

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

На правах рукописи

Кондрашенко Станислав Игоревич

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

05.16.02 - Metallургия черных, цветных и редких металлов

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

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

Москва, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВЕДЕНИЕ	4
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	9
1.1 Схемы нагрева металла струями перед операциями обработки металлов давлением (ОМД), термообработки (ТО), термохимической обработки (ТХО) с использованием атакующих (ударных) струй	10
1.1.1 Струйно-факельный нагрев	10
1.1.2 Нагрев горячими струями	17
1.1.3 Импульсно-скоростной нагрев	24
1.2 Азот, получение и хранение	30
Выводы по главе 1. Цель и задачи работы	33
2 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ	36
2.1 Существующие методы исследования	36
2.2 Использование программных продуктов при исследовании и оптимизации технологических процессов	40
2.2.1 Моделирование турбулентности	43
2.3 Численное моделирование с помощью программно вычислительного комплекса FloEFD	46
2.4 Исходные данные и принятые допущения. Определение начальных и граничных условий	49
2.4.1 Решаемые дифференциальные уравнения	50
Выводы по главе 2	53
3 АЭРОДИНАМИКА И ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ОДИНОЧНОЙ КРУГЛОЙ СТРУИ АЗОТА, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕЙ С ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ	54
3.1 Исследование структуры и полей скорости свободной струи	54
3.2 Исследование структуры и полей скорости струи, взаимодействующей с поверхностью	56
3.2.1 Влияние отношения h/d и скорости истечения азота на аэродинамику и структуру	58
3.2.2 Влияние температурного фактора на аэродинамику и структуру	67
3.3 Исследование структуры температурных полей струи	74
3.3.1 Тепловое состояние свободной струи	74
3.3.2 Исследование температурного поля одиночной струи, истекающей из круглого сопла и взаимодействующей с плоской поверхностью при изменении скорости и температуры истечения азота и отношения h/d_0	75
3.4 Исследование температурных полей металла	87

3.4.1 Исследование теплового состояние металла в условиях наличия и отсутствия радиальных перетоков теплоты	92
3.5 Экспериментальные исследования конвективной теплоотдачи	95
3.5.1 Описание экспериментального стенда.....	95
3.5.2 Методика расчета величины плотности теплового потока.....	97
3.5.3 Результаты экспериментального исследования и их обсуждение	99
Выводы по главе 3	104
4 ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СИСТЕМЫ СТРУЙ	106
4.1 Схема расчетного участка.....	106
4.2 Исследование аэродинамики при изменении S/d_0 и h/d_0	107
4.3 Исследование поля температур для системы истечения струй азота при изменении S/d_0 и h/d_0	115
4.4 Исследование температурных полей металла для системы истечения струй азота при изменении S/d_0 и h/d_0	121
Выводы по главе 4	127
5 РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА КОНВЕКТИВНОЙ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СТРУИ С ОГРАНИЧИВАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ	128
5.1 Энергодинамический потенциал (ЭДП). Энергетическая мощность.....	128
Выводы по главе 5	134
6 ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ	135
6.1 Устройство нагрева азота	137
6.2 Разработка принципа и конструкции установки струйного нагрева азотом	138
6.3 Общая схема нагревающей установки	143
Выводы по главе 6	145
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	146
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	148
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПРОТОКОЛ ТЕХНИЧЕСКОГО СОВЕЩЕНИЯ	157

ВЕДЕНИЕ

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 [65].

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.

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 тепло-

вого 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 разработка и исследование 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».

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. Глинков, 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. Курносков, И.А. Прибытков, В.А. Кривандин, А.Б. Бирюков, Y.J. Liu, J.D. Li и др.

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 окружающей 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. 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.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕВАНИЯ

5 мая 2014 года в Приказе Министерства промышленности и торговли РФ № 839 «Об утверждении Стратегии развития черной металлургии России на 2014-2020 годы и на перспективу до 2030 года» были утверждены основные тенденции развития металлургической отрасли России, одна из которых – это повышение качественных характеристик продукции [1]. Указанная тенденция не может быть реализована без энергоэффективных, способных отвечать современным стандартам металлургических агрегатов.

В свою очередь, для реализации данного Приказа и повышения качества продукции, государством ужесточаются требования к выпускаемой продукции: это и необходимость повышения прочностных характеристик, теплофизических характеристик, поддержка определенных температурных и тепловых режимов при выплавке стали и термообработке готовых изделий.

Происходит постепенное обновление оборудование на всех переделах металлургического производства, но из-за нестабильной финансовой ситуации в стране и мире, а также сложностью закупки промышленного оборудования на Западе, связанного с применёнными к нашей стране санкциями, происходит повышение цен на топливно-энергетические ресурсы. Все эти факторы приводят к тому, что необходимо находить внутренние ресурсы — возможность разрабатывать и совершенствовать технологические процессы, находить способы интенсификации тепловых процессов, сокращения расходов топлива и электрической энергии и в целом повышения энергоэффективности работы оборудования.

Вышесказанные требования также относятся и к полосовой стали, при термообработке которой требуется соблюдать перепад температур по толщине и ширине ленты не более 2-5 °[83]. При этом время термообработки необходимо уменьшить. Добиться требуемых температурных, а также временных значений в печах для термообработки полосовой стали, не всегда представляется возможным. Возникает необходимость в интенсификации теплообмена.

Определение механизма переноса теплоты к металлу позволяет получить основы, на которых будет базироваться технология нагрева и термообработки металла. Речь идет, прежде всего, о возможности использования струйного конвективного нагрева. Процесс распространения газа, истекающего из сопла или отверстия, в пространство, затопленное газом, называется струйным процессом [94].

Все процессы, протекающие в технологических агрегатах, описать эмпирическими методами не представляется возможным либо является сложной задачей. Решить эту проблему можно с помощью методов численного моделирования, которые получили широкое распространение. Численное моделирование процессов скоростного нагрева позволяет уменьшить

время проектирования агрегатов, исследовать дополнительные параметры, влияние которых было невозможно проанализировать, опираясь только на аналитические расчеты.

1.1 Схемы нагрева металла струями перед операциями обработки металлов давлением (ОМД), термообработки (ТО), термохимической обработки (ТХО) с использованием атакующих (ударных) струй

Нагрев металла на большинстве отечественных предприятий, будь то массивных в термическом отношении, либо термически тонких изделий, осуществляется сегодня главным образом в печах, срок службы которых составляет уже порядка полувека. Проблемы, которые были присущи камерным пламенным и методическим печам остаются актуальными и по сей день. Это и угар металла, обезуглероживание и обеднение поверхностных слоев легирующими элементами, низкая производительность и высокий расход топлива, а также нерациональное использование производственных площадей – все это влияет на итоговую эффективность производственного процесса [8]. Существуют способы для сокращения времени нагрева в 2-3 раза, за счет возможности нагрева с трех-четырех сторон, что, кстати, позволяет уменьшить в несколько раз и угар металла.

Важное место занимают разработки в области скоростного нагрева. Агрегаты данного типа позволяют увеличить скорость нагрева в 5-7 раз [52]. Это позволяет приблизить скорость нагрева в данных печах к индукционным. Можно выделить три основных направления развития скоростного нагрева металла: струйно-факельный нагрев, работы по исследованию которого проводятся специалистами ВНИИМТ и УГТУ-УПИ [53]; нагрев горячими струями продуктов сгорания топлива; импульсно-скоростной нагрев, работы проводятся преимущественно специалистами МИСиС [67].

1.1.1 Струйно-факельный нагрев

В основе разработки способа нагрева металла, при котором топливо сжигается на его поверхности, лежит экспериментально факт интенсификации процесса переноса теплоты от горящих газов по сравнению со случаем омывания поверхности горячими газами. Различными авторами даются различные объяснения указанного факта, но можно предположить, что на теплообмен в данном случае влияют такие факторы: турбулизация вязкого подслоя вблизи поверхности металла, изменение теплофизических характеристик самого газа, приближение зоны высоких температур непосредственно к металлу.

Имеющиеся топливосожигательные устройства не позволяют организовать такую схему нагрева, однако данный способ можно реализовать при струйной подаче воздуха и топлива к поверхности металла.

Экспериментально на холодных моделях изучалось влияние основных геометрических и режимных факторов [8] на аэродинамические процессы вблизи поверхности: характер растекания газов, смешение топлива и воздуха, толщину устойчивой зоны смешения у поверхности. К геометрическим факторам относятся: угол наклона струй топлива и воздуха, расстояние между срезами сопел, положение точки встречи струй относительно поверхности, высота расположения среза сопел над поверхностью. В качестве режимных факторов были выбраны скорости истечения и соотношение этих скоростей. Исследования проводились для сопел круглого поперечного сечения и щелевидной формы. Результаты модельных исследований проверялись на огневом стенде, где, в частности, исследовалась равномерность температурного поля на поверхности металла. Были получены уравнения регрессии, где функцией является показатель равномерности зоны взаимодействия струйной системы с поверхностью.

Наряду с экспериментальными исследованиями был проведен расчетно-теоретический анализ теплообмена и нагрева металла для случая равномерно-распределенного радиационного теплообмена с одной стороны, и нагрева при сжигании топлива на поверхности металла - с другой. При этом рассчитывались: удельное время нагрева, угар металла при различной толщине горящего слоя и различном значении коэффициента расхода воздуха.

Рассмотренная схема нагрева не требует горелок сложной конструкции, позволяет достичь гибкого регулирования теплового и температурного режимов по длине печи (проходные печи) и во времени (печи садового типа).

Струйно-факельный нагрев (СФН) металла, был впервые предложен и разработан (это касается и научных основ, и математических моделей, и конструкций) во ВНИИМТ (сегодня - АО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники») под руководством Г.К. Маликова и в УГТУ-УПИ под руководством В.Г. Лисиенко [52].

При данном способе нагрев осуществляется системой гомогенных факелов (горящих струй, направленных на поверхность нагреваемого объекта), непосредственно взаимодействующих с нагреваемой поверхностью. Это позволяет нагреваемой поверхности непосредственно взаимодействовать с теплоносителем. В печах данного типа смешанные струи газа и воздуха прогреваются, воспламеняются и сгорают в пространстве между горелочными соплами и металлом. При натекании на металл недогоревших факелов процесс горения продолжается в высокотемпературных струях, растекающихся вдоль поверхности заготовки [51].

Это позволяет сохранить достоинства струйного нагрева по интенсификации теплообмена, и в свою очередь отказаться от применения камер предварительного сжигания топлива, стойкость которых ограничивает широкое распространение струйного нагрева в высокотемпературных печах.

СФН обладает определенными особенностями, которые представлены ниже [49]:

- Горение струй предварительно подготовленной смеси организуется без использования горелочных туннелей и выносится в рабочий объем печи, при этом факел направляется непосредственно на поверхность нагреваемой заготовки;

- Быстрый и равномерный нагрев изделий достигается путем размещения в кладке печи многосопловых неохлаждаемых горелок с калиброванными соплами, изготовленными из жаропрочной, стали;

- Необходимость поддержания скорости истечения смеси свыше 100 м/с, что позволяет предотвратить просок пламени в горелку, а также обеспечить высокие значения коэффициентов теплоотдачи на поверхности;

- Конструктивная простота дает возможность размещать достаточное для самых разнообразных условий нагрева число сопел на единицу поверхности металла и тем самым оптимизировать как тепловую эффективность схемы отопления, так и уровень экологической чистоты продуктов горения;

- Компактность и малоинерционность нагревательного устройства, уменьшение объема футеровки.

В 60-70-ых годах XX века в нашей стране проходили первые стендовые испытания струйно-факельного нагрева, а с 80-ых годов на заводах Урала осуществляли внедрение данной технологии [52]. Также, были разработаны горелочные устройства предварительного перемешивания для камер скоростного нагрева полосы институтами ВНИИМТ и Стальпроект для агрегата термопластической отделки стальной холоднокатаной полосы. Основные элементы горелки - смеситель, стабилизатор и камера сгорания. Горелка обеспечивает скоростной нагрев стальной полосы до 250-300 °С. Общий вид представлен на рисунке 1 [16] (1 – патрубок подвода смеси; 2 – насадок с отверстиями; 3 – стабилизатор; 4 – корпус камеры сгорания).

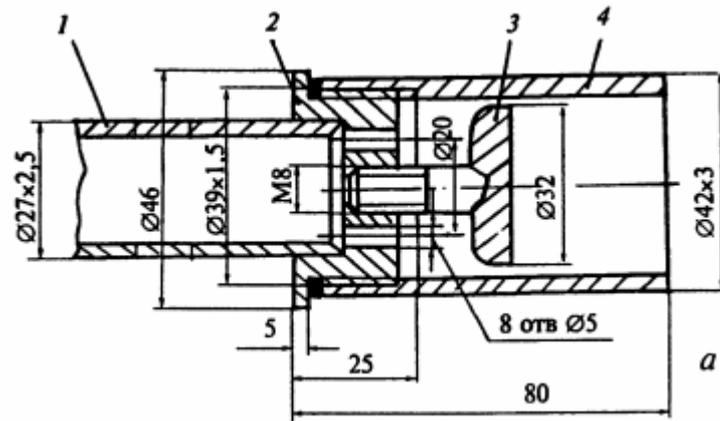


Рисунок 1 - Общий вид горелки для камер скоростного нагрева полосы

Совместно с Северским трубным и Первоуральским новотрубным заводами ВНИИМТ разработал горелочное устройство типа ГМП-20, которое предназначено для сжигания природного газа в печах скоростного струйного нагрева. Общий вид горелочного устройства представлен на рисунке 2 [16] (1 – воздухопровод; 2 – газопровод; 3 – смеситель; 4 – газоздушный коллектор; 5 – огнепреградитель; 6 – сопловый коллектор; 7 – сопло; 8 – печь). Горелка состоит из смесителя с гибкими металлорукавами для подвода газа и воздуха, газоздушного коллектора с четырьмя отводами по два с слева и справа, четырех огнепреградителей и четырех боковых коллекторов, каждый из которых имеет по пять сопел с отверстиями. Скорость потока на выходе из сопел достигает 350 м/с. Температура на оси факела перед ударом о поверхность нагреваемого металла составляет от 1350 до 1550 °С.

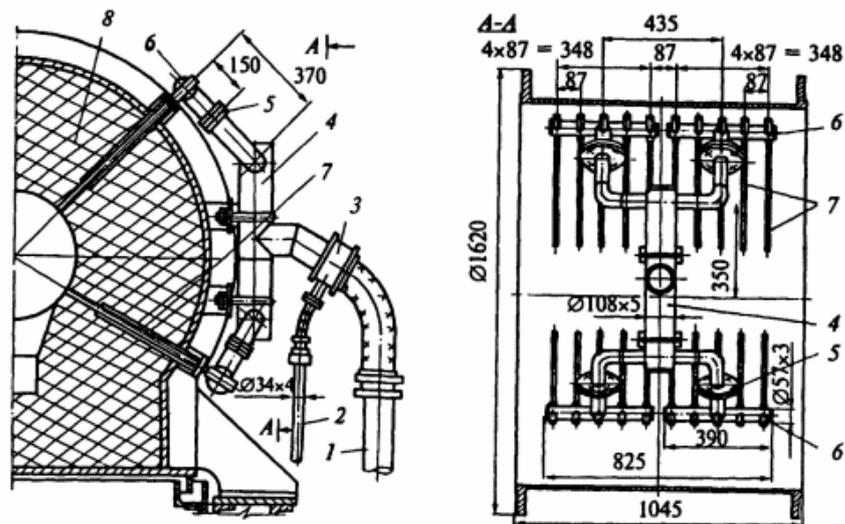


Рисунок 2 - Горелочное устройство типа ГМП-20 для скоростного нагрева металла

Печь с использованием СФН имела меньший объем рабочего пространства и меньший объем футеровочных материалов (в 5 раз). Тепловой КПД был увеличен в 2 раза, а температура кладки уменьшилась на 200-300 °С. Все это сказывалось на качестве получаемого металла, а также на повышении стойкости футеровки. Это все способствовало сокращению расхода топлива в 2 раза, повышению производительности на 15 % [49].

С точки зрения экологических составляющих, применение СФН способствовало резкому сокращению эмиссии оксидов азота, сравнение представлено на рисунке 3 [54]. Это стало возможно благодаря снижению температуры горения и увеличению кратности рециркуляции, а также уменьшению локально перегретых зон газовой среды в рабочем объеме печи. Оксиды азота образуются по «быстрому» механизму, их эмиссия близка к минимальной и практически не зависит от температуры воздуха горения.

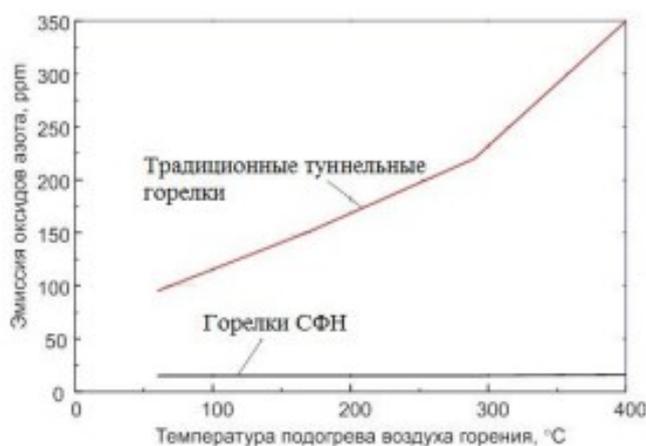


Рисунок 3 - Зависимость эмиссии NO_x от температуры подогрева воздуха

Хочется отметить, что на Западе и в Америке, вопрос реализации и просто исследование процессов СФН началось позднее и получило название DFI (Direct Flame Impingement) технологий в соединении с повышением потенциала топливной смеси за счет обогащения окислителя кислородом (Oxy-fuel) [106].

Исследование особенностей тепловой работы печей СФН было предпринято на опытной печи в совместных исследованиях российских и американских специалистов [106].

С американской стороны в этих исследованиях принимали участие Р. Висканта, М. Хинкис, Дж. Вагнер, И. Курек и др. Печь была установлена в Институте технологий газа в Чикаго (США) и оборудована самыми современными приборами для измерения всех необходимых параметров. Расход природного газа достигал 30 м³/ч, подогрев воздуха доходил до 650 °С. На этой печи были подтверждены ранее установленные и получены многие дополнительные дан-

ные по преимуществам СФН. Удалось достичь уровня теплового КПД в районе 65 %, эмиссия оксидов азота, даже при подогреве воздуха до 650 °С, не превышала 30 ppm против 240–250 ppm на обычных печах [106]. Перед строительством проводилось численное моделирование гидрогазодинамики и теплообмена с помощью современных программных продуктов.

Схема реальной печи, находящаяся на заводе в США для нагрева алюминиевых заготовок представлена на рисунке 4 [106].

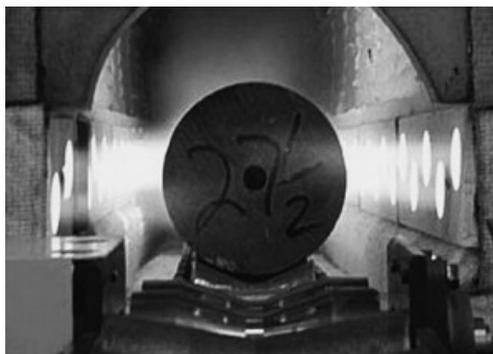


Рисунок 4 - СФН печь для нагрева алюминиевых заготовок (США)

Накопленные знания привели к созданию печей СФН (DFI) в США, Германии, Швеции и других странах. Ниже, на рисунке 5 представлена схема роликовой печи СФН, которая находится в Германии.

Компания «Линде» (Германия) использует технологию СФН для термической обработки стальной полосы, но с добавлением кислорода в горелки, эта технология получила на Западе название DFI oxy-fuel [85].

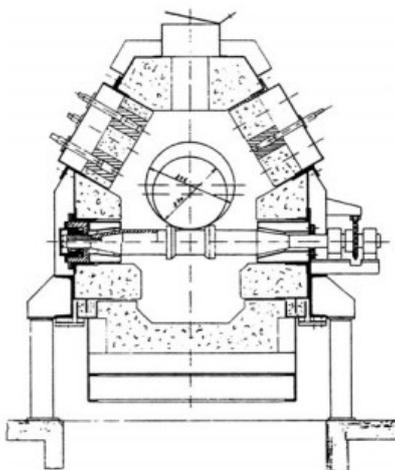


Рисунок 5 - Роликовая печь СФН для высокоскоростного нагрева (Германия)

Работы по исследованию СФН также ведутся в Индии [105]. В работе 2018 года исследовалось соударение высокоскоростной горячей струи с изогнутой (выпуклой и вогнутой) полцилиндрической пластиной. Сделаны выводы о том, что вогнутая пластина обеспечивает более высокий КПД и лучшую однородность теплового потока по пластине, по сравнению с выпуклой. Но локальный тепловой потока наблюдается выше в эксперименте с выпуклой пластиной [105]. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 6.

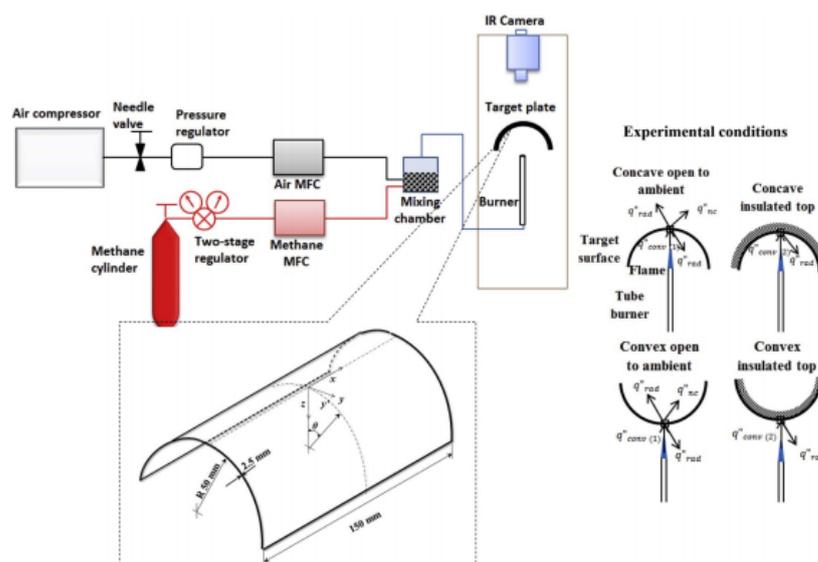


Рисунок 6 - Схема экспериментальной установки (Индия)

Струйно-факельные устройства могут работать в широком диапазоне изменения коэффициентов избытка воздуха. Так, в системах СФН для подогрева свежего воздуха в вентиляции шахт, происходит сгорание струй предварительно перемешанной смеси природного газа с большим избытком воздуха (вблизи нижнего концентрационного предела распространения пламени при значениях $\alpha = 1,6-1,7$) [108].

Использование СФН для нагрева приточного воздуха, подаваемого в помещение для замены воздуха, уходящего по вентиляционной системе, а также для подогрева свежего воздуха, который подается для проветривания шахт, позволяет отказаться от камеры сгорания и теплообменника, а также напрямую использовать пламя горелки для нагрева воздуха.

Как было отмечено ранее, использование СФН позволяет снизить вес футеровки печного агрегата. В работе [92], проводимой специалистами НИТУ МИСиС проводились исследования о возможности внедрения и использования струйно-факельных печей для нагрева труб, не имеющих тяжелой, высокоинерционной футеровки. Рабочее пространство печи имеет ограничения в виде перфорированной поверхности, которая способствует формированию микрофаке-

лов. В работе было исследовано влияния количества и взаимного расположения отверстий, обеспечивающих создание микрофакелов.

При исследовании схемы перфорации с большим шагом характерны повышенная равномерность их распределения по поверхности нагреваемого изделия и увеличенная площадь области более высоких температур. Это связано с тем, что для двух схем исследования расход топлива остается постоянным, а при увеличении расстояния между отверстиями, скорости истечения струй топлива увеличивается. Работа подтверждает возможность разработки и проектирования нефутерованных агрегатов СФН методом численного моделирования.

Данный способ нагрева изделий был запатентован (получен патент РФ № 2494155 «Способ термообработки изделий в горизонтальной печи») [42]. Применение данного способа нагрева с использованием микрофакелов позволяет повысить энергоэффективность за счет сокращения подачи избыточного воздуха, увеличения температурного напора, увеличения коэффициента теплоотдачи между факелом и нагреваемой поверхностью, а также снижения выбросов оксида азота, который догорает в буферной зоне.

Учеными из МИСиС запатентован «Способ нагрева газов», патент РФ № 2518714 [45]. Изобретение может быть использовано в разных отраслях промышленности, например, металлургии, машиностроении, промышленности стройматериалов при нагреве азота, водорода, инертных газов для использования в качестве защитных сред при нагреве, а также нагрева воздуха для использования в технологиях нагрева и в системах воздушного отопления производственных и бытовых помещений. Нагрев газа проводят в камере нагрева, отделенной от камеры горения. Нагрев теплопередающей поверхности корпуса камеры нагрева осуществляют с помощью системы мелких факелов с эффектом поверхностного горения на корпусе камеры нагрева. Систему мелких факелов образуют путем взаимодействия потока топлива, подаваемого параллельно стенкам корпуса камеры нагрева, и потока воздуха, подаваемого перпендикулярно стенкам корпуса камеры нагрева. Нагрев газа производят в камере нагрева путем взаимодействия системы перпендикулярных струй нагреваемого газа с теплопередающей поверхностью корпуса камеры нагрева, атакуемого с противоположной стороны системой перпендикулярных факелов камеры горения.

1.1.2 Нагрев горячими струями

В основу разработки таких печей положен метод использования высокотемпературного потока, который направлен непосредственно на нагреваемое изделие, для обеспечения высокой скорости нагрева в связи с тем, что при прямом нагреве коэффициент передачи теплоты конвекцией к изделию больше, чем к кладке.

Опыт эксплуатации промышленных печей скоростного струйного нагрева машиностроительного производства показывает, что в этом случае удастся добиться уменьшения удельного расхода топлива на 30-50 %, увеличения производительности, а также снижения затрат на ремонт футеровки [28].

Введение в практику печестроения скоростных горелок придало новый импульс разработке тепловых схем промышленных печей. Высокоскоростные потоки продуктов горения таких устройств в сочетании с современными огнеупорами позволили отказаться от схем с применением рециркуляционных каналов, повысить равномерность температурных полей в рабочем пространстве печей. Это происходит из-за примерного равенства лучистой и конвективной составляющих теплового потока [87]. Работы в этом направлении способствовали появлению понятия «скоростная газовая горелка» - это устройство, которое обеспечивает полное сжигание газа во встроенной камере сгорания, а также истечение уже продуктов сгорания в рабочее пространство с высокой скоростью (до 200 м/с). Высокая скорость обеспечивается высоким давлением газов в камере сгорания, что в свою очередь происходит из-за сжигания газа и повышения температуры. Существуют различные типы скоростных горелочных устройств, работы по проектированию которых начались параллельно с работами о возможном применении скоростного нагрева. Ниже перечислены различные типы скоростных горелок, использование которых возможно на печах, предназначенных для скоростного нагрева. Ниже представлены отечественные разработки скоростных горелочных устройств, разработанные ВНИИпромгазом, ОАО «Уралмашем»,

Скоростные горелочные устройства СВП. Данная горелка разработана институтом ВНИИпромгаз [16] для сжигания природного газа с воздухом в печах скоростного нагрева металла. Общий вид горелки представлен ниже на рисунке 7 [16]. Горелка состоит из металлической воздухоохлаждаемой камеры горения (1), запального устройства (2) и газового сопла (3). Газ подается в камеру горения через газовое сопло, где смешивается с предварительно подогретым до 300-350 °С воздухом. Сгорание газозвушной смеси завершается в камере горения.

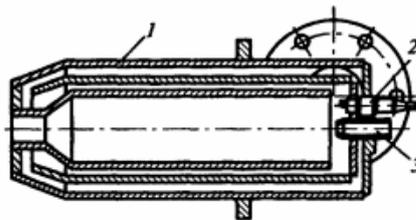


Рисунок 7 - Общий вид скоростной горелки типа СВП

Скоростные горелочные устройства ПИВс. Это горелки с переменным избытком воздуха разработанные также институтом ВНИИпромгаз. Выход продуктов сгорания осуществляется через одно калибровочное сопло. Общий вид горелки представлен ниже на рисунке 8 [16]. (1 – корпус; 2 – камера предварительного смешения; 3 – газовый коллектор; 4 – воздушный коллектор; 5 – камера горения; 6 – выходное сопло; 7 - диффузор; 8 - свеча дожигания; 9 – контрольный электрод). Розжиг горелки осуществляется с помощью пилотно-защитного устройства. Смесь газов с первичным воздухом поступает из камеры предварительного смешения в камеру горения. Вторичный воздух подается через отверстие в диффузоре. Горение газовой смеси осуществляется в камере горения. Продукты сгорания выходят из камеры горения через калиброванное окно.

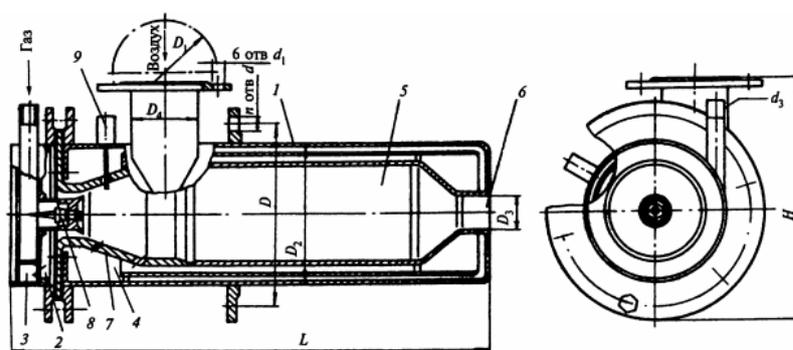


Рисунок 8 - Общий вид скоростной горелки типа ПИВс

Скоростные горелочные устройства ОАО «Уралмаш». Отличительной особенностью данных горелочных устройств является то, что они предназначены для сжигания холодного природного газа и с холодным воздухом. Были разработаны четыре типоразмера горелок. Общий вид представлен ниже на рисунке 9 [16]. (1 – воздушный патрубок; 2 – газовый патрубок; 3 – газораспределительная камера; 4 – камера сгорания; 5 – выходной наконечник; 6 – запальный канал; 7 – свеча зажигания; 8 – сбросной кран; 9 – корпус). У горелки имеется воздухоподводящий корпус и встроенная камера горения. На торцевой стенке выполнена газораспределительная камера с системой газораспределительных отверстий. Камера сгорания выполнена двухступенчатой. Первая часть имеет перфорацию из отверстий различного диаметра, вторая - кольцевую спиральную щель. Это сделано из-за того, что на начальном участке происходит интенсивное смешение струй газа с вытекающими навстречу и воспламенение. При работе горелки скорость продуктов сгорания в выходном наконечнике составляет около 200 м/с.

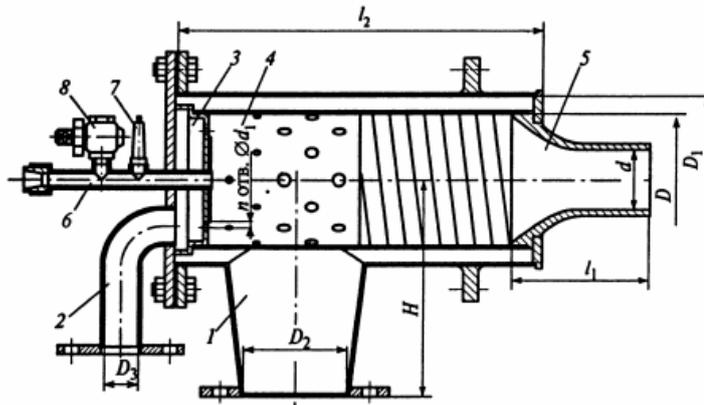


Рисунок 9 - Общий вид скоростной горелки ОАО «Уралмаш»

Скоростные горелочные устройства типа ГВ. Данные горелки используют для создания высокотемпературной высокоскоростной струи продуктов сгорания. Горелки работают на холодном природном газе и подогретом воздухе. Воздух нагревается, охлаждая металлическую камеру сгорания с зауженным входом. Газ подаётся мелкими струями в поток подогретого воздуха. Общий вид горелочных устройств представлен на рисунке 10 [16]. (1 – камера сгорания; 2 – двухходовой контур охлаждения камеры сгорания; 3 – газовый коллектор; 4 – смеситель; 5 – электрозапальная свеча).

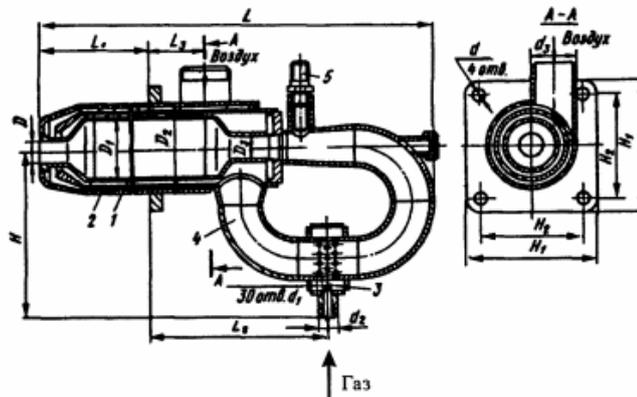


Рисунок 10 - Общий вид скоростной горелки типа ГВ

Скоростные горелки типа ГГПС для безокислительного нагрева. Данный тип горелочных устройств разработан ВНИИМТом и Стальпроектом для использования на агрегатах непрерывного горячего алюминирования. Работа осуществляется без подогрева газа и воздуха. Горелка состоит из корпуса с патрубками для подвода воздуха и газа, смесителя, огнепреградителя и водоохлаждаемой фурмы. Между корпусом и смесителем установлено воздушное сопло с периферийными наклонными в сторону оси горелки отверстиями для истечения воздуха в поток газа. Воспламенение происходит при истечении смеси в горелочный туннель. Общий вид пред-

ставлен на рисунке 11 [16]. (1 – газовое сопло; 2 – воздушное сопло; 3 – смеситель; 4 – огнепреградитель; 5 – водоохлаждаемая фурма).

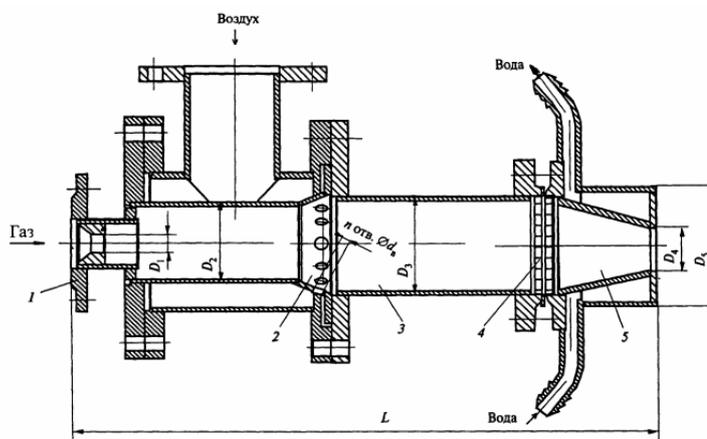


Рисунок 11 - Общий вид скоростной горелки типа ГПС

Сегодня в АО «ВНИИМТ» [16] также разрабатывают и предлагают скоростные горелки. Камера горения так же, как и раньше располагается в воздушном корпусе горелки и выполнена перфорированной по всей длине. Перфорация стенок камеры по её длине выполнена различными отверстиями в связи с различным назначением её передней и задней частей. Передняя часть камеры – зона предварительного смешения, воспламенения и горения; задняя часть – зона вторичного смешения. Выходной наконечник сопла выполнен сменным и выбирается в зависимости от требуемой скорости истечения продуктов горения на выходе. Горелочный камень для работы горелки не требуется. Разработано шесть типоразмеров горелочных устройств. Горелки отличаются тепловой мощностью и элементами смесителей. Горелка типа ГН-500 может поставляться в варианте для сжигания жидкого топлива.

Режим горения зависит от соотношения расходов топлива и воздуха, подаваемых в горелку. При необходимости использовать горелку для в низкотемпературных печах для термообработки металла, то происходит подача избыточного количества воздуха. При этом интенсивное сгорание топлива происходит в передней части камеры горения. В задней части камеры горения происходит интенсивное разбавление образовавшихся продуктов воздухом. При этом из выходного наконечника горелки в рабочий объем печи вытекает смесь продуктов горения с воздухом заданной температуры.

Скоростные горелочные устройства для использования в промышленных печах разрабатывают и производят также российская компания ЗАО «КОМАС» (ЗАО «Комплексные автоматизированные системы») [60]. Горелочное устройство типа ГСП для сжигания природного газа предназначено для использования в печах, сушилах различных отраслей промышленности, а

также в котлах малой производительности. Горелка ГСП состоит из горелки с контрольным электродом и электродом розжига, из пульта навесной автоматики безопасности и управления горелкой (электророзжиг, контроль факела, световая и звуковая сигнализация, кнопка вкл./выкл.) Мощность может варьироваться от 100 до 6000 кВт, в зависимости от типа. Использование данных горелочных устройств позволяет добиваться безокислительного нагрева и обезуглероживания [47].

Разработкой и серийным производством скоростных горелочных устройств для использования на промышленных предприятиях занимаются также научно-производственное предприятие ТЕСКА. Горелочное устройство серии ГСС с регулируемыми параметрами факела, тепловой мощностью от 100 кВт до 45 МВт, скорость продуктов сгорания от 20 до 200 м/с [61]. Нельзя не упомянуть и о компании ООО «Общемаш», разработавшую и производящую горелочные устройства газовые скоростные серии ГТС. Они предназначены для сжигания природного газа при переменном коэффициенте избытка воздуха в промышленных печах различного назначения. Номинальная тепловая мощность от 190 кВт до 850 кВт, скорость продуктов сгорания до 160 м/с.

Анализ литературы, касающейся скоростных горелочных устройств [16, 24, 36, 52, 85], показывает, что исследования и развитие данной темы направлены в область усовершенствования энегосберегательных характеристик, а именно, рекуперацию теплоты уходящих продуктов сгорания. Все больше скоростных горелочных устройств являются также рекуперативными, что приводит к отсутствию трубопроводов горячего воздуха (позволяет исключить потери теплоты при транспортировке горячих газов по трубопроводу), повышение температуры воздуха, направленного на горение (позволяет снизить удельный расход топлива) и повысить температуру горения (до 2000 °С).

Ниже представлены несколько мировых производителей рекуперативных горелочных устройств.

- Рекуперативные горелки Kromschroeder (Кромшредер) ECOMAX представляют собой газогорелочное устройство со встроенным в него рекуператором. Продукты сгорания удаляются из рабочего пространства печи через рекуперативную горелку Kromschroeder (Кромшредер), обеспечивая подогрев дутьевого воздуха до 700 °С. Рекуперативная горелка Kromschroeder (Кромшредер) предназначена для непосредственной установки на нагревательных и термических печах с рабочей температурой до 1300 °С или в составе радиационных труб. Применение данных горелок позволяет сократить затраты на строительство печи, снизить удельный расход природного газа, уменьшить текущие затраты при эксплуатации природного

газа, уменьшить текущие затраты при эксплуатации печи. Вид рекуперативной горелки Kromschroeder (Кромшредер) представлен на рисунке - 12 [62].

Отличительные признаки рекуперативных горелок Kromschroeder (Кромшредер):

- Шесть различных типоразмеров мощностью от 15 до 500 кВт;
- Имеют высокоскоростной факел;
- Имеют встроенный электророзжиг;
- Низкий уровень вредных выбросов за счет ступенчатого сжигания;
- Металлический или керамический рекуператор;
- Варьируемая длина рекуператора.



Рисунок 12 - Рекуперативные горелки Kromschroeder (Кромшредер)

Горелки фирмы WS Warmeprozestechnik GmbH серии «REKUMAT» сочетают в себе рекуператорный теплообменник и такие принадлежащие к горелке конструкционные узлы как, например, клапаны и элементы контроля, образуя из них единое общее. За счет этого предоставляется возможность модулярного построения газового отопления, обладающего наивысшей степенью эффективности. Высокий импульс обеспечивает оптимальную равномерность температурных значений. При этом горелки серии «REKUMAT» задают тон в отношении высокой степени эффективности и малых значений эмиссии вредных веществ в тысячекратном использовании.

Серия «REKUMAT» в своей новой конструкции, выполненная из различных материалов, в том числе и полнокерамическая, приспособленная для потребностей процесса в виде горелки быстрого действия или горелки «FLOX®», отвечает теперь требованиям широкого диапазона как в отношении температурных значений, так и в отношении производственной мощности.

При применении технологии «беспламенного окисления», процессуальной разработки фирмы «WS-Warmeprozestechnik» для температурных значений топочного пространства, превышающих 850° С, эмиссии NOx могут быть резко понижены, несмотря на наивысшую степень

предварительного подогрева воздуха. Горелка «РЕКУМАТ» представлена ниже на рисунке 13 [63].



Рисунок 13 - Горелка «РЕКУМАТ»

Рекуперативная горелка RECUFIRE. Это новое поколение энергосберегающих рекуперативных горелок с низким уровнем эмиссии. Встроенный в горелку теплообменник позволяет в зависимости от конкретного случая применения снизить потребление энергии до 50 %. Рекуперативные горелки RECUFIRE, имеющие мощность от 10 до 500 кВт, выгодны в экологическом и в финансовом отношении. Они применяются в излучающих трубах и в печах с открытым пламенем. Рекуперативная горелка RECUFIRE показана рисунке 14 [64].



Рисунок 14 - Рекуперативная горелка RECUFIRE

1.1.3 Импульсно-скоростной нагрев

Для нагрева различных изделий используют печные агрегаты, основанные на методе импульсно-скоростного нагрева. Данное направление получило свое начало на кафедре печей (сейчас кафедра «Энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий») в НИТУ МИСиС.

Основы импульсно-скоростного нагрева для использования в промышленных печах впервые упоминаются в работах М.А. Глинкова, В.Ю. Коганова Кривенко П.Г. и др. в 70-ых годов XX века и получили дальнейшее применение в камерных печах, нагревательных колод-

цах. Позже, начиная с конца XX века [68, 69, 75, 79, 80] и по настоящее время [44, 46, 73] импульсным-скоростным нагревом/охлаждением, а также исследованием процессов гидрогазодинамики, смешения, горения и теплообмена в печах с использованием струйных потоков [27, 34, 35, 72, 76, 90, 91] продолжает заниматься часть научного коллектива кафедры ЭРПТ НИТУ МИСиС.

