры.

Модели исследования описываются системой, состоящей из: уравнения неразрывности (1); уравнения энергии для азота (2), уравнения Навье-Стокса (3) и дополнена уравнениями переноса субстанции для кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ϵ стандартной модели турбулентности k - ϵ (4):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{T}) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho \bar{u} \bar{T}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \bar{v} \bar{T}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho \bar{w} \bar{T}) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho a_{eff} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho a_{eff} \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho a_{eff} \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right) + S_i, \quad (2)$$

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}(\rho\bar{u}) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{eff}\frac{\partial\bar{u}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{eff}\frac{\partial\bar{u}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_{eff}\frac{\partial\bar{u}}{\partial z}\right) \\ \frac{d}{dt}(\rho\bar{v}) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{eff}\frac{\partial\bar{v}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{eff}\frac{\partial\bar{v}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_{eff}\frac{\partial\bar{v}}{\partial z}\right)\end{aligned}\quad (3)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho\bar{w}) = -\rho g - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{eff}\frac{\partial\bar{w}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{eff}\frac{\partial\bar{w}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_{eff}\frac{\partial\bar{w}}{\partial z}\right)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho k\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho k\bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho k\bar{w}) &= \frac{\partial}{\partial x}\left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x}\right] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y}\left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial z}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho\varepsilon\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho\varepsilon\bar{v}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho\varepsilon\bar{w}) &= \frac{\partial}{\partial x}\left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x}\right] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y}\left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial z}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}\end{aligned}\quad (4)$$

В третьей главе представлены результаты исследования структуры, а также полей скорости и температуры одиночной струи, взаимодействующей с поверхностью. Сложности получения для данной задачи аналитического решения усугубляются тем, что струя при взаимодействии с поверхностью как таковая исчезает и с поверхностью взаимодействует настильный (веерный) поток (область IV на рисунке 2), форма, аэродинамические свойства и тепловое состояние которого резко отличаются от таковых для первоначальной струи. Области течения при взаимодействии струи с плоской поверхностью представлены на рисунке 3 (а). Как и в случае движения неограниченного потока вдоль плоской поверхности вблизи последней образуется гидродинамический пограничный слой, однако структура течения в веерном потоке принципиально иная.

Веерный поток, распространяющийся в пространстве с неподвижной средой, должен иметь две границы с нулевой скоростью, как показано на рисунке 3 (б). Вблизи поверхности формируется гидродинамический пограничный слой $\delta(x)$, величина скорости в нем изменяется от нуля на поверхности до некоторого максимального значения.

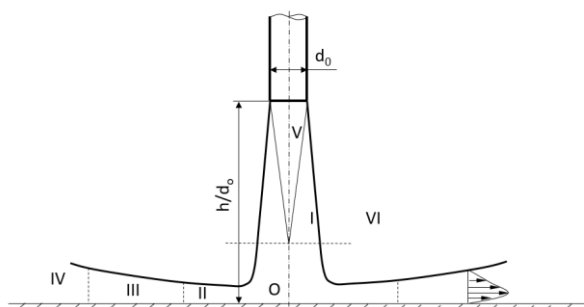


Рисунок 2 - Области течения при взаимодействии одиночной струи с поверхностью

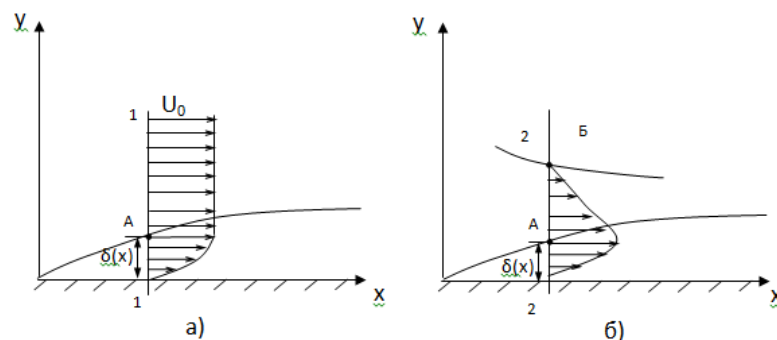


Рисунок 3 - Структура гидродинамического пограничного слоя: а - поток бесконечен в направлении координаты y , б – веерный поток

Рассмотренные отличия позволяют сделать, по крайней мере, два вывода: 1 – расчет конвективной теплоотдачи при взаимодействии струи с граничной поверхностью представляется более сложным; 2 – методика расчета конвективной теплоотдачи в этом случае должна базироваться на факторах (режим движения, толщина гидродинамического и теплового пограничных слоев и др.), характерных именно для веерного потока.

С использованием метода численного моделирования проведено исследование влияния отношения h/d_0 на аэродинамику и структуру потока: варианты исходных данных представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Варианты исходных данных при исследовании влияния отношения h/d_0 .

Вариант №	Скорость истечения азота U_0 , м/с	Отношение h/d_0
1	30	5
2	30	10
3	30	25
4	100	5
5	100	10
6	100	25

Основными определяющими величинами являлись: скорость истечения азота из сопла U_0 , температура азота T_0 , внутренний диаметр сопла d_0 , расстояние от среза сопла до поверхности h , расстояние от критической точки (точки пересечения оси струи с поверхностью) по радиусу потока R .

Ниже приведены результаты решения сформулированной задачи. На рисунках 4 и 5 представлены поля скоростей и структура течения для варианта 2.

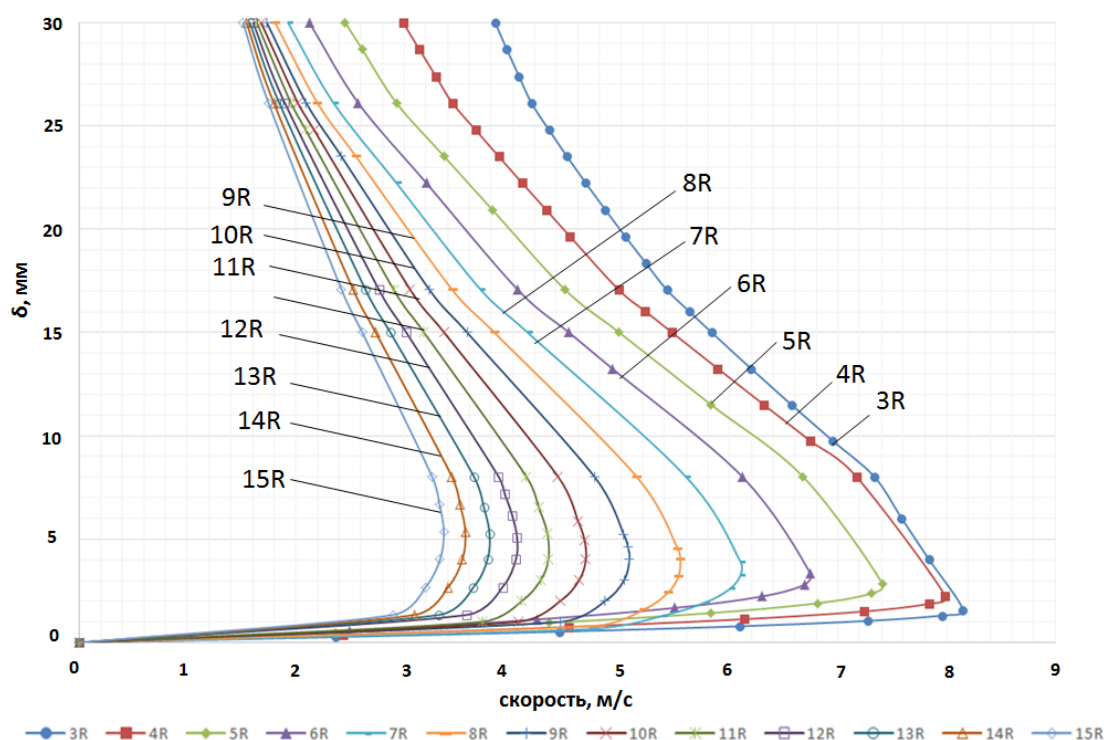


Рисунок 4 - Распределение скорости в гидродинамическом пограничном слое при $U_0 = 30$ м/с,
 $T_0 = 700$ °C, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$, $T_{\text{среды}} = 20$ °C

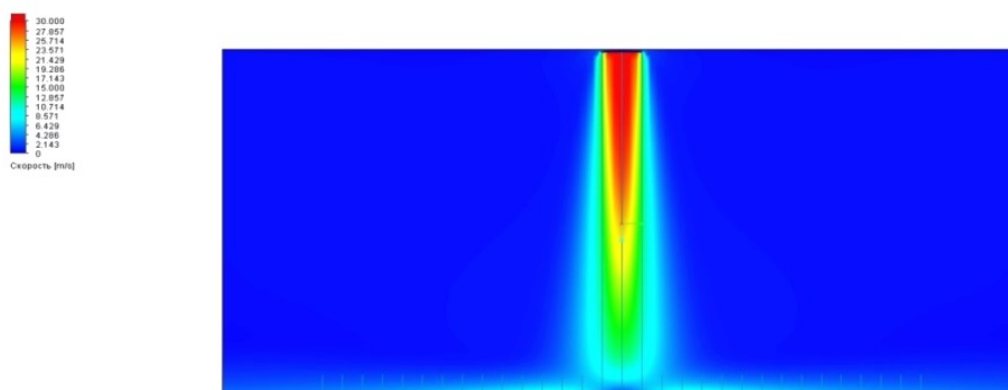


Рисунок 5 – Структура течения струи азота при взаимодействии с поверхностью при $U_0 = 30$ м/с, $T_0 = 700$ °C, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$, $T_{\text{среды}} = 20$ °C

Результаты, представленные на рисунке 4, показывают, что все кривые имеют максимум, расположенный вблизи поверхности. Расстояние максимума от поверхности вглубь веерного потока при каждом значении текущего радиуса характеризует толщину собственно гидродинамического пограничного слоя, вне пределов которого расположена основная область веерного потока с более низким темпом изменения скорости. Толщина гидродинамического пограничного слоя при выбранных условиях весьма мала, толщина же основного веерного потока соизмерима с внутренним диаметром сопла.

Как следует из рисунка 5, наблюдаются две области течения газа – область струйного течения и область веерного потока. Толщина веерного потока меньше диаметра струи на всем расстоянии от среза сопла до поверхности. Скорость газа уменьшается по мере развития струи из-за потери начальной энергии на вовлечение в движение неподвижного окружающего газа. Отчетливо видна область начального участка струи, в которой сохраняется наибольшая скорость движения азота. По мере растекания веерного потока скорость газа снижается. При выбранных условиях скорость веерного потока существенно ниже начальной скорости истечения газа из сопла, что должно отразиться на интенсивности конвективной теплоотдачи.

Увеличение относительного расстояния от среза сопла изменяет картину течения. При $h/d_0 = 25$ струя распространяется практически как свободная, веерный поток не имеет выраженного характера.

Увеличение начальной скорости истечения газа приближает к поверхности область более высоких скоростей как в самой струе, так и в веерном потоке. Кроме того, высокие скорости увеличивают общую толщину веерного потока и снижают толщину гидродинамического пограничного слоя, которая возрастает по мере удаления от критической точки.

С точки зрения интенсификации конвективной теплоотдачи рациональнее иметь в зоне пристеночного движения повышенные скорости.

На рисунке 6 представлено распределение скорости в поперечном сечении струи для варианта 1. Так как струя является осесимметричной, то для удобства восприятия на графике изображено распределение скорости от оси струи по ее радиусу.

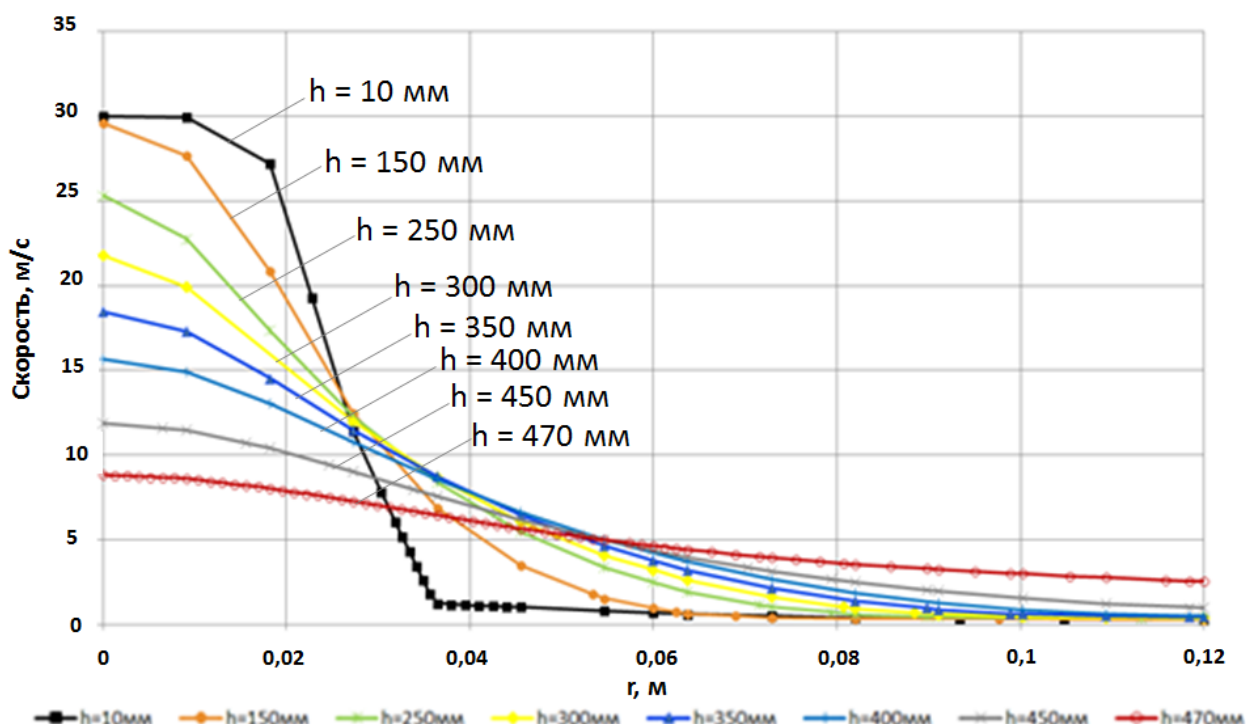


Рисунок 6 - Распределение скорости в поперечном сечении струи

при $U_0 = 30$ м/с, $T_0 = 700$ °C, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$

Из графиков видно, по мере удаления от сопла происходит раскрытие струи, инжекция окружающей среды проявляется активнее и точка затухания скорости смещается вглубь по радиусу от оси струи. Также, при больших значениях величины h заметно наблюдается снижение осевой скорости, эпюры скорости сглаживаются.

Увеличение скорости на выходе из сопла способствует приближению к поверхности области более высоких скоростей, как в самой струе, так и в веерном потоке. Это способствует интенсивному перемешиванию и как следствие более интенсивному нагреву.

Формирование структуры течения и скоростных полей в струйной части потока и в веерном потоке при взаимодействии с ограничивающей поверхностью определяется, при прочих равных условиях, соотношением двух температур: температуры вытекающего из сопла газа T_0 и температуры среды $T_{\text{среды}}$, в которую струя вытекает. Сказанное является следствием того, что величина кинематического коэффициента вязкости газов существенным образом зависит от температуры: в частности, для азота вязкость увеличивается на целый порядок (при 100 °C, $\nu_{N_2} - 13,3 \cdot 10^{-6}$ м²/с, при $T_{N_2} - 800$ °C, $\nu_{N_2} - 130,7 \cdot 10^{-6}$ м²/с).

Вязкость газа, наряду со степенью турбулизации потока, определяет инжектирующий эффект струйной части потока, т.е. степень вовлечения в движение неподвижной окружающей среды. Наиболее заметно этот процесс наблюдается, когда вязкости газа в струе и в окружающей среде максимальны.

Представленные на рисунке 7 кривые изменения максимальной скорости в пограничном слое веерного потока $u_{\max, \text{вп}}$ при различном расстоянии от критической точки струи ($h/d_0 - 5$, $d_0 - 50 \text{ мм}$, $T_0 - 700 \text{ }^\circ\text{C}$, $U_0 - 30 \text{ м/с}$) показывают, что при более высоких температурах окружающей среды $T_{\text{среды}}$ значения максимальной скорости выше, хотя характер кривых один и тот же.

Это хорошо иллюстрируется также данными, приведенными на рисунках 8 и 9 для струи, неограниченной по её длине. Если температура вытекающей струи газа T_0 ниже $T_{\text{среды}}$, то с ростом последней скорость на оси убывает медленнее по мере удаления газа от среза сопла. При температуре вытекающего газа T_0 выше температуры $T_{\text{среды}}$ наибольший темп снижения осевой скорости наблюдается при низких температурах окружающей среды.