Применению скоростного нагрева способствует высокая интенсивность подвода теплоты к поверхности нагреваемого изделия. Это позволяет увеличить скорость нагрева, что способствует уменьшению времени нагрева и снижению потери металла с окислением, особенно это касается термически тонких тел. Когда речь заходит о термически массивных изделиях, то данное преимущество перестает быть таковым вследствие возникновения недопустимого перепада между температурами поверхности изделия и его центра. Для решения данной проблемы может быть использован импульсно-скоростной нагрев в процессе которого контролируется перепад температур между поверхностью и центром изделия. Реализуется данный режим нагрева изменением граничных условий нагрева. В печах скоростного нагрева сделать это позволяет не столь массивная футеровка, которая позволяет осуществлять переход с одного теплового режима на другой без существенных временных затрат за счет современных огнеупорных материалов, обладающих низким коэффициентом удельной теплоемкости. Циклы «нагрев – выдержка» могут повторяться, при этом увеличение длительности периода выдержки может существенно снижать температуру центра изделия. Возможны различные варианты изменения температуры поверхности и центра нагреваемого изделия, они представлены на рисунке 15 [43, 70].

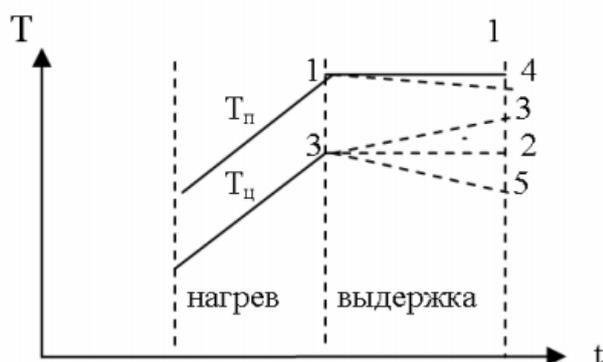


Рисунок 15 - Изменение температур поверхности и центра термически массивной заготовки при использовании импульсно-скоростного нагрева

Из графика следует, что при достижении температуры поверхности изделия (точка 1) – дальнейшее повышение температуры невозможно (траектория 1-1). Изменение температуры центра может происходить по трем возможным вариантам 3-3 (снижение скорости роста темпе-

ратуры), 3-2 (температура центра перестает изменяться) либо 3-5 (снижение температуры центра). Наиболее предпочтительным является траектория 3-3, поскольку при неизменной температуре поверхности температура центра повышается.

Вариантами, при которых снижается не только температура центра, но и поверхности являются траектории 1-4 и 3-5. В случае снижения температуры поверхности – это не критично, так как нагрев поверхности не является трудоёмким процессом, в отличие от снижения температуры центра изделия.

Поэтому при повторении циклов «нагрев - выдержка» следует придерживаться варианта, при котором температура поверхности изменяется по траектории 1-1, а температура центра по траектории 3-3.

Общий принцип и смысл использования данного способа нагрева исследовался и опробовался не только в МИСиС, но и ученым украинской теплотехнической школы [13, 14, 31, 78]. Рассматривается метод выбора оптимальных параметров технологии импульсного отопления в качестве инструмента для сокращения расхода топлива (в частности удалось добиться снижения расхода топлива в нагревательных колодцах на 5 %). В работах Курбатова Ю.Л. [40,82] описывается техническая сущность импульсного отопления, которая заключается в колебательном изменении расхода топлива (и соответственно, воздуха) по определенному временному закону или на основании сигналов датчиков системы автоматизации о достижении граничных значений некоторых величин (температуры, давления и т.д.). Возможен крайний случай импульсного процесса - это технология с полным периодическим отключением топлива и запираанием печи, которая включает в себя следующие элементы:

- периодическое включение подачи газа (и воздуха) на горелки (полупериод подачи топлива);
- периодическое отключение подачи топлива (и воздуха) и запираание печи дымовым клапаном (полупериод отключения топлива).

Как и в работах ученых НИТУ МИСиС, украинские коллеги обращают особое внимание на футеровку агрегата при использовании метода импульсно-скоростного нагрева. В случае использования керамоволокнистых материалов с низкими значениями плотности и коэффициента теплопроводности пренебрежение участием футеровки в процессах циклического нагрева и охлаждения не внесет существенной погрешности в общие результаты расчета импульсного отопления.

Были проведены теплотехнические оценки, которые показали, что при охлаждении продуктов сгорания, заполняющих камеру запертой печи, на величину порядка нескольких сотен градусов в реальных условиях позволяет поднять величину среднemasсовой температуры ме-

тала менее, чем на 1°C , при этом имеет место значительное удлинение операции нагрева, требуются достаточно сложные технические средства для циклического розжига и тушения горелок. Этот факт является причиной, по которой технология с полным запираем печи, как крайнего случая импульсного отопления, не получила распространения при нагреве материалов. Но данная технология используется для выдержки материалов в печах термообработки.

В основе решения практической задачи при создания импульсных горелочных устройств лежит использование либо вращающихся заслонок, либо дроссельных клапанов в каналах подачи топлива и окислителя. При этом имеет место применение такой технологии отопления, когда общий расхода топлива остается постоянным в любой момент времени, а импульсность достигается за счет периодического перераспределения расходов топлива между горелками. Подход, основанный на перераспределении расходов топлива, возможно применить в агрегатах, которые имеют четное число горелочных устройств, это касается не только процесса нагрева, но и выдержки. Поступает сигнал от терморпар об уменьшении температуры в какой-то из рабочих зон камеры печи, средства автоматизации позволяют подать необходимое количество используемого горелкой топлива для формирования необходимой плотности потока в целях поддержания температуры как в рабочей зоне, так и на поверхности.

Исследованием применения струйного нагрева и его влияния на нагрев изделий, также занимаются ученые из Белорусского национального технического университета, под руководством В.И. Тимошпольского [87, 88]. В работах сделаны выводы о том, что применение импульсно-скоростного нагрева позволит повысить эффективность работы печных агрегатов струйного нагрева.

На Западе проблемами импульсно-скоростного нагрева также занимались ученые компаний-производителей в Германии «Fives Stein», Бельгии «LOI», Италии «Danielli» Применение наработок позволило создать методические печи с импульсной системой отопления, которые были построены на территории России в городе Магнитогорске, Выкса и в Украине, в городе Мариуполе на прокатных станах 2000 ПАО ММК, 5000 АО ВМЗ и 1700 ПАО ММК им. Ильича соответственно, компанией из Германии «Fives Stein». Проведенные исследования показывают, что печи имеют низкий удельный расход топлива, пониженное окалинообразование и уменьшенные выбросы оксидов азота, качественное информационное сопровождение управления процессом нагрева.

По публикациям, имеющимся в свободном доступе, можно сделать вывод, о том, что исследованием импульсно-скоростного нагрева занимаются и с помощью методов математического моделирования. Учеными Китая и США проводились исследования возможного применения численного моделирования в подтверждение промышленному эксперименту [107, 109].

Исследования подтверждают, что применение современных пакетов прикладных программ при исследовании нагрева слябов согласуется с результатами экспериментальных исследований. Применение при нагреве массивных слябов импульсного способа нагрева позволяет достигнуть необходимого градиента между поверхностью и центром заготовки. Результаты моделирования использовались для оптимизации процесса нагрева и выдержки.

В совместной работе китайских и канадских ученых [104] предлагается внедрять для применения импульсного отопления программируемый импульсный контроллер горения, который автоматически вычисляет необходимую мощность тепловыделения из горелки для обеспечения температуры в камере нагрева или, при превышении заданных параметров по температуре в камере, отключает горелочное устройство. Схема работы горелочных устройств, предложенная в данной работе, представлена на рисунке 16.

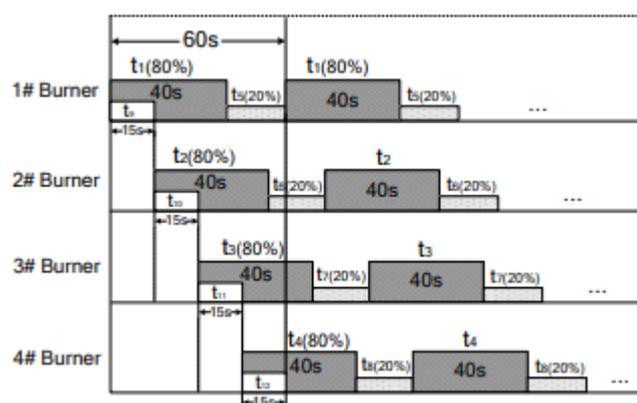


Рисунок 16 - Схема включения/выключения горелочных устройств

В работе ученых из Мексики и США [101] исследовались преимущества от использования импульсной системы отопления на печи перед прокатным станом. Внедрение такого способа отопления позволило уменьшить время нагрева изделий, равномерность по толщине изделия, и в рабочем пространстве печи, но необходимо соблюдать баланс между включенным горелочными устройствами и отключенными, ввиду возникновения разрушающего перепада между температурой поверхности и центра изделия, а также возможного преждевременного выхода из строя горелочного оборудования. Схемы вкл./откл. горелочных устройств при проведении эксперимента представлены на рисунке 17.

	25% demand								50% demand								75% demand							
b1	█				█				█				█				█				█			
b2		█				█				█				█				█				█		
b3			█				█				█				█				█				█	
b4				█				█				█				█				█				█
Sec	10	20	30	40	50	60	70	80	10	20	30	40	50	60	70	80	10	20	30	40	50	60	70	80

Рисунок 17 - Схемы вкл./откл. горелочных устройств при проведении эксперимента

Все преимущества, которые используются при импульсно-скоростном нагреве применимы и к охлаждению, к этому выводу пришли ученые НИТУ МИСиС [74]. При непрерывном охлаждении холодная среда, поступая в одну и ту же зону, поверхности которой уже охлаждались за счет первых потоков охладителя, что приводит к снижению интенсивности теплоотдачи вследствие снижения градиента температур между металлом и охладителем. Для нового повышения температуры поверхностных слоев металла необходимо время, в течение которого существует, нагрев их изнутри за счет внутренних перетоков теплоты теплопроводностью от центра к поверхности. Импульсное охлаждение позволяет расширить возможность управления этим процессом за счет изменения таких влияющих факторов, как длительность периодов интенсивного и малоинтенсивного охлаждения (выдержки), суммарная продолжительность цикла (охлаждение плюс выдержка), соотношение величин коэффициентов теплоотдачи в периоды охлаждения и выдержки.

Из рассмотренных схем нагрева перед операциями обработки металлов давлением проявляется тенденция использования атакующих (ударных) струй в разработках и исследованиях в последнее время. Внедрение данных схем позволит повысить энергоэффективность производства и качество выпускаемой продукции в металлургическом производстве, а именно в черной металлургии.

Один из вариантов дальнейшей переработки полученной стальной заготовки – производство хладнокатаного листа. За 2018 год в РФ было произведено 8,252 млн. тонн хладнокатаного листового проката [59]. Лист хладнокатаный получают в процессе обработки пластичной стальной заготовки давлением. Большую часть хладнокатаного листа в нашей стране производят рулонным способом и на завершающей стадии подвергают термообработке и термохимической обработке.

Термообработку стальной полосы проводят в печных агрегатах двух типов: печь непрерывного отжига (протяжные печи) и садочные печи (колпаковые) [22].

Протяжные печи – термические печи непрерывного действия. По конструктивному признаку протяжные печи делят на горизонтальные (одно- и многоэтажные) и вертикальные (башенные). Полосу протягивают в одну (на однорядных протяжных печах) или несколько (на многорядных протяжных печах). Протяжные печи отапливаются газовым топливом; разработаны протяжные печи с электрическим обогревом, но их эксплуатация обходится дороже.

Отжиг металла в протяжных печах имеет ряд преимуществ по сравнению с отжигом в колпаковых печах:

- сокращение длительности отжига;
- более высокие механические свойства и качество поверхности за счёт высокой равномерности нагрева металла;
- включение отжига в непрерывный процесс очистки металла, травления, нанесения различных покрытий и т.д.;
- ликвидация затрат на транспортировку рулонов от агрегата к агрегату и промежуточным местам складирования.

Протяжные печи также имеют и недостатки [6]:

- низкий уровень развития процессов теплообмена в камере восстановительного нагрева;
- коэффициент излучения составляет только $1,5\text{--}2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$, в то время как в нагревательных печах он равен $3,5\text{--}5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$;
- доля теплоты, передаваемая конвекцией, не более 15–20 %. Это приводит к тому, что камеры восстановительного нагрева являются очень громоздкими;
- повышенные тепловые потери с дымом при форсированных режимах работы печи.

1.2 Азот, получение и хранение

Нагрев металла при термической обработке сопровождается окислением поверхности, а также науглероживанием или обезуглероживанием. Эти процессы ведут к потерям металла (угар, травление или обточка), а в отдельных случаях становится невозможным получение материала с заданными свойствами. Для предотвращения или уменьшения этих явлений в термических печах 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. Состав защитной атмосферы зависит от материала, режима термообработки, требований стандартов к составу, свойствам и качеству поверхности полосы.

Для нагрева стальной ленты в разрабатываемом способе предполагается использовать азот, как в качестве защитной атмосферы, так и

в качестве теплоносителя. Газообразный азот достаточно инертен, чтобы негативно влиять на организм человека, он не оказывает вредного воздействия на окружающую среду, не токсичен, не горюч и не взрывоопасен.

На некоторых предприятиях азотный газ является побочным продуктом разделения воздуха на кислородной станции. Это низкие затраты на получение защитной атмосферы и теплоносителя в достаточном количестве [23].

Под действием тепловой энергии газы проявляют ряд свойств: способность проводить теплоту (теплопроводность, температуропроводность); способность поглощать теплоту (теплоемкость); способность изменять или сохранять свои свойства. Теплофизические характеристики азота имеют важное значение при использовании азота в качестве теплоносителя для нагрева стальной ленты.

Теплоемкость азота и воздуха при различных температурах представлена в таблице 1. [55].

Таблица 1 – Теплоемкость азота при различных температурах

T, °C	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$C_{\text{азота}}$, кДж/(кг·К)	1,299	1,300	1,304	1,311	1,321	1,332	1,345	1,359	1,372	1,385	1,397

Основную массу атмосферного воздуха составляет азот (78,1%), поэтому рациональным вариантов видится получение азота из воздуха. В промышленности основными являются два метода получения азота: криогенное разделение и мембранная технологии.

Криогенная технология разделения воздуха на составляющие (азот, кислород, аргон и другие газы) основана на разнице температур кипения (или сжижения) азота и кислорода при глубоком охлаждении воздуха. Предварительно сжатый и охлажденный воздух расширяется в детандере до температуры ~ 192 °C, при которой воздух полностью сжижается и становится бесцветной жидкостью. В ректификационных колоннах (однократной/двукратной) происходит последующий процесс разделения жидкого воздуха.

Аппараты однократной ректификации применяются в установках малой производительности и в основном в установках для производства жидкого кислорода. Колонна играет также роль отделителя жидкости. В колонне однократной ректификации получают до 2/3 кислорода, содержащегося в воздухе, так как около 1/3 его теряется с азотом.

При двукратной ректификации получают практически чистые продукты разделения - азот и кислород, которые далее могут использоваться для различных целей, в различных технологических линиях. Для ее проведения применяются установки большой производительности.

Ректификационная колонна может состоять из нескольких аппаратов. Указанные установки высокопроизводительные, но сложные по устройству, стационарные и энергоёмкие. Применяются в производствах с большим расходом газов.

При производстве азота по мембранной технологии, которая основана на отделении молекул азота из предварительно очищенного сжатого воздуха, прокачиваемого через так называемый мембранный блок. Основной принцип мембранной технологии основан на разделении газовой смеси за счёт разницы парциальных давлений на внешней и внутренней поверхностях мембраны. Мембрана – это разделительный блок в виде цилиндрического картриджа, внутри которого расположен пучок трубчатых поливолоконных мембран. На таких устройствах можно получить азот чистотой от 90 % и выше [39]. Главные преимущества мембранной технологии – низкая энергозатратность, компактность и мобильность установок. Стоимость одного литра азота в среднем на 50% дешевле полученного традиционным криогенным методом. Азот производится непосредственно на месте его потребления в необходимом количестве. Расходы на хранение и транспортировку отсутствуют. Главным недостатком является высокая стоимость мембранных модулей и требование высокой степени очистки воздуха, подаваемого на модули, но со временем проблема может быть решена благодаря разработке новых технологий получения мембранных модулей.

Хранение азота подразумевает определенные особенности, так как литр жидкого азота, испаряясь и нагреваясь до 20 °С, образует примерно 700 литров газа. В связи с этим хранят его в жидком состоянии в специальных сосудах Дьюара с вакуумной изоляцией открытого типа или криогенных ёмкостях под давлением [10].

Постоянная температура поддерживается пассивными методами за счет хорошей теплоизоляции. Внутренний и внешний сосуды делают из алюминия или нержавеющей стали. Современные сосуды Дьюара имеют достаточно низкие потери от испарения: от 1,5 % в сутки для больших емкостей, до 5 % в сутки — для малых объёмов [84].

Выводы по главе 1. Цель и задачи работы

По материалам, рассмотренным в литературном обзоре прослеживается направленность усилий исследователей и разработчиков на усовершенствование предшествующих и разработку новых научно-технических решений в области скоростного струйного нагрева металла, обеспечивающих повышенную конвективную составляющую нагрева, качество получаемого металла, снижение расхода топлива, снижение массы и габаритов печных агрегатов, уменьшение времени технологического процесса.

Анализ библиографических сведений о патентах и научных публикациях в исследуемой области выявил достаточно высокий уровень изобретательской активности на протяжении более 50-ти лет, характеризующийся существенным подъемом в последние годы, что свидетельствует о росте интереса разработчиков к данной области науки и техники и актуальности выбранного направления исследований.

Анализ конструкций и особенностей тепловой работы протяжных печей для термической и термохимической обработки стальной ленты показал, что к их работе предъявляется особо важное требование – нагрев металла в защитной атмосфере для исключения поверхностного окисления. Отмеченное обстоятельство существенно усложняет конструкцию самого нагревательного устройства, повышает требования к герметичности рабочих камер и гидравлическому режиму работы печи в целом и, как конечный результат – повышает себестоимость готовой продукции.

С другой стороны, протяжные печи позволяют использовать прогрессивные способ нагрева – струйный конвективный нагрев, поскольку стальная лента имеет развитую поверхность теплообмена (отношение площади поверхности к единице массы металла).

Исходя из вышеизложенного, можно утверждать, что актуальной задачей является разработка и исследование нагрева стальной ленты, при котором исключалось бы необходимость использования дорогостоящей защитной атмосферы и во-вторых, две функции – теплоносителя и защитной атмосферы – сочетались бы в одном газообразном агенте.

Таким газообразным агентом может служить азот.

Анализ возможной схемы нагрева металла атакующими струями высокотемпературного азота, представленной на рисунке 18, позволил выявить факторы, которые влияют на эффективность тепловой работы и конструктивные размеры установки.

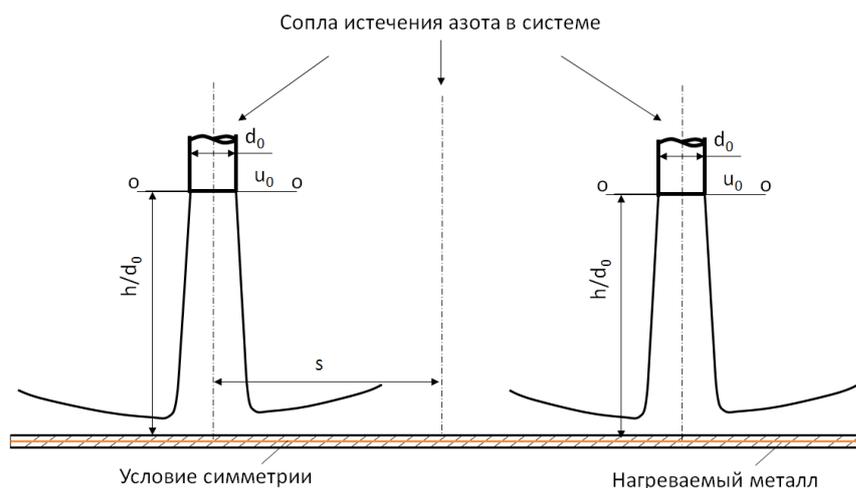


Рисунок 18 - Факторы, влияющие на нагрев металла в системе струй

Режимные факторы:

- скорость истечения струй азота;
- температура подогрева азота;
- температура среды, в которую втекает азот.

Конструктивные факторы:

- диаметр отверстий (d_0);
- схема расположения отверстий;
- шаг между отверстиями (S);
- расстояние между перфорированной поверхностью и нагреваемым металлом (h).

Можно подытожить сказанное следующими выводами:

1. Имеется достаточное количество научных работ, в которых рассматривается разработка и исследование агрегатов, работающих с применением скоростного-струйного нагрева.
2. Применение скоростного-струйного способа нагрева в проходных печах позволит сократить удельный расход топлива, уменьшить габариты нагревательного устройства, и, как следствие, капитальные затраты на строительство, а также время технологического процесса.
3. Не имеется информации о применении струйного-скоростного нагрева с помощью высокотемпературного азота, что позволило бы совместить функцию теплоносителя с функцией защитной атмосферы.

Исходя из вышеизложенного, **целью диссертационной работы** является разработка и исследование 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 результате взаимодействия 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»

2 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Существующие методы исследования

Получить важную информацию о промышленном процессе можно путем непосредственных измерений. Информацию, полученную с помощью экспериментального исследования на полномасштабной установке, можно использовать для определения поведения объекта в натуральных условиях. Только промышленный эксперимент позволяет получить реальную, действующую картину процессов, происходящих в промышленных установках, а не развитие вероятного варианта, как в случае физического и математического моделирования, проведение промышленного эксперимента на действующем агрегате сопровождается рядом существенных недостатков [36]:

- высокая стоимость;
- отсутствие возможности изменять определенные параметры, из-за возможного нарушения технологического процесса (например, температура в зоне);
- длительность по времени;
- пожаровзрывоопасные ситуации вследствие нарушения режима.

В связи с вышеуказанными недостатками, возникает необходимость проведения эксперимента в лабораторных условиях, на специально сконструированных лабораторных установках.

Данный вид исследования связан с гораздо меньшими материальными затратами, однако, полученную информацию необходимо правильно перенести на натуральный объект, так как в полном виде условия подобия невозможно выполнить, физическое моделирование всегда носит сугубо приближенный характер. Также, необходимо иметь в виду, что во многих случаях измерения затруднены и измерительное оборудование может давать погрешности.

В результате воспроизведения промышленных процессов в лабораториях, на специальных лабораторных установках, модель должна быть сооружена так и процессы в ней должны протекать таким образом, чтобы результаты их экспериментального исследования могли быть перенесены на реальный объект. Это возможно благодаря теории подобия, которая представляет собой научную основу обобщения экспериментальных данных и моделирования различных физических и физико-химических процессов [36].

Возникновение теории подобия физических явлений обязано последовательному обобщению представлений о геометрическом подобии. Применительно к геометрическому подобию множитель преобразования может быть определен как безразмерная величина, представляющая собой отношение сходственных одноименных элементов двух различных фигур или тел [15].

Если две данные фигуры или два тела подобны, то множители преобразования для всех одноименных, то есть имеющих одинаковую размерность, элементов одинаковы [26].

Для подобных физических явлений могут быть записаны безразмерные величины, критерии или числа подобия, образованные из величин, характерных для каждого данного явления и одинаковые для всех подобных явлений.

Процессы будут подобными, если они принадлежат к одному классу, описываются тождественными уравнениями, протекают в геометрически подобных системах, характеризуются подобием других условий однозначности и равенством одноименных критериев, составленных из условий однозначности [15].

Для распространения результатов исследования, как экспериментальных, так и численных, на группу явлений, их необходимо обработать в виде зависимостей безразмерных искомых величин от безразмерных аргументов и от безразмерных параметров. Данная формулировка является основной теоремой теории подобия [36]. Постановка (приведение) задачи в безразмерном виде приводит к сокращению числа величин, от которых зависят искомые функции.

Возможность сокращения числа аргументов или параметров задачи в результате перехода к безразмерным величинам утверждается так называемой π -теоремой теории подобия, в соответствии с которой любое уравнение (или система уравнений), связывающее между собой N физических величин, из которых K величин обладают независимыми размерностями, можно преобразовать к уравнению (или системе уравнений), связывающему $N-K$ безразмерных [36].

Математическая модель – это выражение натурального образца, его свойств и поведения с необходимой степенью приближения и подробности в виде формул, уравнений или систем уравнений. Уравнения могут быть алгебраическими, дифференциальными, интегральными или интегрально-дифференциальными [7].

В технике под математическим моделированием понимают адекватную замену исследуемого технического устройства или процесса с последующим его изучением методами вычислительной математики средствами вычислительной техники [29].

Все большее использование математического моделирования при исследовании как тепловых процессов в металлургической теплотехнике, так и гидродинамических [9, 11, 18, 27, 31, 34, 88, 110, 111], обусловлено рядом преимуществ, которыми обладает математическое моделирование:

- высокая точность и объем получаемой с их помощью информации;
- возможность исследования сложных процессов;
- экономическая эффективность по сравнению с исследованием процессов, происходящих в реальных металлургических агрегатах, на стендах или на физических моделях [7].

В одной из работ [18] проводилось компьютерное моделирование процесса конвективного теплообмена при натекании сверхзвуковых струй продуктов сгорания на внешнюю стенку газоотражателей. За основу работы был взят физический эксперимент, при котором исследуются нестационарный теплообмен при периодическом натекании горячей сверхзвуковой струи продуктов сгорания авиационного топлива (керосина) на поверхность отбойника – плоскую многослойную преграду, установленную под углом 45° к оси натекающей струи. Сопоставление результатов численного исследования с физическим моделированием дало хорошее согласование, так как погрешность не превышала 10 %. Также, было подтверждено, что параметры работы рассматриваемой системы охлаждения газоотражателей соответствуют штатному режиму работы, исключая возможность кипения охлаждающей жидкости, что способствует охлаждению газоотражателя в процессе всего цикла работы.

Похожие работы были проведена группой ученых из Китая [111]. В первой было проведено компьютерное моделирование для исследования влияния только взлетевшего летательного аппарата на взлетную зону. Результаты исследования подтверждают возможность использования результатов численного моделирования сложных случаев расчета газодинамики и теплообмена для использования в предпроектных проработках. Также даны рекомендации по определению безопасной зоны для персонала.

Во второй работе исследовались два варианта дефлектора потока, который обеспечивает эффективное термическое разложение и разделение высокотемпературного потока газа от струйного удара двигателя летательного аппарата. Основываясь на численное моделирование предпроектное исследование проводилось гораздо быстрее и без больших финансовых затрат.

Использование предварительного, инженерного расчета, основанного на адекватных математических моделях, позволяет избежать ошибок при проектировании узлов и устройств и, таким образом, значительно сократить расходы ресурсов на создание и опытное исследование новых образцов техники. Применение математического моделирования целесообразно, в частности, при выборе рациональных параметров и схемы нового агрегата, формировании эталонных рабочих характеристик, выявлении предельных возможностей и поиске путей модернизации [38].

Имеющийся опыт, накопленный к настоящему времени в области разработки и дальнейшего использования математических моделей, позволяет сформулировать основные принципы моделирования [66]:

- принцип информационной достаточности;
- принцип осуществимости;
- принцип множественности;

- принцип агрегирования;
- принцип параметризации.

Каждая математическая модель должна обладать рядом таких свойств как: полнота, адекватность, экономичность, продуктивность математической модели, наглядность [93].

Разработку математической модели можно разбить на несколько основополагающих этапов:

- 1) Постановка задачи (формулировка законов для связи основных объектов);
- 2) Математическое исследование (использование численных методов);
- 3) Анализ полученного математического решения (согласование с результатами экспериментов).

Компьютерное моделирование можно разделить на три вида: численное, имитационное и статистическое [33]. Численное моделирование подразумевает под собой построение компьютерной модели с использованием методов вычислительной математики. Численное решение некоторых математических уравнений при заданных значениях параметров и начальных условиях, и представляет собой вычислительный эксперимент.

Под имитационным моделированием подразумевается такой вид компьютерного моделирования, для которого характерно воспроизведение на ЭВМ процесса функционирования исследуемой системы.

Что касается статистического моделирования, то этот вид компьютерного моделирования, позволяет получить статистические данные о процессах, протекающих в моделируемом объекте.

Основное преимущество компьютерного моделирования – проведение исследования, когда отсутствует возможность провести натурный эксперимент по тем или иным причинам. Существует много общего между в этапах проведения натурального и компьютерного эксперимента, сравнение приведено ниже в таблице 2 [86].

Таблица 2 – Этапы проведения натурального и компьютерного эксперимента

Лабораторный эксперимент	Компьютерный эксперимент
Образец	Математическая модель
Физический прибор	Программа
Калибровка	Тестирование программы
Измерения	Расчеты
Анализ данных	Анализ данных

В идеальном варианте оптимальное исследование должно разумно сочетать и расчет, как аналитический, так и численный, но и эксперимент. Доля каждого в общем исследовании должна варьироваться от проблемы и задач исследования, а также от имеющихся экономических и других ограничений.

2.2 Использование программных продуктов при исследовании и оптимизации технологических процессов

В настоящее время широкое применение нашли методы компьютерного моделирования (CAE), которые являются практически необходимым инструментом создания современных технических устройств и промышленных объектов. Анализ мирового рынка CAE программ ясно показывает устойчивый рост доли гидрогазодинамических (англ. Computational Fluid Dynamic - CFD) и тепловых расчетов в общей структуре использования CAE. Вычислительная гидрогазодинамика возникла на стыке вычислительной математики и теоретической гидромеханики и к настоящему времени оформилась как обособленный раздел науки, предметом которого является численное моделирование различных течений жидкости и газа и решение возникающих при этом задач при помощи методов, основанных на использовании компьютерных систем [81]. Не так давно CFD методы применялись, в основном, в высокотехнологичных отраслях промышленности, то сейчас трудно найти отрасль, где подобные инструменты не являются жизненно необходимыми [30].

Современная вычислительная гидродинамика решает такие задачи, как расчет движений вязкой жидкости, численное исследование течений газа с физико-химическими превращениями, изучение распространения ударных волн в различных средах, решение газодинамических задач при наличии излучения, связанные задачи типа «прочность – газовая динамика», «акустика – газовая динамика».

Росту моделирования при вычислении гидродинамики (CFD) способствуют совершенствование компьютерных технологий, создание универсальных, удобных в использовании, а также доступных широкому кругу исследователей программных CFD-комплексов. Как уже было сказано выше, подобные программные продукты обладают преимуществом перед физическим экспериментом, среди которых:

- сокращение временных затрат на проектирование;
- возможность создания условий, которых невозможно добиться при лабораторных исследованиях;
- получение большого объема данных об объекте исследования;
- низкие затраты на моделирование;

– быстрая наладка и коррекция модели исследования.

В настоящее время широкое распространение получили пакеты вычислительной гидродинамики, тепломассообмена, прочности и электродинамики для проведения инженерных расчетов. Среди них можно упомянуть такие, как программные продукты Ansys от компании Cad-fem, FlowVision от компании ТЕСИС, Comsol Multyphysics от компании COMSOL Group, FloEFD и FloSimulation от компании CADFlo. Это далеко не полный список CFD-пакетов. Вычислительная гидродинамика продолжает развиваться. Моделирование с использованием CFD-программ широко применяется в инженерных расчетах таких промышленных гигантов, как Siemens, Shell, Volkswagen-Audi, BMW, Boeing, Daimler-Chrysler и многих других. Зарубежными исследователями накоплен уже серьезный опыт использования этих программ в промышленности.

Система уравнений Навье-Стокса образует законченную математическую модель поведения жидкости, которая детально описывает практически весь спектр течений. На практике к системе необходимо добавить уравнения используемой модели турбулентности, чтобы система в целом могла быть решена.

Получение точного математического решения для системы уравнений Навье-Стокса является основной проблемой. Возможным способом ее решения становятся численные методы.

Если учесть, что для большинства задач гидрогазодинамики определяющие уравнения являются нелинейными, процесс построения численного решения обычно ведется посредством итераций. Для этого используются методы Ньютона, многосеточные методы, метод сопряженных градиентов.

Хотелось бы отметить, что наиболее востребованным численным методом решения уравнений гидрогазодинамики является метод контрольных (конечных) объемов (FVM).

В основе метода лежит разбиение расчетной области на некоторое число непересекающихся контрольных объемов (элементов) и интегрирование дифференциального уравнения по каждому контрольному из рассматриваемых контрольных объемов. Вычисление интегралов внутри контрольного объема осуществляется посредством функций формы, которые описывают изменение некоторой интересующей переменной между расчетными узловыми точками. В качестве расчетного узла в методе контрольного объема (далее – МКО) используется центр контрольного объема.

В МКО, который центрирован по узлу, грани расположены посередине между узловыми точками сетки, узел геометрической сетки является центром контрольного объема. Таким образом, базовым является положение узлов, вокруг которых располагаются контрольные объемы. Центрирование по узлу приводит к ряду затруднений [33]:

- Не совпадение расчетной и исходной геометрической сеток;
- Сложная форма контрольного объема, в отличии от элементов геометрии сетки;
- Отдельное рассмотрение контрольных объемов на границах.

Главным преимуществом расположения контрольного объема вокруг узла геометрической сетки является высокая точность нахождения градиентов и производных, поскольку грани, на которых они вычисляются, расположены точно посередине между двумя соседними узлами геометрической сетки. Но при интегрировании по контрольному объему для расчетного узла точность величин ниже [33].

В методе контрольного объема, центрированного по ячейке, для построения расчетной сетки используется уже имеющаяся геометрическая сетка. Грани контрольного объема совпадают с гранями ячейки исходной сетки, расчетным узлом является центр геометрической ячейки. Это позволяет использовать уже готовые ячейки, которые созданы на этапе дискретизации расчетной области, в качестве контрольных.

Методы численного моделирования, применяемые для решения задач газовой динамики сегодня - позволяют использовать имеющуюся математическую модель – систему Навье-Стокса.

Вычислительные комплексы для проведения CFD-расчетов структурируют по уровню сложности решаемых задач (поддерживаемое максимальное число узлов расчетной сетки, учет степени нелинейностей), по количеству моделей поведения жидкостей и газов. Условно, CFD-пакеты можно поделить на три класса:

- Тяжелые – это комплексы, которые решают самые сложные задачи с учетом большого количества эффектов, используют широкий набор математических подходов. Комплексы тяжелого класса подходят и для научных, и для инженерных расчетов, для более комфортного использования необходима современная рабочая станция. Все комплексы содержат большое число моделей турбулентности и способны решать задачи различной сложности с учетом горения, химических реакций, многофазных потоков, поддерживают различные типы сеток.

- Средние - предназначены, в основном, для расчетов инженеров, но набор используемых моделей остается достаточно широким.

- Легкие – предназначены, в основном для учебно-методических целей.

CFD-пакеты всех классов используют МКО в его различных вариациях. При проведении расчета в CFD-пакетах происходит одинаковый порядок действий [33]:

- 1) Подготовка расчетной модели, которая включает в себя создание геометрической модели, генерацию сетки на основании этой геометрии, задание граничных и начальных условий, а также выбор физической модели расчета;

- 2) Решение задачи в решателе;
- 3) Просмотр и анализ результатов – так называемый постпроцессинг;
- 4) Корректировка расчетной модели при необходимости;
- 5) Повторное решение задачи с учетом изменений.

Корректировка расчетной модели происходит после получения неудовлетворительных результатов в ходе решения. Но изменению подвергают различные параметров при желании исследователя проследить влияние сеточной модели (количество и параметры ячеек) на итоговый результат, сходимость расчета, время расчета или желание проверить адекватность применения выбранной физической модели.

Подготовка расчетной модели - это основная стадия при проведении численного эксперимента, потому что дальнейшее решение (его характер, точность, сходимость, устойчивость) будет определяться теми походами и оценками реальной физической проблемы, которые затем были использованы при подготовке численного эксперимента.

Важным шагом при решении задачи гидрогазодинамики является выбор модели турбулентности. От этого выбора зависит то, какие нюансы будут учтены при решении задачи, а какие нет. Не существует универсальной модели турбулентности, и каждую из них применяют в определенных случаях, для которых результаты будут наиболее близки к реальным. Различные подходы при моделировании турбулентности предъявляют разные требования к сеткам: минимальные размеры ячейки, ограничения на тип используемого элемента при дискретизации, на соотношения размеров сторон ячеек, уровень детализации сеточной модели.

Важно понимать, что численные методы позволяют решить математическую модель, отражающую с определенной степенью достоверности некоторый физический процесс, происходящий в реальности, но результаты численного моделирования нуждаются в полном анализе, а также, сравнение с результатом физических исследований, если имеется возможность.

2.2.1 Моделирование турбулентности

На сегодняшний день турбулентный перенос вещества, теплоты и импульса остается наиболее сложным объектом исследования механики жидкости и газа. Еще в начале XX века было отмечено, что вблизи стенок возникает область (пограничный слой), в которой газодинамические параметры изменяются от значений на стенке до значений во внешнем потоке. Уже в дальнейшем было доказано, что данный пограничный слой является турбулентным, и этот факт существенно влияет на его характеристики. Теория турбулентности является сравнительно молодой и постоянно развивается: учеными продолжают разрабатываться новые подходы к изуче-

нию данного явления и новые модели, обеспечивающие лучшее понимание его отдельных свойств [19, 21].

Наиболее популярными все же остаются три подхода при расчете турбулентности [19]:

- Прямое численное моделирование турбулентности 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).

Также, используются различные смешанные подходы, которые являются комбинациями трех вышеизложенных методов.

Подход, при котором к численному исследованию задач турбулентного движения жидкостей и газов применяется прямое численное решение уравнений Навье–Стокса без осреднений и дополнительных предположений, носит название DNS.

Для использования данного подхода необходимы немалые вычислительные ресурсы (из-за того, что размер расчетной сетки должен позволять «разрешить» наименьшие из вихревых структур), а возможность применения ограничивается упрощенной геометрией и сравнительно малыми числами Рейнольдса. При предположении, что имеет место изотропная и однородная турбулентность, и для решения задачи используется равномерная сетка, количество узлов в ней для трех измерений должно быть пропорционально кубу числа Рейнольдса, который считается по величинам пульсации скорости и интегрального масштаба турбулентности. Результаты решения такой задачи должны содержать в себе большое количество информации о течении [50]. Информацию, которая получена из исследований подходом DNS, чаще используется для изучения полуэмпирических моделей турбулентности и ламинарно-турбулентного перехода, а также для улучшения методов управления турбулентностью.

Если сравнивать DNS и LES, то второй подход требует меньших вычислительных затрат, так как не производит расчет мелких вихрей. Это приводит к тому, что имеют место более крупные разностные сетки и временные шаги.

Идея LES подхода в том, что происходит частичное осреднение уравнений Навье-Стокса так, что крупные энергосодержащие вихри с размерами, начиная от макроразмеров потока до вихрей, соответствующих инерционному интервалу рассчитываются как в методе DNS, а влияние мелких диссипативных вихрей учитывается в уравнениях движения вязкой жидкости дополнительными напряжениями. Эти напряжения рассчитываются по простым зависимостям, полученным из теории локально изотропной турбулентности [20].

Использование такого подхода позволяет экономить вычислительные ресурсы, а также, может быть оправдано с практической точки зрения – так как во многих прикладных задачах требуется знать средние характеристики потока: среднюю по времени скорость, расход, температуру и т.д.

Количество узлов в LES составляет всего 5% от количества узлов в DNS. Но основной проблемой, как в LES, так и в DNS методах, остается определение производных для разрешения мелких масштабов [19].

Осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса используются в методе RANSE. Основная идея метода в том, что в результате осреднения по времени в полученных уравнениях появляется тензор вязких напряжений Рейнольдса, который нельзя выразить через средние характеристики потока. Это приводит к тому, что количество неизвестных превышает число уравнений, и система оказывается незамкнутой. Попытки замыкания системы без дополнительных гипотез приводят к цепочке уравнений Фридмана–Келлера, которая может быть ликвидирована лишь с помощью какой-либо полуэмпирической теории турбулентности. Термин «полуэмпирическая теория» отражает тот факт, что все модели в рамках этого подхода обязательно содержат константы, значения которых должны определяться из опытов [32,58].

Часть полуэмпирических моделей турбулентности оперирует понятием «эффективная вязкость», являющуюся суммой молекулярной и турбулентной вязкости. Что касается последней величины, то в соответствии с идеей Буссинеска она связывает тензор турбулентных напряжений Рейнольдса с тензором скоростей деформации, записанным в терминах осредненных скоростей [20].

Наиболее простым способом получения значения эффективной вязкости является ее задание и их замыкания с помощью полуэмпирических моделей турбулентности [32].

Имеются модели, в которых турбулентная вязкость используется как скалярная величина, подчиняющаяся обобщенному закону переноса.

Отдельную группу образуют подходы, использующие для вычисления турбулентной вязкости введенное Прандтлем понятие длины пути смешения турбулентного моля, под которой понимают расстояние, проходимое турбулентным молекулом поперек потока, прежде чем происходит его смешение с окружающей жидкостью. На протяжении всего пути смешения турбулентный импульс, теплосодержание, масса остаются постоянными. В конце этого пути он мгновенно смешивается с окружающей жидкостью и значение его импульса, теплосодержания, массы пульсационно изменяется.

Наиболее популярными на сегодняшний день моделями, являются двухпараметрические модели, например, так называемая k-ε-модель. Понятие k-ε-модели построено на предположе-

нии о реализации полностью развитых турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости при больших числах Рейнольдса [19,58].

Турбулентная вязкость в этом случае рассчитывается с помощью дифференциальных уравнений для кинетической энергии турбулентных пульсаций k и скорости ее диссипации ε , отнесенных к единице массы.

Начиная с А.Н. Колмогорова, все большее применение находят модели с использованием уравнения для средней частоты турбулентных пульсаций ω . Вторым параметром в данном случае является скорость диссипации на единицу турбулентной энергии, имеющей размерность $1/c$ и называлась средней частотой, на которой происходит диссипация энергии [19].

В результате постановки задачи с использованием модели Рейнольдсовых напряжений для трехмерных задач требуется решить 7 дополнительных дифференциальных уравнений в частных производных.

2.3 Численное моделирование с помощью программно вычислительного комплекса FloEFD

FloEFD – простой в освоении и полностью интегрированный в САД-системы пакет для решения задач гидрогазодинамики и теплообмена. Процесс проектирования часто сопровождается решением задач гидрогазодинамики и теплообмена. Данный CFD-пакет разработан специально для исследований инженеров-конструкторов. пакет FloEFD позволяет производить расчеты непосредственно в САД-системах благодаря понятному графическому интерфейсу. Сама концепция вычислительной системы ориентирована на конструкторские расчеты. По отзывам большинства пользователей пакета для начала работы во FloEFD достаточно всего 8 часов.

Компании, занимающиеся разработками в различных отраслях, начиная от авиастроения и заканчивая производством климатического оборудования, используют FloEFD для:

- выполнения многовариантных расчетов, анализа и оптимизации параметров разрабатываемой конструкции, а также минимизации риска возникновения ошибок на этапе проектирования;
- уменьшения затрат на изготовление промышленных образцов (прототипов) и снижения, таким образом, общей стоимости производства.

Технология FloEFD базируется на тесной интеграции расчетного ядра в наиболее распространенные САД-системы. Поэтому позволяет при проектировании минимизировать ошибки, связанные с различной интерпретацией геометрии при конвертации модели из других форматов.

Разработка начинается с создания (либо загрузки) трёхмерной геометрической модели. Обоснование выбора ее параметров строится на расчете использующихся эксплуатационных характеристиках. Далее, используется специальный инструмент, позволяющий быстро и гибко настраивать параметры расчетной сетки.

FloEFD позволяет моделировать следующие технологические процессы:

- динамику жидкостей, газов и частиц твердого тела в движущейся среде;
- аэродинамику во всем диапазоне изменения скоростей потока;
- многокомпонентные течения;
- теплообмен излучением, теплопроводность и конвекцию;
- конденсацию и фазовые переходы; горение; кавитационные эффекты;
- вращение.

Сформулировать основные достоинства программы FloEFD можно в следующих базисах:

- простая реализация, не требующая вспомогательных процедур сопровождения на этапах проектирования;
- понятный интерфейс;
- обширный выбор моделей физических процессов;
- библиотека физических свойств различных веществ, которую имеет возможность пополнить пользователю;
- возможная автоматизация (серии расчетов при изменении определенных параметров).

Основные задачи, решение которых можно получить с помощью программно-вычислительного комплекса FloEFD:

- 1 Определение распределений давления на элементах конструкции, сил и моментов, аэродинамических коэффициентов;
- 2 Определение тепловых потоков, температур отдельных элементов конструкций;
- 3 Взаимодействие струй с поверхностями;
- 4 Определение расходов, перепадов давлений, гидравлических сопротивлений;
- 5 Течения через пористые конструкции;
- 6 Задачи свободной и вынужденной конвекции в замкнутых объемах;
- 7 Задачи с учётом сопряженного и лучистого теплообмена;
- 8 Определение трёхмерных полей течения;
- 9 Движение частиц из различных материалов в потоке.

Ключевые идеи технологии FloEFD выглядят следующим образом:

- Полная интеграция с CAD;
- Сочетание полных моделей 3D моделирования и инженерных методик;
- Весь цикл работ (задание исходных данных, проведение расчёта и обработка результатов) проходит непосредственно в среде CAD (Creo, CATIA, NX, Solid Works);

Компания Mentor Graphics выпускающая программно-вычислительный комплекс (далее – ПВК) FloEFD была основана в 1980 году в Московском физико-техническом университете, сегодня штаб-квартира находится в г. Вильсонвилл, Орегон, США. На мировой рынок компания вышла в 1999 году, сейчас уже порядка 70000 коммерческих пользователей. Каждый год выпускается обновленный сервис пак программы. Компания осуществляет поддержку, обучение и консалтинг по всему миру. Основная часть разработчиков находится в России, г. Москва.

Расчетная сетка разрабатывалась более 20 лет назад, и продолжает усовершенствоваться с каждой версией. Сетка является прямоугольной, наиболее точным численным методом решения уравнений гидрогазодинамики при прямоугольной сетке является МКО. Описание МКО было представлено в предыдущей главе.

Для определения оптимальной плотности сетки имеется возможность проведения нескольких тестовых расчетов, которые не займут много времени.

Имеется возможность использования адаптации сетки Solution Adaptive Refinement (далее SAR), которая позволяет получить ту же точность расчета, но со значительно меньшим числом ячеек.

SAR позволяет получить точное решение для областей, где имеет место большой градиент потока, например для пограничных слоев, а также значительно сократить время на построение качественной сетки, решение численной задачи и обработку результатов.

Так как процесс генерации является неотъемлемой частью любого численного моделирования, то от качества сетки напрямую зависят точность, сходимость и скорость решения. Поэтому время, которое потрачено на построение геометрии расчетной области и сетки, является лимитирующим фактором для всего расчета.

С помощью ПВК FloEFD можно проводить моделирование сложных металлургических процессов. Также, данный комплекс используется в авиационной и нефтегазовой промышленности, медицине и т.п. Но, хотелось бы отметить, что в России, особенно в области металлургии, при разработке или модернизации печных агрегатов, ПВК FloEFD (и вообще CFD-пакеты) пока не получили широкого распространения.

2.4 Исходные данные и принятые допущения. Определение начальных и граничных условий

В данной работе исследуется аэродинамика и тепловое состояние струй высокотемпературного азота, взаимодействующей с твердой поверхностью.

Струи азота «атакуют» стальную поверхность. При струйном конвективном нагреве основное количество теплоты к металлу передается конвекцией и основной количественной характеристикой интенсивности этого процесса является коэффициент конвективной теплоотдачи от высокотемпературной струи азота к нагреваемой поверхности.

В действительности нагрев металла происходит с помощью двух процессов - излучения и конвекции. Лучистую составляющую в современных печных устройствах в дальнейшем увеличить не представляется возможным, поэтому использование в качестве устройства для нагрева металла установки на основе нагрева струями высокотемпературного азота способствовало бы увеличению, как конвективной составляющей, так и возможности отказаться от использования защитной атмосферы.

Схема исследуемой модели представлена на рисунке 19, длина и ширина 1000 мм, толщина нагреваемого металла 1 мм, диаметр сопла истечения азота 50 мм, высота от сопла до нагреваемого металла изменяется от 5 до 25 h/d_0 , возможность выхода азота из камеры имеется в 4 стороны.

Температура истекающего азота $T_0 = 700$ °С; Начальная температура в камере исследования и температура металла - 20 °С; Скорость истечения азота 30, 100 м/с; материал металла – Сталь Ст3. Коэффициент теплопроводности стали Ст3 представлен в таблице 3. Физические свойства азота представлены в таблице 4 [24].

Таблица 3 - Коэффициент теплопроводности стали Ст3

Температура, °С	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К
200	54
400	45
600	34
800	30

Таблица 4 - Физические свойства газообразного азота

Температура, °С	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	Удельная теплоемкость, Дж/кг·К	Коэффициент кинематической вязкости, 10^6 , м ² /с
200	18,3	1053	34,1

Температура, °С	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	Удельная теплоемкость, Дж/кг·К	Коэффициент кинематической вязкости, $10^6, \text{ м}^2/\text{с}$
400	32,7	1090	61,5
600	44,6	1140	93,5
800	54,8	1177	130,7

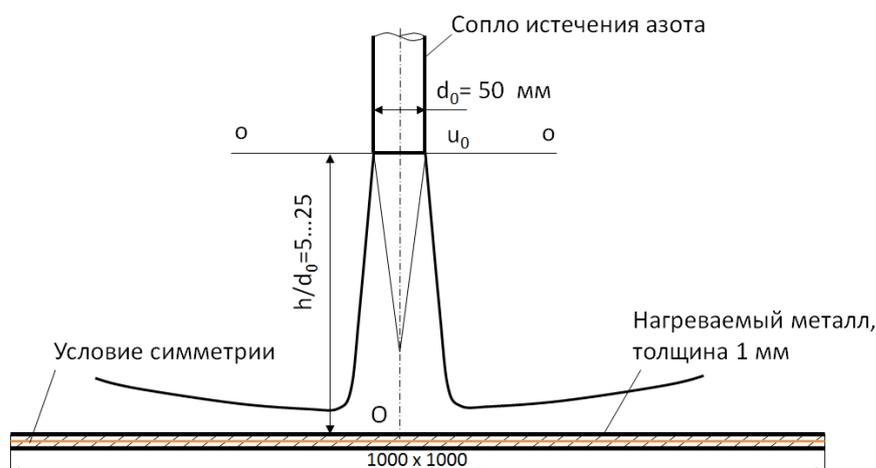


Рисунок 19 - Схема исследуемой модели аэродинамики и теплового состояния струи, взаимодействующей с плоской поверхностью

Изменение теплофизических свойств металла приравнено функцией кусочно-линейного вида.

Из допущений, хотелось бы отметить следующие:

- не рассматривается процесс нагрева азота, считается, что последний подается с заданной температурой;
- движение азота считаем турбулентным, для моделирования турбулентности используется стандартная $k-\epsilon$ модель турбулентности.

2.4.1 Решаемые дифференциальные уравнения

Модель исследования возможно описать системой из уравнения неразрывности, уравнения энергии для азота, уравнения теплопроводности нагрываемого металла, уравнениями Навье-Стокса для трех координат.

Так как полученная система уравнений, описывающая процессы не замкнута и не имеет точного аналитического решения, ее необходимо дополнить уравнениями переноса субстанции

для кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ε стандартной модели турбулентности k - ε . Выбор именно этой модели турбулентности обусловлен тем, что она является наиболее экономичной в плане компьютерных ресурсов, а также является достоверной в плане полученных результатов.

Принимается стандартная k - ε модель турбулентности с константами:

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

где σ_k и σ_ε - турбулентные числа Прандтля для k и ε ; $\sigma_k = 1,0$ и $\sigma_\varepsilon = 1,3$.

$$G_k = -\rho \bar{u}' u' \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \rho \bar{u}' v' \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) - \rho \bar{v}' v' \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \text{слагаемое, описывающее генерацию кинетической энергии турбулентности.}$$

Генерация турбулентности за счет плавучести.

$$G_b = -\beta g \frac{\mu_T}{\text{Pr}_T} \frac{\partial T}{\partial y}$$

Для стандартной k - ε модели число $\text{Pr}_T = 0,85$.

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} - \text{динамический коэффициент турбулентной вязкости.}$$

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p - \text{величина, характеризующая затухание деформации растяжения/сжатия.}$$

$$M_T = \frac{k}{w_{3B}^2} - \text{турбулентное число Маха.}$$

$$\text{Константы: } C_{1\varepsilon} = 1,44; \quad C_{2\varepsilon} = 1,92; \quad C_{3\varepsilon} = \tanh \left| \frac{v}{u} \right|; \quad C_\mu = 0,09.$$

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

Уравнение Навье-Стокса

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

где $\mu_{eff} = \mu + \mu_T$ - эффективный коэффициент динамической вязкости (с учетом турбулентного переноса).

Уравнение энергии

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{T}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho\bar{u}\bar{T}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho\bar{v}\bar{T}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho\bar{w}\bar{T}) = \\
 \frac{\partial}{\partial x}\left(\rho a_{eff} \frac{\partial\bar{T}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\rho a_{eff} \frac{\partial\bar{T}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\rho a_{eff} \frac{\partial\bar{T}}{\partial z}\right)
 \end{aligned} \tag{4}$$

где $a_{eff} = \left(a + \frac{\nu_T}{Pr_T}\right)$ - эффективный коэффициент динамической вязкости (с учетом турбулентного переноса).

Выводы по главе 2

Рассмотрены возможные варианты методов исследования процесса. Выбран метод численного моделирования для дальнейшего исследования.

Рассмотрены возможные программно-вычислительные комплексы для численного моделирования процесса исследования. Выбран программно-вычислительный комплекс FloEFD, обладающий всеми необходимыми возможностями для постановки задачи и моделирования.

Рассмотрены возможные подходы моделирования турбулентных течений для исследования методами численного моделирования. Выбрана k-ε модель турбулентности, так как она является наиболее экономичной в плане компьютерных ресурсов и достоверной в плане полученных результатов.

Разработаны 3D-модели исследуемого процесса, заданы начальные и граничные условия.

Созданные модели, позволяют получить результаты исследования газодинамики и теплообмена при взаимодействии как одиночной струи азота, так и системы струй азота с нагреваемым металлом.

3 АЭРОДИНАМИКА И ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ОДИНОЧНОЙ КРУГЛОЙ СТРУИ АЗОТА, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕЙ С ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Изучение аэродинамики и структуры, а также характеристик теплообмена струй, которые взаимодействуют с плоской преградой, являются достаточно любопытными для исследования, и продолжают находить глубокий интерес научной общественности во многих опубликованных работах [17, 18, 100, 102, 110, 111].

Использование струйных течений широко применяется в различных областях техники.

Принято разделять струи на дозвуковые и сверхзвуковые [3, 4].

Дозвуковые высокотемпературные струи используются для плавления стекла, интенсификации сушки, очищения поверхностей от снега и льда, в рекуператорах для интенсификации теплообмена.

Сверхзвуковые высокотемпературные струи используются в авиационных двигателях, при исследовании теплозащитных материалов для летательных аппаратов и защиты стартовых установок при взлете, термического разрушения материалов.

Интенсивность теплообмена при струйном взаимодействии с преградами является выше, чем при остальных способах подвода теплоты к поверхности. Отличительной особенностью данных процессов является то, что они поддаются достаточно простому управлению, так как являются малоинерционными.

Процессы теплообмена при взаимодействии струй с преградами осложнены влиянием градиента давления, высокой степенью турбулентности набегающего потока, а возможно и химическими реакциями [3, 4]. В настоящее время еще продолжается изучение влияния этих факторов на процессы переноса в пограничном слое при натекании струи на преграду.

3.1 Исследование структуры и полей скорости свободной струи

Свободные струи образуются при истечении жидкости из сопел в свободное пространство. Если физические свойства вещества струи одинаковы или незначительно отличаются от физических свойств вещества среды, в которую происходит истечение, то такие струи называются затопленными, в случае же, когда свойства отличаются, то такая струя называется незатопленной [36]. Для упрощения задач было введено предположение о том, что свободная струя состоит из трех участков: начального, переходного и основного. Переходный участок чаще всего не рассматривается, вследствие несформировавшегося поперечного профиля струи, но на данном участке скорость по оси начинает уменьшаться.

На начальном участке, расстоянием 4-6 диаметров от сопла [94], струи скорость на оси струи не изменяется. На основном – скорость на оси струи непрерывно падает [3]. Схема свободной затопленной струи представлена ниже на рисунке 20.

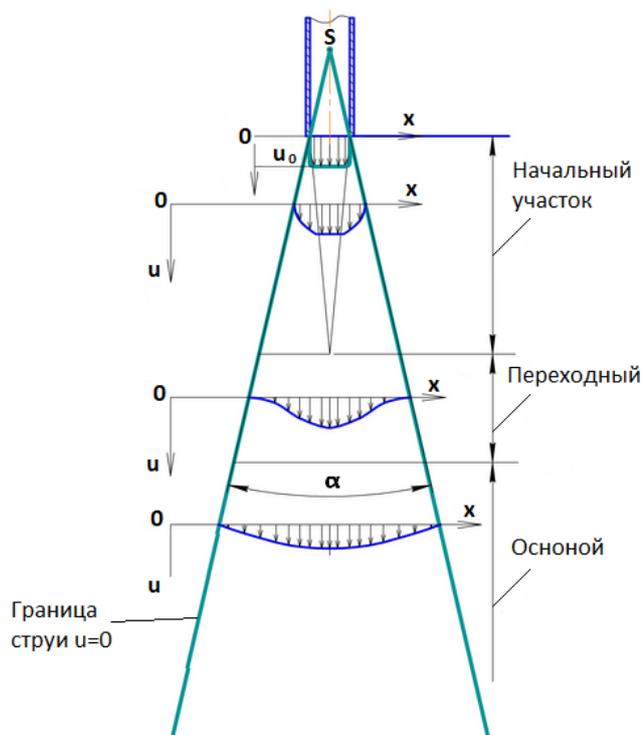


Рисунок 20 – Схема свободной затопленной струи

В данном случае, нахождение границ весьма проблематично, поэтому на практике за границу струи чаще всего принимают поверхность, в каждой точке которой $\bar{u}=0,5\bar{u}_{\max}=0,5\bar{u}_{\text{ось}}$ [94].

Струя может вытекать в неподвижную жидкость либо движущийся с определенной скоростью поток. При малых скоростях, струя после выхода из сопла является ламинарной. При больших скоростях истечения из сопла она становится турбулентной. В современных высокоинтенсивных агрегатах струйные потоки практически всегда являются турбулентными.

При смешении струи с неподвижной жидкостью образуется пограничный слой, ширина которого увеличивается в направлении течения от среза сопла. Это происходит в результате поперечного переноса импульса, что приводит к вовлечению в струю неподвижной окружающей среды. Следовательно, количество жидкости в каждом поперечном сечении струи по мере удаления от сопла увеличивается, а скорость падает.

Важным свойством свободной струй является прямолинейность их границ. Из-за того, что свободные струйные течения представляют собой частный случай свободного пограничного слоя, давление в поперечном сечении таких течений остается постоянным, и равно давлению

в окружающей среде. Это приводит к отсутствию сил трения на границе. Связано это с тем, что на указанных границах обнуляется не только скорость, но и ее производная по поперечной координате [36]. Это приводит к отсутствию результирующего потока импульса для любого участка свободной струи, и как следствие, по длине струи сохраняется поток импульса. Это свойство заложено в основу интегральных методов расчета струйных течений.

Так как расширение струи происходит по линейному закону, но вводится понятие угол расширения. Для осесимметричной струи составляющий 5° . Используя формулу для основного участка круглой струи, получено условие для ламинарности ($\varepsilon = \nu$) потока: $Re < 80$ [94].

$$\bar{u}_0/\bar{u}_{\max} = 6,4 \cdot d_0/x \quad (5)$$

По имеющимся исследованиям, в осесимметричной струе полностью развитое турбулентное движение имеет место в области ядра струи, до радиуса, где $\bar{u}_0/\bar{u}_{\max} = 0,5$.

Одной из важных характеристик турбулентной струи является длина. Принято считать, что длина струи – это расстояние на котором осевая скорость составляет примерно 5-10 % от начальной скорости.

На сегодня, используя формулу Шлихтинга (6) [94], полученную для воздушной струи имеется возможность описать профиль скорости в основном участке осесимметричной струи.

$$\bar{u}/\bar{u}_{\max} = f(n) = (1 - n^{3/2})^2 \quad (6)$$

где $n = y/r$ – расстояние от точки до оси струи со скоростью u .

Из данных, представленных выше, с точки зрения математики, турбулентная струя определяется распределением скорости (в поперечном сечении), а также максимальной скоростью по оси струи на всем протяжении.

3.2 Исследование структуры и полей скорости струи, взаимодействующей с поверхностью

Для газодинамических процессов, которые протекают как в одиночной струе, так и системе струй, взаимодействующих с металлом, довольно сложно получить аналитическое решение. Сложности расчета усугубляются тем, что, струя при взаимодействии с поверхностью как таковая исчезает и с поверхностью взаимодействует настильный (веерный) поток (область IV

на рисунке 21), 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 21. 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 22.

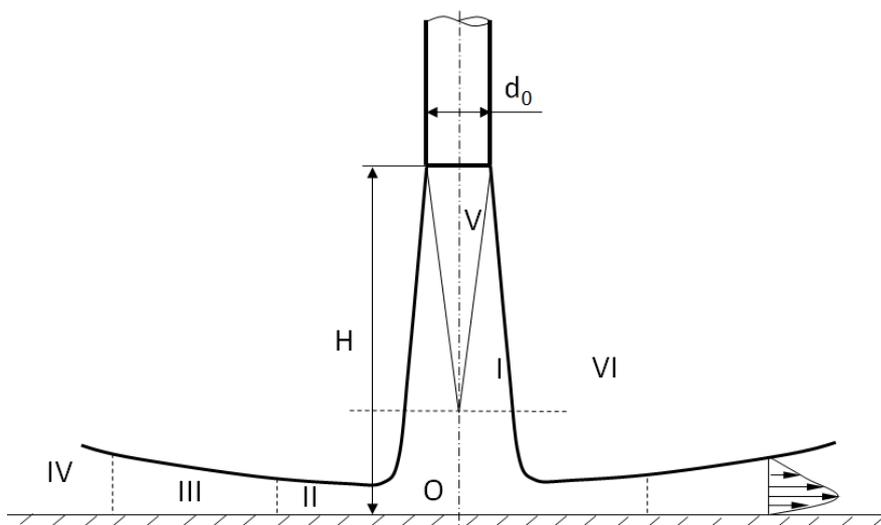


Рисунок 21 - Области течения при взаимодействии с поверхностью

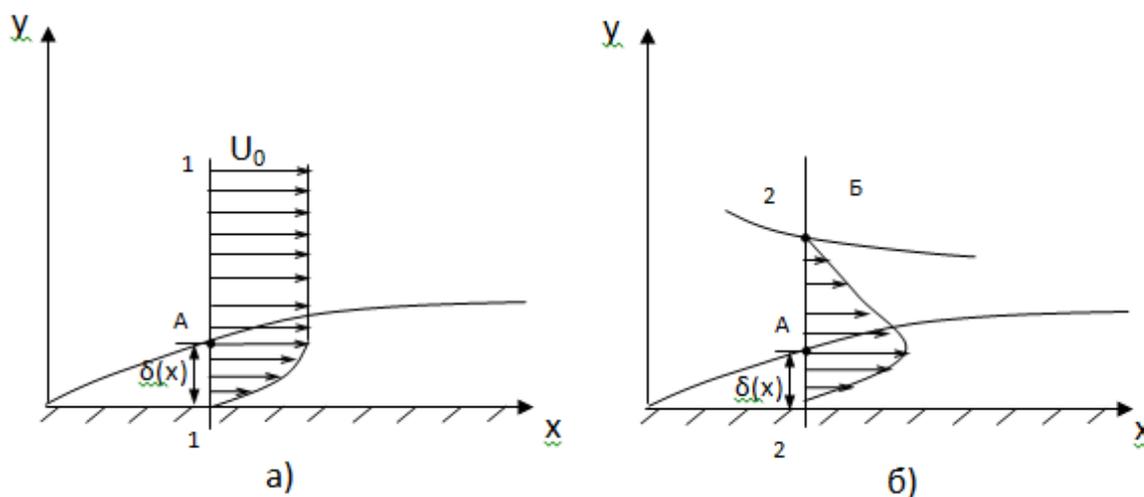


Рисунок 22 - Структура гидродинамического пограничного слоя: а - поток бесконечен в направлении координаты y , б – веерный поток

Вблизи поверхности формируется гидродинамический пограничный слой $\delta(x)$, однако величина скорости в нем изменяется от нуля на поверхности до некоторого максимального значения. За пределами границы $\delta(x)$ скорость уменьшается снова до нулевого значения (точка Б), выше которой находится неподвижная среда (область VI на рисунке 21). Толщина веерного потока между точками А и Б характеризуется тем, что, во-первых, она изменяется вниз по течению и, во-вторых, в её пределах происходит перестройка профиля скорости движения газа. Совершенно ясно, что такая структура течения имеет место в области уже сформировавшегося веерного потока. Картина течения является более сложной в переходной области от струйного течения к веерному потоку (области II и III на рисунке 21).

Рассмотренные отличия позволяют сделать, по крайней мере, два вывода: 1 – расчете конвективной теплоотдачи при взаимодействии струи с граничной поверхностью представляется более сложным и 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. Аналитический расчет характерных для веерного потока величин не представляется возможным из-за сложности характера течения, поэтому актуальной задачей является исследование аэродинамики и теплового состояния газа внутри веерного потока.

3.2.1 Влияние отношения h/d и скорости истечения азота на аэродинамику и структуру

В данном параграфе основными определяющими величинами являлись расстояние от среза сопла до поверхности h металла и скорость истечения азота из сопла U_0 . Варианты исследования представлены в таблице 5. Диаметр сопла – 50 мм, температура истечения азота T_0 – 700 °С. Струя является осесимметричной.

Таблица 5 - Варианты моделирования 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

Ниже приведены результаты решения сформулированной задачи. На рисунках 23 и 24 представлены структура течения и поля скоростей для варианта 2.

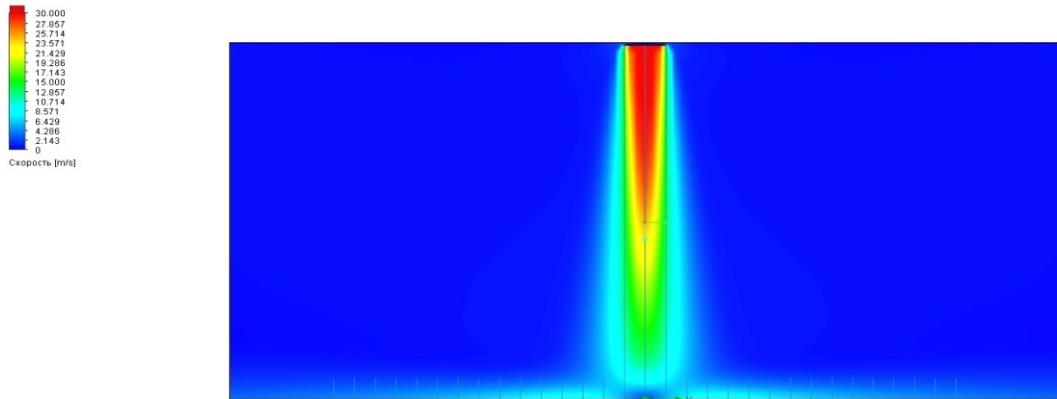


Рисунок 23 – Структура течения струи азота при взаимодействии с поверхностью при $U_0 = 30$ м/с, $T = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$

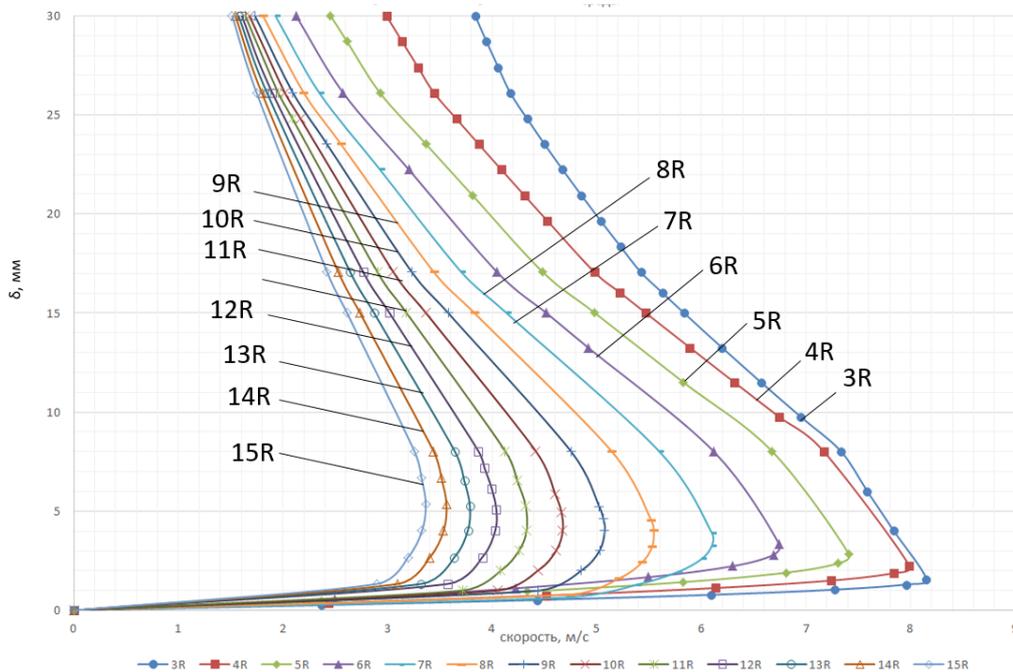


Рисунок 24 - Распределение скорости в гидродинамическом пограничном слое при $U_0 = 30$ м/с, $T_0 = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$

Как следует из рисунка 23, 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. На рисунке 23 отчетливо видна область начального участка струи, в которой сохраняется наибольшая скорость движения азота. По мере растекания веерного потока скорость газа снижается. Следует отметить, что при выбранных условиях скорость веерного потока существенно ниже начальной скорости истечения газа из сопла, что может отразиться на интенсивности кон-

вективной теплоотдачи. На рисунке 24 представлены кривые распределения скорости газа по толщине веерного потока при различных значениях текущего радиуса потока. Следует отметить, 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.

На рисунках 25 и 26 показана структура течения и поля скоростей при $h/d_0 = 5$, т.е. преграда находится в конце начального участка струи. Скорости истечения азота из сопла 30 м/с (вариант 1). Видно, что высокие скорости течения наблюдаются и в области критической точки (точки пересечения оси струи с поверхностью).

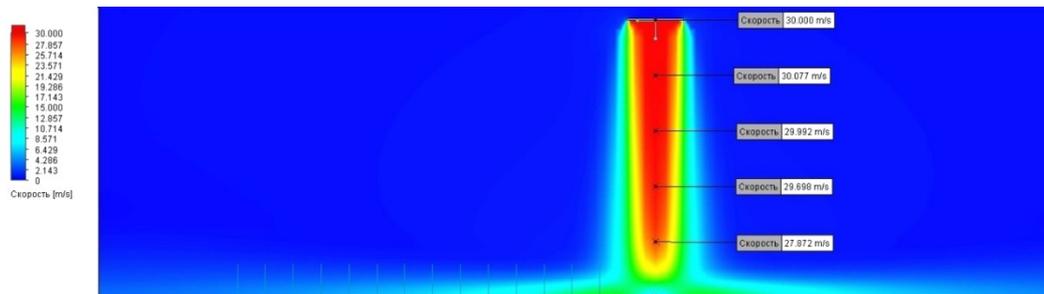


Рисунок 25 – Структура течения струи азота при взаимодействии с поверхностью при $U_0 = 30$ м/с, $T_0 = 700$ °C, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 5$

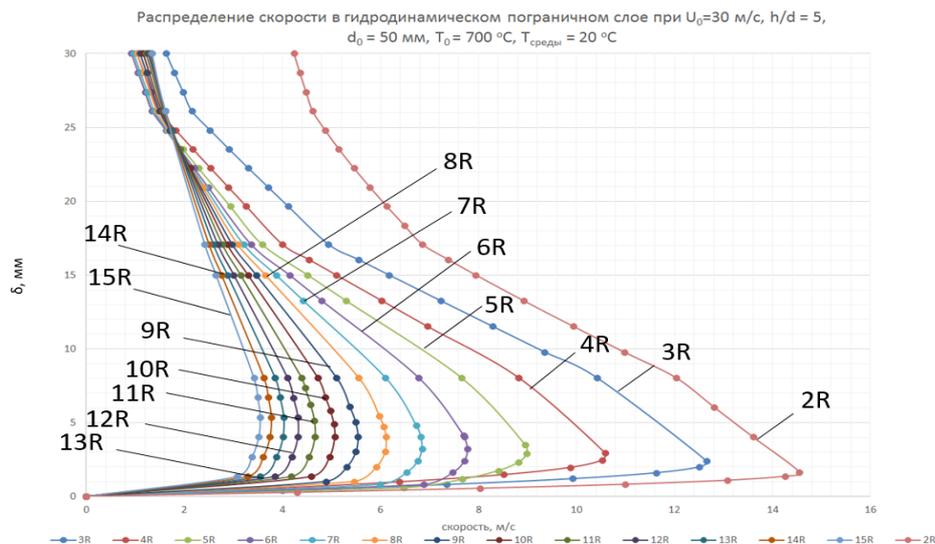


Рисунок 26 - Распределение скорости в гидродинамическом пограничном слое при $U_0 = 30$ м/с, $T_0 = 700$ °C, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 5$

Увеличение относительного расстояния от среза сопла изменяет картину течения. На рисунке 27 при $h/d_0 = 25$ (вариант 3) видно, что струя распространяется практически как свободная, веерный поток не имеет выраженного характера.

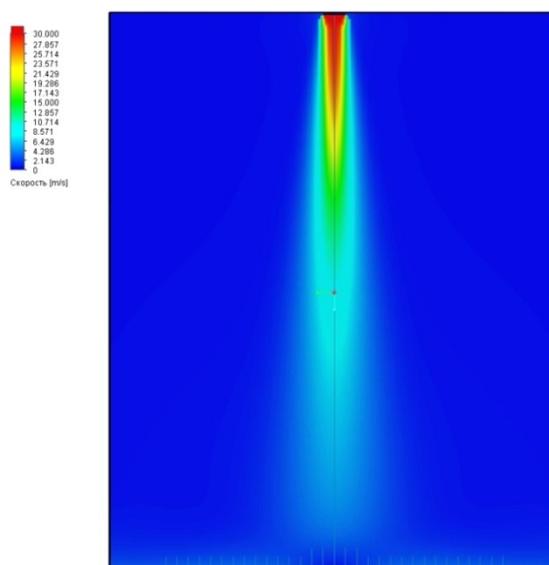


Рисунок 27 – Структура течения струи азота при взаимодействии с поверхностью при $U_0 = 30$ м/с, $T_0 = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 25$

Картина развития течения при более высоких скоростях показана на рисунках 28 и 29 (вариант 4), рисунках 30 и 31 (вариант 5) и рисунке 32 (вариант 6). Увеличение начальной скорости истечения газа приближает к поверхности область более высоких скоростей, как в самой струе, так и в веерном потоке. Кроме того, как это видно на рисунках 29 и 31, 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.

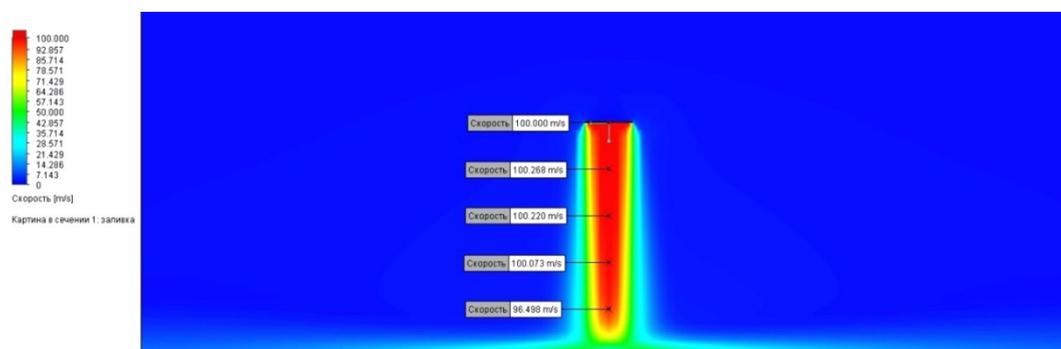


Рисунок 28 – Структура течения струи азота при взаимодействии с поверхностью при $U_0 = 100$ м/с, $T_0 = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 5$

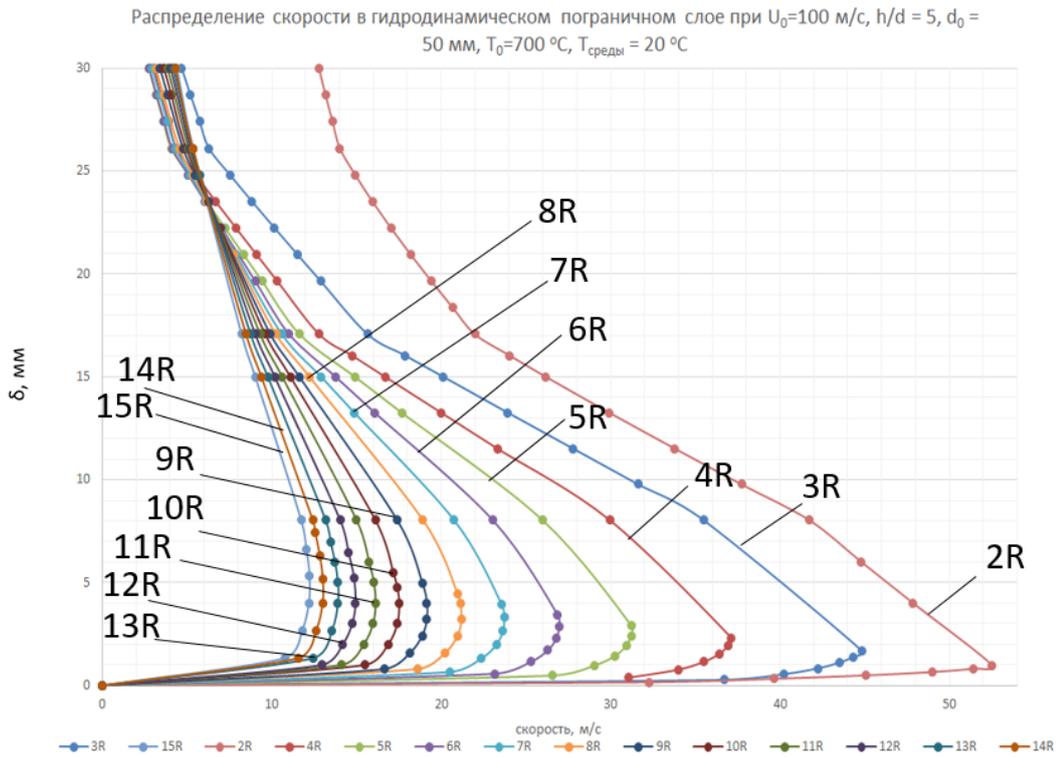


Рисунок 29 - Распределение скорости в гидродинамическом пограничном слое при $U_0 = 100$ м/с, $T_0 = 700$ °C, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 5$

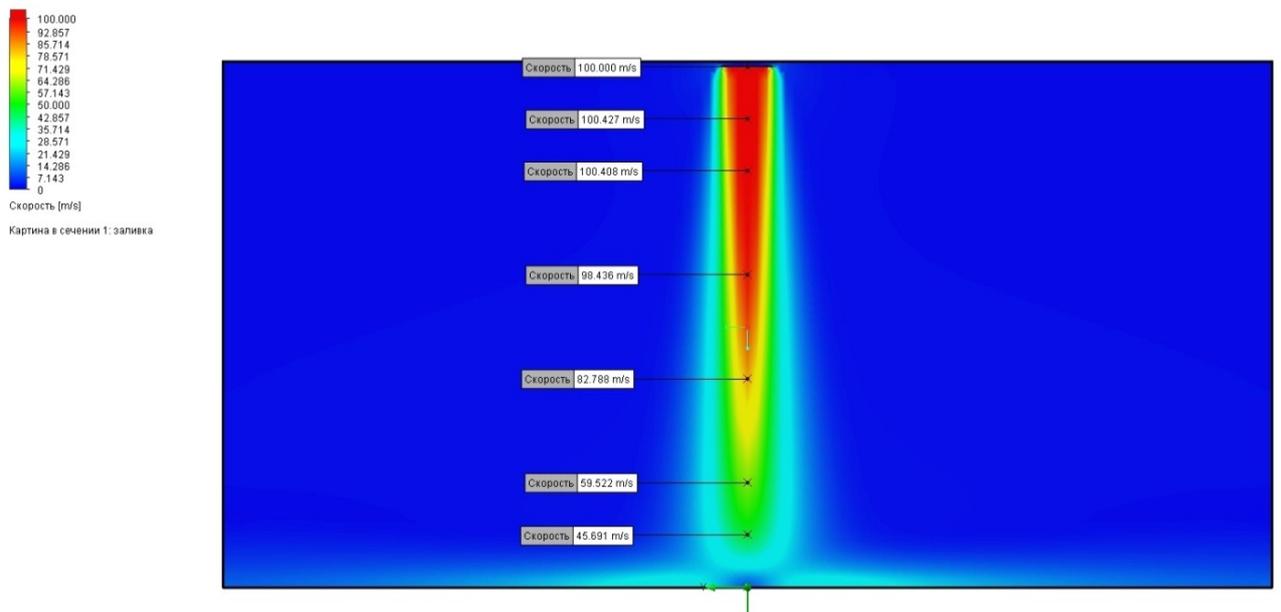


Рисунок 30 – Структура течения струи азота при взаимодействии с поверхностью при $U_0 = 100$ м/с, $T_0 = 700$ °C, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$

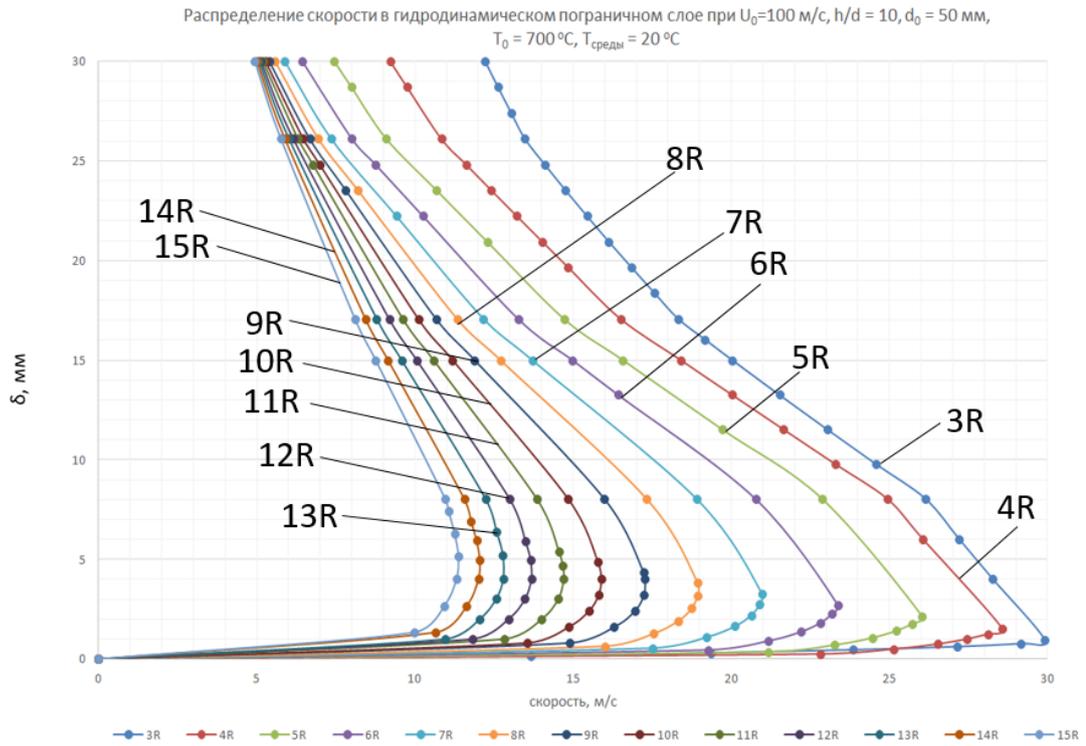


Рисунок 31 - Распределение скорости в гидродинамическом пограничном слое при $U_0 = 100$ м/с,
 $T_0 = 700$ °C, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$

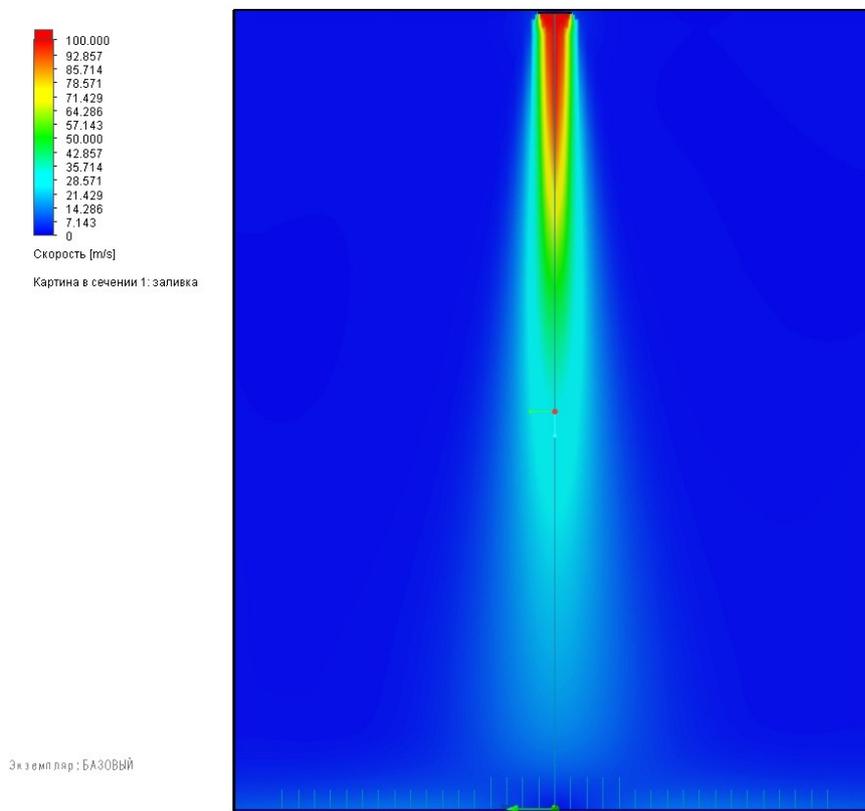


Рисунок 32 – Структура течения струи азота при взаимодействии с поверхностью при $U_0 = 100$
 м/с, $T_0 = 700$ °C, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 25$

Так как в вариантах 3 и 6 влияние поверхности на струю практически не ощущается, для дальнейшего исследования целесообразно использовать соотношение h/d_0 равное 15.