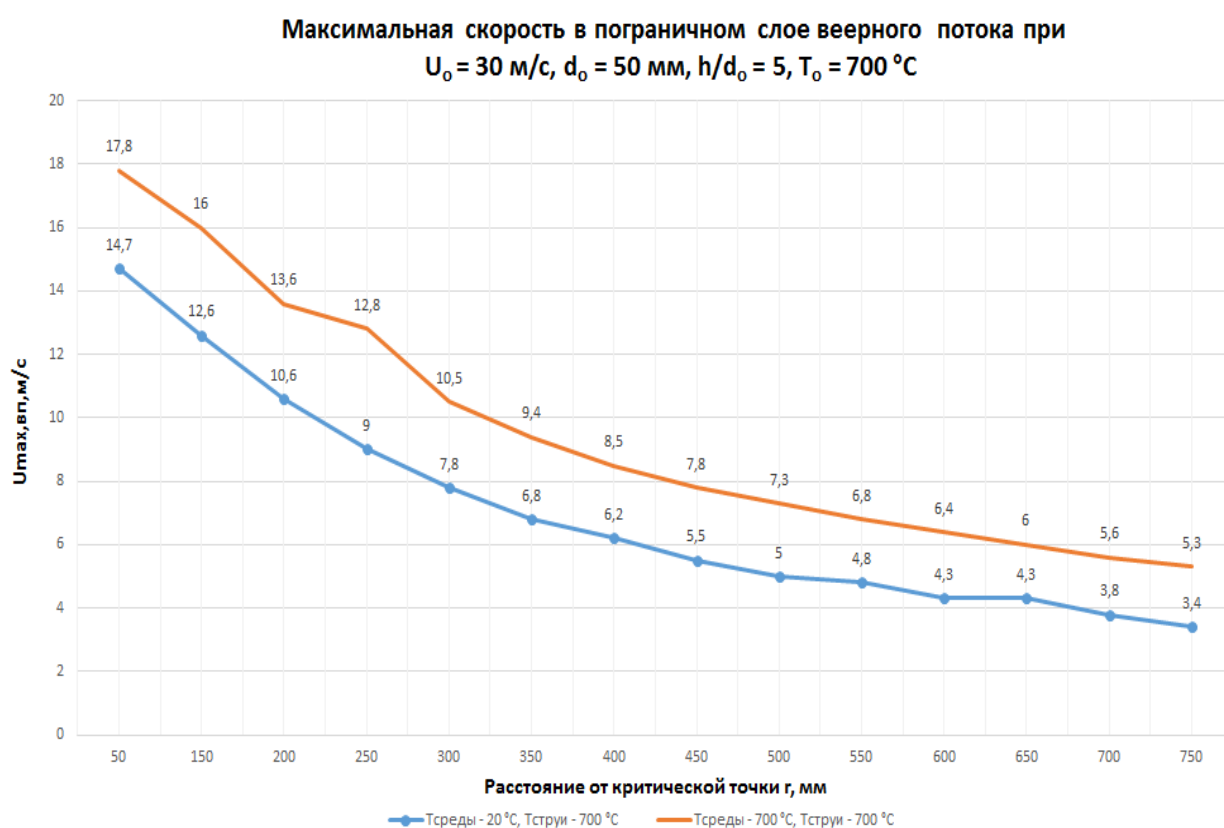


Рисунок 7 - Характер изменения максимальной скорости в пристеночном пограничном слое при удалении от критической точки вниз по течению веерного потока

Видно, что повышение температуры среды $T_{\text{среды}}$, в которую вытекает из сопла азот, значительно повышает максимальную скорость.

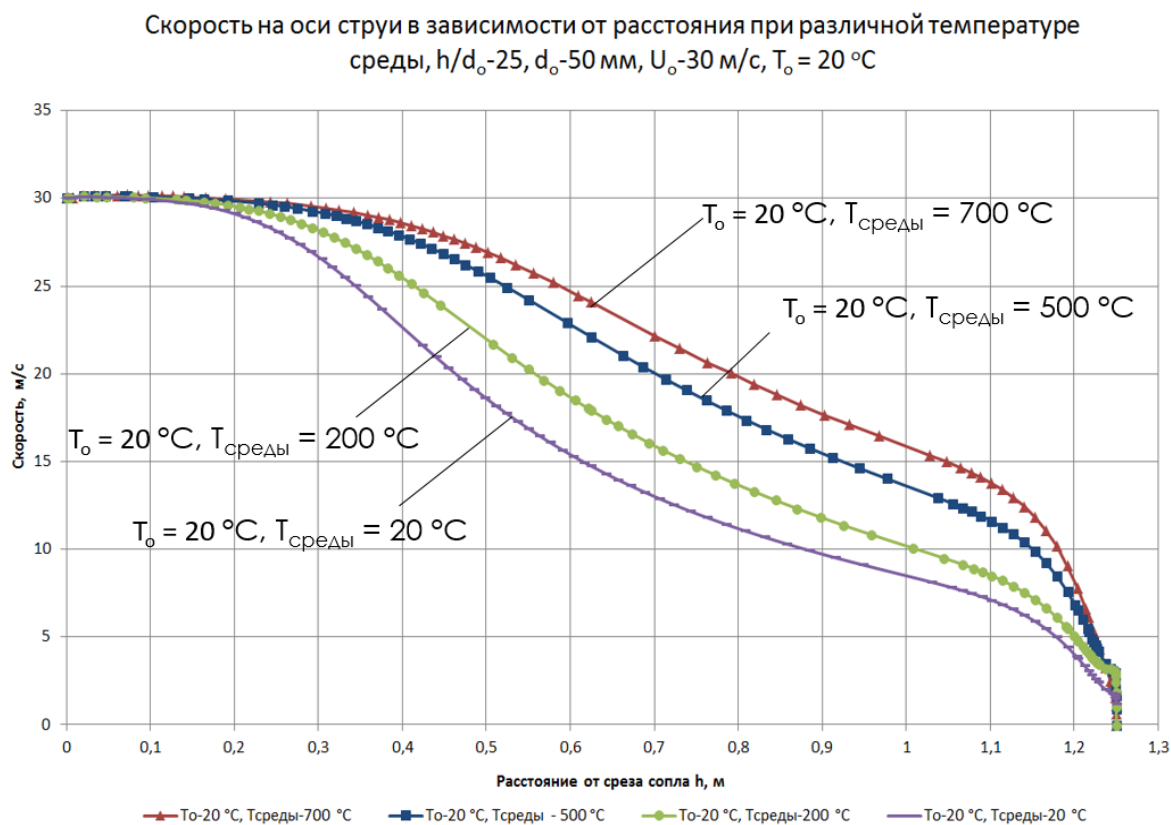


Рисунок 8 - Влияние температуры среды $T_{ср}$ для случая истечения струи в неограниченное пространство