Ниже, на рисунках 33, 34 и 35 представлено распределение скорости в поперечном сечении струи для варианта 1, 2 и 3. Так как струя является осесимметричной, то для удобства восприятия на графике изображаем распределение скорости от оси струи вглубь по радиусу.

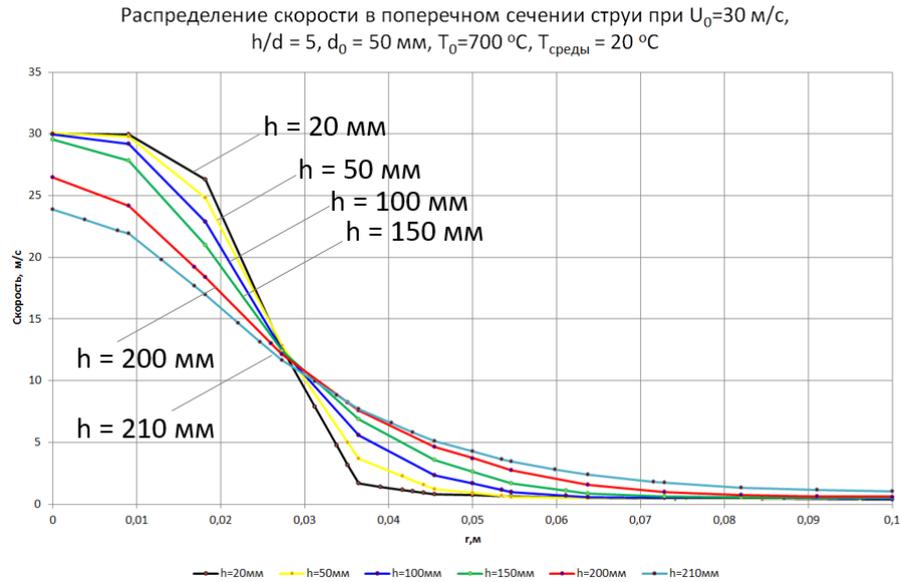


Рисунок 33 - Распределение скорости в поперечном сечении струи при $U_0 = 30$ м/с, $T_0 = 700$ °C, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 5$

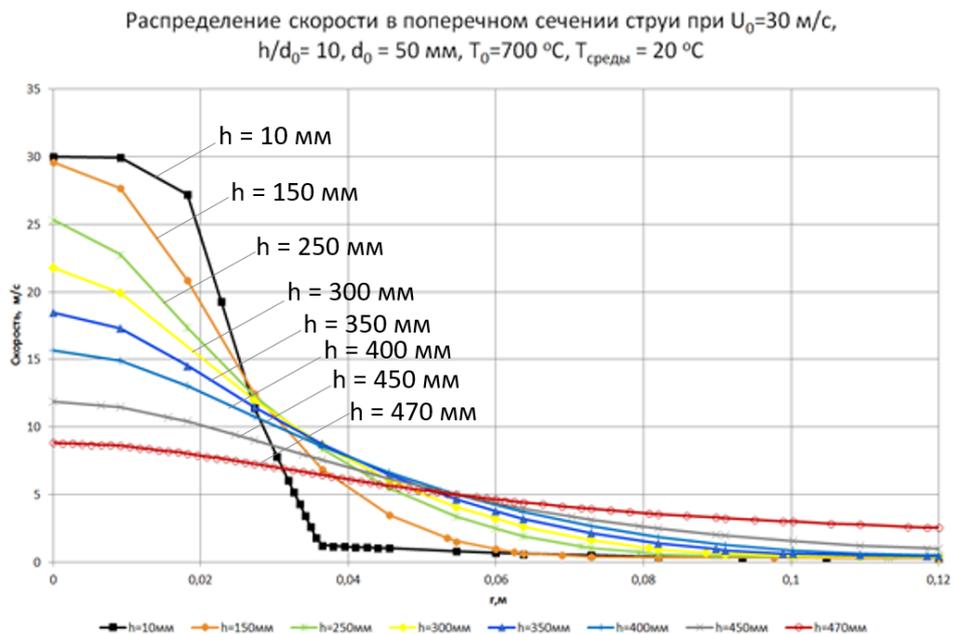


Рисунок 34 - Распределение скорости в поперечном сечении струи при $U_0 = 30$ м/с, $T_0 = 700$ °C, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$

Распределение скорости в поперечном сечении струи при $U_0=30$ м/с,
 $h/d = 15$, $d_0 = 50$ мм, $T_0 = 700$ °С, $T_{\text{среды}} = 20$ °С

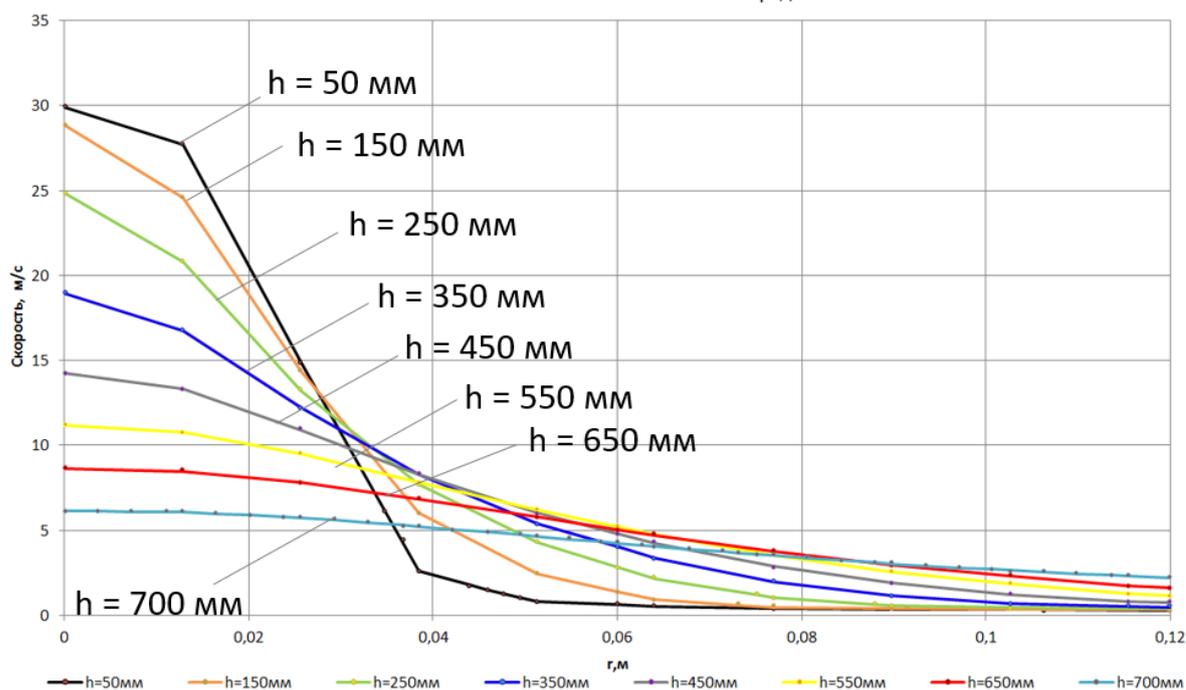


Рисунок 35 - Распределение скорости в поперечном сечении струи
при $U_0 = 30$ м/с, $T_0 = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 15$

Из графиков видно, что при $h < 10$ мм для каждого из вариантов эжектирующее действие струи проявляется весьма незначительно, а область начального участка струи заметно выражена. По мере удаления от сопла происходит раскрытие струи, эжекция 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.

Ниже, на рисунках 36, 37 и 38 представлено распределение скорости в поперечном сечении струи для варианта 4, 5 и 6. 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.

Распределение скорости в поперечном сечении струи при $U_0=100$ м/с,
 $h/d = 5$, $d_0 = 50$ мм, $T_0=700$ °С, $T_{\text{среды}} = 20$ °С

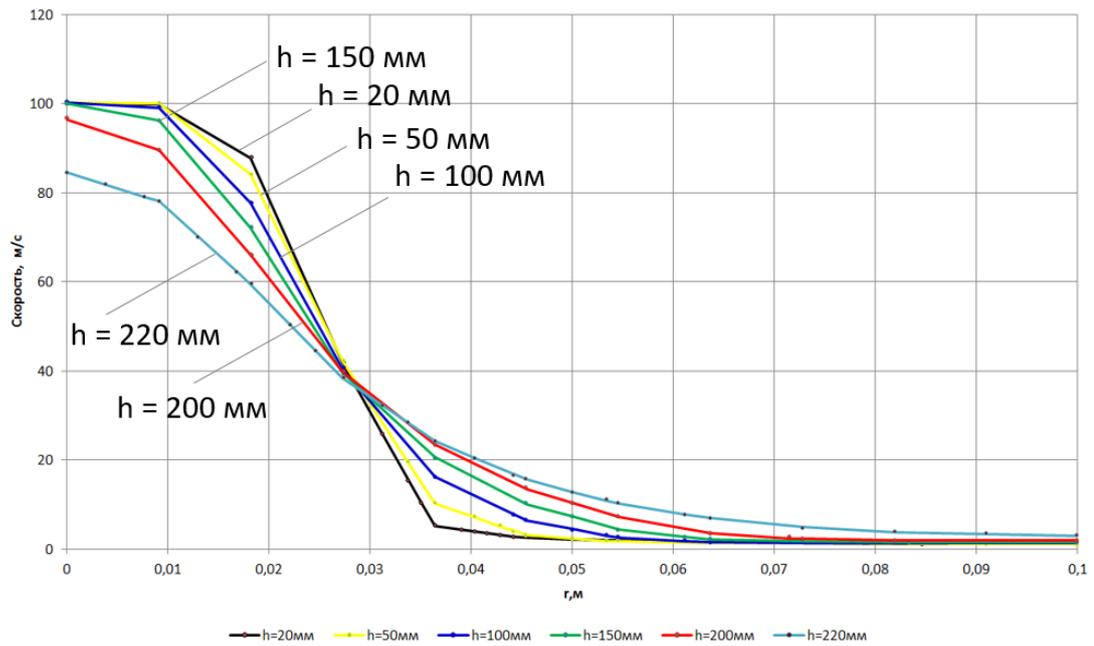


Рисунок 36 - Распределение скорости в поперечном сечении струи
при $U_0 = 100$ м/с, $T_0 = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 5$

Распределение скорости в поперечном сечении струи при $U_0=100$ м/с,
 $h/d = 10$, $d_0 = 50$ мм, $T_0=700$ °С, $T_{\text{среды}} = 20$ °С

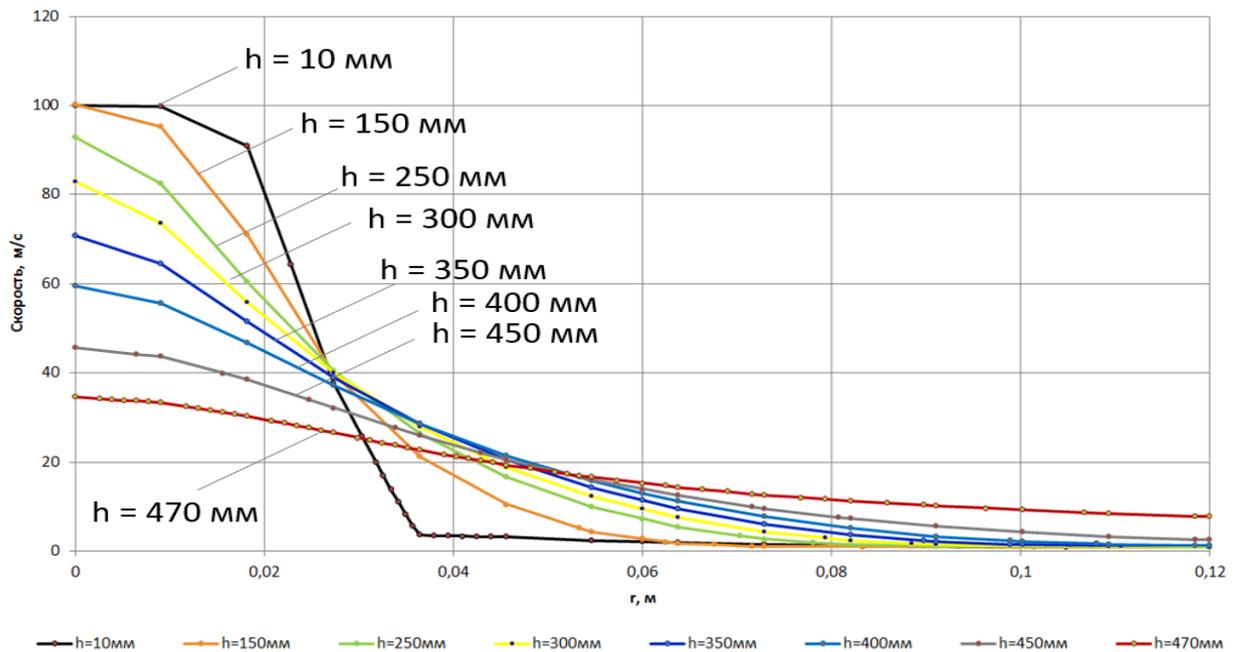


Рисунок 37 - Распределение скорости в поперечном сечении струи
при $U_0 = 100$ м/с, $T_0 = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$

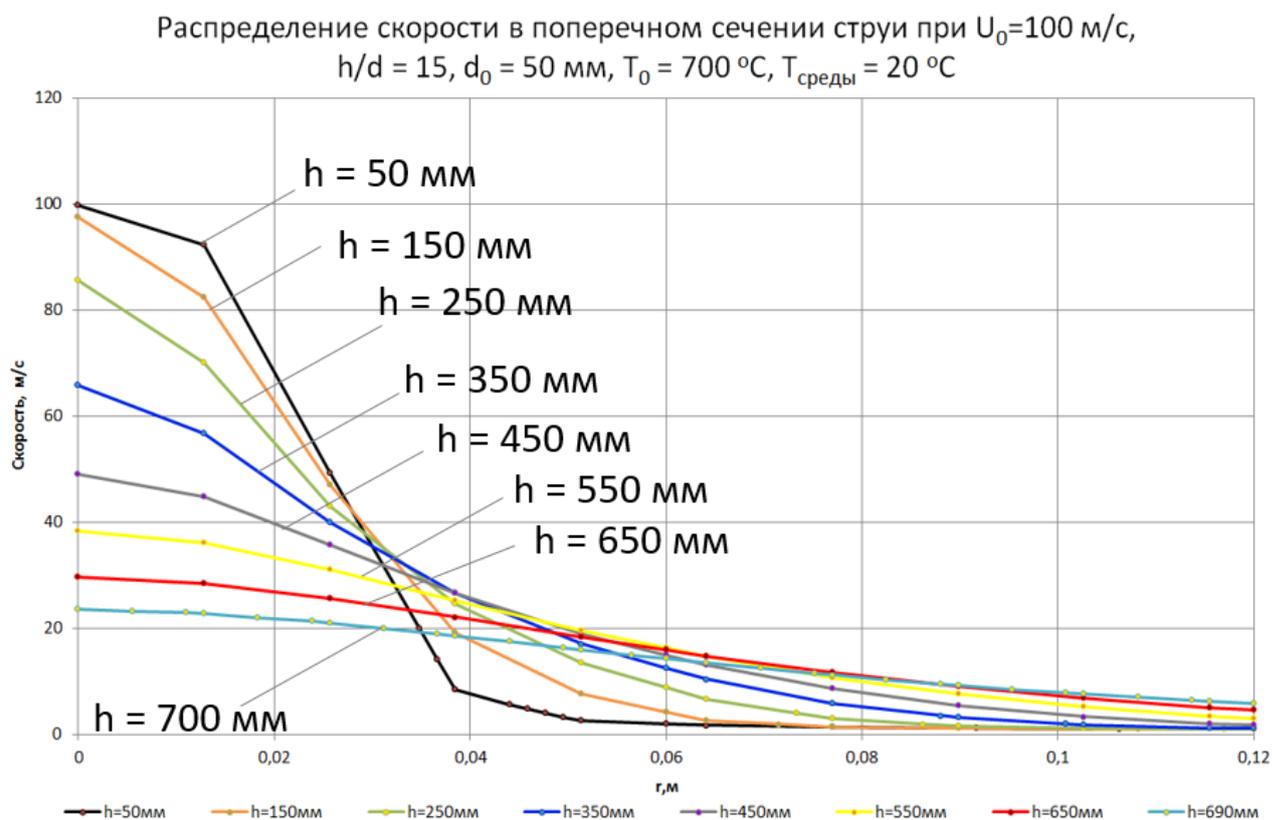


Рисунок 38 - Распределение скорости в поперечном сечении струи
при $U_0 = 100$ м/с, $T_0 = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 15$

3.2.2 Влияние температурного фактора на аэродинамику и структуру

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 [Таблица № 4. Физические свойства азота, глава 2.5].

Физически это может проявляться возможной сменой режимов движения в потоке, изменением сил вязкостного трения и, как следствие, изменением инжектирующей способности струи после истечения газа из сопла. Изменение аэродинамических характеристик струйной части потока в свою очередь определяет интенсивность конвективной теплоотдачи на границе раздела веерный поток – твердая поверхность [67].

Изменение температуры вытекающего из сопла газа и газа в веерном потоке вызвано различными причинами. В струйной части потока формирование температурных полей в поперечном сечении в основном определяется инжекцией газа окружающей среды в струйную часть

потока, в верном потоке – в основном процессами переноса теплоты от газа к нагреваемому материалу [17].

Из вышесказанного следует, что при расчете процессов движения и теплообмена при струйном конвективном нагреве металла необходимо учитывать зависимость вязкости газа от температуры и от соотношения температур вытекающего из сопла газа и температуры среды, окружающей струю.

Интенсивность конвективной теплоотдачи при взаимодействии струй с поверхностью нагреваемого металла определяется аэродинамикой и тепловым состоянием газа в области верного потока. На рисунке 39 и 40 представлена структура течения и скоростные поля для случая истечения азота из сопла круглого поперечного сечения с внутренним диаметром $d_0 = 50$ мм для случаев $h/d_0 = 5$ (конец начального участка струи) и $h/d_0 = 10$ при температуре азота, в который втекает струя $T_{\text{среды}} = 700$ °С и 20 °С. Начальная скорость истечения азота из сопла U_0 в обоих случаях была равна 30 м/с, $T_0 = 700$ °С.

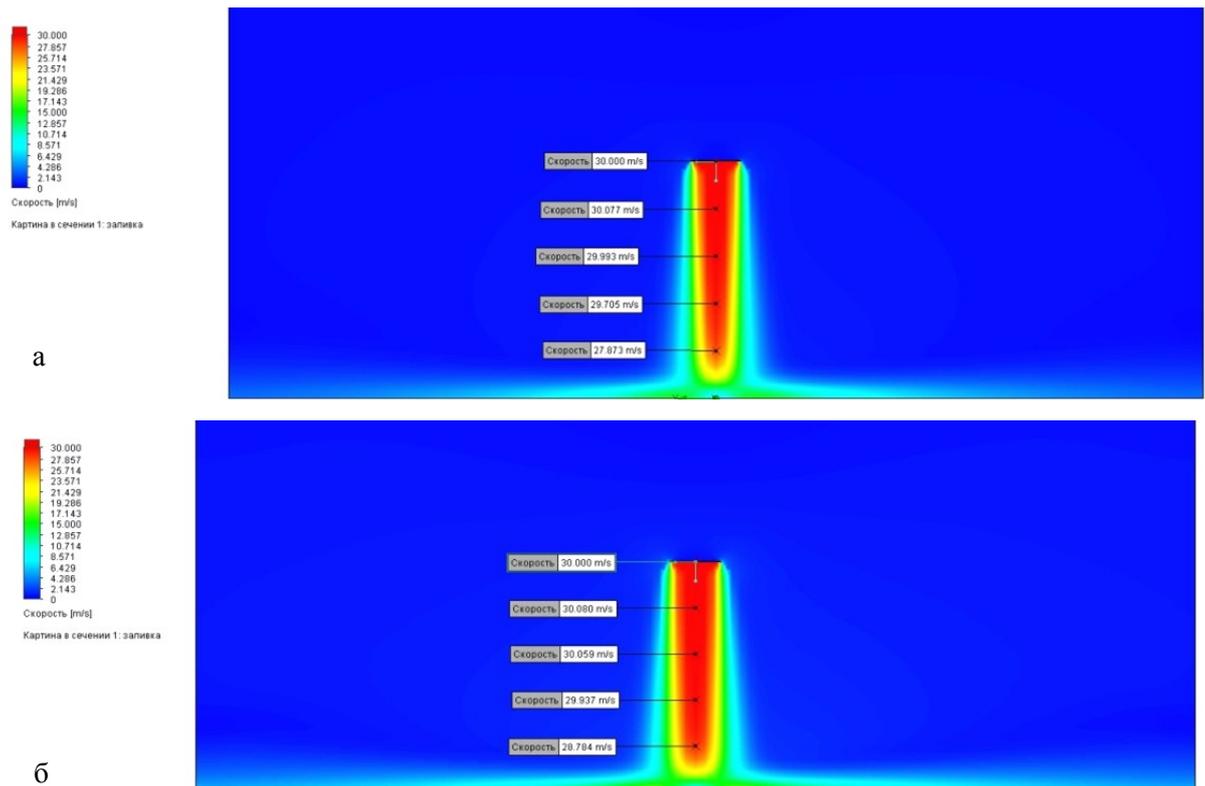


Рисунок 39 – Структура течения и скоростные поля при $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 5$, $T_{\text{среды}} = 20$ °С (а) и 700 °С (б), $U_0 = 30$ м/с, $T_0 = 700$ °С

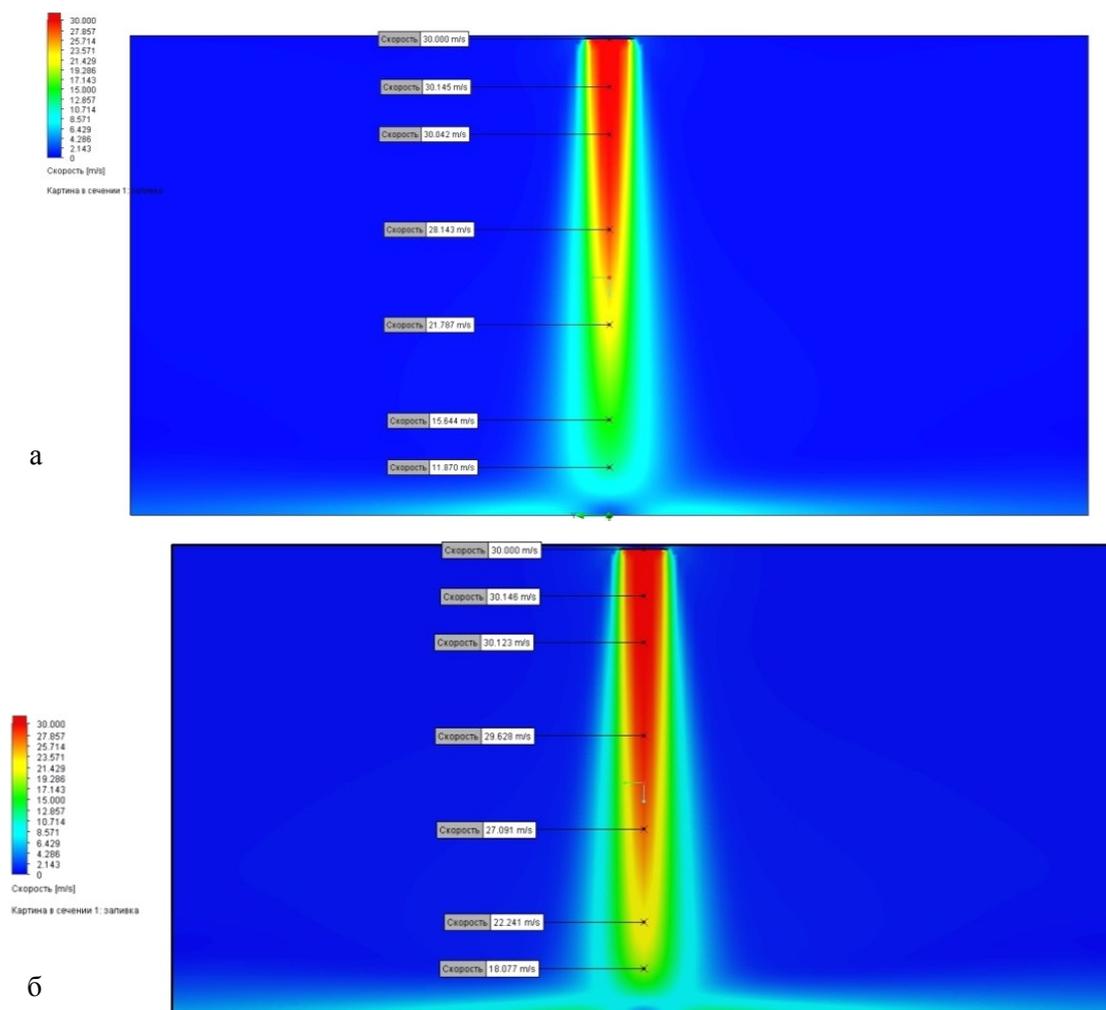


Рисунок 40 - Структура течения и скоростные поля при $d_0 = 50 \text{ мм}$, $h/d_0 = 10$, $T_{\text{среды}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (а) и $700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (б), $U_0 = 30 \text{ м/с}$, $T_0 = 700 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Как показали расчеты, температура среды, в которую вытекает азот заметно сказывается на скоростных полях как в области струйного, так и в области веерного потока. Повышенная температура среды приводит к более низкому темпу изменения скорости в приосевой области струи и, как следствие, к более высоким скоростям в области критической точки струи. Особенно это проявляется при малых значениях относительной высоты h/d_0 . При более высоких значениях этой величины ($h/d_0 \geq 15$) поверхность металла омывается азотом с существенно более низкими скоростями. Характерной особенностью для всех случаев является то, что толщина веерного потока мала по сравнению с величиной относительной высоты h/d_0 при различных начальных температурах вытекающего азота.

Особый интерес представляет анализ аэродинамических характеристик течения газа в области пограничного пристеночного слоя. На рисунках 41 и 42 приведены кривые распределения скорости течения азота по толщине пограничного слоя в сечениях при различном расстоя-

нии от оси струи, для случая одинаковой температуры вытекающей струи, равной 700°C , и различной температуры азота вне струи. Приведенные кривые имеют выраженный максимум скорости вблизи поверхности.

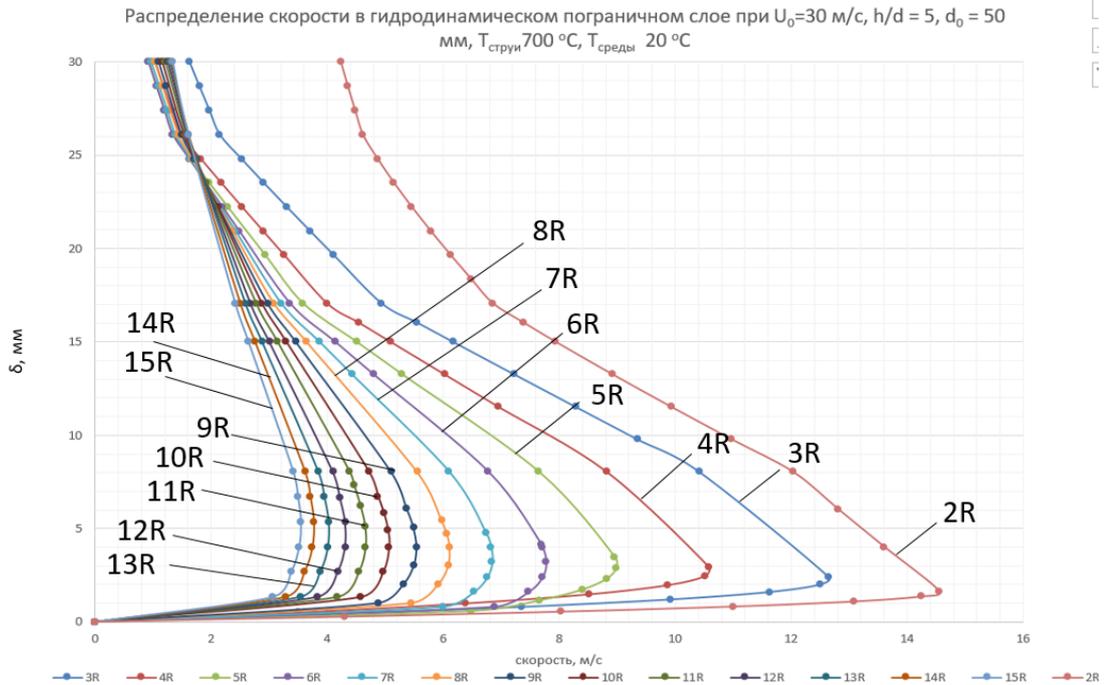


Рисунок 41 – Кривые распределения скорости течения азота по толщине пограничного слоя

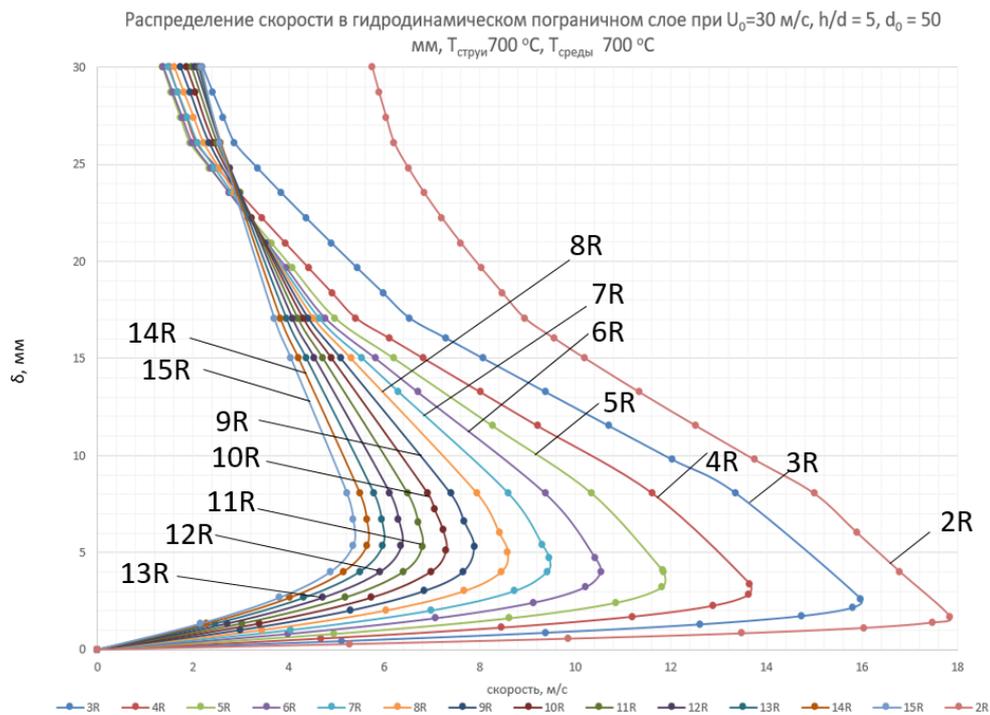


Рисунок 42 – Кривые распределения скорости течения азота по толщине пограничного слоя

Вблизи критической точки наблюдается самое высокое значение максимальной скорости, которое убывает вниз по течению веерного потока, при этом толщина пограничного слоя возрастает. Из-за малой толщины пограничного слоя скорость в его пределах изменяется практически по линейному закону. Повышение температуры среды (рисунок 42) увеличивает скорости движения азота в пограничном слое.

Аналогичный характер изменения скорости в поперечном сечении пограничного пристеночного слоя имеет и при более высоких скоростях истечения азота из сопла, однако толщина пристеночного пограничного слоя уменьшается.

Изменение температуры среды $T_{\text{среды}}$ сказывается на распределении скорости в поперечном сечении струи. На рисунках 43 и 44 представлены кривые распределения скорости в поперечном сечении струйного потока на различных расстояниях h от среза сопла ($h/d_0 = 10$, $d_0 = 50$ мм, $U_0 = 30$ м/с, $T_0 = 700$ °С, $T_{\text{среды}} = 20$; 700 °С).

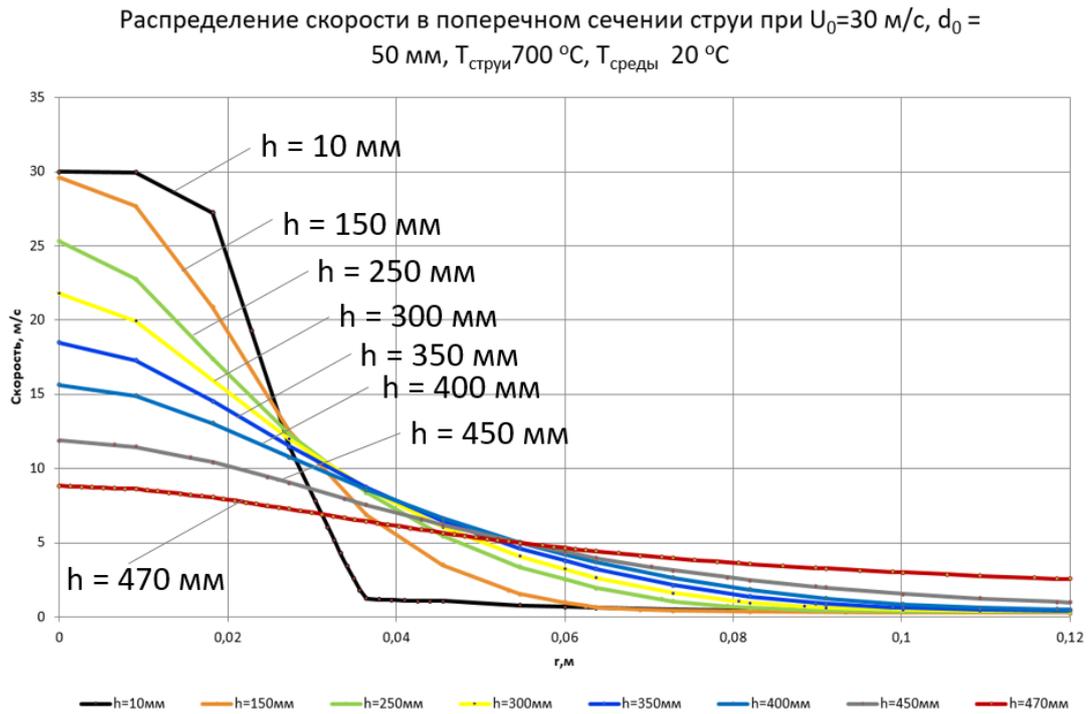


Рисунок 43 - Кривые распределения скорости в поперечном сечении струйного потока на различных расстояниях h от среза сопла

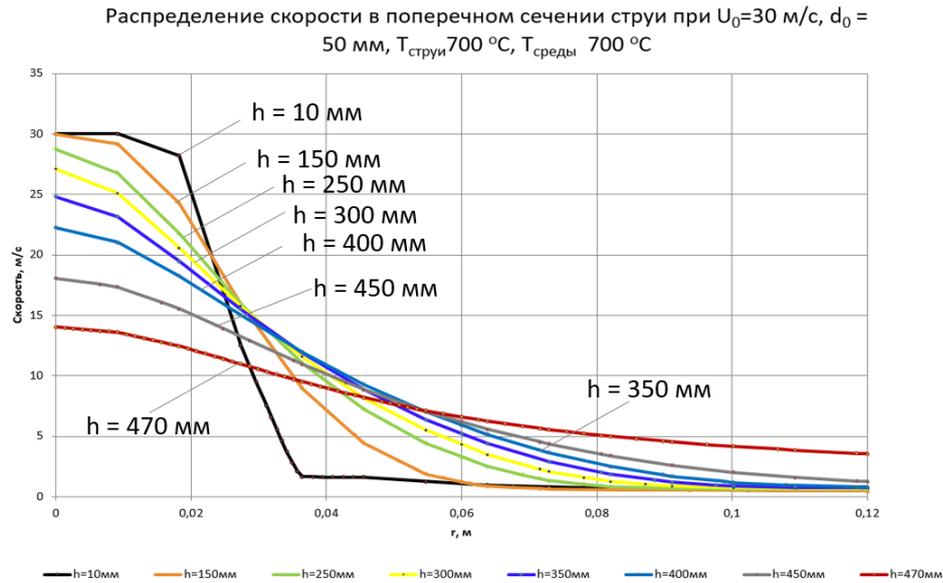


Рисунок 44 - Кривые распределения скорости в поперечном сечении струйного потока на различных расстояниях h от среза сопла

Видно, что при $h < 10$ мм эжектирующее действие струи проявляется весьма незначительно, область начального участка струи заметно выражена. При больших значениях величины h наблюдается снижение осевой скорости, эпюры скорости сглаживаются. Повышение температуры среды до 700 °С снижает темп выравнивания эпюр особенно за пределами начального участка струи.

Характер изменения максимальной скорости в пристеночном пограничном слое в зависимости от расстояния от критической точки вниз по течению веерного потока показан на рисунке 45.

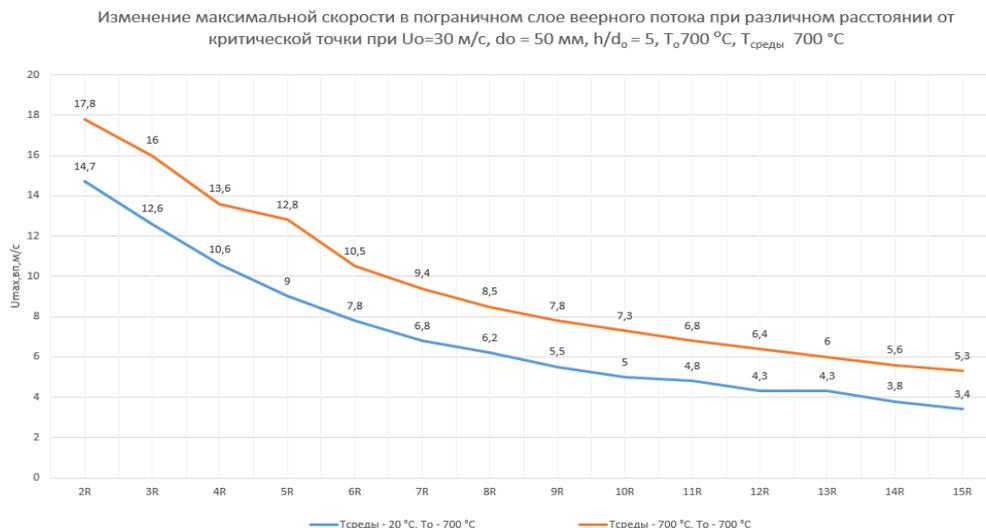


Рисунок 45 - Характер изменения максимальной скорости в пристеночном пограничном слое в зависимости от расстояния от критической точки вниз по течению веерного потока

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

Существенное влияние температуры среды $T_{\text{среды}}$ проявляется для случая истечения струи в неограниченное пространство, т. е. в отсутствии ограничивающей поверхности, влияние температуры среды для данного случая представлен на рисунках 46 и 47.

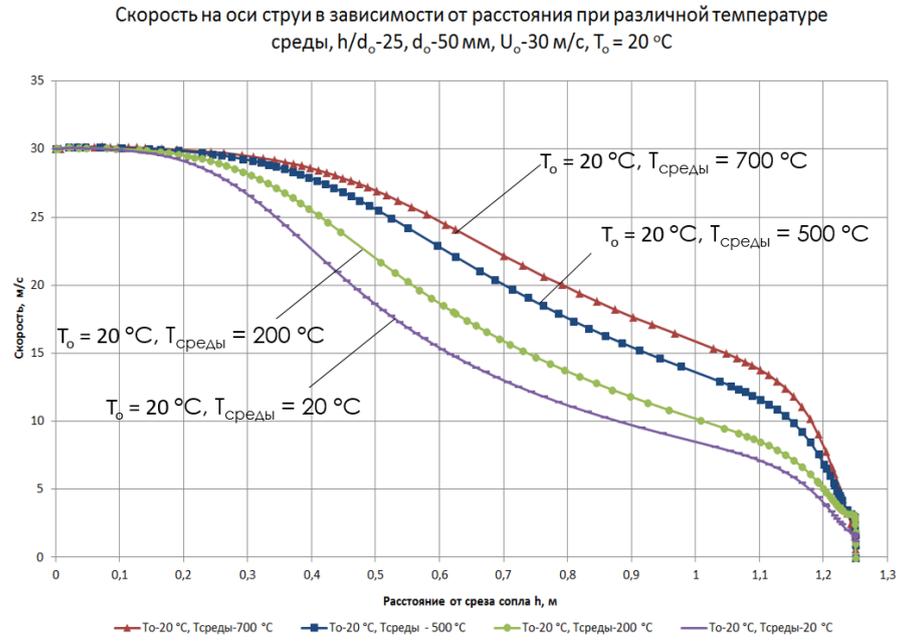


Рисунок 46 - Влияние температуры среды $T_{\text{среды}}$ для случая истечения струи в неограниченное пространство

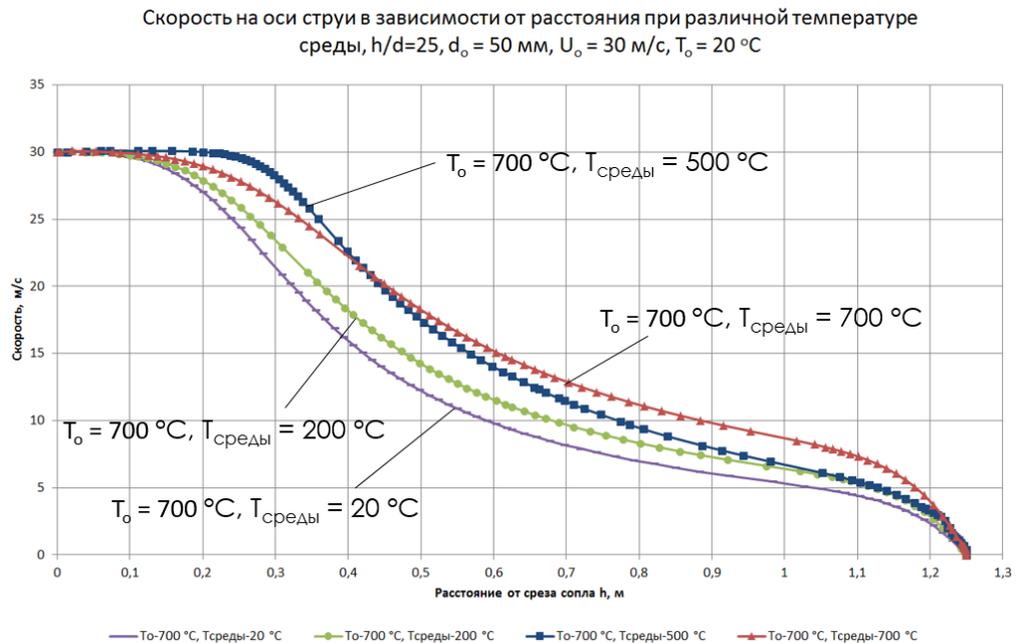


Рисунок 47 - Влияние температуры среды $T_{\text{среды}}$ для случая истечения струи в неограниченное пространство

Данные приведены для случая $U_0 = 30$ м/с, $d_0 = 50$ мм и изменения температуры T_0 и $T_{\text{среды}}$ в интервале $(20 \dots 700)$ °С и показывают изменение только скорости на оси струи при различных расстояниях от среза сопла. Как видно, полное затухание струи наблюдается при $h/d_0 = 25$.

Таким образом при анализе аэродинамики струй, взаимодействующих нормально с ограничивающей поверхностью, необходимо учитывать температурный фактор. Его влияние сказывается через зависимость вязкости азота (газов) от температуры. Для азота, например, вязкость увеличивается на целый порядок (при 100 °С, $\nu_{N_2} = 13.3 \cdot 10^{-6}$ м²/с, при $T_{N_2} = 800$ °С, $\nu_{N_2} = 130.7 \cdot 10^{-6}$ м²/с) [24].

Вязкость газа, наряду со степенью турбулизации потока, определяет эжектирующий 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 45 кривые изменения максимальной скорости в пограничном слое вверного потока $u_{\text{max,вп}}$ при различном расстоянии от критической точки струи ($h/d_0 = 5$, $d_0 = 50$ мм, $T_0 = 700$ °С, $U_0 = 30$ 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 46 и 47 для струи, неограниченной по её длине. При этом вязкость проявляется по-разному при различных соотношениях температур T_0 и $T_{\text{среды}}$.

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 (рисунок 46). При температуре вытекающего газа T_0 выше температуры $T_{\text{среды}}$ наибольший темп снижения осевой скорости наблюдается при низких температурах окружающей среды.

3.3 Исследование структуры температурных полей струи

3.3.1 Тепловое состояние свободной струи

Температура струи, вытекающей из круглого сопла, во многих промышленных процессах отличается от температуры струи, в которую она втекает. Во многих экспериментальных исследованиях с нагретым воздухом результаты сводятся к тому, что характер температурных полей в затопленной струе является идентичным распределению скоростей [3, 100]. Участку с постоянной скоростью на оси в струи, также характерно постоянство температуры, по мере

удаления от сопла температурные границы расширяются, а температура постепенно уменьшается, как на оси струи, так и в поперечном сечении.

Существует некая связь, которая подтверждает предположение, о том, что изменение средней температуры вдоль струи идентично изменению средней скорости [3]. Из закона сохранения импульса в струе имеем, что произведение массы, которая проходит через произвольное сечение, умноженное на среднюю скорость в этом сечении, представляет собой постоянную величину:

$$m u_{\text{сеч}} = m_0 u_0, \quad \text{или} \quad m u_{\text{сеч}} / m_0 u_0 = 1 \quad (7)$$

Исходя из закона сохранения энергии, произведение температуры на массовый расход, от сечения к сечению (при условном постоянстве теплоемкостей), изменяется по похожему принципу, что и произведение массы на среднюю скорость:

$$m T_{\text{сеч}} = m_0 T_0, \quad \text{или} \quad m T_{\text{сеч}} / m_0 T_0 = 1 \quad (8)$$

Сравнивая два полученных выражения, становится понятно, что изменение температуры вдоль свободной струи происходит по тому же закону, что и изменение средней скорости.

3.3.2 Исследование температурного поля одиночной струи, истекающей из круглого сопла и взаимодействующей с плоской поверхностью при изменении скорости и температуры истечения азота и отношения h/d_0

Расчет процесса теплообмена при взаимодействии высокотемпературной струи с поверхностью, как было отмечено выше, весьма трудно реализовать аналитически в виду сложности газодинамических процессов. Сложности расчета усугубляются ещё и тем, что, струя при взаимодействии с поверхностью как таковая исчезает и с поверхностью взаимодействует настильный (веерный) поток, форма, аэродинамические свойства и тепловое состояние которого резко отличаются от таковых для первоначальной струи. Как и в случае движения неограниченного потока, вдоль плоской поверхности вблизи последней образуется гидродинамический пограничный и тепловой слой, однако структура течения в веерном потоке принципиально иная.

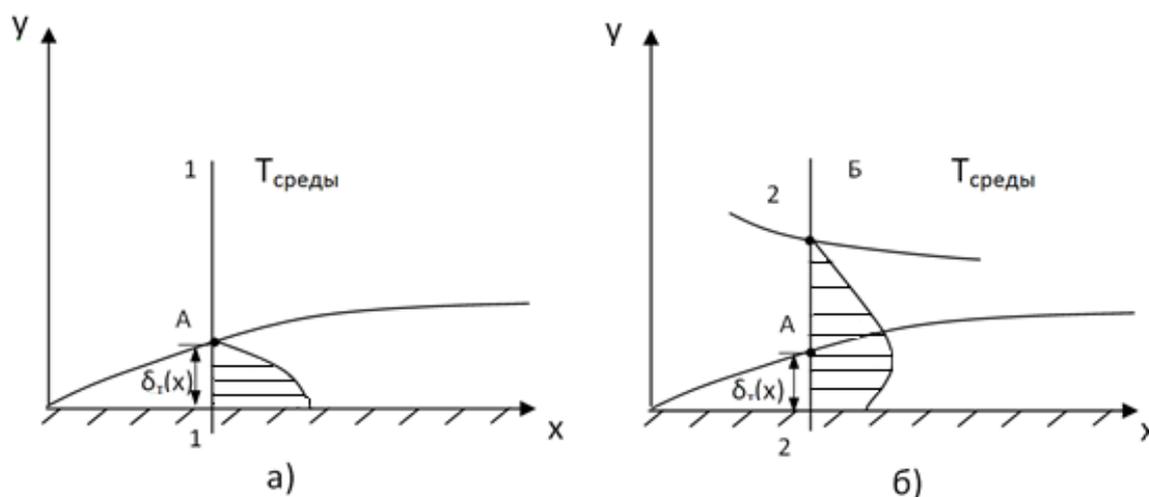


Рисунок 48 - Структура теплового пограничного слоя: а – поток бесконечен в направлении координаты y , б – веерный поток

Веерный поток, распространяющийся в пространстве с неподвижной средой, должен иметь одну границу с температурой близкой к температуре атакующей поверхности, а также, одну с температурой окружающей среды.

Вблизи поверхности формируется тепловой пограничный слой $\delta_t(x)$, однако температура в нем изменяется от температуры на поверхности до значения, равного температуре поверхности либо близкого к ней. За пределами границы $\delta_t(x)$ температура уменьшается до температуры окружающей среды (точка Б), выше которой находится неподвижная среда. Толщина веерного потока между точками А и Б характеризуется тем, что, во-первых, она изменяется вниз по течению и, во-вторых, в её пределах происходит перестройка профиля температуры.

Перейдем к исследованию теплового состояния газа внутри веерного потока. Основными определяющими величинами являлись расстояние от среза сопла до поверхности h металла и скорость истечения азота из сопла U_0 . Варианты исследования представлены в таблице 6. Диаметр сопла – 50 мм, температура истечения азота $T_0 = 700$ °С. Струя является осесимметричной.

Таблица 6 - Варианты моделирования при исследовании влияния скорости U_0 и отношения h/d

Вариант №	Скорость истечения азота U_0 , м/с	Отношение h/d_0	Температура струи, T_0 , °С	Температура среды, $T_{\text{среды}}$, °С
1	30	5	700	20
2	30	10	700	20
3	30	15	700	20
4	100	5	700	20
5	100	10	700	20
6	100	15	700	20

Ниже приведены результаты решения сформулированной задачи. На рисунках 49 и 50 представлены структура температурного поля и распределение температуры для варианта 2.

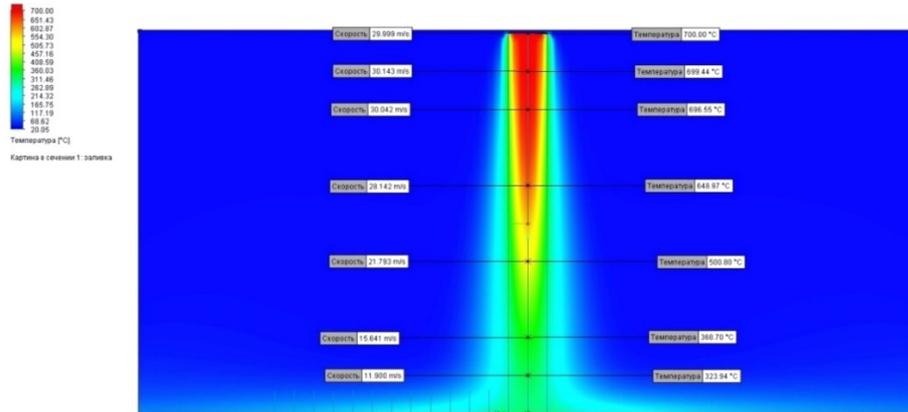


Рисунок 49 – Структура температурного поля струи азота при взаимодействии с поверхностью при $U_0 = 30$ м/с, $T = 700$ °C, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$

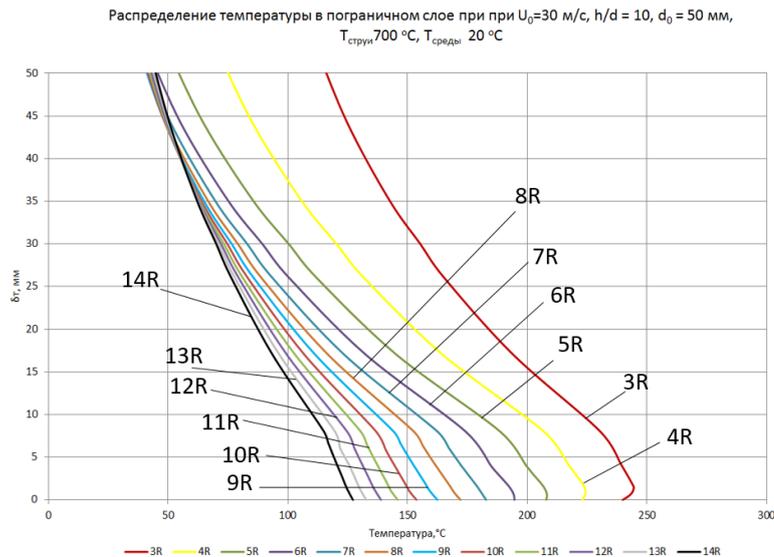


Рисунок 50 - Распределение температуры в пограничном слое при $U_0 = 30$ м/с, $T_0 = 700$ °C, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$

Как следует из рисунка 49, 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 вовлечение в движение неподвижного окружающего газа, также отчетливо видна область начального участка струи, в которой сохраняется, как наибольшая скорость движения азота, так и максимальная температура. По мере растекания веерного потока температура газа снижается. На рисунке 50 представлены кривые распределения температуры газа по толщине веерного потока при различных значениях текущего радиуса потока. Следует

отметить, что кривые до 5R (125 мм от оси) имеют максимум, расположенный вблизи поверхности. Расстояние максимума от поверхности вглубь веерного потока при каждом значении текущего радиуса характеризует толщину собственно теплового пограничного слоя. Толщина теплового пограничного слоя при выбранных условиях весьма мала, толщина же основного веерного потока соизмерима с внутренним диаметром сопла. Кривые, находящиеся дальше, чем 5R (125 мм от оси), имеют профиль, как для случая движения неограниченного потока, вдоль плоской поверхности и для этого участка возможно использование методик, предлагаемых для данного случая.

На рисунках 51 и 52 показана структура температурного поля и распределение температуры при $h/d_0 = 5$, т.е. преграда находится в конце начального участка струи. Скорости истечения азота из сопла 30 м/с (вариант 1). Видно, что температуры течения наблюдаются и в области критической точки (точки пересечения оси струи с поверхностью). Кривые на рисунке 52 до 4R (100 мм от оси) имеют максимум, расположенный вблизи поверхности. Расстояние максимума от поверхности вглубь веерного потока при каждом значении текущего радиуса характеризует толщину теплового пограничного слоя. Толщина теплового пограничного слоя при выбранных условиях весьма мала, толщина же основного веерного потока соизмерима с внутренним диаметром сопла. Кривые, находящиеся дальше, чем 4R (100 мм от оси), имеют профиль, как для случая движения неограниченного потока, вдоль плоской поверхности.

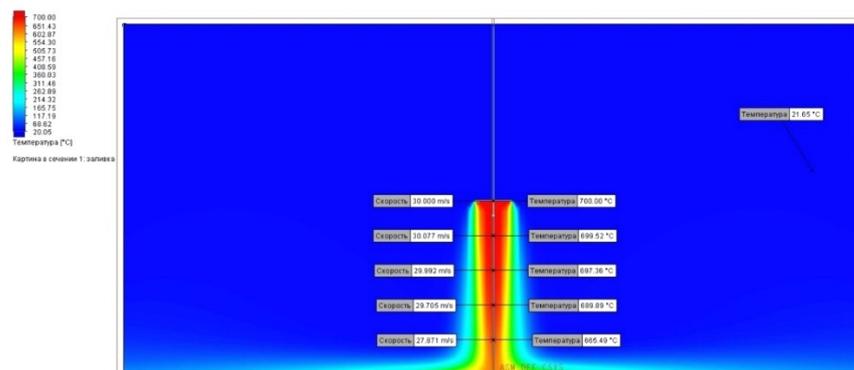


Рисунок 51 – Структура температурного поля струи азота при взаимодействии с поверхностью при $U_0 = 30$ м/с, $T_0 = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 5$

Распределение температуры в пограничном слое при $U_0=30$ м/с, $h/d = 5$, $d_0 = 50$ мм,
 $T_{\text{струи}} 700$ °С, $T_{\text{среды}} 20$ °С

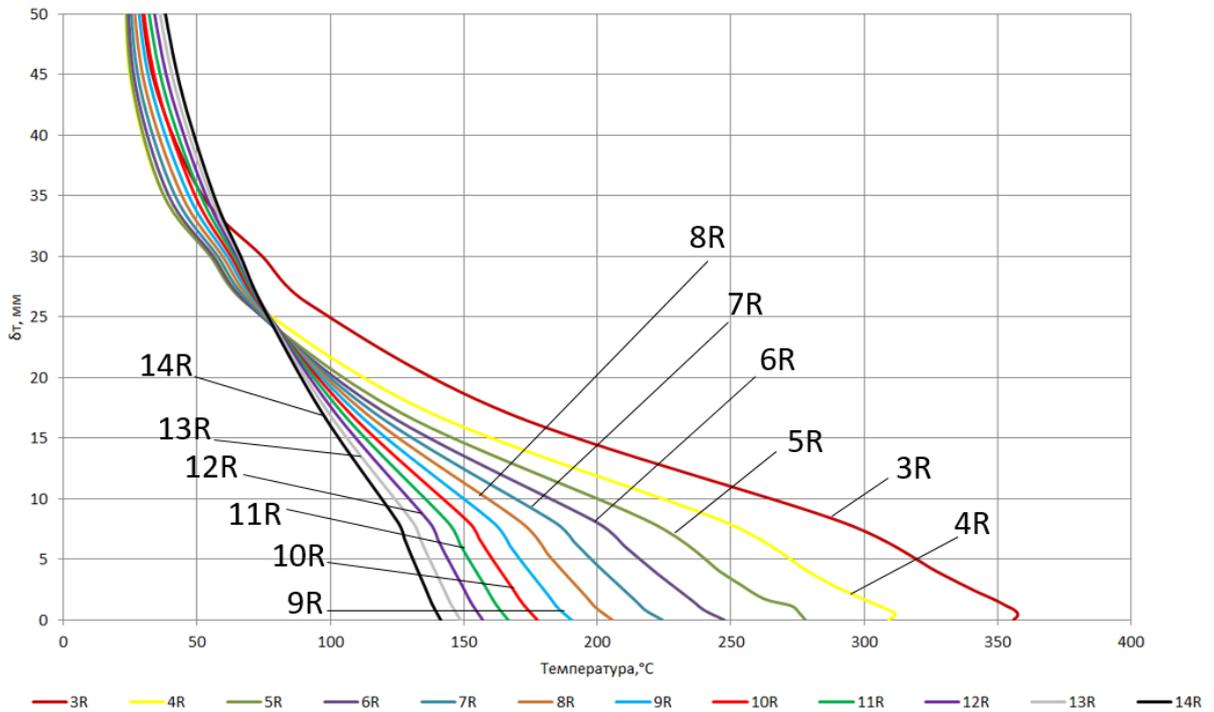


Рисунок 52 - Распределение температуры в пограничном слое при $U_0 = 30$ м/с, $T_0 = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 5$

Увеличение относительного расстояния от среза сопла изменяет картину течения. На рисунке 53 и 54 при $h/d_0 = 15$ (вариант 3). Видно, что струя взаимодействует с поверхностью в области гораздо меньших температур, чем в предыдущих вариантах. На рисунке 54 представлены кривые распределения температуры по толщине вверного потока при различных значениях текущего радиуса потока. Следует отметить, что все кривые до 7R (175 мм от оси) имеют похожий вид и у каждой из кривой максимум расположен на близком расстоянии от поверхности. Кривые, находящиеся дальше, чем 7R (175 мм от оси), имеют профиль, как для случая движения неограниченного потока, вдоль плоской поверхности.

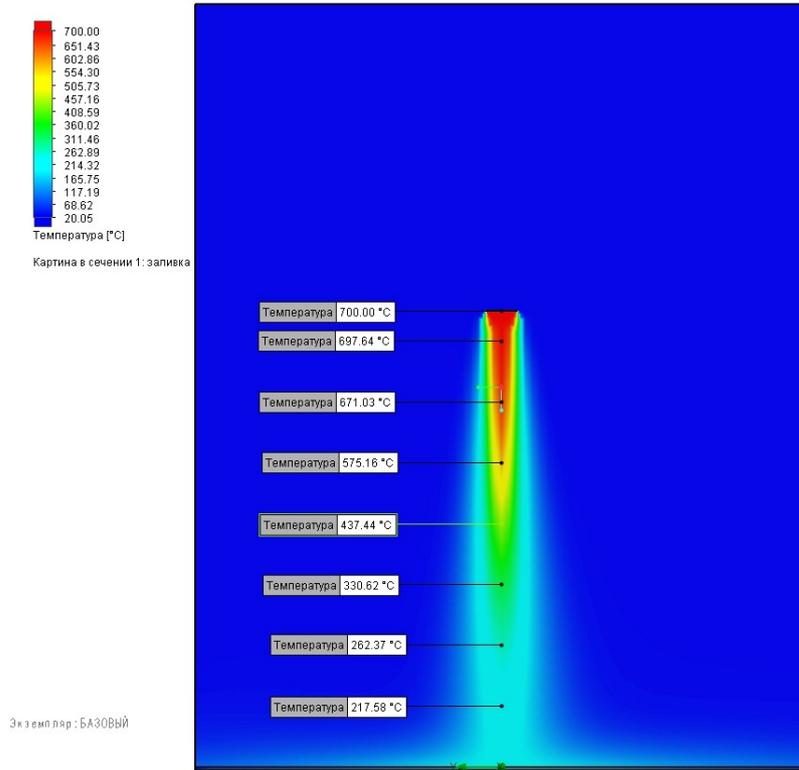


Рисунок 53 – Структура температурного поля струи азота при взаимодействии с поверхностью при $U_0 = 30$ м/с, $T_0 = 700$ °C, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 15$

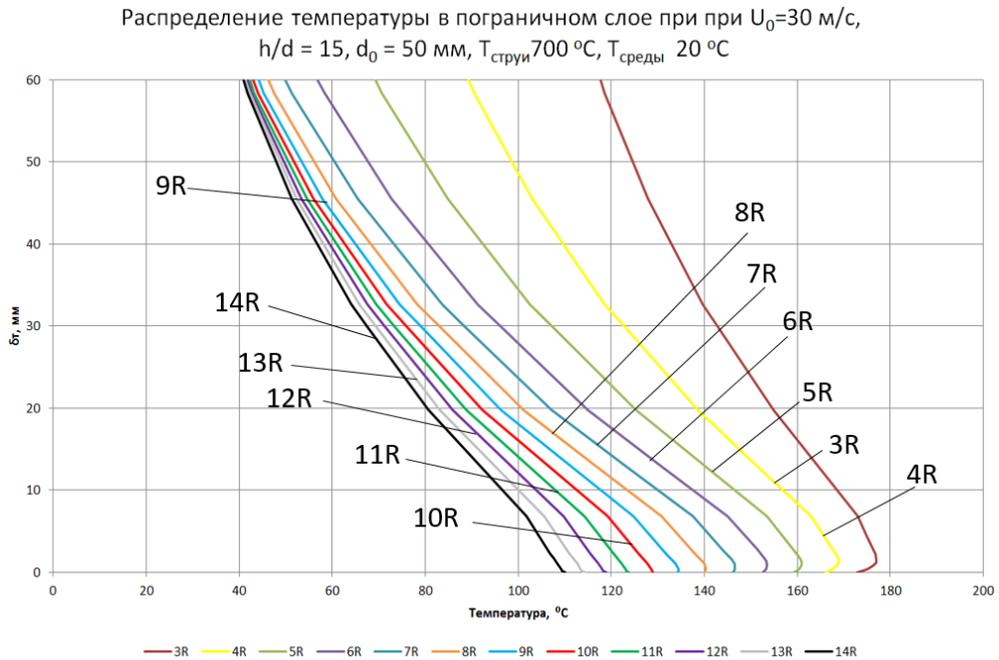


Рисунок 54 - Распределение температуры в пограничном слое при $U_0 = 30$ м/с, $T_0 = 700$ °C, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 15$

Картина развития течения при более высоких скоростях показана на рисунках 55 и 56 (вариант 4), рисунках 57 и 58 (вариант 5) и рисунках 59 и 60 (вариант 6). Увеличение начальной

скорости истечения газа приближает к поверхности область более высоких температур, как в самой струе, так и в верном потоке. Высокие скорости уменьшают области с тепловым пограничным слоем для верного потока: для $h/d_0 = 5$ – сразу имеет место движение неограниченного потока, вдоль плоской поверхности; для $h/d_0 = 10$ – лишь кривая 3R (75 мм от оси) максимум, расположенный на близком расстоянии от поверхности. Кривые, находящиеся дальше, чем 3R (75 мм от оси), имеют профиль, как для случая движения неограниченного потока, вдоль плоской поверхности; для $h/d_0 = 15$ – все кривые до 5R (125 мм от оси) имеют похожий вид и у каждой из кривой максимум расположен на близком расстоянии от поверхности. Кривые, находящиеся дальше, чем 5R (175 мм от оси), имеют профиль, как для случая движения неограниченного потока, вдоль плоской поверхности.

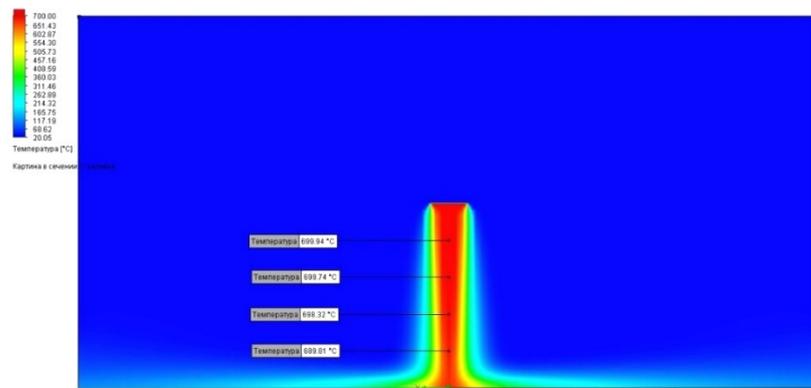


Рисунок 55 – Структура температурного поля струи азота при взаимодействии с поверхностью при $U_0 = 100$ м/с, $T_0 = 700$ °C, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 5$

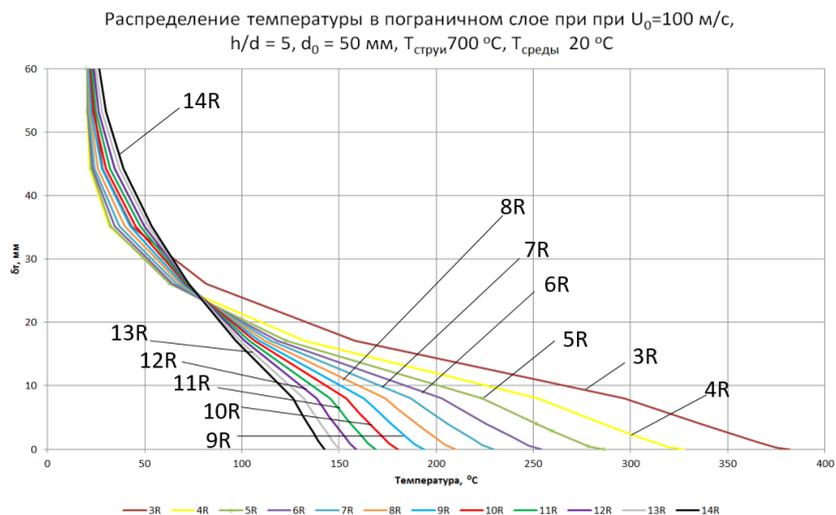


Рисунок 56 – Распределение температуры в пограничном слое при $U_0 = 100$ м/с, $T_0 = 700$ °C, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 5$

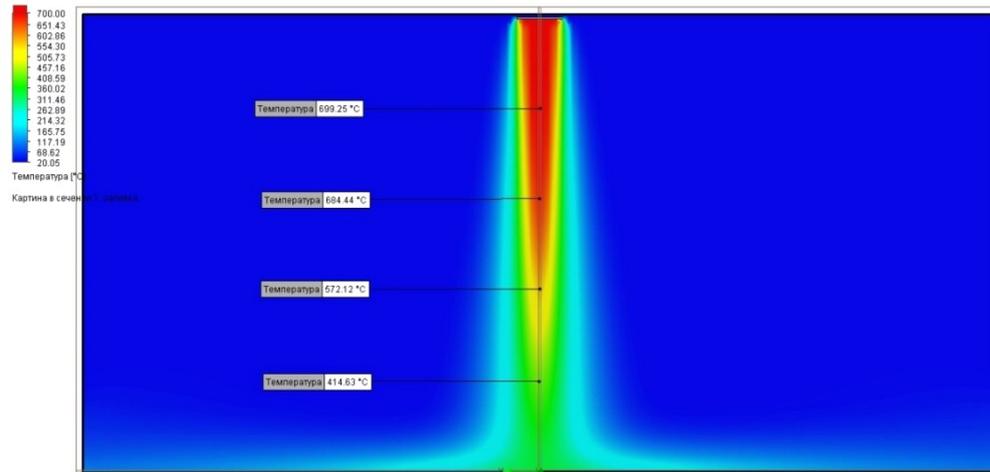


Рисунок 57 – Структура температурного поля струи азота при взаимодействии с поверхностью при $U_0 = 100$ м/с, $T_0 = 700$ °C, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$

Распределение температуры в пограничном слое при $U_0=100$ м/с, $h/d = 10$, $d_0 = 50$ мм, $T_{\text{струи}} 700$ °C, $T_{\text{среды}} 20$ °C

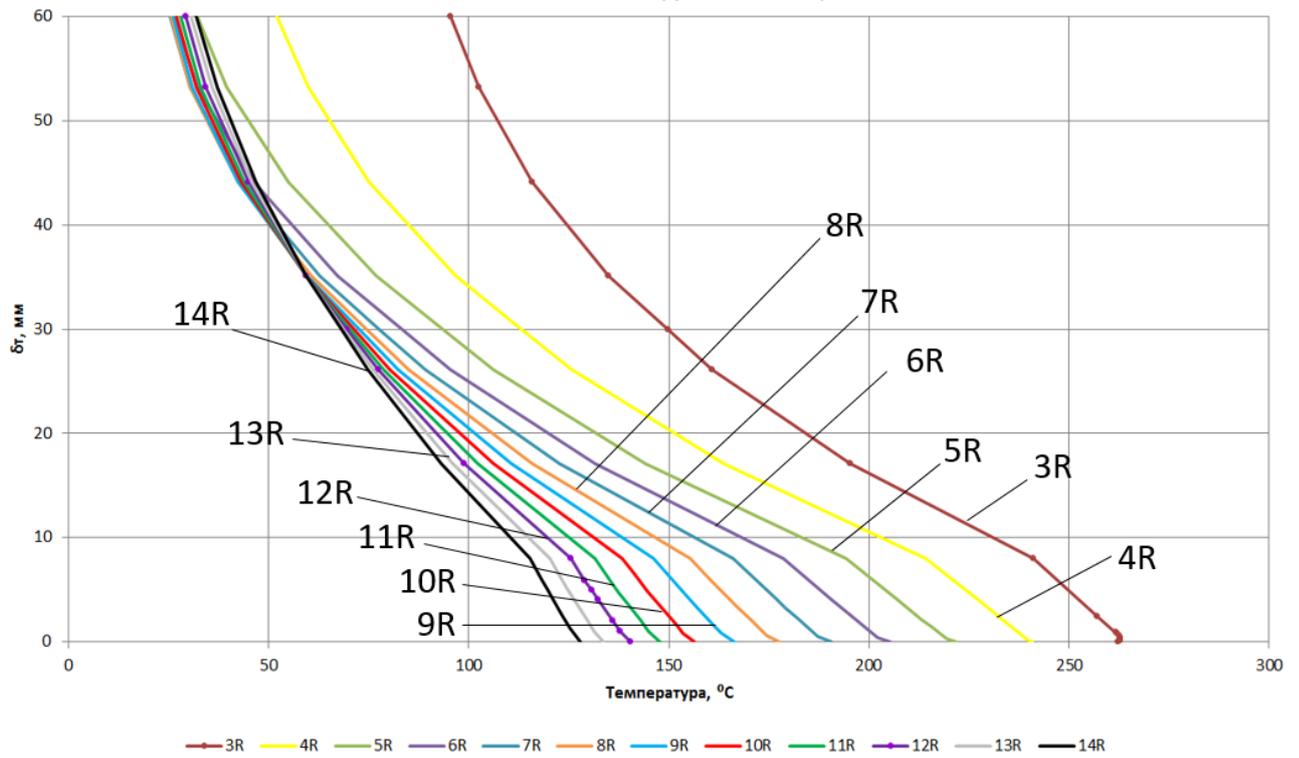


Рисунок 58 - Распределение температуры в пограничном слое при $U_0 = 100$ м/с, $T_0 = 700$ °C, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$

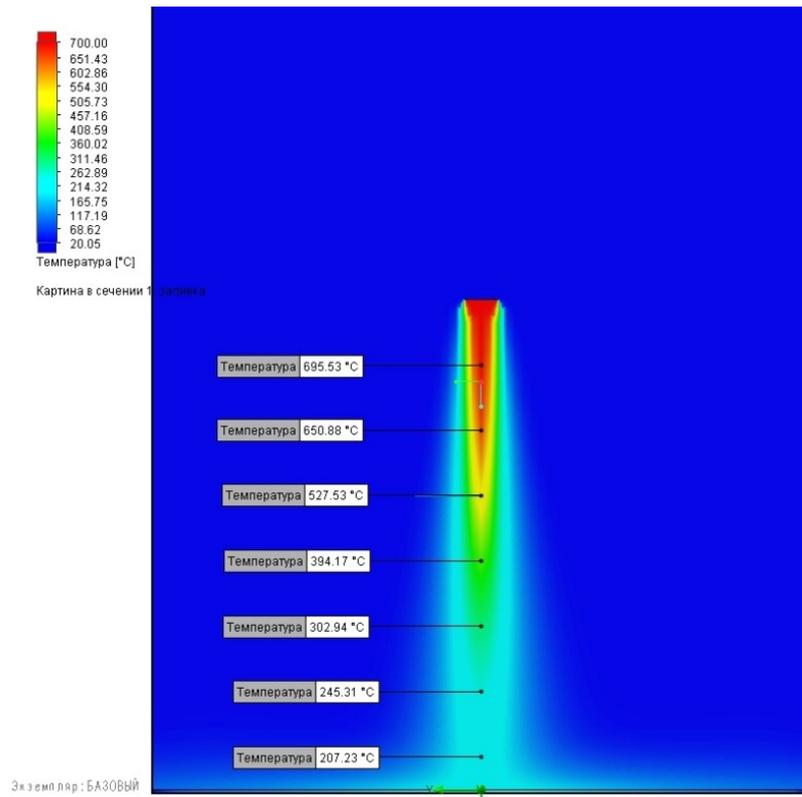


Рисунок 59 – Структура температурного поля струи азота при взаимодействии с поверхностью при $U_0 = 100$ м/с, $T_0 = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 15$

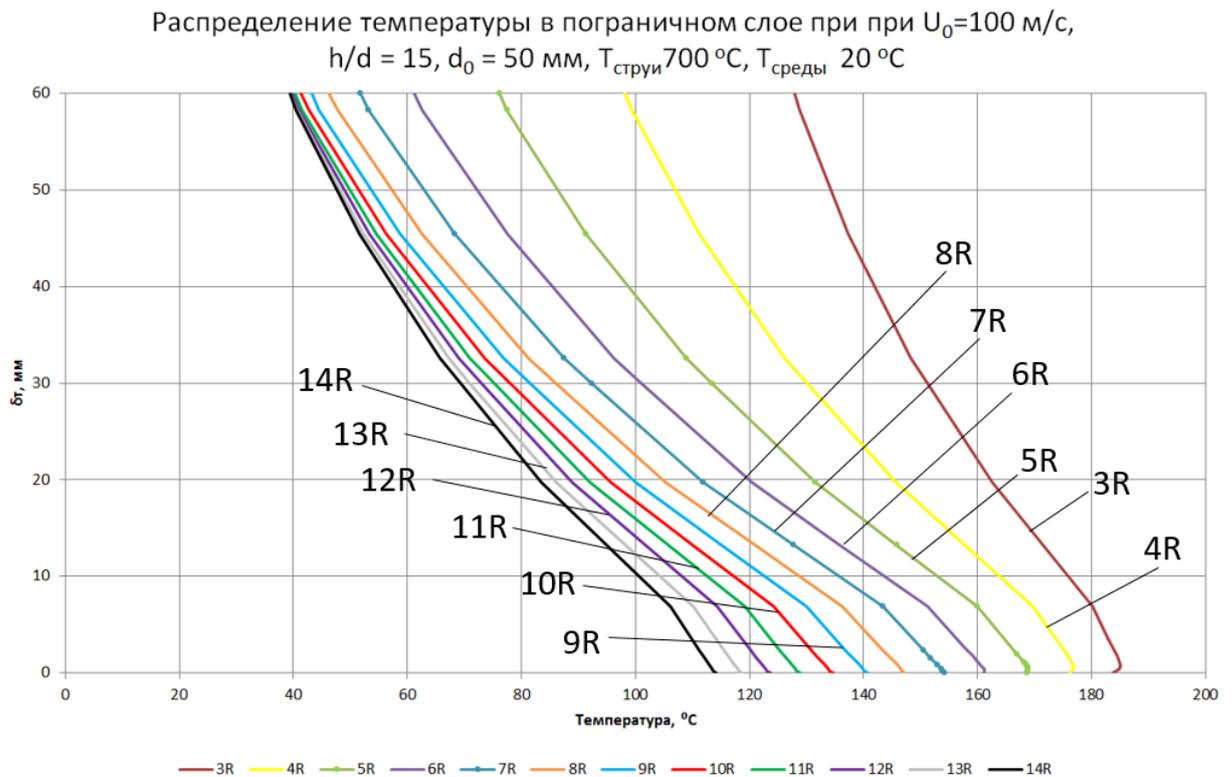


Рисунок 60 - Распределение температуры в пограничном слое при $U_0 = 100$ м/с, $T_0 = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 15$

Ниже, на рисунках 61, 62 и 63 представлено распределение температуры в поперечном сечении струи для варианта 1, 2 и 3. Так как струя является осесимметричной, то для удобства восприятия на графике изображено распределение скорости от оси струи вглубь по радиусу.

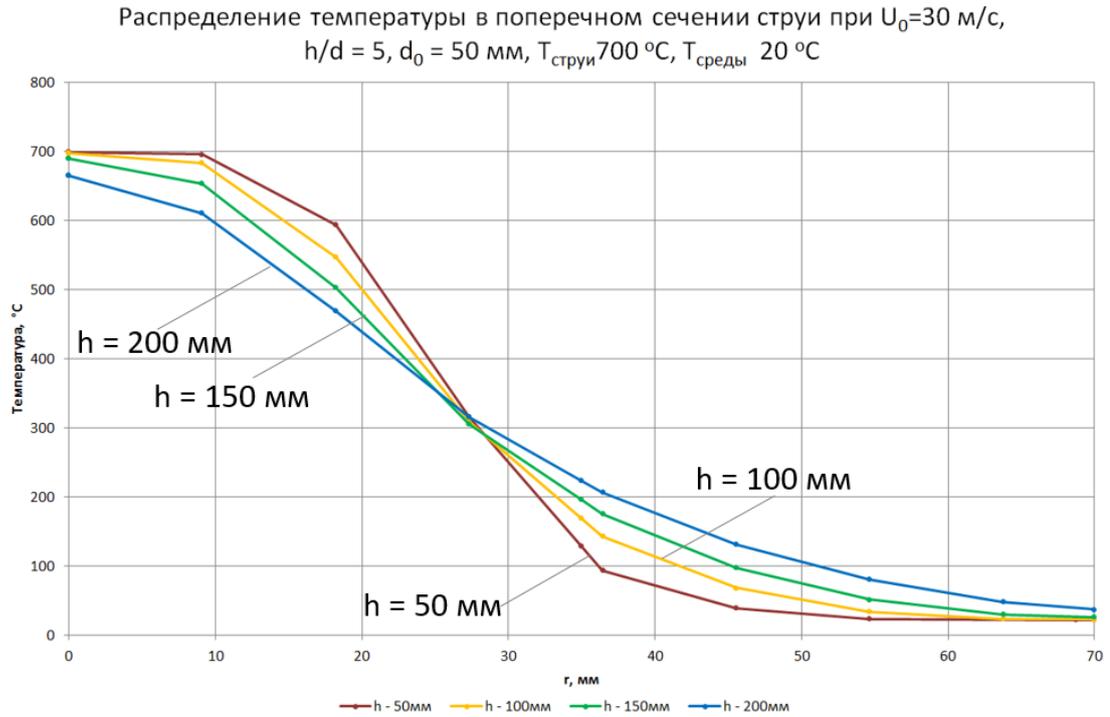


Рисунок 61 - Распределение температуры в поперечном сечении струи
при $U_0 = 30$ м/с, $T_0 = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 5$

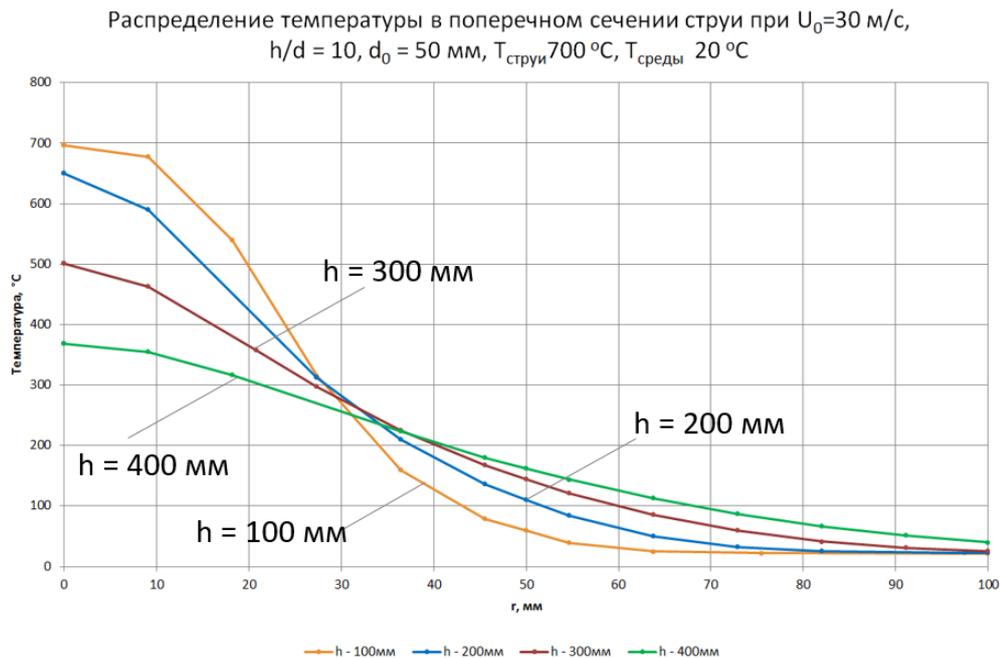


Рисунок 62 - Распределение температуры в поперечном сечении струи
при $U_0 = 30$ м/с, $T_0 = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$

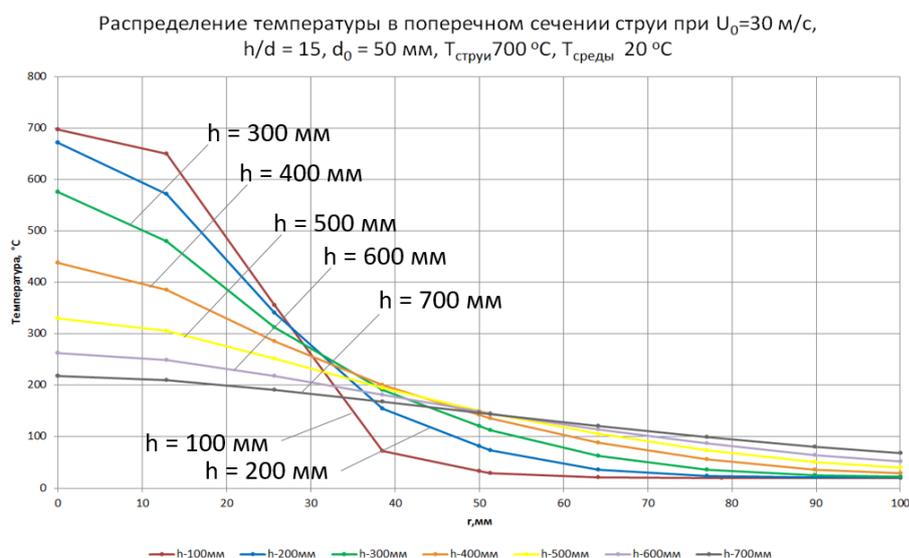


Рисунок 63 - Распределение температуры в поперечном сечении струи
при $U_0 = 30$ м/с, $T_0 = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 15$

Из графиков видно, что по мере раскрытия струи, эжекция проявляется активнее и точка уменьшения температуры смещается вглубь по радиусу от оси струи. При увеличении h , наблюдается снижение температуры на оси и происходит сглаживание эпюр температуры.