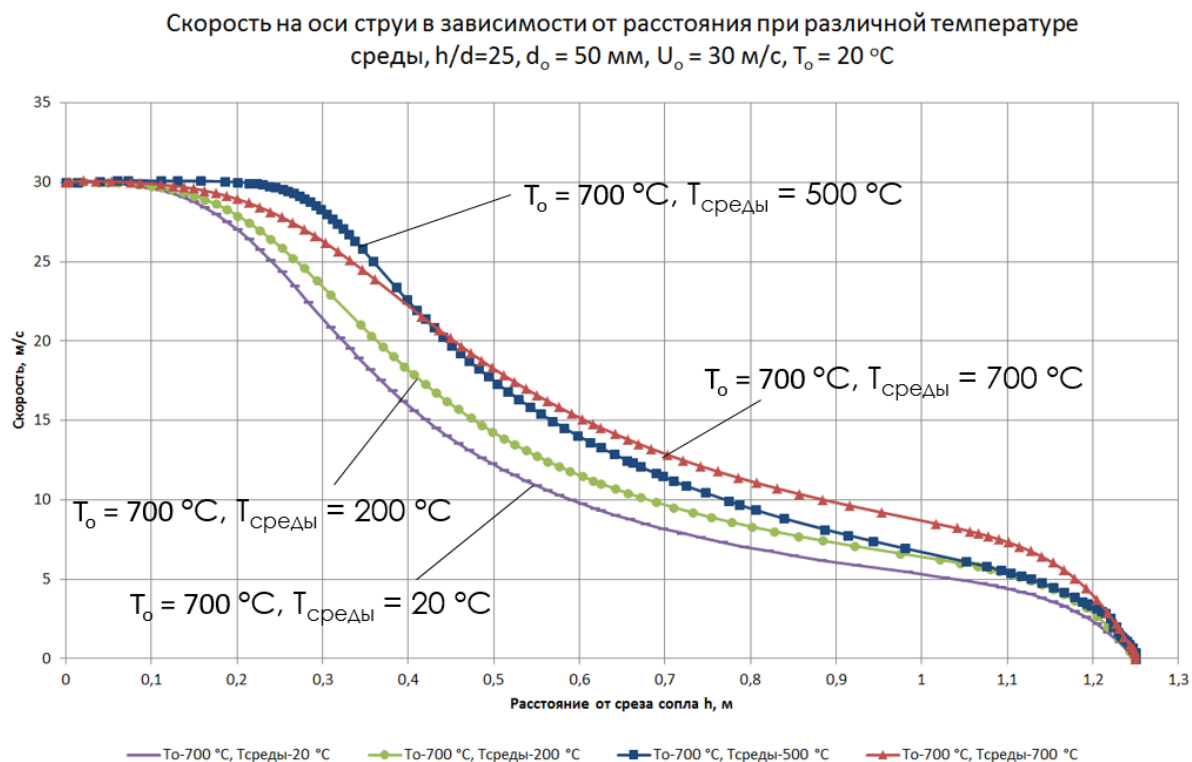


Рисунок 9 - Влияние температуры среды $T_{ср}$ для случая истечения струи в неограниченное пространство

В данной главе также было проведено исследование температурных полей одиночной струи, взаимодействующей с поверхностью. Как было сказано ранее, сложности расчета усугубляются тем, что, струя, взаимодействуя с поверхностью, как таковая исчезает и с поверхностью взаимодействует настильный (веерный) поток, тепловое состояние которого резко отличаются от таковых для первоначальной струи. Тепловой пограничный слой при взаимодействии струи с плоской поверхностью представлен на рисунке 10 (а).

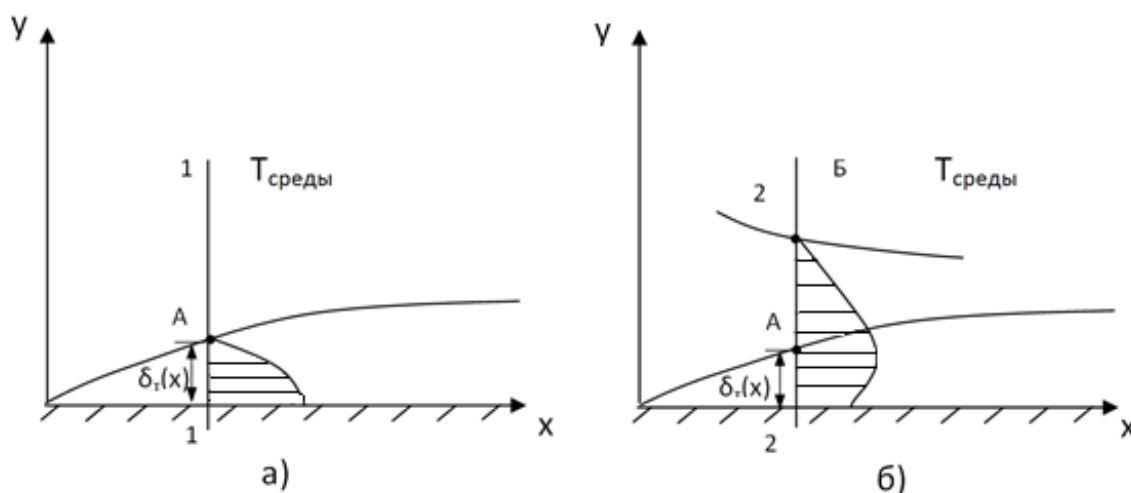


Рисунок 10 - Структура теплового пограничного слоя: а - поток бесконечен в направлении координаты у, б – веерный поток

Веерный поток, представленный на рисунке 10 (б), распространяющийся в пространстве с неподвижной средой, имеет одну границу с температурой близкой к температуре поверхности, а другую - с температурой окружающей среды.

Основные исходные данные используются точно такие же, как исследование при исследовании влияния отношения h/d_0 на аэродинамику и структуру потока в третьей главе.

На рисунке 11 представлена структура температурного поля для варианта 2.

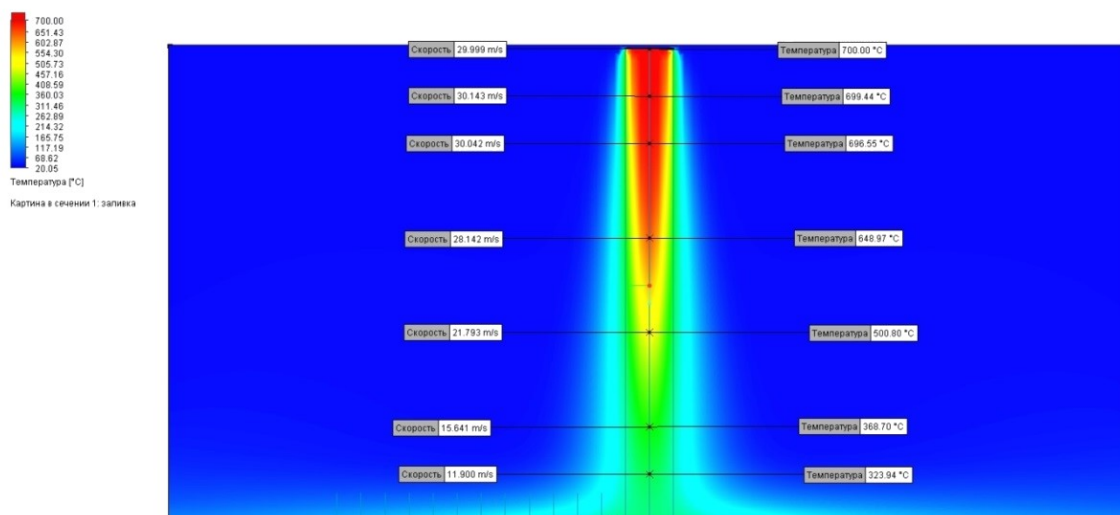


Рисунок 11 – Структура температурного поля струи азота при взаимодействии с поверхностью при $U_0 = 30$ м/с, $T_0 = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$, $T_{\text{среды}} = 20$ °С

Как следует из представленных данных, наблюдаются две области течения газа – область струйного течения и область веерного потока. Температура азота уменьшается по мере развития струи из-за потери начальной энергии на нагрев вовлеченного в движение неподвижного окружающего газа. Также, отчетливо видна область начального участка струи, в которой сохраняется максимальная температура. По мере растекания веерного потока температура газа снижается.

Уменьшение относительной высоты до $h/d_0 = 5$, поверхность металла находится в конце начального участка, что приводит к повышению температуры вблизи поверхности металла.

Увеличение начальной скорости истечения газа также приближает к поверхности область более высоких температур как в самой струе, так и в веерном потоке.

Были проведены исследования по распределению температуры в поперечном сечении струи для шести вариантов. Результаты расчетов позволяют сделать вывод о том, что при увеличении h/d_0 , наблюдается снижение температуры на оси струи и происходит сглаживание эпюр температуры; увеличение скорости на выходе из сопла способствует приближению к поверхности области высоких температур как в самой струе, так и в веерном потоке. Это способствует интенсивному перемешиванию и, как следствие, более интенсивному нагреву.

Разработанные численные модели позволили также провести анализ полей плотности теплового потока, подводимого к поверхности стальной ленты, и температурных полей нагреваемого металла для всех вариантов исходных данных.

Для обобщения и удобства восприятия результатов на рисунках 12 и 13, представлены графики плотности теплового потока на поверхности металла и температуры металла. Полученные данные сделать вывод о том, что уменьшение расстояния между соплом истечения

и металлом повышает локальность нагрева, в то время как повышение скорости способствует интенсификации нагрева.