Ниже, на рисунках 64, 65 и 66 представлено распределение температуры в поперечном сечении струи для варианта 4, 5 и 6. Увеличение скорости на выходе из сопла способствует приближению к поверхности области высоких температур, как в самой струе, так и в верном потоке. Это способствует интенсивному перемешиванию и как следствие более интенсивному нагреву.

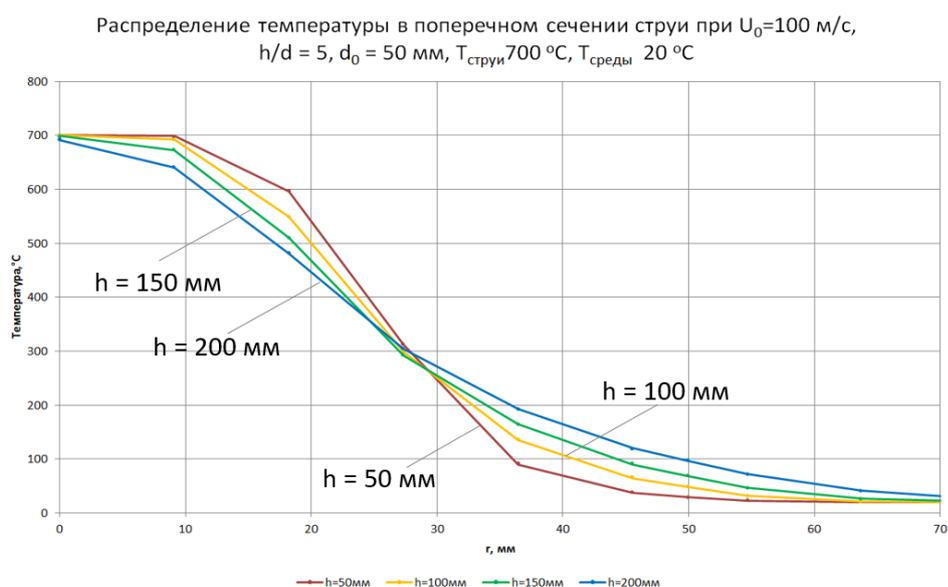


Рисунок 64 - Распределение температуры в поперечном сечении струи
при $U_0 = 100$ м/с, $T_0 = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 5$

Распределение температуры в поперечном сечении струи при $U_0=30$ м/с,
 $h/d = 10$, $d_0 = 50$ мм, $T_{\text{струи}} 700$ °С, $T_{\text{среды}} 20$ °С

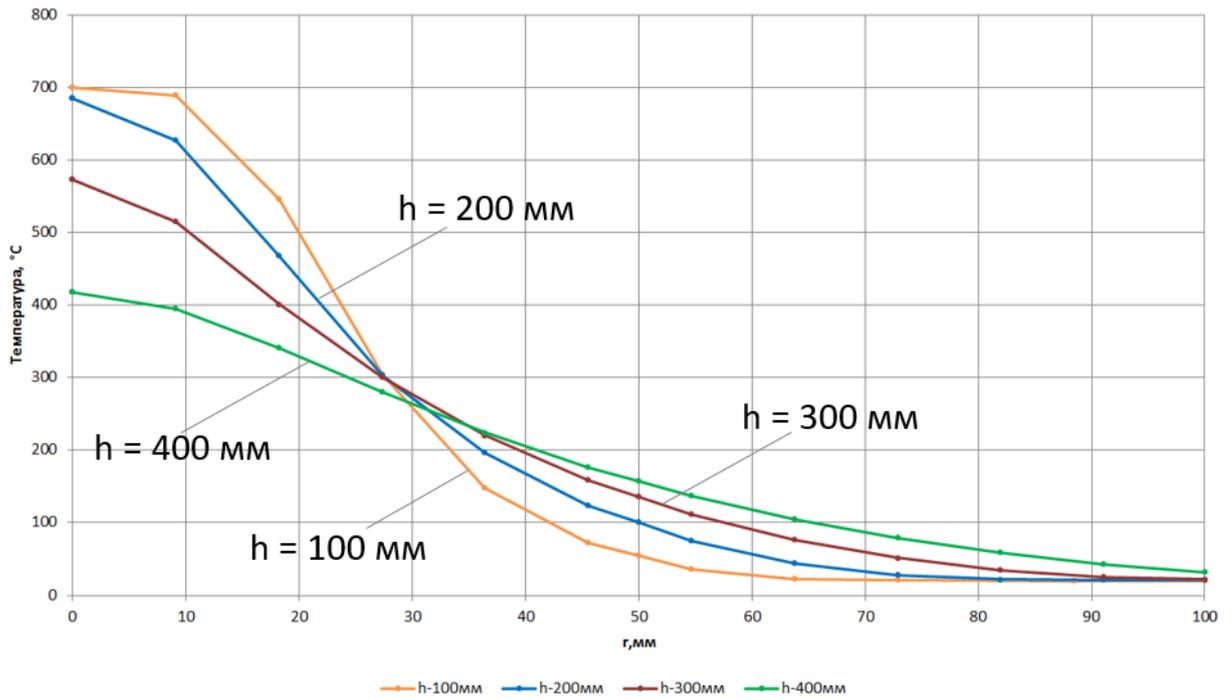


Рисунок 65 - Распределение температуры в поперечном сечении струи
при $U_0 = 100$ м/с, $T_0 = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$

Распределение температуры в поперечном сечении струи при $U_0=100$ м/с,
 $h/d = 15$, $d_0 = 50$ мм, $T_{\text{струи}} 700$ °С, $T_{\text{среды}} 20$ °С

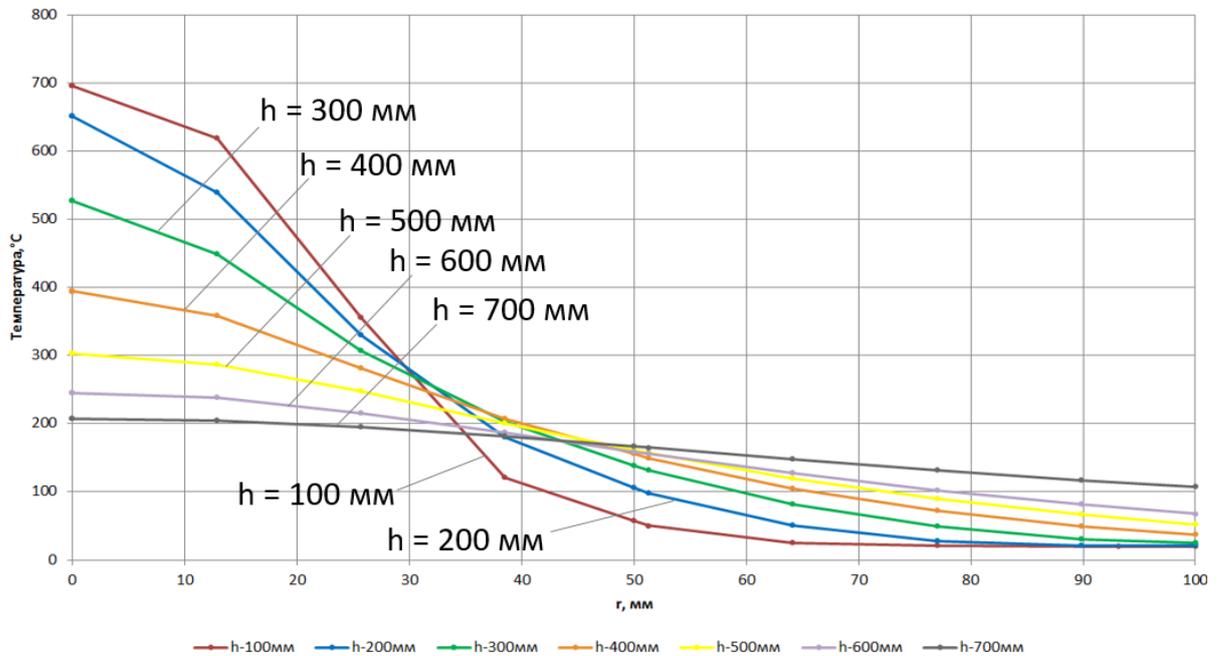


Рисунок 66 - Распределение температуры в поперечном сечении струи
при $U_0 = 100$ м/с, $T_0 = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 15$

На рисунке 67 представлено сравнение температур на оси струи при $h/d = 10$, $U_0 = 30$ м/с. Расчеты проводились при T_0 равной 100 °С, 300 °С, 500 °С, 700 °С и 900 °С; $T_{\text{среды}} = 20$ °С. Видно, что при понижении температуры истекающего азота, эпюра температур на оси выравнивается. Что касается расстояния от сопла, при котором температура на оси не изменяется, то при минимальной T_0 , это расстояние - максимально и уменьшается по мере повышения температуры T_0 .

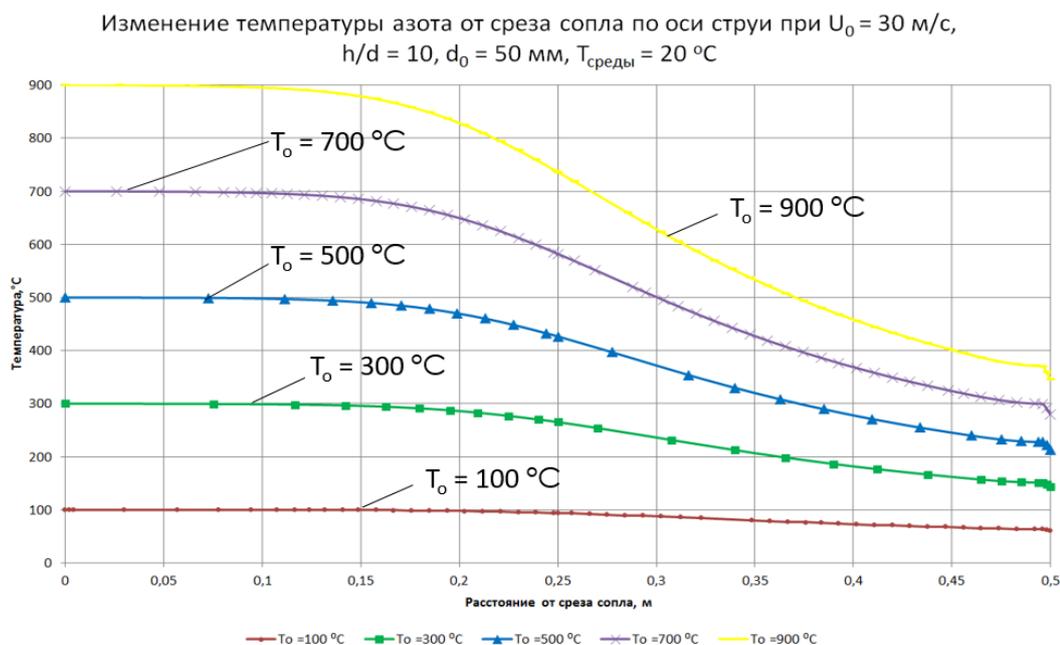


Рисунок 67 - Сравнение температур на оси струи при $h/d_0 = 10$, $U_0 = 30$ м/с

3.4 Исследование температурных полей металла

В исследуемом случае, разность температур по сечению металла стремиться к нулю при условии Vi стремящимся к нулю. Данные изделия принято называть термически тонкими [36]. Скорость нагрева термически тонких тел не ограничена возникновением термических напряжений внутри металл. Исходя из этого, режим нагрева тонких, в тепловом отношении тел, выбирают, ориентируясь на наименьшее время нагрева, наибольшую производительность агрегата и наименьшее окалинообразование.

Нагрев металла производился также, как остальные исследования при изменении определяющих величин: расстояния от среза сопла до поверхности h металла и скорость истечения азота из сопла U_0 . Варианты исследования представлены в таблице 7. Диаметр сопла – 50 мм, температура истечения азота T_0 – 700 °С. Струя является осесимметричной.

Таблица 7 - Варианты моделирования при исследовании влияния скорости U_0 и отношения h/d

Вариант №	Скорость истечения азота U_0 , м/с	Отношение h/d_0	Температура струи, T_0 , °C	Температура среды, $T_{\text{среды}}$, °C
1	30	5	700	20
2	30	10	700	20
3	30	15	700	20
4	100	5	700	20
5	100	10	700	20
6	100	15	700	20

На рисунке 68 представлена температура металла для варианта исследования № 1.

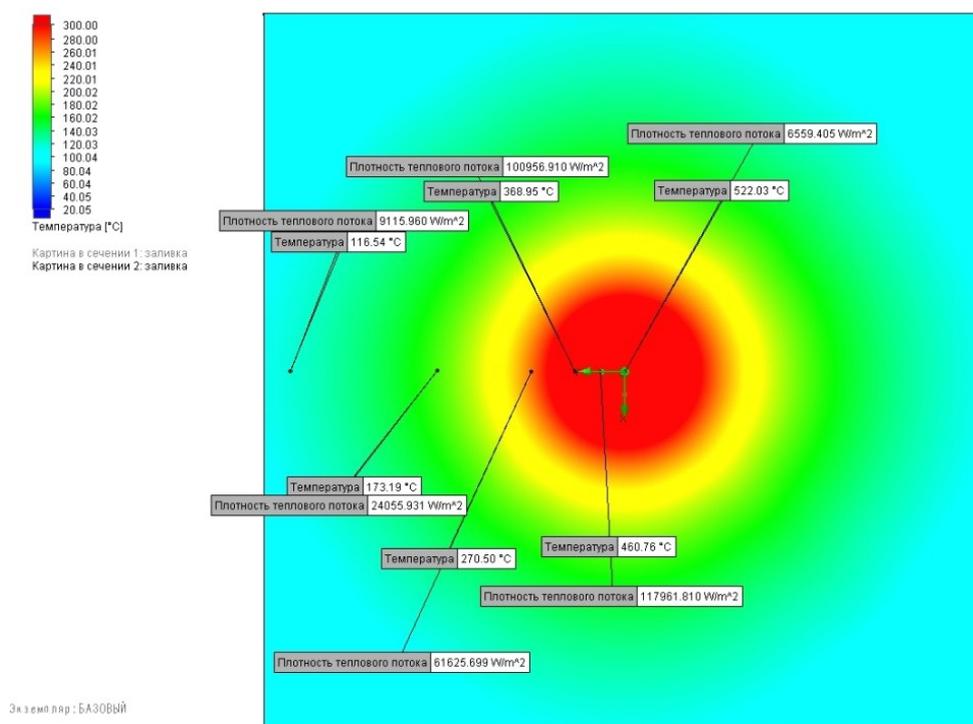


Рисунок 68 – Температурное поле поверхности металла при $U_0 = 30$ м/с, $T = 700$ °C, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 5$

Имеется яркая локальная область взаимодействия высокотемпературной струи с поверхностью металла, так как поверхность находится на небольшом расстоянии. По мере удаления от оси струи температура уменьшается. Наибольшая температура металла составляет 520 °C.

На рисунке 69 представлена температура металла для варианта исследования № 2.

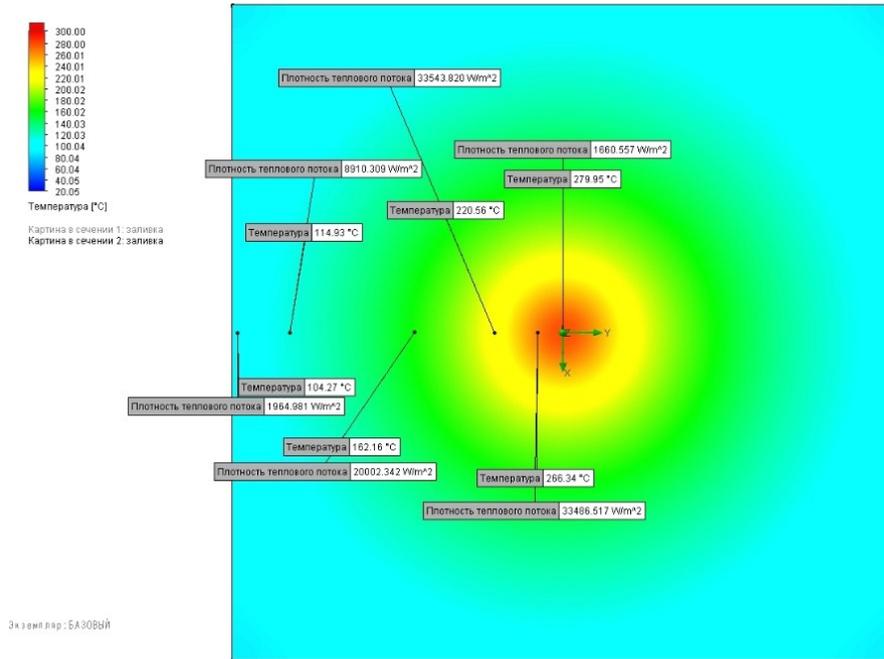


Рисунок 69 – Температурное поле поверхности металла при $U_0 = 30$ м/с, $T = 700$ °C, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$

Имеется яркая локальная область взаимодействия высокотемпературной струи с поверхностью металла, которая уменьшается по мере удаления от оси струи. Наибольшая температура металла составляет 280 °C.

На рисунке 70 представлена температура металла для варианта исследования № 3.

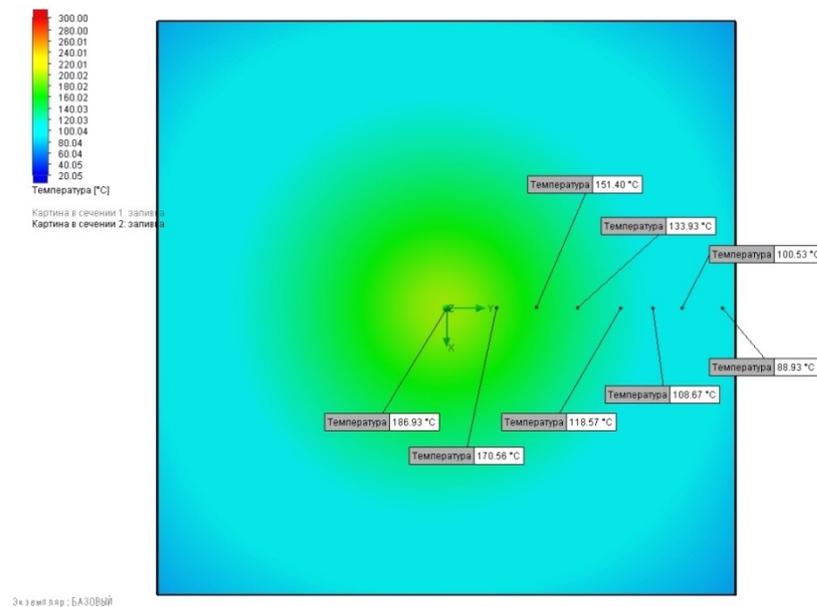


Рисунок 70 – Температурное поле поверхности металла при $U_0 = 30$ м/с, $T = 700$ °C, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 15$

При данном расстоянии от сопла, металл прогревается незначительно. Наибольшая температура металла составляет 186 °С.

На рисунке 71 температура металла для варианта исследования № 4.

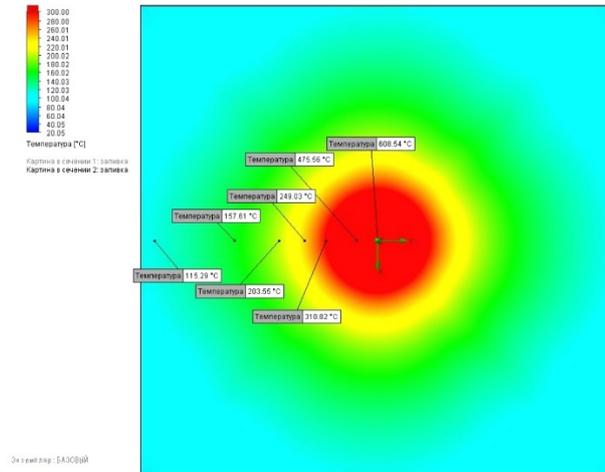


Рисунок 71 – Температурное поле поверхности металла при $U_0 = 100$ м/с, $T = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 5$

Имеется более яркая локальная область взаимодействия высокотемпературной струи с поверхностью металла, так как поверхность находится на небольшом расстоянии и увеличение скорости истечения азота способствует более интенсивному взаимодействию струи и металла, повышая температуру вблизи его поверхности. Наибольшая температура металла составляет 608 °С.

На рисунке 72 температура металла для варианта исследования № 5.

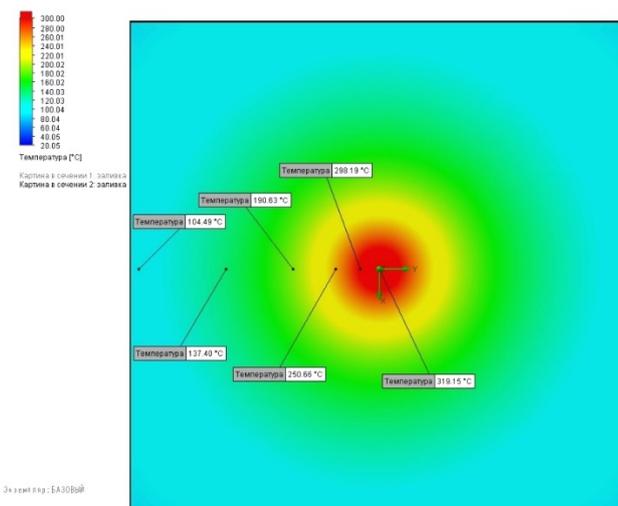


Рисунок 72 – Температурное поле поверхности металла при $U_0 = 100$ м/с, $T = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$

Повышение скорости способствовало увеличению температуры металла, а также области взаимодействия струи с металлом. Наибольшая температура металла составляет 320 °С.

На рисунке 73 представлена температура металла для варианта исследования № 6.

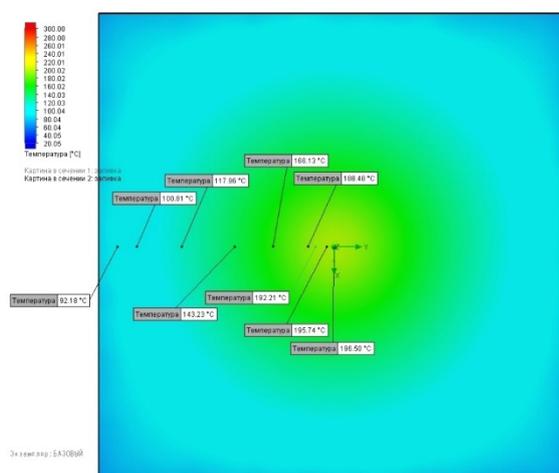


Рисунок 73 – Температурное поле поверхности металла при $U_0 = 100$ м/с, $T = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм,
 $h/d_0 = 15$

В данном случае, повышение скорости незначительно способствовало увеличению температуры металла, вследствие удаленности от сопла. Наибольшая температура металла составляет 195 °С.

Ниже, на рисунке 74, представлен график с обобщенными результатами исследований по нагреву металла, представленных выше.

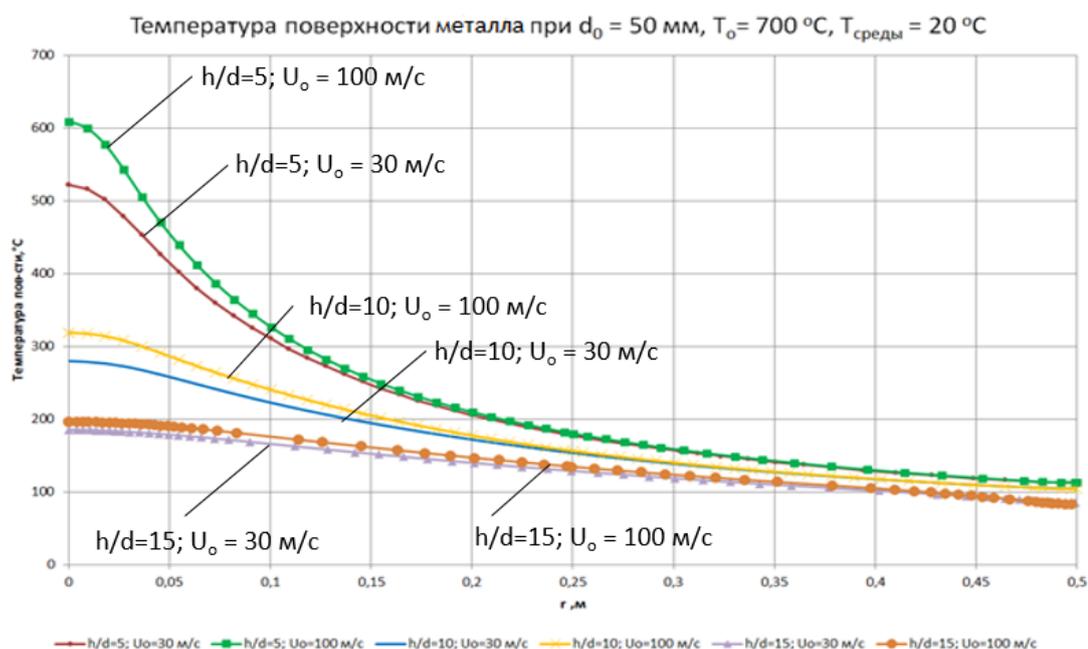


Рисунок 74 - Изменение температуры поверхности металла при изменении расстояния от сопла
и скорости истечения

Как уже было сказано, уменьшение расстояния между соплом истечения и металлом, повышает локальность нагрева, в то время как повышение скорости способствует интенсификации нагрева.

Ниже, на рисунке 75, представлен график распределения плотности теплового потока на поверхности металла, для исследований, представленных выше.

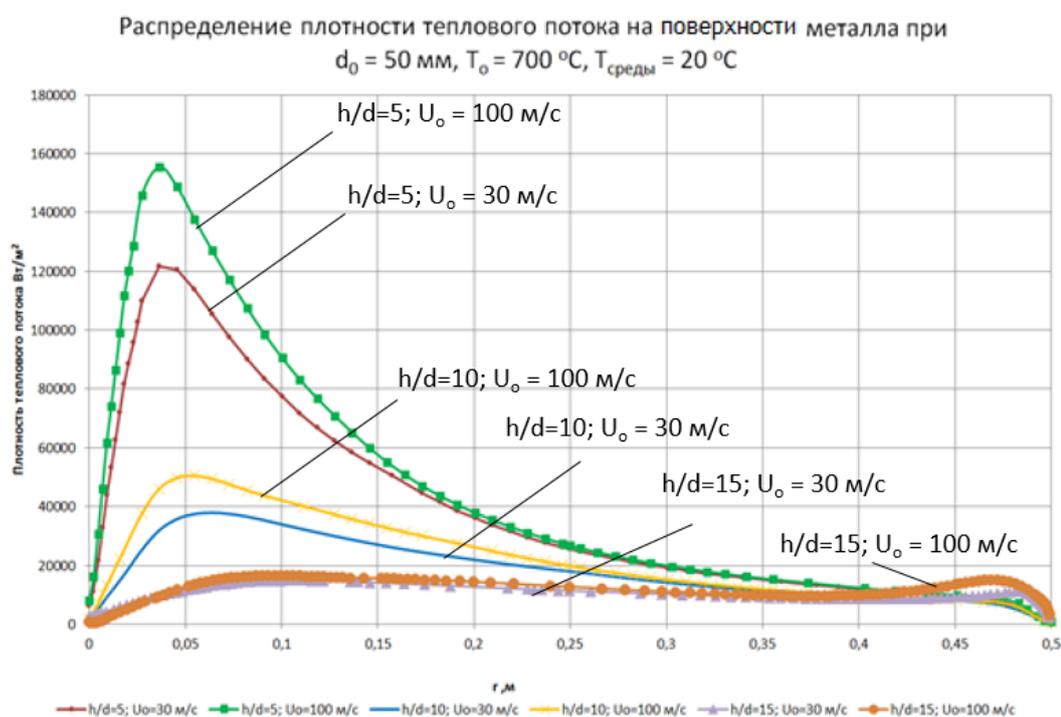


Рисунок 75 - Распределение плотности теплового потока на поверхности металла при изменении расстояния от сопла и скорости истечения

В критической точке значение плотности теплового потока равно нулю из-за отсутствия разности температур между струей и металлом. По мере удаления от оси струи, в каждом из вариантов исследований имеется ярковыраженный пик значения плотности теплового потока вследствие уже максимального градиента температуры между металлом и струей в этой области.

3.4.1 Исследование теплового состояние металла в условиях наличия и отсутствия радиальных перетоков теплоты

Для того чтобы выяснить, происходит нагрев металла только конвекцией от струи азота или еще имеется переток теплоты от металла с высокой температурой по мере удаления от критической точки за счет теплопроводности, проведено исследование двух схем нагрева.

Рассматриваются два варианта нагрева металла, представленные на рисунке 77:

- С имеющейся низкотеплопроводной вставкой;
- Без вставки, нагрев чистого металла.

Диаметр сопла $d_0 = 50$ мм, температура истечения азота $T_0 = 700$ °С, струя является осесимметричной, $T_{\text{среды}} = 20$ °С, $h/d_0 = 10$, $U_0 = 30$ м/с.

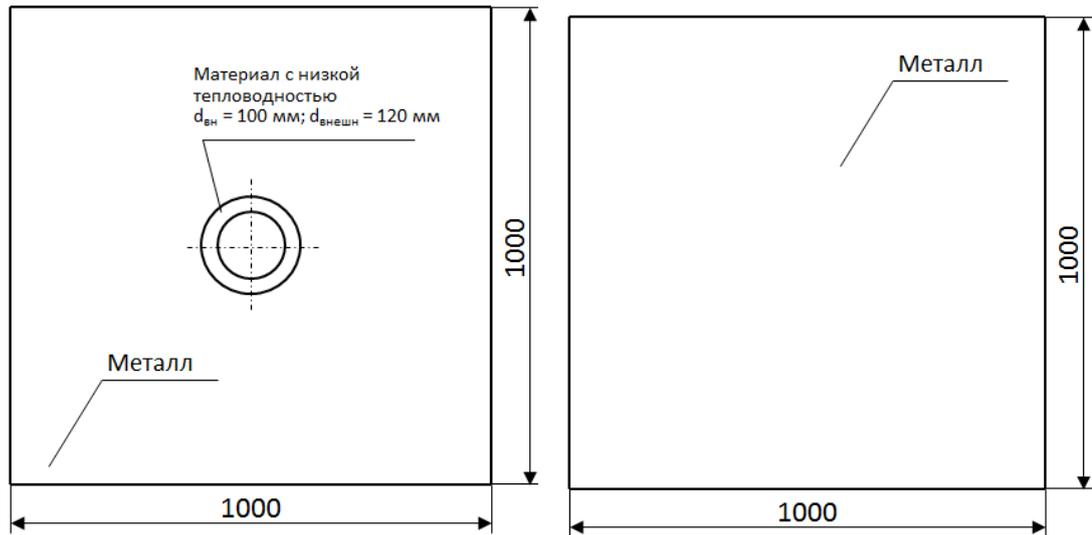


Рисунок 76 - Вариант нагрева металла с низкотеплопроводной вставкой и без

На рисунке 77 представлена температура поверхности металла с вставкой, а на рисунке 78 температура поверхности металла без вставок.

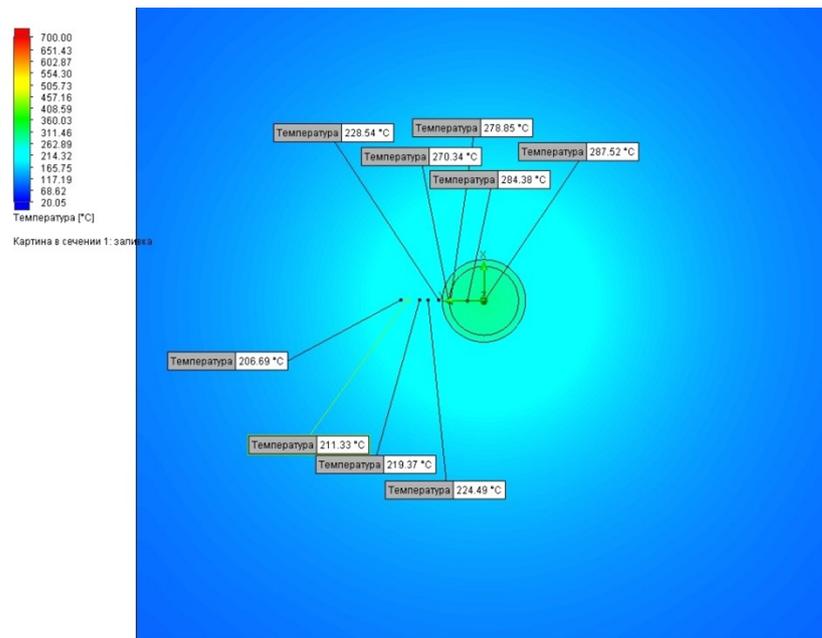


Рисунок 77 - Температура поверхности металла с низкотеплопроводной вставкой

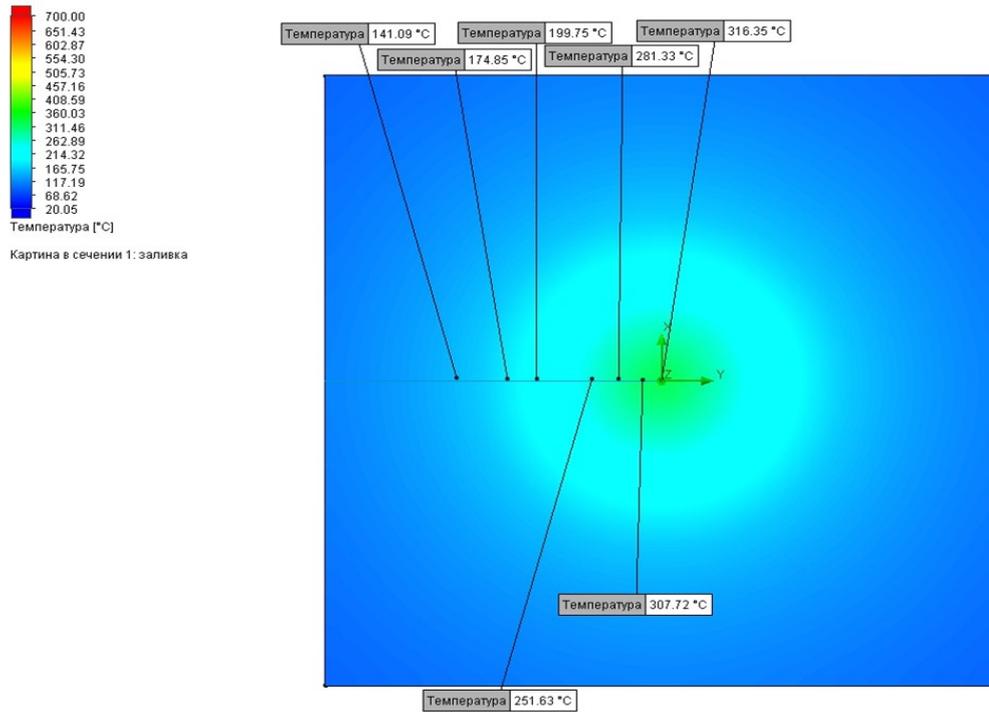


Рисунок 78 - Температура поверхности металла без низкотеплопроводной вставкой

Для наглядности, ниже на рисунках 79 и 80, представлены графики сравнения температуры и плотности теплового потока на поверхности металла от критической точки.

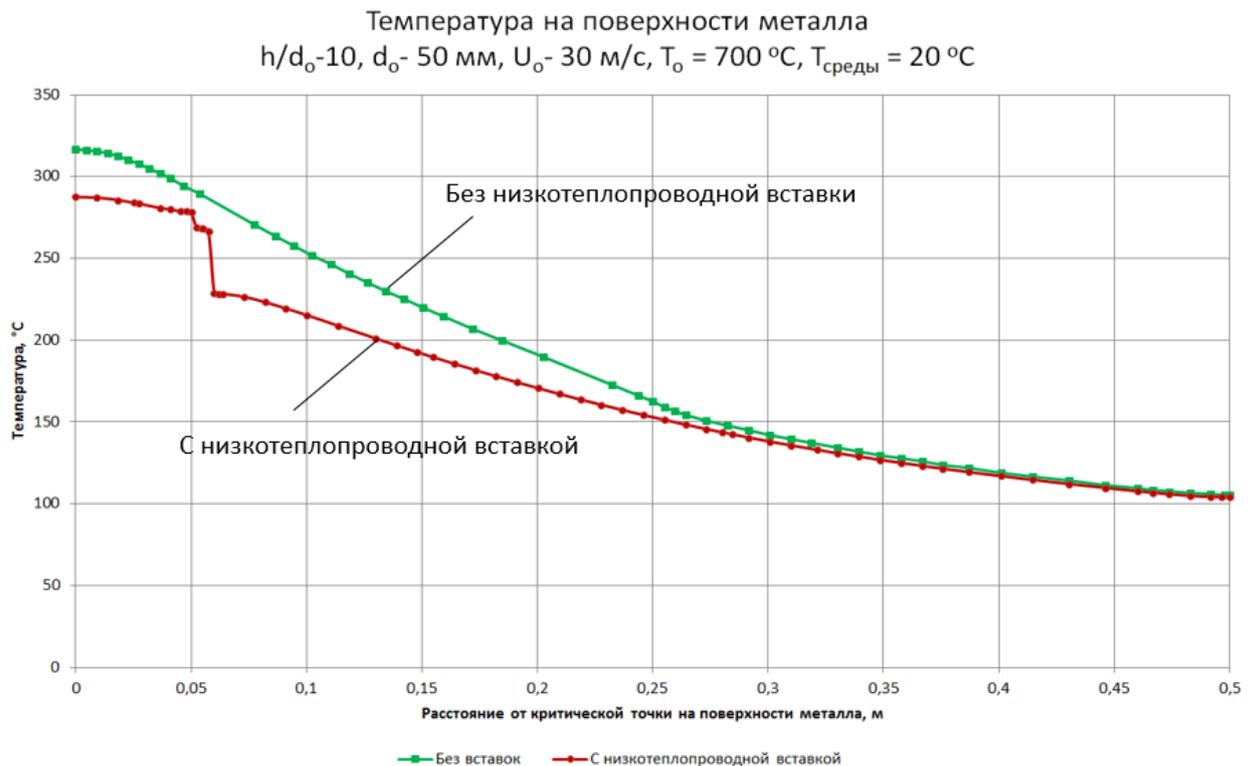


Рисунок 79 - Температура на поверхности металла для двух вариантов

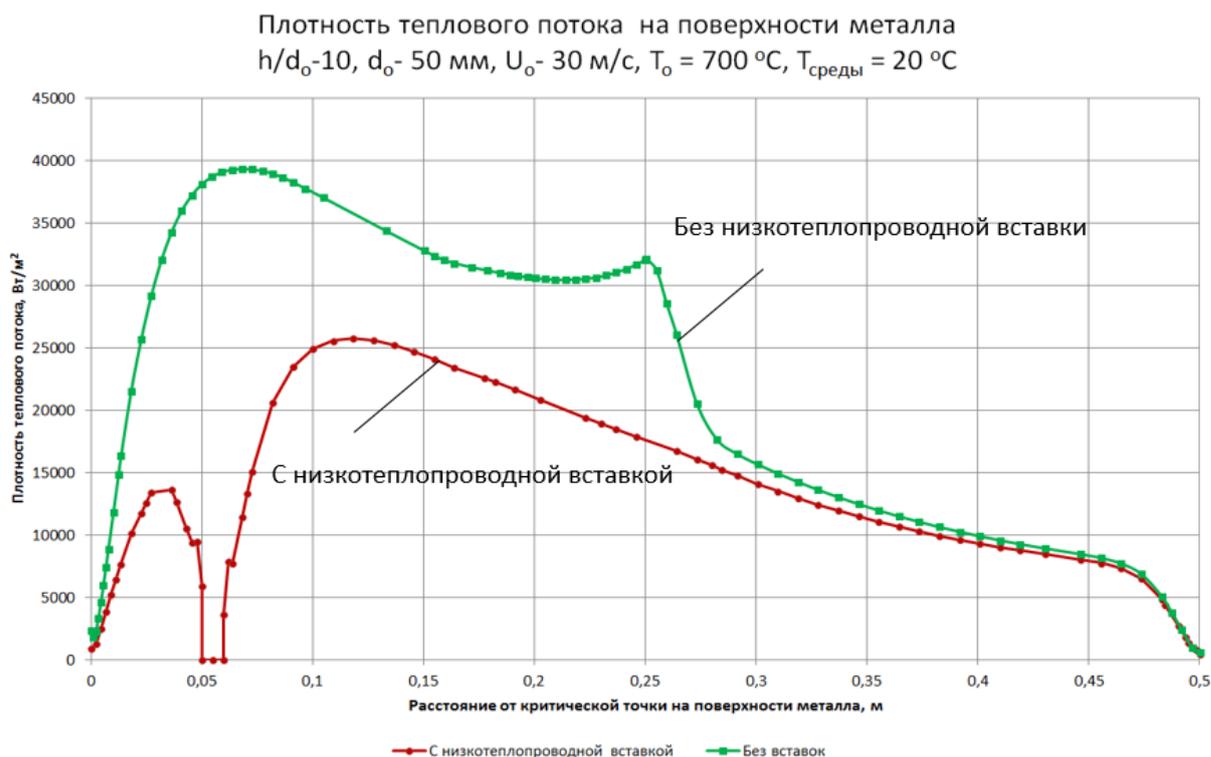


Рисунок 80 - Плотность теплового потока на поверхности металла для двух вариантов

Плотность теплового потока на поверхности исследуемой вставки стремится к нулю, а температура металла после вставки заметно ниже, чем при случае с ее отсутствием. На расстоянии $5d_o$ температура на поверхности металла для двух вариантов исследования уже совпадает.

Также, можно сделать вывод о том, что нагрев металла происходит не только за счет конвекции, но и за счет перетоков теплоты внутри металла.

3.5 Экспериментальные исследования конвективной теплоотдачи

Экспериментальные исследования по физическому моделированию взаимодействия высокотемпературного струйного потока с плоской поверхностью проводились на разработанной установке.

Целью данных исследований являлись подтверждения правильности выбора расчетной модели при численном моделировании, а также правильность расчетной схемы структуры струи.

3.5.1 Описание экспериментального стенда

Экспериментальный стенд включает в себя нагнетатель с нагревателем воздуха Интерскол 2000ЭМ с возможностью изменения температурного режим; плоскую поверхность с

встроенными датчиками температуры, которые состоят из алюминиевого цилиндра, к которому подведена термопара ХА с выходом на микроконтроллер и интегрированным АЦП для передачи данных на ЭВМ (вычисления и передача происходят с помощью написанного кода).

Регулирование температуры подогрева воздуха возможно с шагом 10 °С, температурный диапазон от 50 до 600 °С.

Для измерения плотности теплового потока в плиту из теплоизоляционного материала были зачеканены 8 датчиков. Схема расположения датчика в плите представлена на рисунке 81.

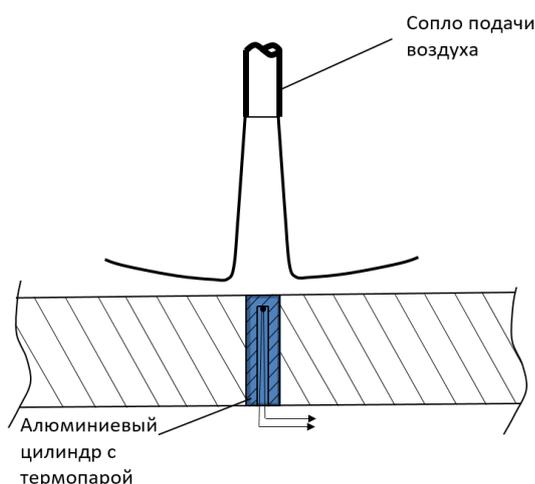


Рисунок 81 – Схема расположения датчика в плите

Датчик представляет собой алюминиевый цилиндр диаметром 6 мм и длиной не более 15 мм, к которому подведена термопара ХА, 1 кл., 0-1100 °С, подключенная через усилитель к плате микроконтроллера и интегрированным в него АЦП и последующей передачей данных на ЭВМ (вычисления и передача происходят с помощью написанного программного кода).

Общая схема системы измерения с термопарой, операционным усилителем и платой представлена на рисунке 82.

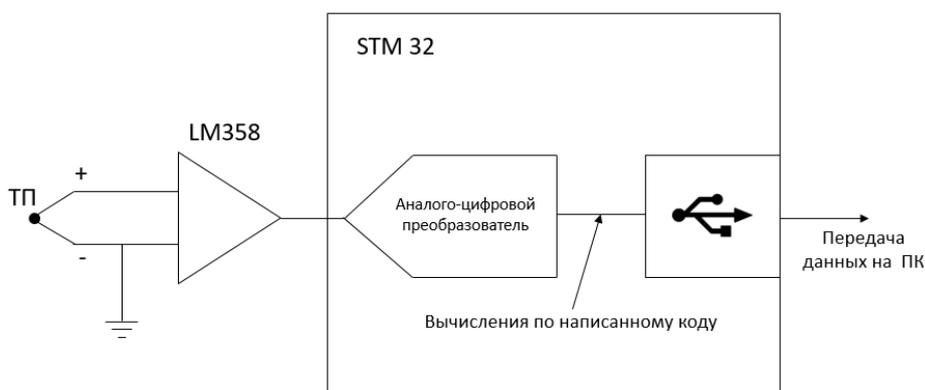


Рисунок 82 - Общая схема системы измерения плотности теплового потока

Для проведения вычислений был написан код на языке программирования C++ в программе Atollic TrueSTUDIO.

Схема расположения датчиков измерения плотности теплового потока представлена на рисунке 83. Общая схема экспериментального стенда на рисунке 84.

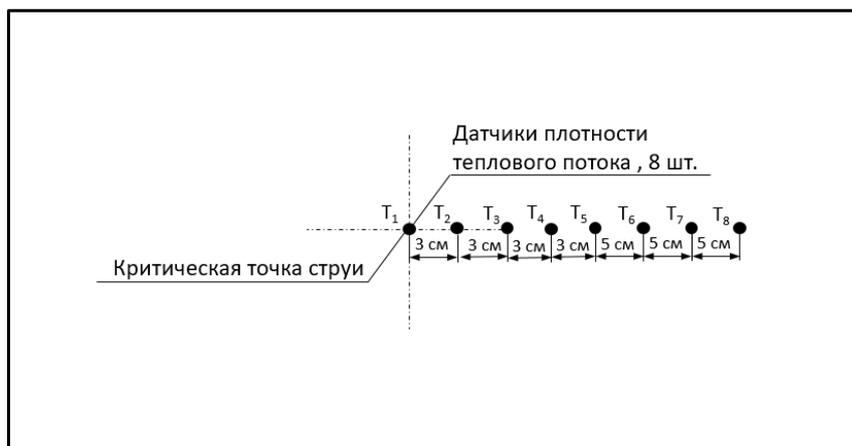


Рисунок 83 – Схема расположения датчиков плотности теплового потока

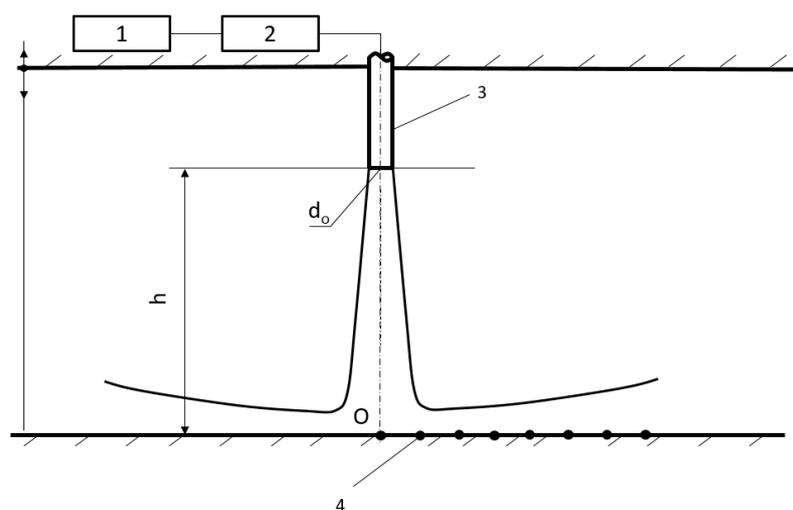


Рисунок 84 – Общая схема экспериментального стенда: 1 – подача воздуха, 2 – нагреватель воздуха, 3 - сопло, 4 - датчик измерения плотности теплового потока

3.5.2 Методика расчета величины плотности теплового потока

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

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

Методика расчета величины плотности теплового потока по экспериментальным данным состояла в следующем.

Нагрев датчика происходит по зависимости, представленной на рисунке 85.

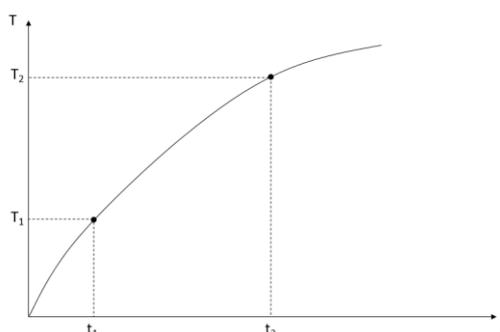


Рисунок 85 – Графическая зависимость нагрева образца во времени

Теплосодержание датчика плотности теплового потока в момент времени t_1 , Дж

$$i_1 = Mc_1T_1 \quad (8)$$

где, M - масса датчика, кг

T_1 - температура в момент времени t_1 , °С

c_1 - удельная теплоемкость датчика, Дж/кг·°С, при температуре T_1

Теплосодержание датчика плотности теплового потока в момент времени t_2 , Дж

$$i_2 = Mc_2T_2 \quad (9)$$

где, M - масса датчика, кг

T_2 - температура в момент времени t_2 , °С

c_2 - удельная теплоемкость датчика, Дж/кг·°С, при температуре T_2

Изменение теплосодержаний датчиков Δi за время $\Delta t = t_2 - t_1$:

$$\Delta i = i_2 - i_1 = Mc_2T_2 - Mc_1T_1 = M(c_2T_2 - c_1T_1) \quad (10)$$

Допуская, что при малых величинах Δt $c_1 = c_2$, величина Δi равна

$$\Delta i = Mc(T_2 - T_1) \quad (11)$$

Величина Δi обусловлена тем, что за время Δt датчик получил теплоту за счет конвективной теплоотдачи, т.е.

$$\Delta i = qF\Delta t, \quad (12)$$

где, q – плотность теплового потока, Вт/м²

F – площадь теплообменной поверхности (торца датчика), м²

Следовательно, плотность теплового потока равна, Вт/м²

$$q = \Delta i / F \Delta t \quad (13)$$

3.5.3 Результаты экспериментального исследования и их обсуждение

На первом этапе эксперимента определялись «динамические» характеристики датчиков плотности теплового потока с целью определения области чувствительности датчиков при изменении параметра h/d_0 и при температуре истекающего из сопла воздуха T_0 , равной 200 °С и 500 °С.

Результаты этих экспериментов показаны на рисунках 86,87,88,89,90,91. Из приведенных данных можно сделать два основных вывода: 1 – изменение величины h/d_0 существенно сказывается на интенсивности конвективной теплоотдачи и 2 – при фиксированной величине h/d_0 наибольшие изменения интенсивности конвективной теплоотдачи наблюдаются в области перехода струйного потока в веерный поток. Начиная с датчика №4 и далее вниз по течению потока интенсивность конвективной теплоотдачи существенно не меняется.

В таблице 8 и 9 в качестве примера приведены результаты расчета величины плотности теплового потока. Приведенные данные подтверждают вышеизложенные выводы.

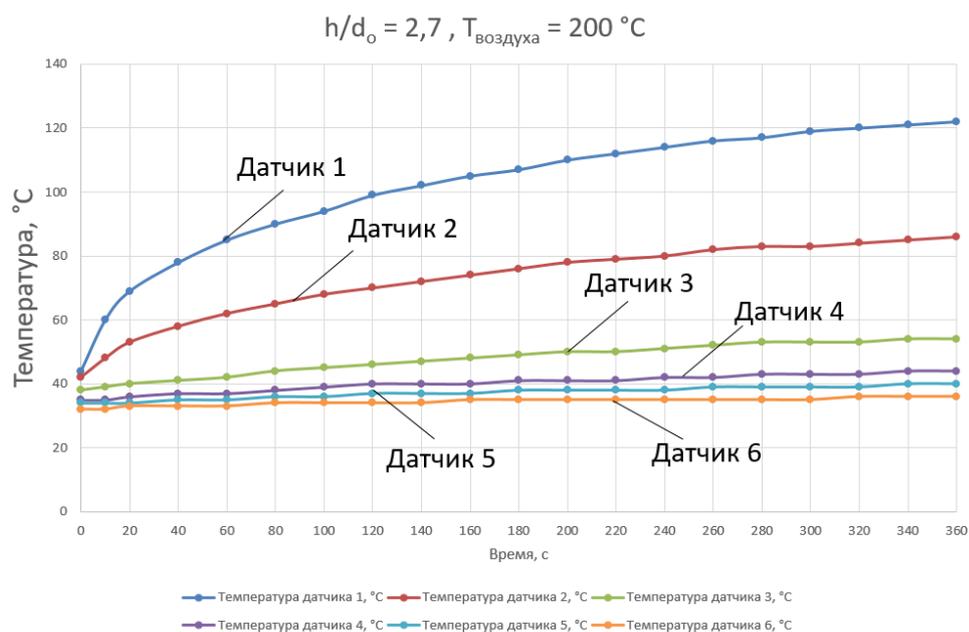


Рисунок 86 – Температуры датчиков плотности теплового потока при $T_{\text{воздуха}} = 200 \text{ } ^\circ\text{C}$ и $h/d_0 = 2,7$

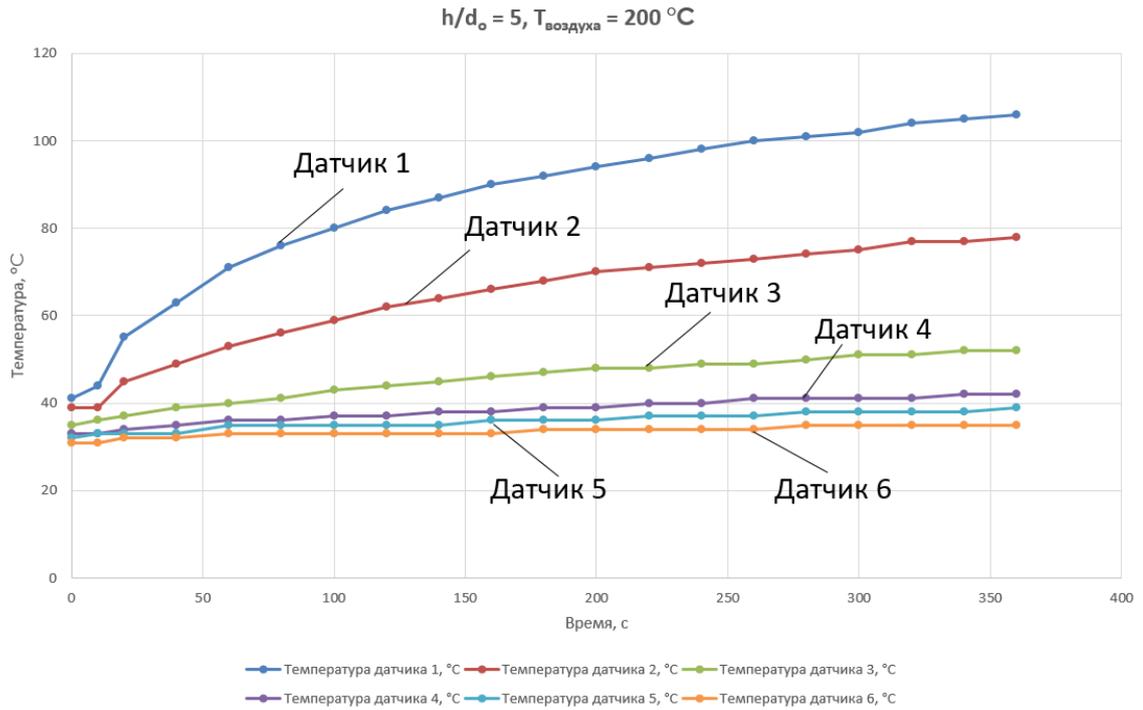


Рисунок 87 – Температуры датчиков плотности теплового потока при $T_{\text{воздуха}} 200 \text{ }^\circ\text{C}$ и $h/d_o = 5$

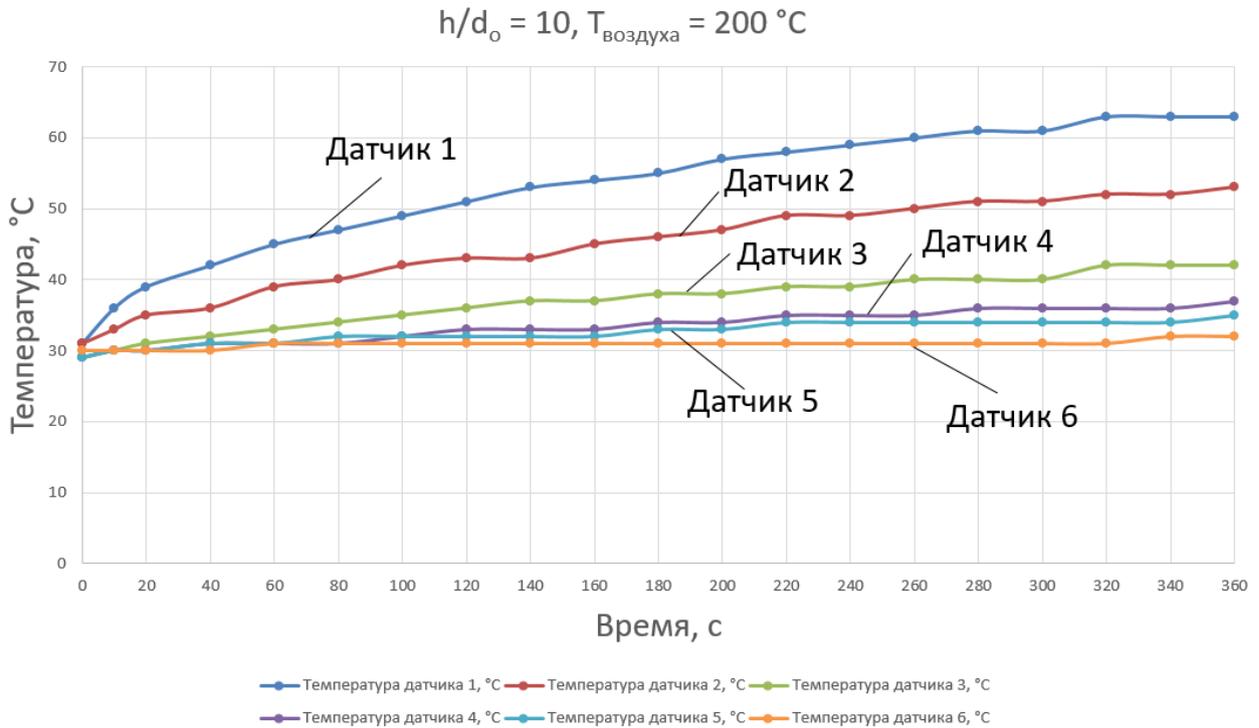


Рисунок 88 – Температуры датчиков плотности теплового потока при $T_{\text{воздуха}} 200 \text{ }^\circ\text{C}$ и $h/d_o = 10$

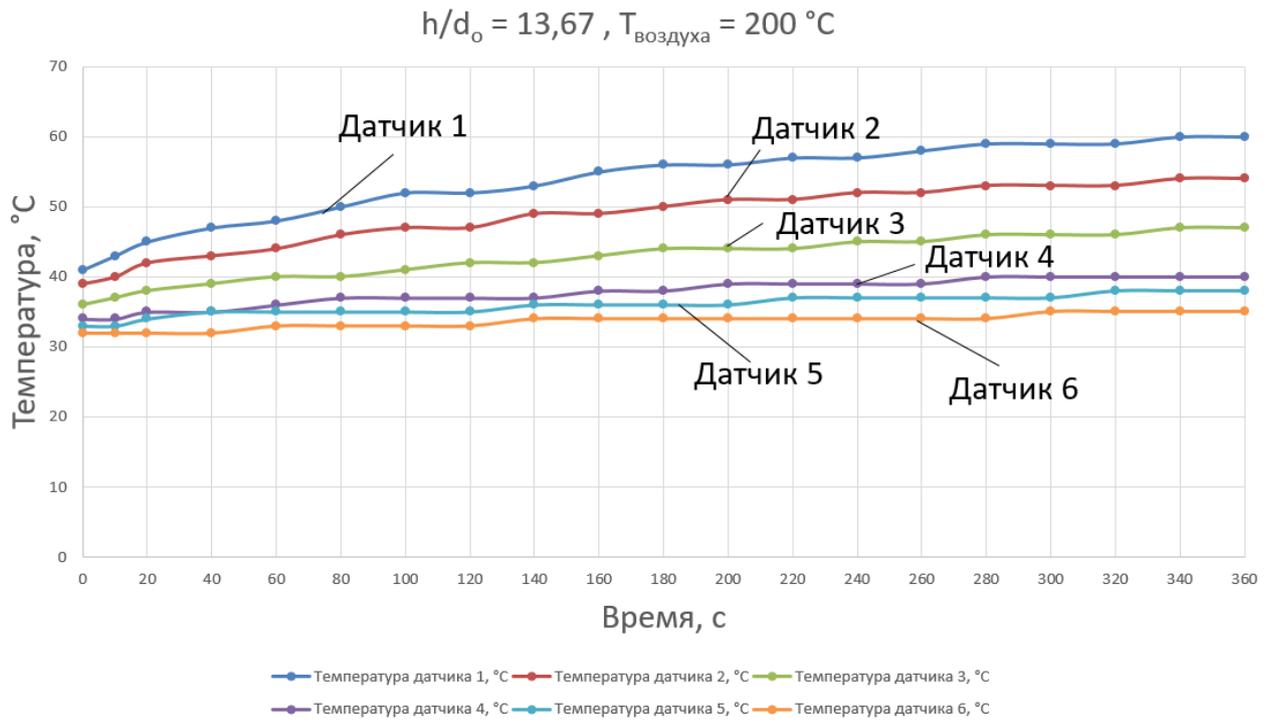


Рисунок 89 – Температуры датчиков плотности теплового потока при $T_{\text{воздуха}} 200\text{ }^{\circ}\text{C}$
и $h/d_o = 13,67$

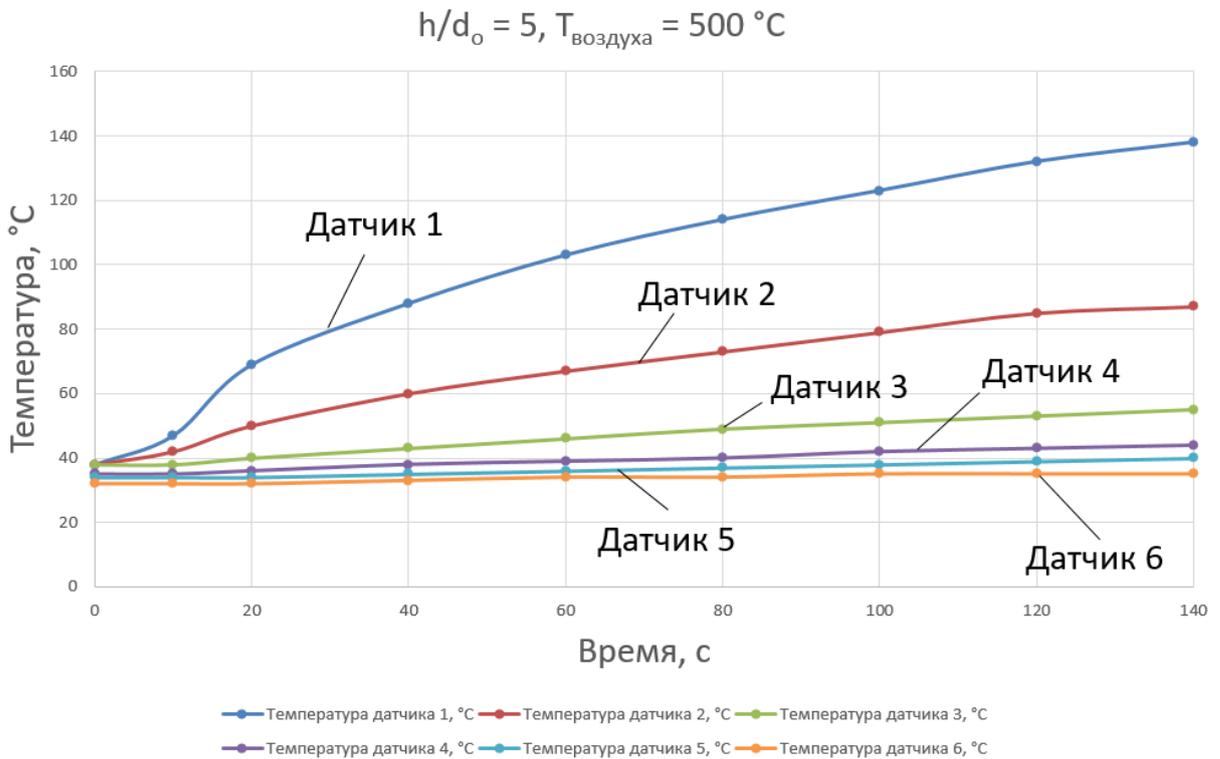


Рисунок 90 – Температуры датчиков плотности теплового потока при $T_{\text{воздуха}} 500\text{ }^{\circ}\text{C}$
и $h/d_o = 5$

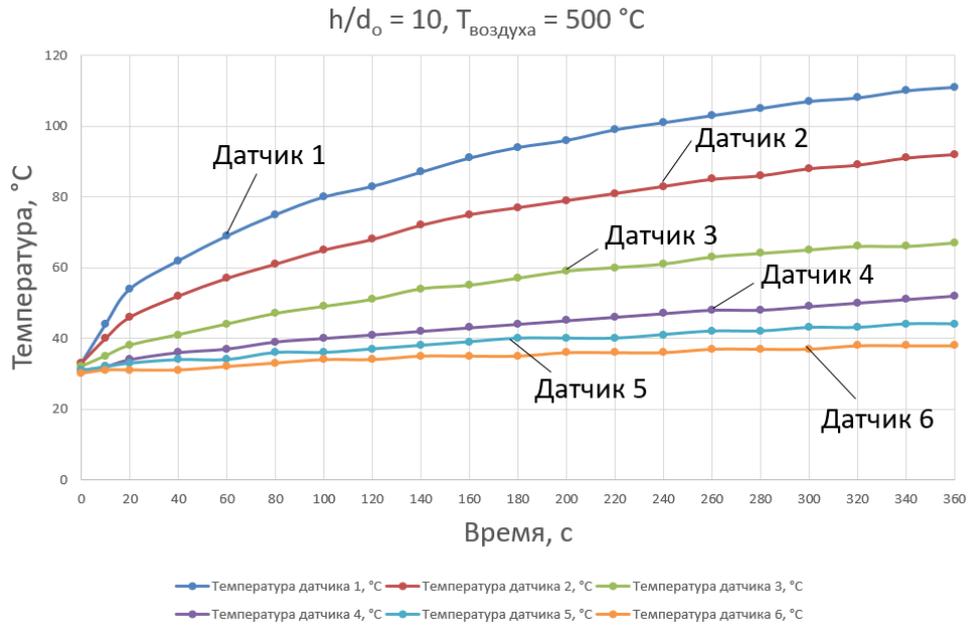


Рисунок 91 – Температуры датчиков плотности теплового потока при $T_{\text{воздуха}} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$
и $h/d_o = 10$

Таблица 8 - Результаты расчета плотности теплового потока при $T_{\text{воздуха}} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$.

№ датчика	R, м	$h/d_o = 2,67,$ Вт/м^2	$h/d_o = 5, \text{Вт/м}^2$	$h/d_o = 10, \text{Вт/м}^2$	$h/d_o = 13,67,$ Вт/м^2
Датчик 1	0	14437,41826	13406,1741	6187,464968	4124,976645
Датчик 2	0,03	8249,953291	9281,197452	4124,976645	3093,732484
Датчик 3	0,06	4124,976645	4124,976645	3093,732484	2062,488323
Датчик 4	0,09	4124,976645	1031,244161	2062,488323	1031,244161
Датчик 5	0,12	1031,244161	0	1031,244161	0
Датчик 6	0,17	1031,244161	0	0	0

Таблица 9 - Результаты расчета плотности теплового потока при $T_{\text{воздуха}} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$.

№ датчика	R, м	$h/d_o = 5, \text{Вт/м}^2$	$h/d_o = 10, \text{Вт/м}^2$
Датчик 1	0	29906,08068	14437,41826
Датчик 2	0,03	18562,3949	11343,68577
Датчик 3	0,06	7218,70913	7218,70913
Датчик 4	0,09	4124,976645	4124,976645
Датчик 5	0,12	3093,732484	3093,732484
Датчик 6	0,17	1031,244161	2062,488323

В таблицах 8 и 9 величина R есть расстояние от критической точки струи до соответствующего датчика плотности теплового потока, м.

Таким образом 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.

Выводы по главе 3

Исследована аэродинамика, и структура одиночной круглой струи азота, взаимодействующей с твердой поверхностью при различном расстоянии сопла до поверхности, а также при изменении скорости истечения азота.

Показаны 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. По мере растекания веерного потока скорость газа снижается.

Толщина гидродинамического пограничного слоя при выбранных условиях весьма мала, толщина же основного веерного потока соизмерима с внутренним диаметром сопла.

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.

При анализе аэродинамики струй, взаимодействующих нормально с ограничивающей поверхностью, необходимо учитывать температурный фактор. 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.

Исследована структура температурных полей одиночной круглой струи азота, взаимодействующей с твердой поверхностью при различном расстоянии сопла до поверхности, а также при изменении скорости истечения азота.

Показаны две области течения газа – область струйного течения и область веерного потока. Температура азота уменьшается по мере развития струи из-за потери начальной энергии на вовлечение в движение неподвижного окружающего газа.

При скорости истечения азота 30 м/с, на расстоянии не более $R/d_0 - 2,5$ от оси струи, у поверхности металла имеется максимум, который характеризует толщину теплового пограничного слоя. Толщина теплового пограничного слоя при выбранных условиях весьма мала, толщина же основного веерного потока соизмерима с внутренним диаметром сопла. На расстоянии

больше $R/d_0 - 2,5$ – поток можно рассматривать, как движения неограниченного потока, вдоль плоской поверхности и для этого участка возможно использование методик, предлагаемых для данного случая.

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

Высокие скорости уменьшают область веерного потока до $R/d_0 - 1,5$, далее поток необходимо рассматривать, как движения неограниченного потока вдоль плоской поверхности и для этого участка возможно использование методик, предлагаемых для данного случая.

При понижении температуры истекающего азота, эпюра температур на оси выравнивается. Что касается расстояния от сопла, при котором температура на оси не изменяется, то при минимальной T_0 , это расстояние - максимально и уменьшается по мере повышения температуры T_0 .

Температура поверхности металла при уменьшении расстояния между соплом истечения и металлом, приводит к повышению локальности нагрева, в то время как повышение скорости способствует интенсификации нагрева.

В разработанной модели нагрев металла происходит не только за счет конвекции, но и за счет перетоков теплоты внутри металла.

Результаты экспериментального исследования конвективной теплоотдачи на разработанном стенде, 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.

4 ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СИСТЕМЫ СТРУЙ

4.1 Схема расчетного участка

Проведенные в Главе 3 исследования позволяют понять структуру течения и распределение температуры при истечении струи из сопла с последующим взаимодействием с поверхностью металла, и выбрать рациональные параметры для системы. Отдельно использование одиночной струи на практике редко встречается, а во многих процессах используются системы струй. Далее будут представлены варианты численного моделирования взаимодействия системы струй с поверхностью металла.

Схема исследуемой модели представлена ниже на рисунке 92 и 93, длина и ширина 1000 мм, толщина нагреваемого металла 1 мм, диаметр сопел истечения азота 50 мм, высота от сопла до нагреваемого металла изменяется от 5 до 10 h/d_0 , возможность выхода азота из камеры имеется в 4 стороны.

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 $U_0 = 30\text{ м/с}$. Расстояние между соплами S/d_0 : 2,3,5.

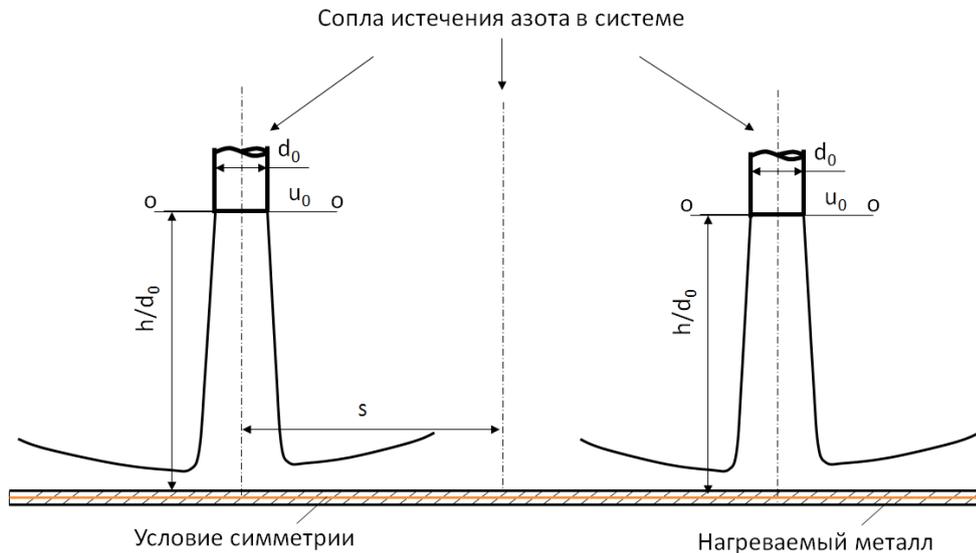


Рисунок 92 - Схема исследования аэродинамики теплового состояния при взаимодействии системы струй 3 на 3

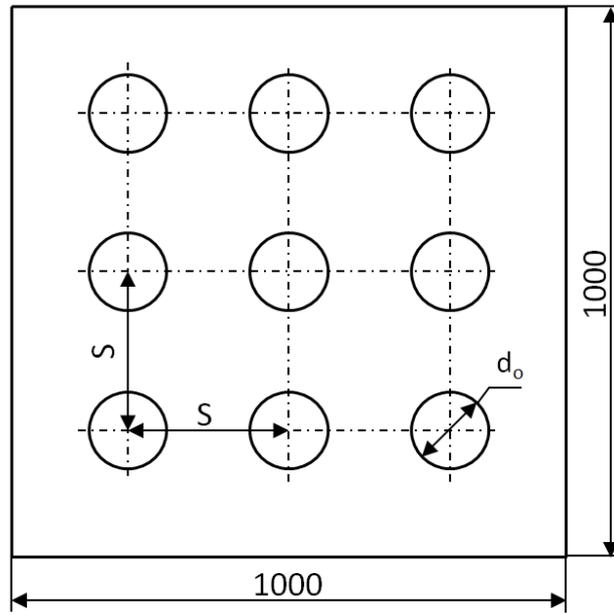


Рисунок 93 - Схема системы струй 3 на 3

При исследовании системы струй 3 на 3 основными определяющими величинами являлись расстояние от среза сопла до поверхности h металла и расстояние между соплами. Варианты исследования представлены в таблице 10.

Таблица 10 - Варианты моделирования при исследовании системы струй 3 на 3

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

4.2 Исследование аэродинамики при изменении S/d_0 и h/d_0

На рисунке 94 представлена структура течения и поля скоростей в системе струй азота 3 на 3 при взаимодействии с поверхностью для варианта №1.

Увеличение расстояния между соплами и поверхностью способствует уменьшению скорости струй у поверхности, но за счет раскрытия каждой из струй происходит перестроение в одну большую.

На рисунке 96 представлена структура течения и поля скоростей в системе струй азота 3 на 3 при взаимодействии с поверхностью для варианта №3.

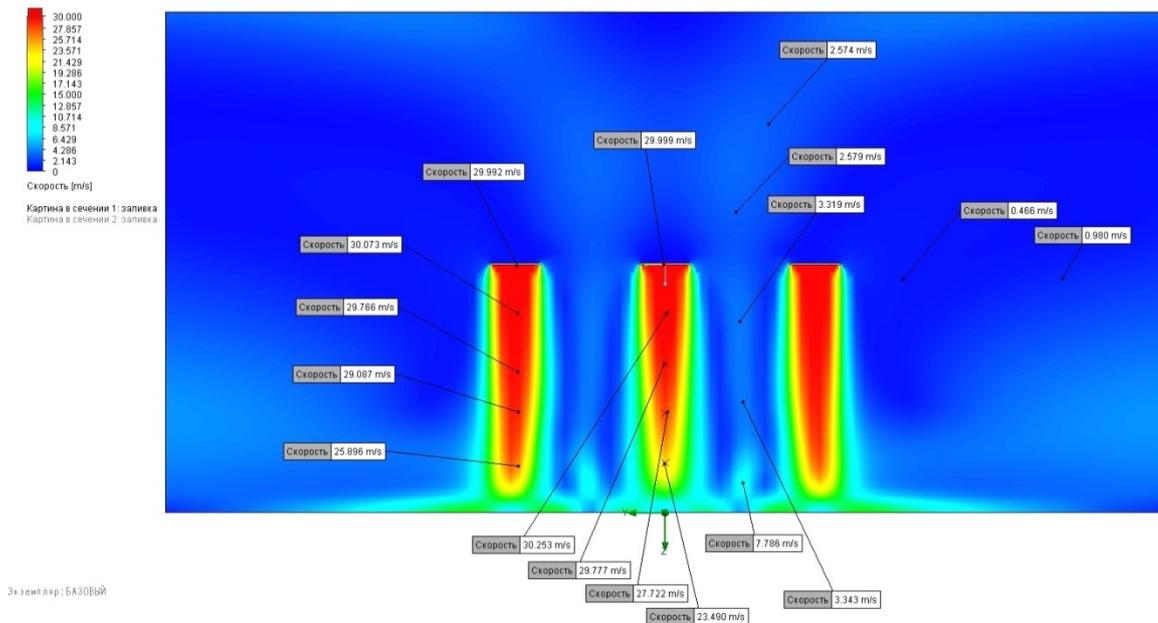


Рисунок 96 – Структура течения в системе струй азота при взаимодействии с поверхностью при $U_0 = 30 \text{ м/с}$, $T = 700 \text{ }^\circ\text{C}$, $d_0 = 50 \text{ мм}$, $h/d_0 = 5$, $S/d_0 = 3$

Ярок выражена толщина как гидродинамического пограничного слоя, которая достаточно мала, и толщина веерного потока, которая больше диаметра сопла за счет интенсивного перемешивания веерных потоков у поверхности. Раскрытие струи еще не происходит, поэтому данный вариант будет способствовать интенсивному теплообмену между струями и поверхностью. На поверхности между струями происходит встреча веерных потоков, способствующая более интенсивному теплообмену в этой области.

На рисунке 97 представлена структура течения и поля скоростей в системе струй азота 3 на 3 при взаимодействии с поверхностью для варианта №4.

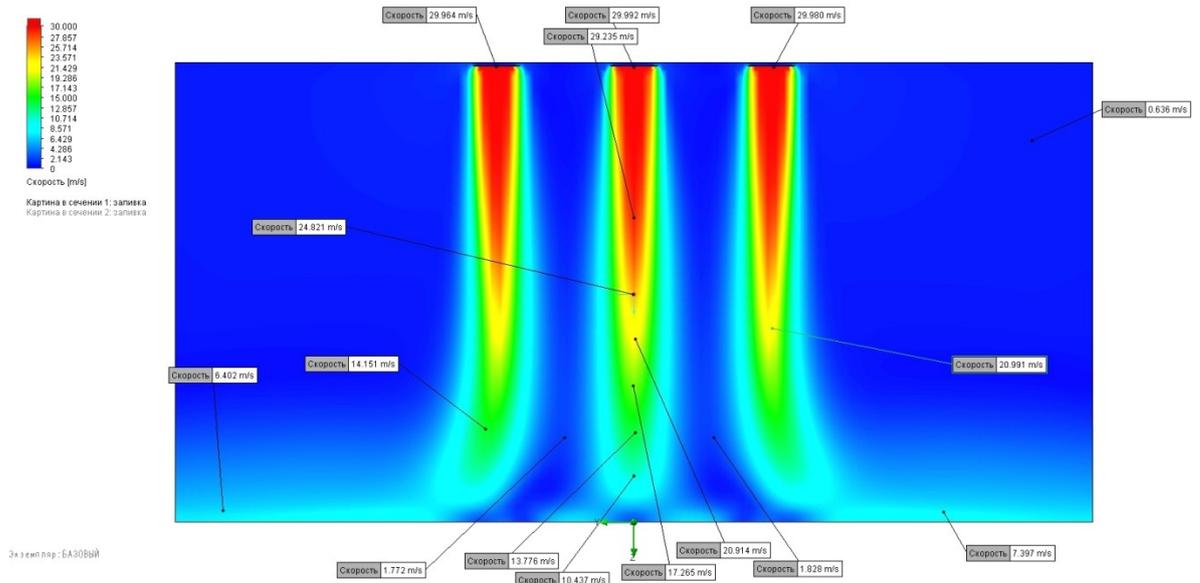


Рисунок 97 – Структура течения в системе струй азота при взаимодействии с поверхностью при $U_0 = 30$ м/с, $T = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$, $S/d_0 = 3$

Увеличение расстояния между соплами, а также между соплами и поверхностью, способствует уменьшению скорости струй у поверхности, но за счет раскрытия каждой из струй не успевает сформироваться в одна большая струя.

На рисунке 98 представлена структура течения и поля скоростей в системе струй азота 3 на 3 при взаимодействии с поверхностью для варианта №5.

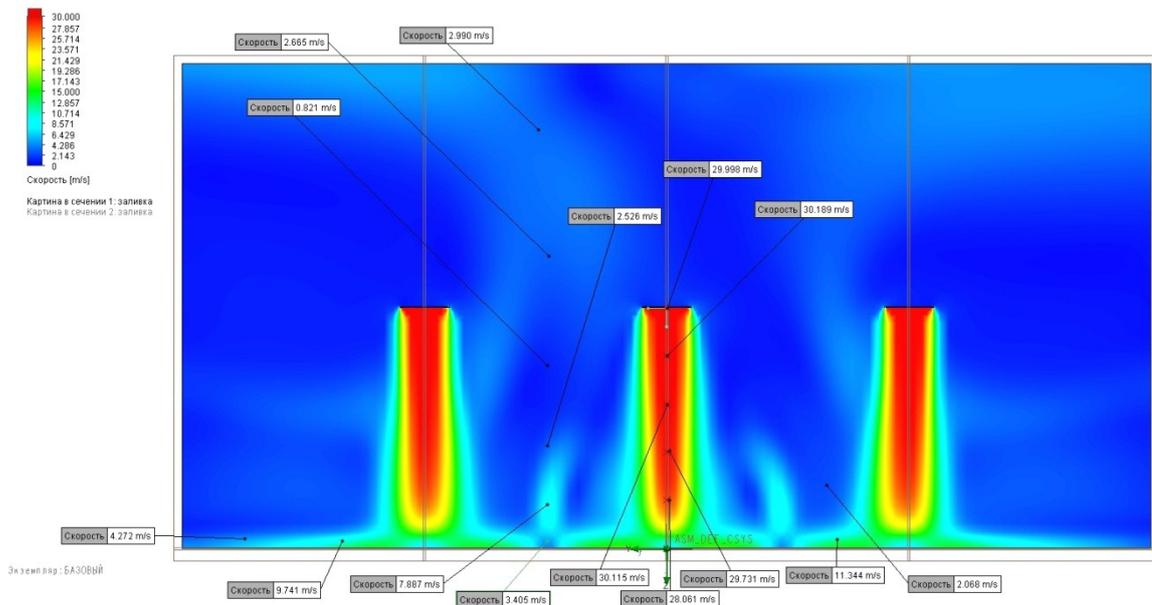


Рисунок 98 – Структура течения в системе струй азота при взаимодействии с поверхностью при $U_0 = 30$ м/с, $T = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 5$, $S/d_0 = 5$

Такое увеличение расстояния между соплами способствует появлению локальных максимумов на поверхности за счет того, что раскрытие струи не успевает произойти и система

действует как множество одиночных струй. На поверхности между струями происходит встреча веерных потоков, способствующая более интенсивному теплообмену в этой области.

На рисунке 99 представлена структура течения и поля скоростей в системе струй азота 3 на 3 при взаимодействии с поверхностью для варианта №6.