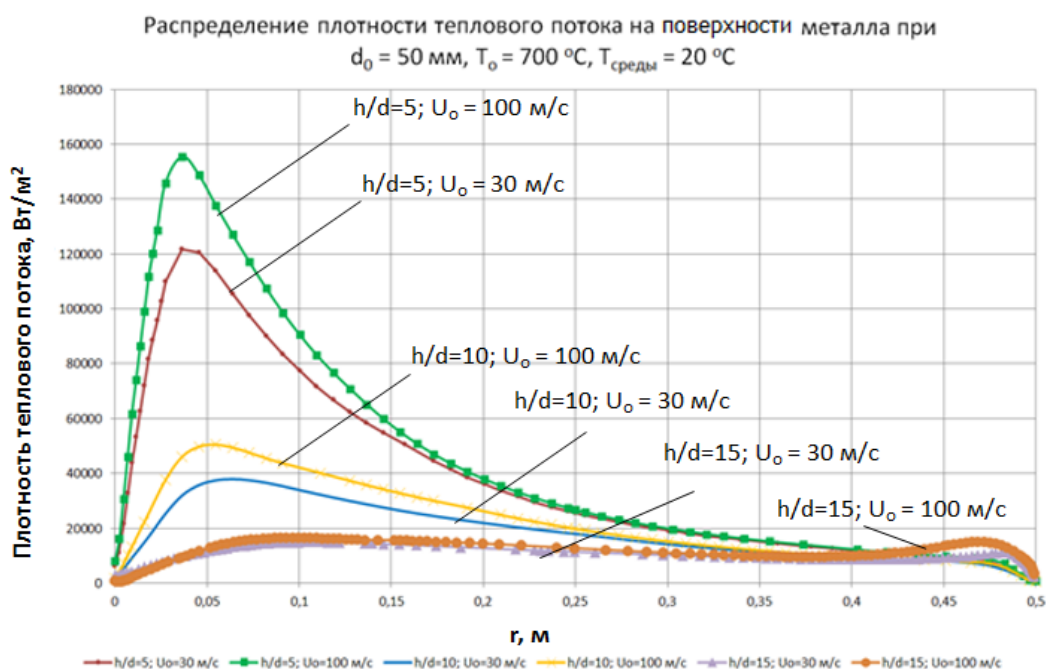


Рисунок 12 - Распределение плотности теплового потока на поверхности металла при изменении расстояния от сопла и скорости истечения

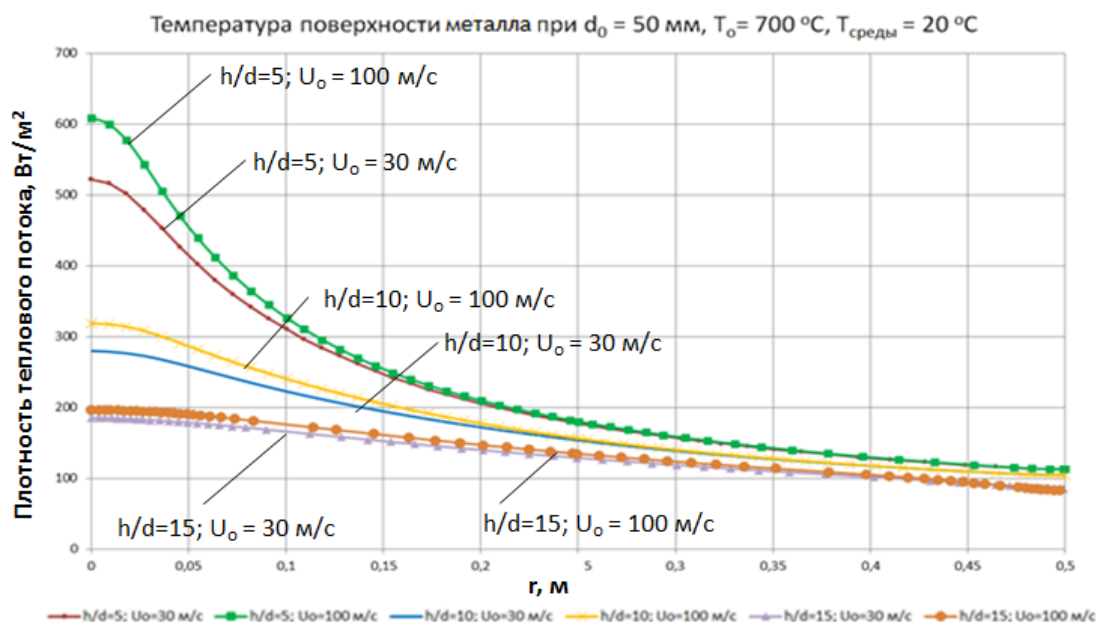


Рисунок 13 - Изменение температуры поверхности металла при изменении расстояния от сопла и скорости истечения

В критической точке значение плотности теплового потока равно нулю из-за отсутствия движения азота в этой точке. По мере удаления от нее на кривых наблюдается выраженный максимум значения плотности теплового потока.

При наличии распределения величины плотности теплового потока на поверхности металла температура его в каждой точке зоны взаимодействия струи с металлом будет формироваться двумя условиями: величиной плотности теплового потока и переносом теплоты теплопроводностью в радиальном направлении вследствие наличия разности температур металла также в радиальном направлении (вниз по веерному потоку).

Было оценено влияние перетока теплоты в радиальном направлении за счет теплопроводности на равномерность распределения температуры в зоне взаимодействия струи с металлом. Показано, что формирование температурного поля металла осуществляется как за счет воздействия струи, так и за счет перетоков теплоты теплопроводностью.

Да данной главе описываются также экспериментальные исследования конвективной теплоотдачи. Экспериментальные исследования по физическому моделированию взаимодействия высокотемпературного струйного потока с плоской поверхностью проводились на разработанной установке.

Целью данного эксперимента являлись подтверждения правильности расчетной модели при численном моделировании, а также правильность расчетной схемы структуры струи.

Эксперименты проводились с различным соотношением h/d_0 и двух значениях T_0 . Внутренний диаметр сопла d_0 оставался неизменным.

Общая схема экспериментального стенда показана на рисунке 14.

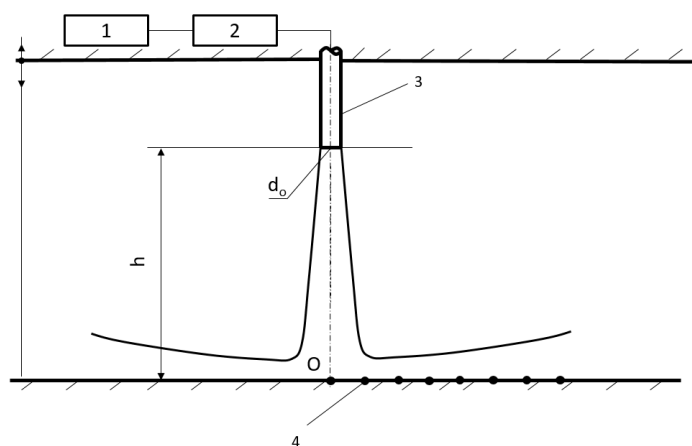


Рисунок 14 – Общая схема экспериментального стенда: 1 – подача воздуха, 2 – нагреватель воздуха, 3 – сопло, 4 – датчик измерения плотности теплового потока

При проведении экспериментов измерялись температуры датчиков плотности теплового потока в восьми точках при изменении параметров h/d_0 и T_0 .

Для дальнейшего изучения процесса была разработана методика определения плотности теплового потока, подробно представленная в третьей главе.

Результаты экспериментального исследования конвективной теплоотдачи позволяют сделать вывод о том, что подтверждена правильность выбора структуры потока при взаимодействии струи с ограничивающей поверхностью, состоящая из области струйного течения, переходной области и области веерного потока. Выбранная структура потока позволяет рассчитать начальную толщину веерного потока и в дальнейшем интенсивность конвективной теплоотдачи.

В четвертой главе проведено исследование структуры течения и температурных полей при взаимодействии системы струй с поверхностью металла. Использованные исходные данные: $d_o = 50$ мм; $T_o = 700$ °C; $T_{среды} = 20$ °C; $U_o = 30$ м/с. Изменение расстояния между соплами S/d_o : 2,3,5 и высоты от сопла до нагреваемого металла h/d_o : 5,10. На рисунках 15 и 16 представлены структура течения и температурного поля при взаимодействии системы струй с поверхностью при $h/d_o = 5$, $S/d_o = 2$.

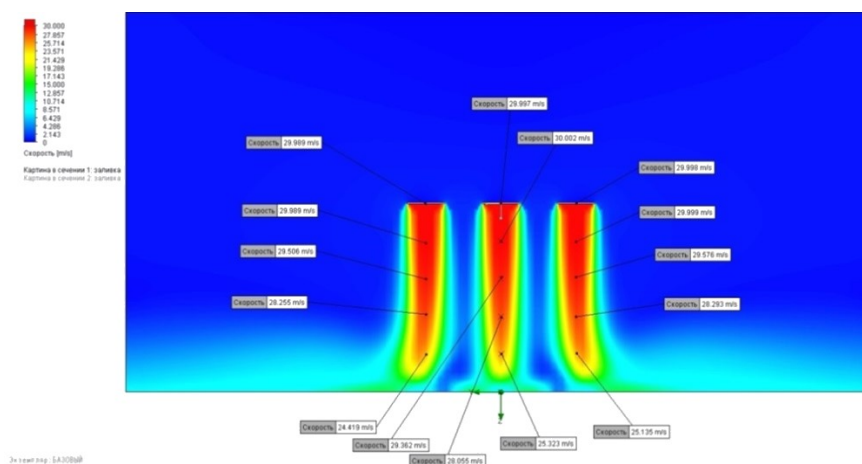


Рисунок 15 – Структура течения в системе струй азота при взаимодействии с поверхностью при $U_o = 30$ м/с, $T_o = 700$ °C, $d_o = 50$ мм, $h/d_o = 5$, $S/d_o = 2$

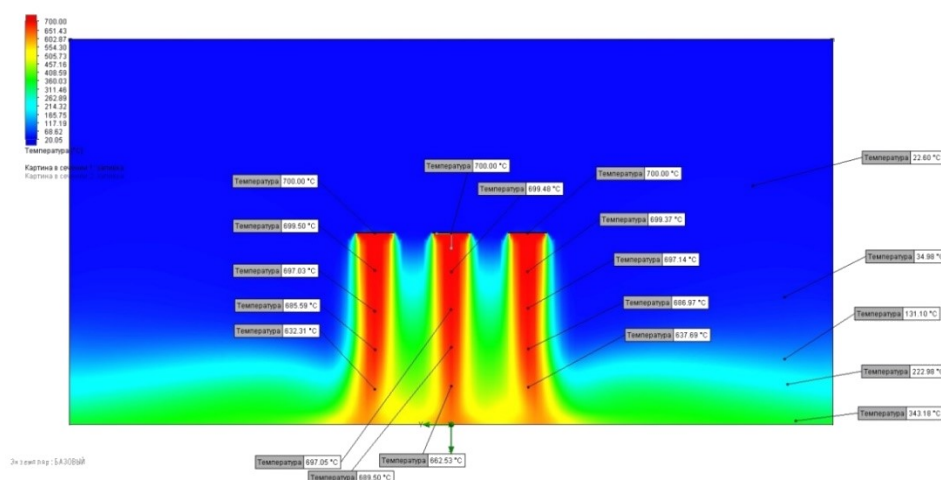


Рисунок 16 – Температурное поле при взаимодействии системы струй азота с поверхностью при $U_o = 30$ м/с, $T_o = 700$ °C, $d_o = 50$ мм, $h/d_o = 5$, $S/d_o = 2$

Проведенные исследования показали, что, как и в случае одиночной струи, в системе имеется область струйного течения и область веерного потока. Расстояние от сопла до поверхности позволяет обеспечить высокие скорости и температуры у поверхности, но не позволяет добиться равномерного распределения температуры на поверхности.

На рисунках 17 и 18 представлены структура течения и температурного поля при взаимодействии системы струй с поверхностью при $h/d_o = 10$, $S/d_o = 5$.

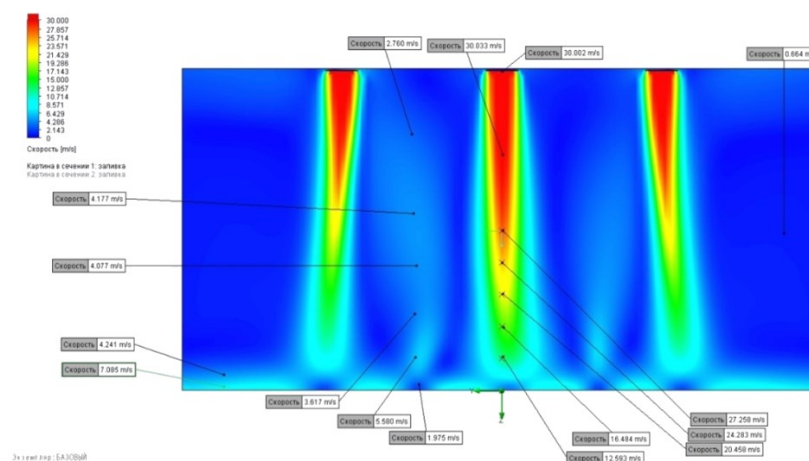


Рисунок 17 – Структура течения в системе струй азота при взаимодействии с поверхностью при $U_o = 30$ м/с, $T_o = 700$ °C, $d_o = 50$ мм, $h/d_o = 10$, $S/d_o = 5$

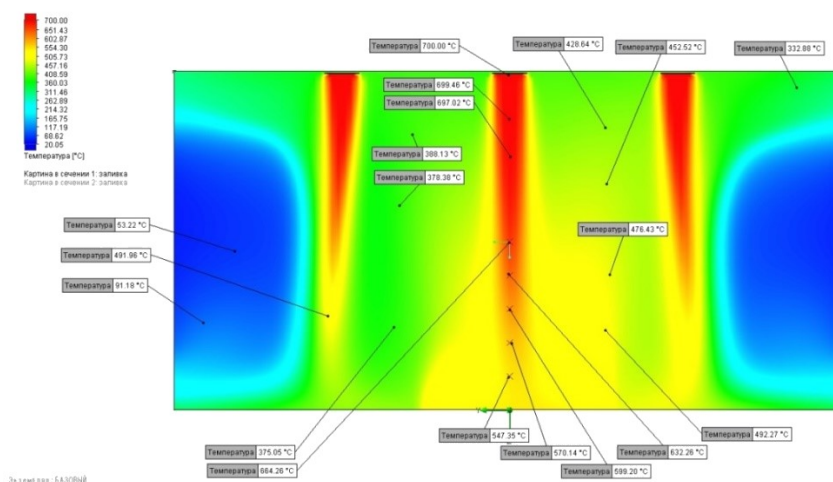


Рисунок 18 – Температурное поле при взаимодействии системы струй азота с поверхностью при $U_o = 30$ м/с, $T_o = 700$ °C, $d_o = 50$ мм, $h/d_o = 10$, $S/d_o = 5$

Увеличение расстояния между соплами способствуют раскрытию каждой из струй, а увеличение расстояния от среза сопла до поверхности позволяет обеспечить интенсивное взаимодействия веерных потоков, что в свою очередь, способствует повышению интенсификации теплообмена за счет перемешивания.

Сложная картина течения газа вблизи поверхности металла при различных параметрах системы струй приводит к неоднородности температурного поля нагреваемого металла. При этом степень неоднородности зависит от степени тепловой массивности металла. Для случая термически тонкого металла определяющим фактором является неоднородность температурного поля по его поверхности, т.е. в радиальном направлении. Для массивного в тепловом отношении металла добавляется (дополнительно) и неравномерность нагрева по толщине металла.

На рисунках 19 и 20 приведены графики изменения температуры поверхности металла в радиальном направлении от критической точки при изменении h/d_o и S/d_o . Видно, что при $h/d_o = 5$ имеют место локальные нагревы, равномерность температуры на поверхности металла не достигается, а при $h/d_o = 10$ удается добиться более равномерного нагрева поверхности, но с низкими температурами.

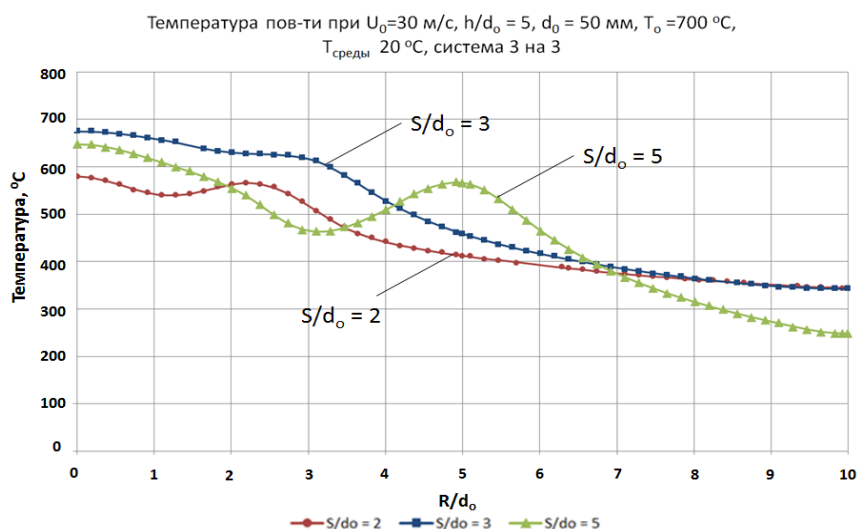


Рисунок 19 - Изменение температуры поверхности металла для $h/d_o = 5$ при изменении S/d_o

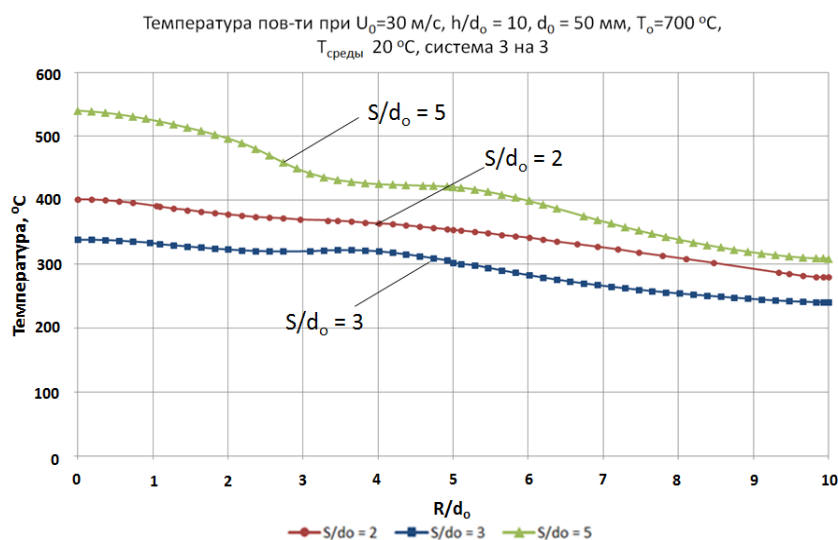


Рисунок 20 - Изменение температуры поверхности металла для $h/d_o = 10$ при изменении S/d_o

В пятой главе предложена методика расчета характеристик веерного потока, формирующегося после взаимодействия струи с поверхностью. Имеющиеся в литературе расчетные формулы для определения интенсивности конвективной теплоотдачи включают в качестве определяющих величин такие, как внутренний диаметр сопла, начальную скорость истечения газа на срезе сопла, относительную высоту расположения сопел или отверстий над ограничивающей поверхностью в калибрах, шаг между осями сопел (также в калибрах). В то же время веерный поток имеет отличные от струйного потока форму, аэродинамические свойства и тепловое состояние. Потеря струей своей индивидуальности после контакта с ограничивающей поверхностью требует другого подхода к расчетам аэродинамики и теплообмена при струйном нагреве.

Предложено понятие энергодинамический потенциал потока (ЭДП), Вт/м², который характеризует потенциал потока жидкости как источника теплоты для металла:

$$q_э = U_{ср} \cdot c_{ср} \cdot T_{ср}, \quad (5)$$

где $U_{ср}$ – средняя по сечению веерного потока скорость, м/с;

$T_{ср}$ – средняя по сечению температура веерного потока жидкости или газа, °С;

$c_{ср}$ – средняя по сечению удельная теплоемкость жидкости или газа, Дж/м³·К.

Энергодинамический потенциал потока имеет размерность плотности теплового потока и представляет собой количество теплоты, переносимое в единицу времени через единицу площади поперечного сечения потока. Отличие понятий плотности теплового потока q и энергодинамического потенциала $q_э$ в том, что q – это количество теплоты, которое переносится от жидкости к твердой поверхности (или наоборот) за единицу времени через единицу площади поверхности теплообмена, и характеризует интенсивность процесса конвективной теплоотдачи, а $q_э$ характеризует свойство потока как источника или носителя теплоты. Величина $q_э$ характеризует удельную энергетическую мощность потока жидкости.

Наряду с понятием энергодинамический потенциал потока предлагается понятие энергодинамической мощности потока $Q_э$, Вт:

$$Q_э = q_э \cdot S, \quad (6)$$

где S – площадь поперечного сечения потока.

Энергетическая мощность потока для двух разных сечений 1-1 и 2-2 соответственно равна

$$Q_{э1} = U_{ср1} \cdot c_{ср1} \cdot T_{ср1} \cdot S_1 \quad (7)$$

$$Q_{32} = U_{cp2} \cdot c_{cp2} \cdot T_{cp2} \cdot S_2 \quad (8)$$

где S_1 и S_2 - соответственно площади поперечных сечений 1-1 и 2-2.

Разность энергетических мощностей $\Delta Q_3 = Q_{31} - Q_{32}$ представляет собой результат теплообмена между жидкостью и поверхностью на пути l_{12} между двумя сечениями.

В работе применительно к струям принято допущение, что поток состоит из трех зон предложено допущение, что поток, состоит из трех зон (рисунок 21): между сечениями 0-0 и 1-1 – струйная зона; переходная зона течения (участок формирования веерного потока) между сечениями 1-1 и 2-2; зона установившегося веерного потока – между 2-2 и 3-3.

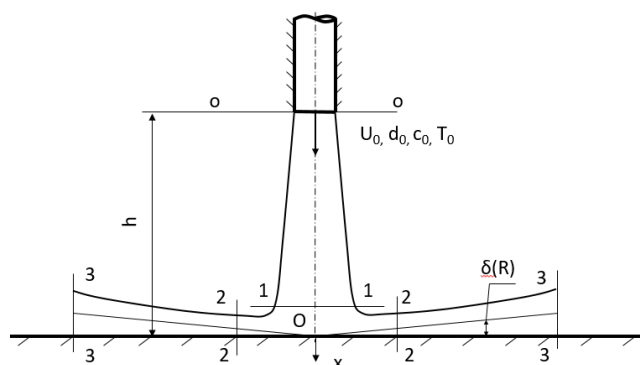


Рисунок 21 - Схема деформации струи при ее взаимодействии с плоской поверхностью

Расчет параметров струйной части потока проводится в предположении, что струя является свободной. Контакт струи с непроницаемой поверхностью приводит к резкой деформации струи, формированию веерного потока с соответствующим профилем скорости в поперечном сечении и его изменением в радиальном направлении. В веерной части потока необходимо рассчитать его начальную толщину l_1 и среднюю начальную скорость течения.

На основании закона сохранения массы, массовые расходы через сечение 1-1 и 2-2 равны. Это позволяет получить формулу для начальной толщины веерного потока:

$$l_1 = \pi \cdot R_1^2 / 2\pi \cdot R_1 = R_1 / 2 \quad (9)$$

где R_1 – расстояние от оси струи до сечения, в котором необходимо рассчитать толщину веерного потока.

На участке от сечения 0-0 до сечения 1-1 протекают процессы инжекции окружающей газовой среды в струю, изменения профиля начальной скорости и профиля начальной температуры и изменения удельной теплоемкости движущейся среды. На этом участке струйного течения работают законы развития свободной струи. Энергодинамический потенциал и энергетическая мощность струи на срезе сопла описывается соотношениями:

$$q_{э,о} = U_o \cdot c_o \cdot T_o, \quad (10)$$

$$Q_{э,о} = U_o \cdot c_o \cdot T_o \cdot S_o, \quad (11)$$

В области между сечениями 1-1 и 2-2 идет перестройка струйного потока в веерный поток. Веерный поток аналогичен потоку с канальным течением. В этой области начинает формироваться пристеночный пограничный слой $\delta(R)$ переменной толщины. Режим движения газа в этом слое и структура его определяют интенсивность конвективной теплоотдачи на границе раздела «газ - твердая поверхность».

В **шестой главе** представлено практическое использование результатов проведенных исследований, а именно использование струй высокотемпературного азота в существующей технологии нагрева при термообработке стали на протяжных печах. Ниже, на рисунке 22 представлена схема нагрева при термообработке в протяжных печах агрегате непрерывного горячего алюминирования (АНГА).

до $T_m = 180-200 \text{ }^{\circ}\text{C}$	до $T_m = 180-200 \text{ }^{\circ}\text{C}$	до $T_m = 500-750 \text{ }^{\circ}\text{C}$	до $T_m = 800-900 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Камера подогрева	Камера дожига	Камера безокислительного нагрева	Камера восстановительного нагрева

Рисунок 22 - Существующая схема нагрева на протяжной печи в АНГА

Так как при нагреве и выдержке необходимо постоянное использование защитной атмосферы для предотвращения окисления металла, был предложен нагрев струями высокотемпературного азота, которые выступали бы в роли и защитной атмосферы и теплоносителя.

Предлагаемая схема нагрева с использованием струйного нагрева для АНГА представлена ниже на рисунке 24. Нагрев осуществляет в двух камерах: камере нагрева и камере безокислительного нагрева.

$n = 1$	$n = 0,8$	$n = 0,5$	800-900 $^{\circ}\text{C}$
Камера нагрева			Камера безокислительного нагрева
Нагрев ПС природного газа до 500 $^{\circ}\text{C}$			$\text{N}_2 + \text{H}_2$

Рисунок 24 - Предлагаемая схема нагрева для АНГА струями высокотемпературного азота

В камере нагрева металл нагревается за счет теплоты сжигания природного газа, но с уменьшенным коэффициентом избытка воздуха по длине камеры, для предотвращения нежелательного окисления. В камере безокислительного нагрева, нагрев осуществляется от 500

до 900 °С смесью высокотемпературных струй смеси азота и водорода в соотношении 95 % и 5% соответственно.

Был произведен расчет длины зоны нагрева по сравнению с существующей технологией для нескольких вариантов. При варианте № 1: $U_o = 30$ м/с; $h = 250$ мм; $T_o = 950$ °С. При варианте № 2: $U_o = 30$ м/с; $h = 500$ мм; $T_o = 950$ °С. При варианте № 3: $U_o = 70$ м/с; $h = 500$ мм; $T_o = 1100$ °С. При варианте № 4: $U_o = 70$ м/с; $h = 250$ мм; $T_o = 1100$ °С. Результаты представлены ниже, в таблице № 2.

Таблица № 2 - Обобщенные результаты расчета для всех вариантов

Технологии	Длина зоны нагрева от 20 до 500 °С, м	Длина зоны нагрева от 500 до 900 °С, м	Длина общая, м
Действующая схема нагрева	30,00	72,00	100,00
Вариант №1	17,06	116,14	133,20
Вариант №2	24,88	169,32	194,20
Вариант №3	15,46	51,54	67,00
Вариант №4	9,93	33,87	43,80

Из полученных результатов расчета можно сделать следующий вывод: предложенный способ нагрева для агрегата непрерывного горячего алюминирования струями высокотемпературного азота позволяет не только уменьшить производственные площади, но и отказаться от использования отдельно защитной атмосферы, а использовать высокотемпературный азот, совмещающий в себе две функции – теплотехническую и технологическую.

В разработанную схему устройства нагрева стальной ленты входят: устройство для нагрева азота, устройство безокислительного нагрева струями азота; теплообменное устройство; вентилятор.

Нагрев азота производится за счет теплоты продуктов сгорания при сжигании природного газа. Нагретый азот направляется по трубопроводу и струями воздействует на стальную ленту. Азот движется за счет действия вентилятора, перед которым он охлаждается в теплообменном устройстве. Предусмотрен замкнутый контур по азоту, позволяющий сократить расход защитной атмосферы и максимально эффективно его использовать.

Разработанная схема нагрева для использования на АНГА обладает следующими преимуществами перед существующей:

- сокращение времени нагрева за счет интенсификации теплообменных процессов;
- уменьшение габаритов, а как следствие капитальных затрат, появление дополнительных производственных площадей;

- малая тепловая инерционность контура по нагреву;
- использование азота одновременно как теплоносителя и защитной атмосферы;
- сокращение удельного расхода топлива и экологических выбросов.

ВЫВОДЫ

1. Предложен способ нагрева стальной ленты струями высокотемпературного азота, отличающийся тем, что азот выполняет одновременно две функции – функцию теплоносителя и функцию защитной атмосферы. Разработанный способ позволяет исключить использование дорогостоящей специальной защитной атмосферы для предотвращения поверхностного окисления металла, упростить конструкцию установок и снизить энергетические затраты.

2. Проведен анализ способов нагрева стальной ленты и конкретных нагревательных устройств. В существующих установках обязательным является использование специальных защитных атмосфер для предотвращения поверхностного окисления, что приводит к увеличению себестоимости процессов термообработки.

3. Создана численная модель для исследования аэродинамики, структуры течения при взаимодействии струйного потока, вытекающего из одиночного круглого сопла, с металлом, а также температурного поля одиночной круглой струи и температуры металла. Отличительной особенностью разработанной модели является возможность учета зависимости функций свойств азота от его температуры как в струе, так и в веерном потоке, поскольку физические свойства азота влияют на интенсивной конвективной теплоотдачи. Модель позволяет учитывать влияние изменения начальных условий и конструктивных параметров.

4. Создана численная модель для исследования аэродинамики, структуры течения при взаимодействии струйного потока, вытекающих из системы круглых струй, с металлом, а также температурного поля системы струй и температуры металла.

5. Приведены результаты численного расчета полей скоростей и температур в области струйного и веерного потоков при изменении относительного расстояния от среза сопла до поверхности металла, при различных температурах вытекающего из сопла и окружающей среды. Отмечено существенное влияние температуры вытекающего из сопла азота на максимальную скорость на оси струи, а также на величину максимальной скорости в веерном потоке при различных расстояниях от критической точки.

6. С использованием введенных понятий энергодинамический потенциал потока и энергодинамическая мощность потока предложен способ расчета величины плотности теплового потока от азота к металлу.

7. Разработана методика расчета конвективного теплообмена при взаимодействии высокотемпературной струи азота с нагреваемым металлом, отличающаяся тем, что в качестве

определяющих параметров используются параметры веерного потока. На основании закона сохранения массы предложен способ определения начальной толщины веерного потока.

8. Экспериментально на созданной опытной установке проведено исследование распределения величин плотности теплового потока к металлу в зависимости от относительного расстояния от среза сопла до поверхности металла при различных температурах истекающей среды. Проведенные исследования подтвердили обоснованность выбранной структуры течения и основных областей перехода от струйного течения к веерному потоку.

9. Определены рациональные конструктивные параметры струйных систем – расстояние от среза сопла до металла, расстояние между осями струй, что позволяет использовать их при конструировании нагревательных устройств струйного нагрева.

10. На основании полученных результатов для условий ПАО «Северсталь» рассчитаны основные параметры установки агрегата непрерывного горячего алюминирования. Показано, что, например длина зоны нагрева сокращается примерно в 2 раза.

Основные положения диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

1. Кондрашенко С.И. О расчете конвективной теплоотдачи при взаимодействии струи с ограничивающей поверхностью / Прибытков И.А., Кондрашенко С.И. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. М.: 2019, (03). - с. 208-214. (ВАК)

2. Кондрашенко С.И. Аэродинамика струй, взаимодействующих с плоской поверхностью / Прибытков И.А., Кондрашенко С.И. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. М.: 2019, (04). с. 263-269. (ВАК)

3. Кондрашенко С.И. Исследование аэродинамических характеристик струй, атакующих плоскую поверхность / И. А. Прибытков, С. И. Кондрашенко // Современные технологии в энергетике: сборник докладов II Всероссийской специализированной научно-практической конференции молодых специалистов с международным участием (Москва, 29-30 марта 2018 г.). – М.: ОАО «ВТИ», 2018. – с. 213-214.

4. Кондрашенко С.И. Исследование взаимодействия высокотемпературной струи азота с плоской поверхностью / С. И. Кондрашенко, И. А. Прибытков // Энергетики и металлургии настоящему и будущему России: сборник материалов 19-ой Всероссийской научно-практической конференция студентов, аспирантов и специалистов (Магнитогорск, 22-24 мая 2018 г.). - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. – с. 13-16.

5. Кондрашенко С. И. Структура течения и аэродинамика струи, взаимодействующей по нормали с ограничивающей поверхностью / С. И. Кондрашенко, И. А. Прибытков // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов VII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2018) с международным участием (Екатеринбург, 17–18 мая 2018 г.). – Екатеринбург: ООО АМК «День РА», 2018. – С. 144-151.

6. Кондрашенко С.И. Исследование взаимодействия системы высокотемпературных струй азота с плоской поверхностью / Кондрашенко С.И., Прибытков И.А. // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология: сборник трудов X Международной научно-практической конференции (Москва, 12-14 декабря 2018 г.). – М.: МИСиС, 2019. – с. 253-257.