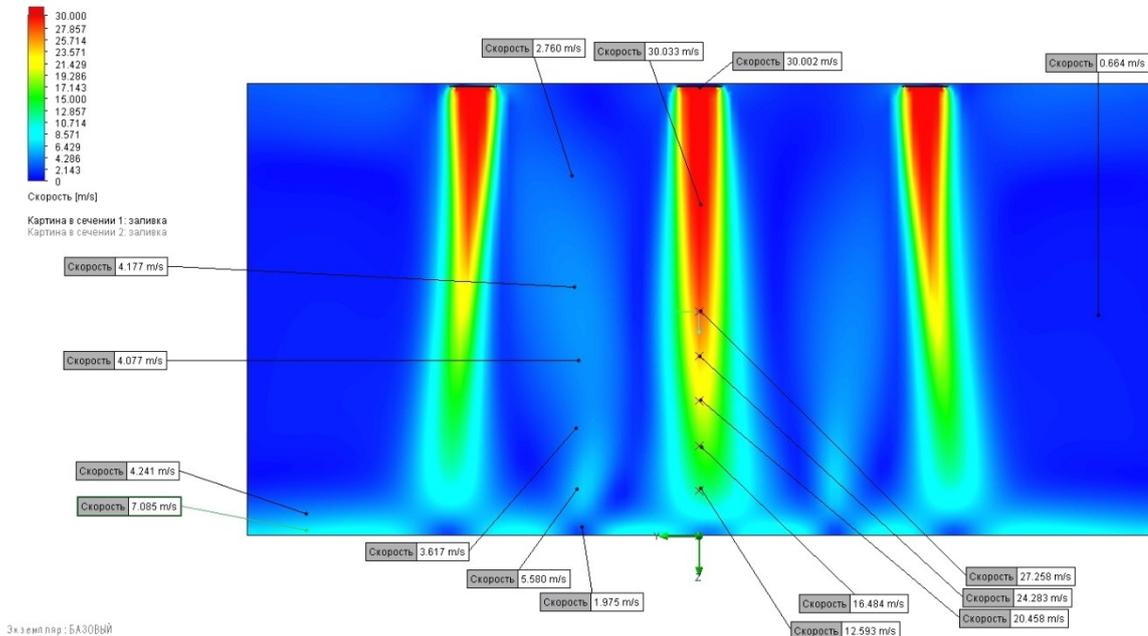


Рисунок 99 – Структура течения в системе струй азота при взаимодействии с поверхностью при $U_0 = 30$ м/с, $T = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$, $S/d_0 = 5$

Такое увеличение расстояния между соплами способствует раскрытию струи, а также взаимодействию веерных потоков на поверхности, что способствует интенсификации теплообмена в этих областях. Происходит интенсивное перемешивание на поверхности.

Ниже, на рисунках 100, 101 и 102 представлено распределение скорости в поперечном сечении системы струй для варианта 1, 3 и 5. Так как струи являются осесимметричной, то для удобства восприятия на графике изображаем распределение скорости от центральной оси вглубь по радиусу.

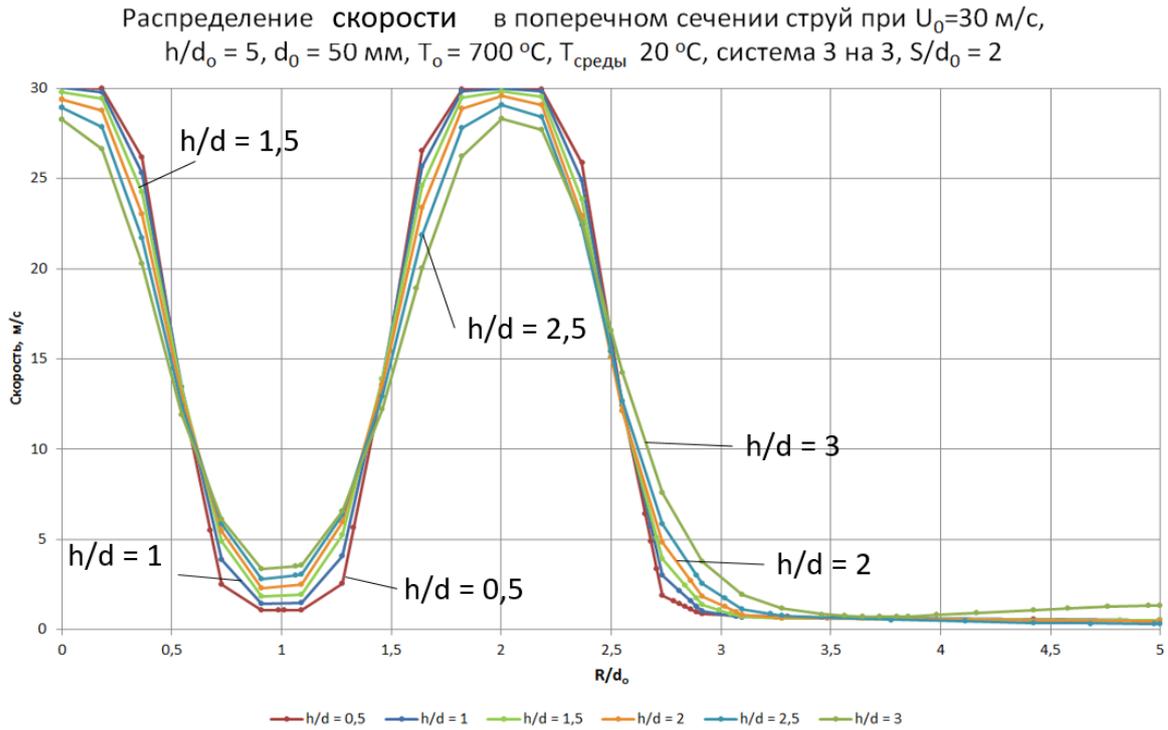


Рисунок 100 - Распределение скорости в поперечном сечении струи при $U_0 = 30$ м/с, $T_0 = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 5$, $S/d_0 = 2$

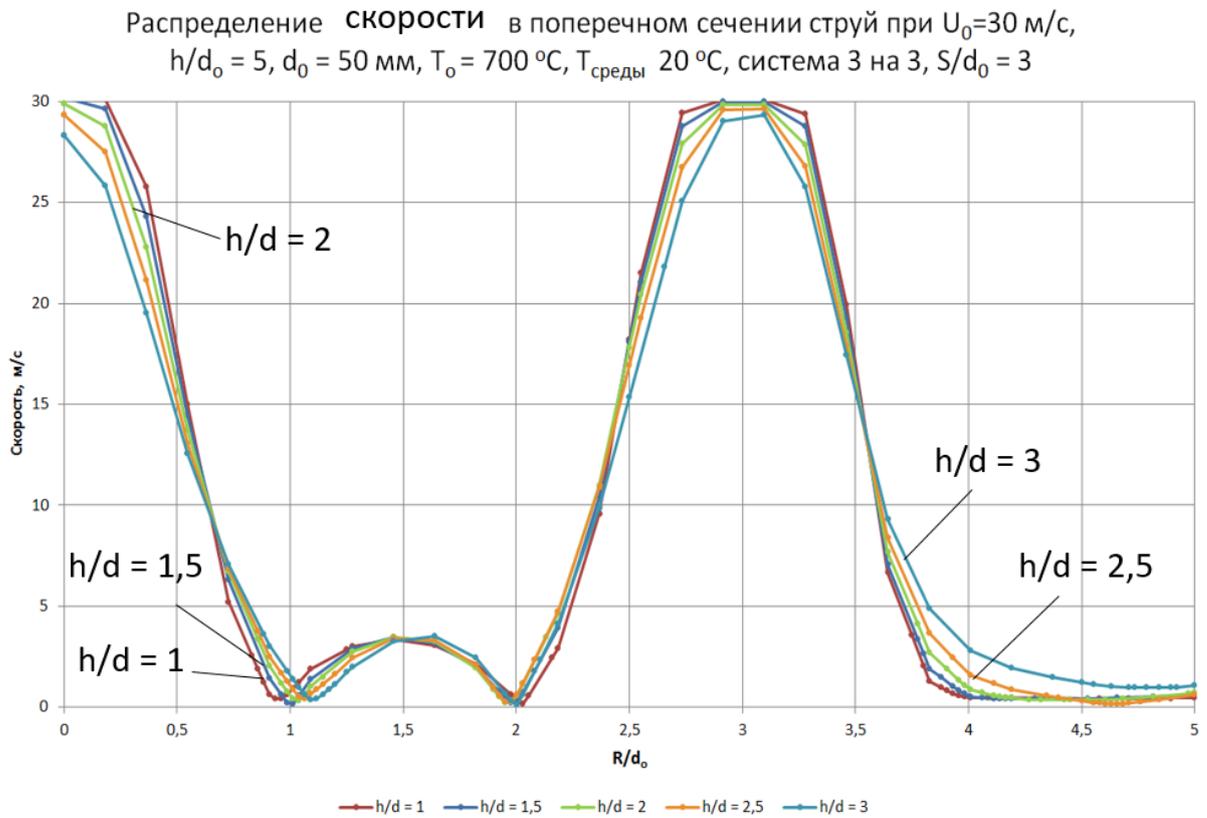


Рисунок 101 - Распределение скорости в поперечном сечении струи при $U_0 = 30$ м/с, $T_0 = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 5$, $S/d_0 = 3$

Распределение **СКОРОСТИ** в поперечном сечении струй при $U_0=30$ м/с,
 $h/d_0 = 5$, $d_0 = 50$ мм, $T_0 = 700$ °С, $T_{\text{среды}} 20$ °С, система 3 на 3, $S/d_0 = 5$

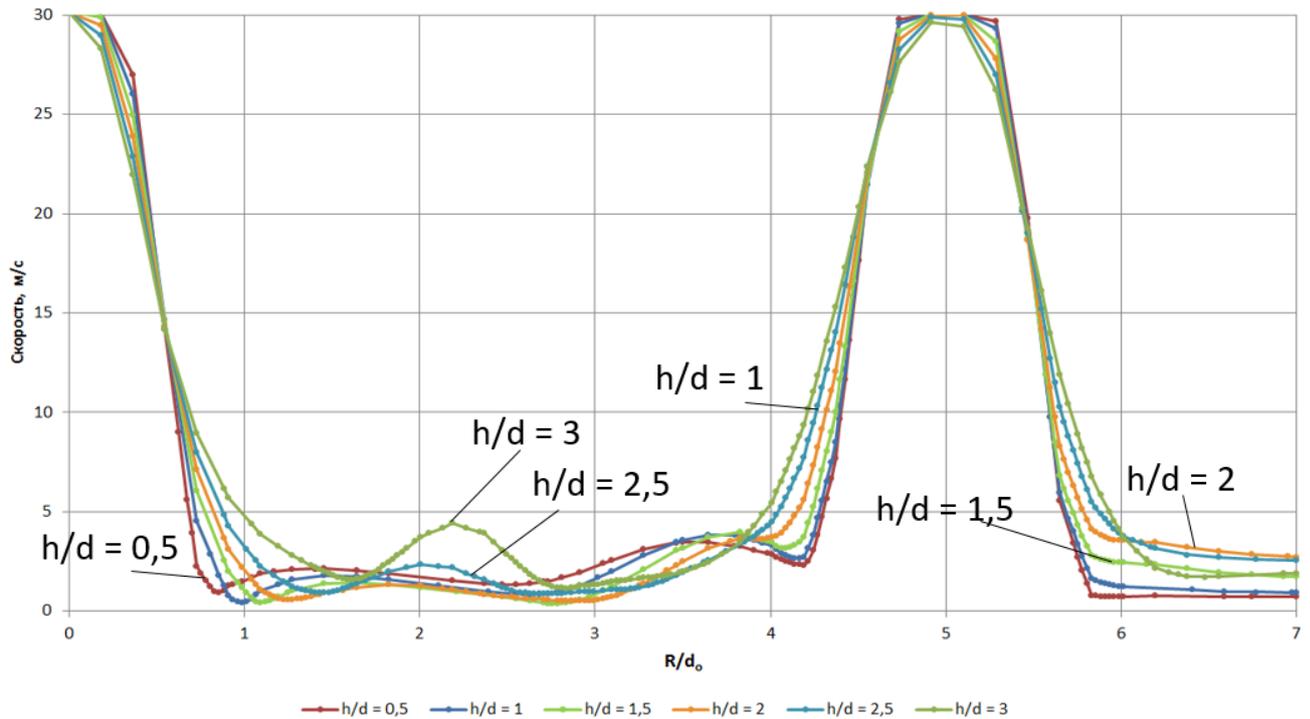


Рисунок 102 - Распределение скорости в поперечном сечении струи
при $U_0 = 30$ м/с, $T_0 = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 5$, $S/d_0 = 5$

Из графиков видно, что для каждого из рассмотренных вариантов эжектирующее действие струи проявляется весьма незначительно, а область начального участка струи заметно выражена до взаимодействия с поверхностью. При варианте № 3, как описывалось выше, между струями наблюдается столкновение веерных потоков.

Ниже, на рисунках 103, 104 и 105 представлено распределение скорости в поперечном сечении системы струй для варианта 2, 4 и 6. Увеличение расстояния между поверхностью и соплами способствует наличию довольно низких скоростей у поверхности металла. Область начального участка для каждой струи заметно выражена. По мере удаления от сопел происходит раскрытие струй, эжекция проявляется активнее. Также, при больших значениях величины h заметно наблюдается снижение осевой скорости, эпюры скорости сглаживаются.

Распределение скорости в поперечном сечении струй при $U_0=30$ м/с, $h/d = 10$, $d_0 = 50$ мм, $T_{\text{струи}} 700$ °С, $T_{\text{среды}} 20$ °С, система 3 на 3, $S = 100$ мм

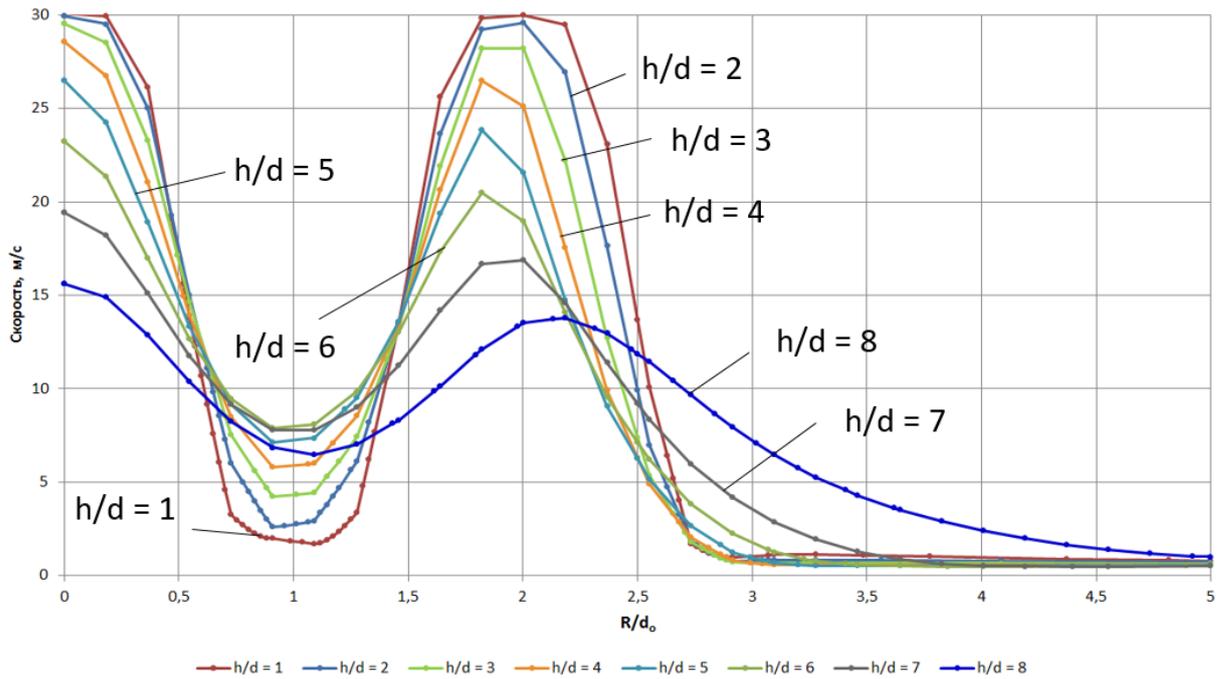


Рисунок 103 - Распределение скорости в поперечном сечении струи при $U_0 = 100$ м/с, $T_0 = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$, $S/d_0 = 2$

Распределение скорости в поперечном сечении струй при $U_0=30$ м/с, $h/d_0 = 10$, $d_0 = 50$ мм, $T_0 = 700$ °С, $T_{\text{среды}} 20$ °С, система 3 на 3, $S/d_0 = 3$

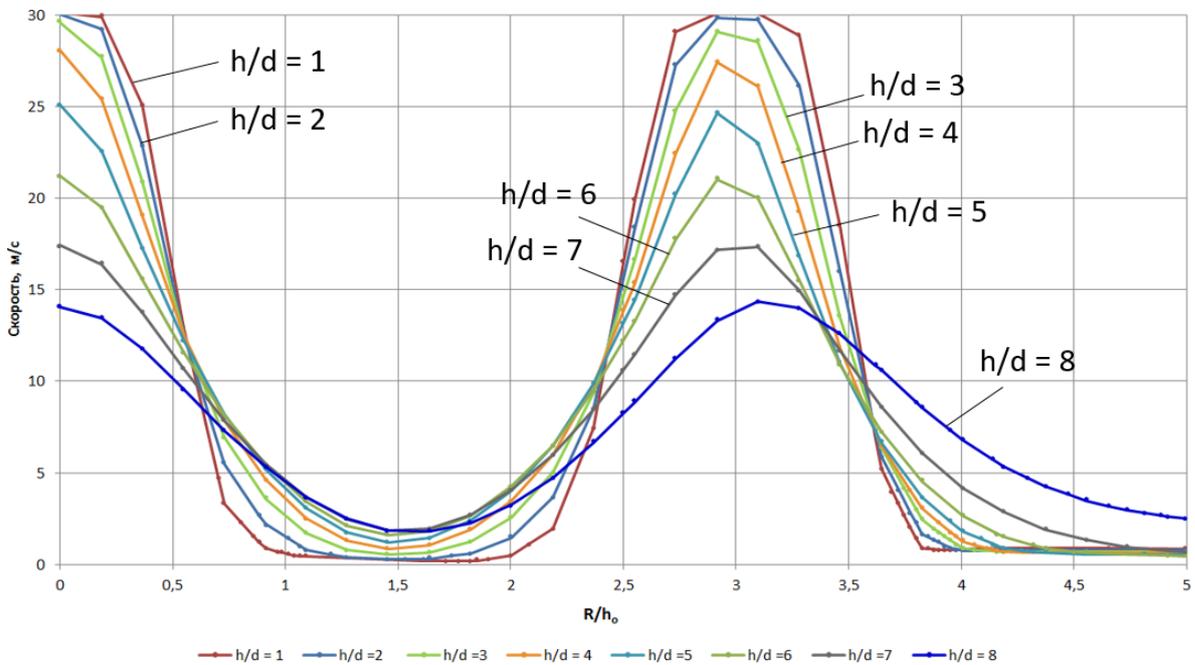


Рисунок 104 - Распределение скорости в поперечном сечении струи при $U_0 = 100$ м/с, $T_0 = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$, $S/d_0 = 3$

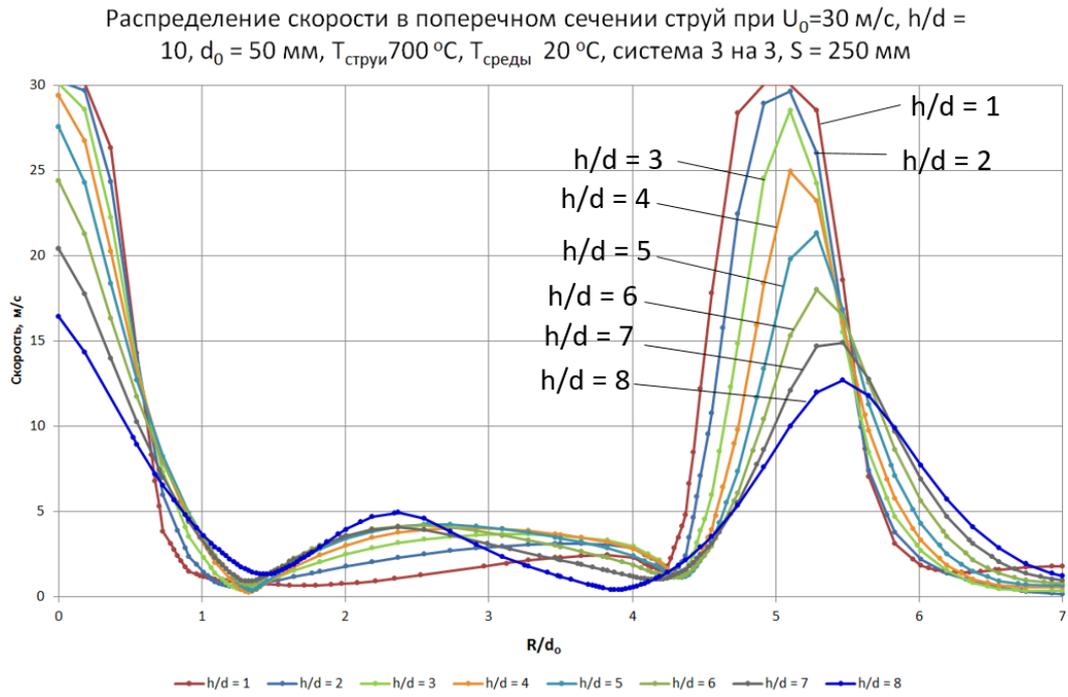


Рисунок 105 - Распределение скорости в поперечном сечении струи при $U_0 = 100$ м/с, $T_0 = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$, $S/d_0 = 5$

4.3 Исследование поля температур для системы истечения струй азота при изменении S/d_0 и h/d_0

На рисунках 106 и 107 представлены структура температурного поля и распределение температуры в поперечном сечении системы струй для варианта 1.

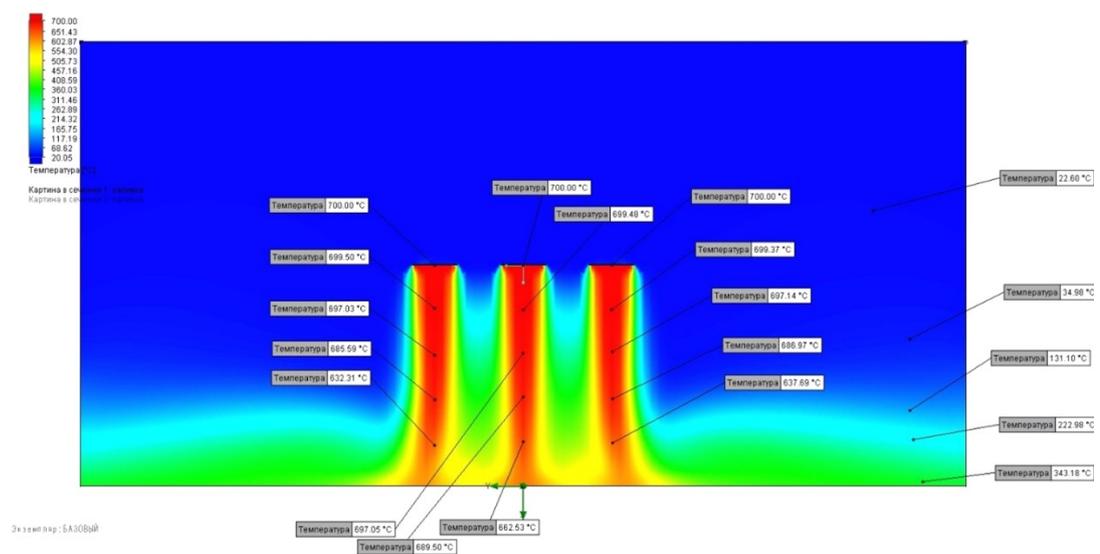


Рисунок 106 – Структура температурного поля для системы истечения струй азота, взаимодействующих с поверхностью при $U_0 = 30$ м/с, $T = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 5$, $S/d_0 = 2$

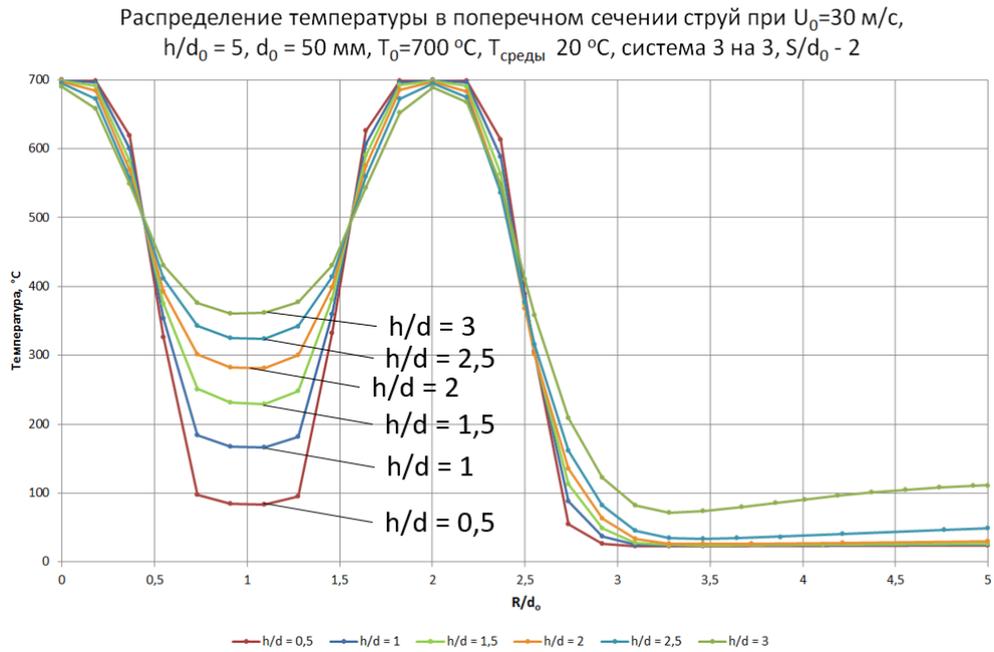


Рисунок 107 - Распределение температуры в поперечном сечении для системы струй азота, взаимодействующих с поверхностью при $U_0 = 30$ м/с, $T = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 5$, $S/d_0 = 2$

Так как область начального участка струй сохраняется практически до поверхности металла, температура в этих местах поддерживается высокой, но недостаточной, из-за того, что струя не успевает раскрыться и взаимодействовать с соседними. Следует отметить, что при выбранных условиях температура верного потока существенно ниже начальной температуры истечения газа.

На рисунках 108 и 109 представлены структура температурного поля и распределение температуры в поперечном сечении системы струй для варианта 2.

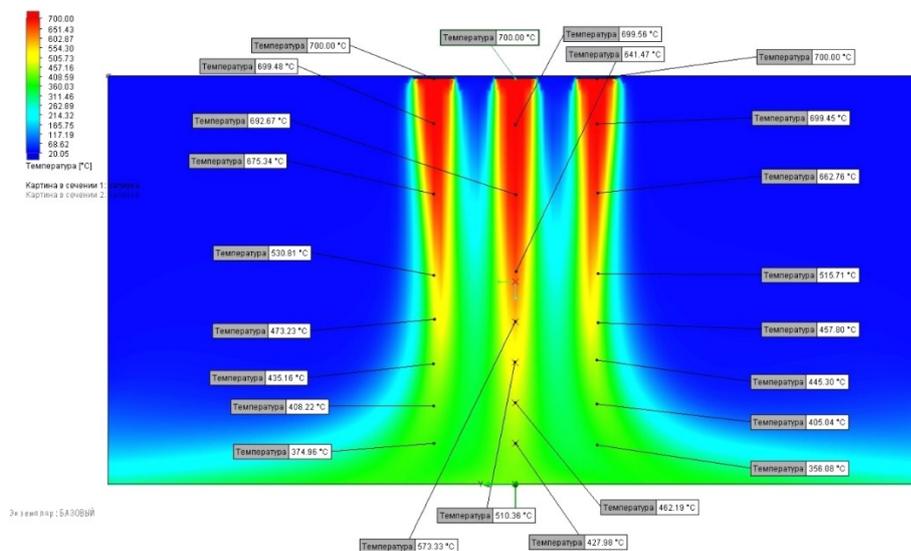


Рисунок 108 – Структура температурного поля для системы струй азота, взаимодействующих с поверхностью при $U_0 = 30$ м/с, $T = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$, $S/d_0 = 2$

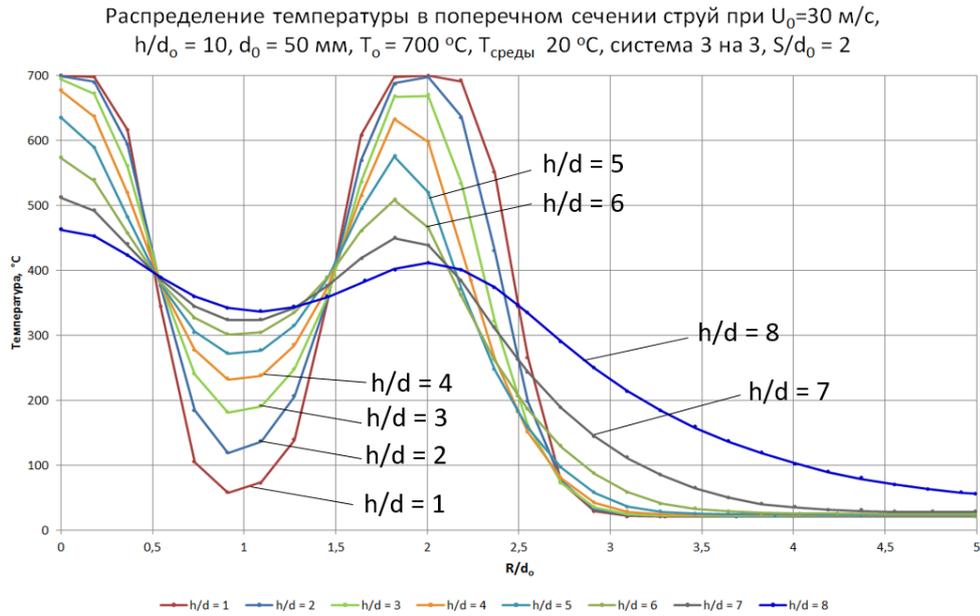
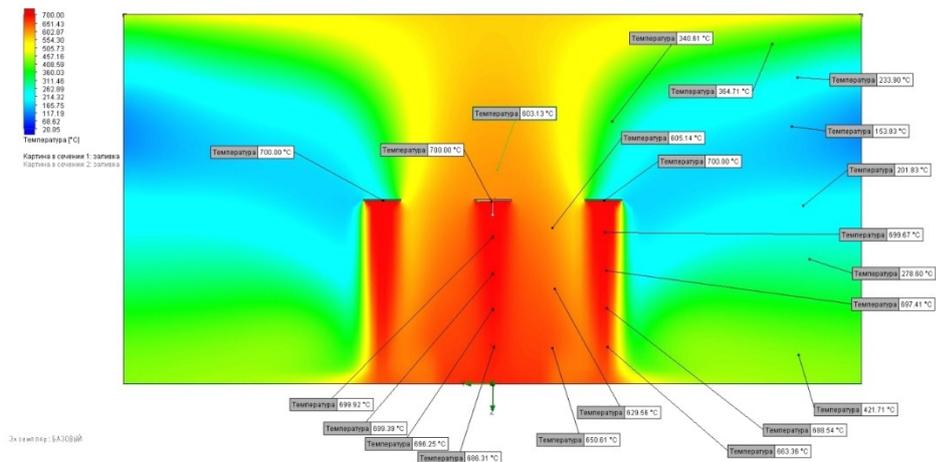


Рисунок 109 - Распределение температуры в поперечном сечении для системы истечения струй азота, взаимодействующих с поверхностью при $U_0 = 30$ м/с, $T = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$, $S/d_0 = 2$

С увеличением расстояния между соплами и поверхностью уменьшаются температуры струй у поверхности, но за счет раскрытия каждой из струй происходит перестроение в одну большую (это заметно по выравниванию эпюры температуры у поверхности), с температурами у поверхности, меньше, чем в варианте №1. Заметное выравнивание температуры у поверхности должно способствовать равномерному нагреву металла, но, до невысоких температур.

На рисунках 110 и 111 представлены структура температурного поля и распределение температуры в поперечном сечении системы струй для варианта 3.



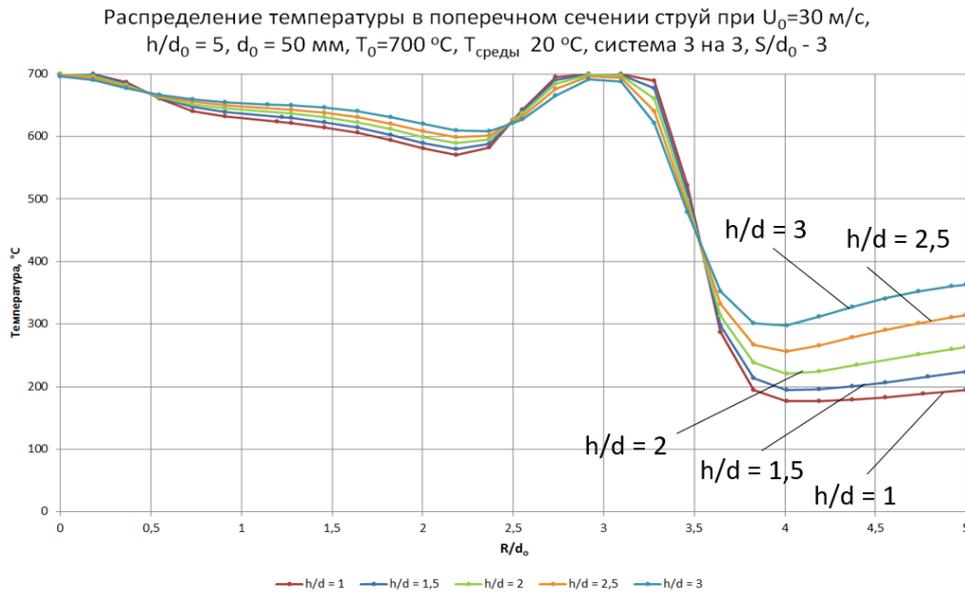


Рисунок 111 - Распределение температуры в поперечном сечении для системы истечения струй азота, взаимодействующих с поверхностью при $U_0 = 30$ м/с, $T = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 5$, $S/d_0 = 3$

В данном варианте происходит интенсивное высокоскоростное взаимодействие верных потоков, способствующее интенсификации теплообмена, а также выравниванию температуры в поперечном сечении системы и пограничном слое между струй. Картина распределения температуры в пограничном слое имеет характер одинаково высоких температур между струями, так и менее высоких, но равных за пределами системы.

На рисунках 112 и 113 представлены структура температурного поля и распределение температуры в поперечном сечении системы струй для варианта 4.

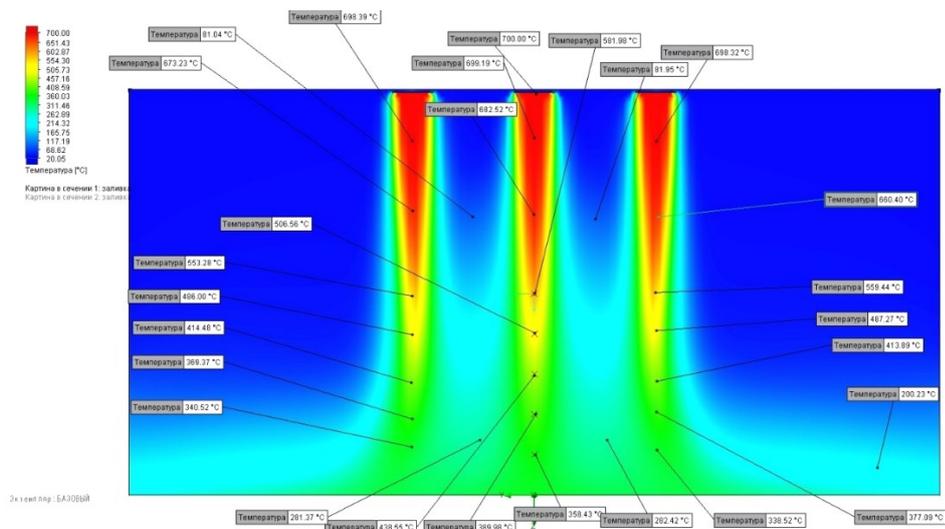


Рисунок 112 – Структура температурного поля для системы истечения струй азота, взаимодействующих с поверхностью при $U_0 = 30$ м/с, $T = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$, $S/d_0 = 3$

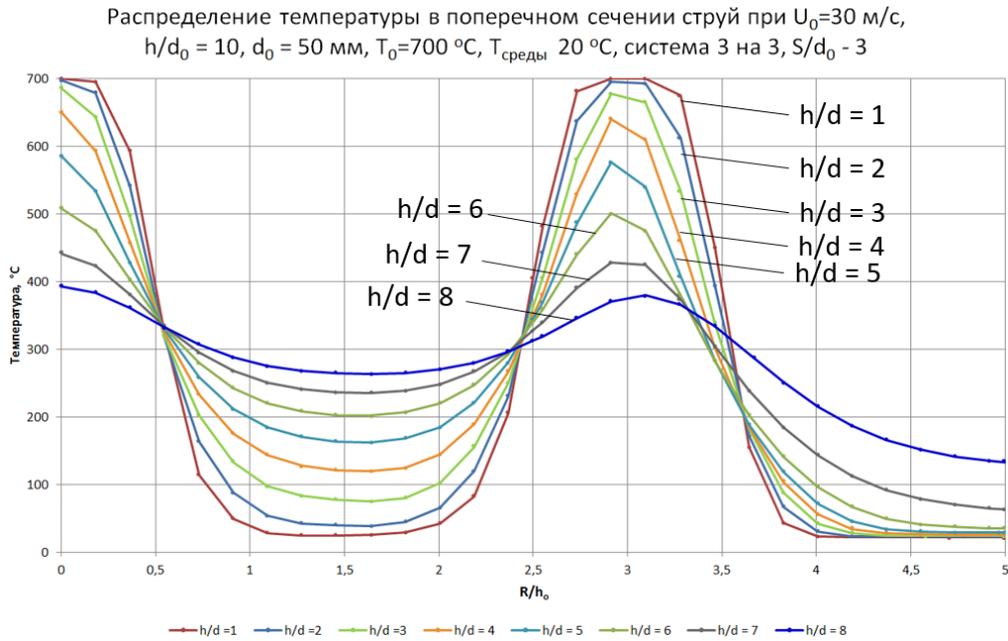


Рисунок 113 - Распределение температуры в поперечном сечении для системы истечения струй азота, взаимодействующих с поверхностью при $U_0 = 30$ м/с, $T = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$, $S/d_0 = 3$

С увеличением расстояния между соплами и поверхностью уменьшаются температуры струй у поверхности, но за счет раскрытия каждой из струй происходит перестроение в одну большую (это заметно по выравниванию эпюры температуры у поверхности). Заметное выравнивание температуры у поверхности должно способствовать равномерному нагреву металла, но, до невысоких температур.

На рисунках 114, 115 представлены структура температурного поля и распределение температуры в поперечном сечении системы струй для варианта 5.

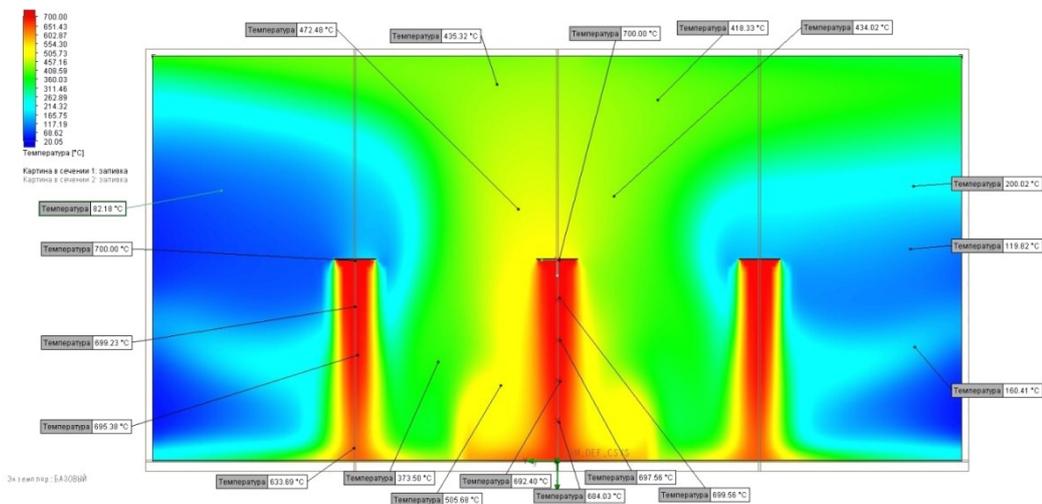


Рисунок 114 – Структура температурного поля для системы истечения струй азота, взаимодействующих с поверхностью при $U_0 = 30$ м/с, $T = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 5$, $S/d_0 = 5$

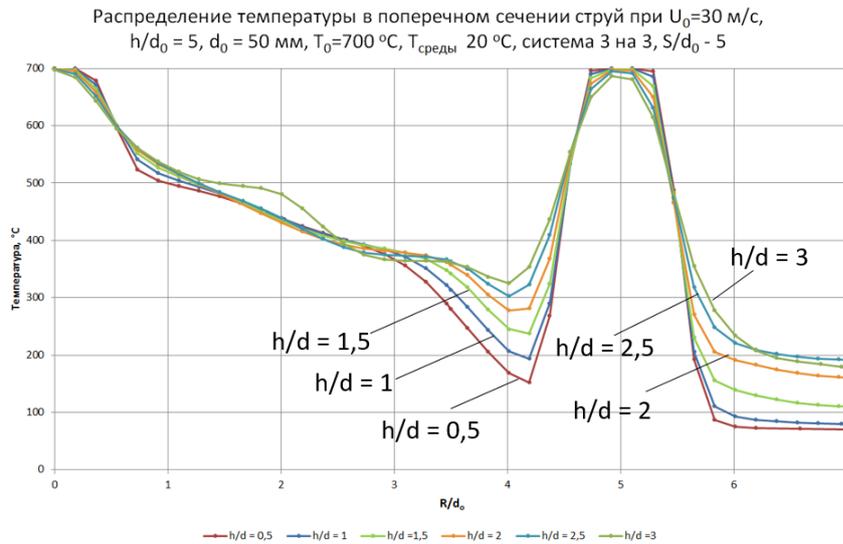


Рисунок 115 - Распределение температуры в поперечном сечении для системы истечения струй азота, взаимодействующих с поверхностью при $U_0 = 30$ м/с, $T = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 5$, $S/d_0 = 5$

В данном варианте, за счет увеличения расстояния между струями, происходит менее интенсивное высокоскоростное взаимодействие веерных потоков. Достижение высоких температур у поверхности носит локальный характер из-за не полностью раскрывшихся струй, что сказывается на резкоменяющихся температурах внутри веерного потока вглубь от оси струи.

На рисунках 116 и 117 представлены структура температурного поля и распределение температуры в поперечном сечении системы струй для варианта б.

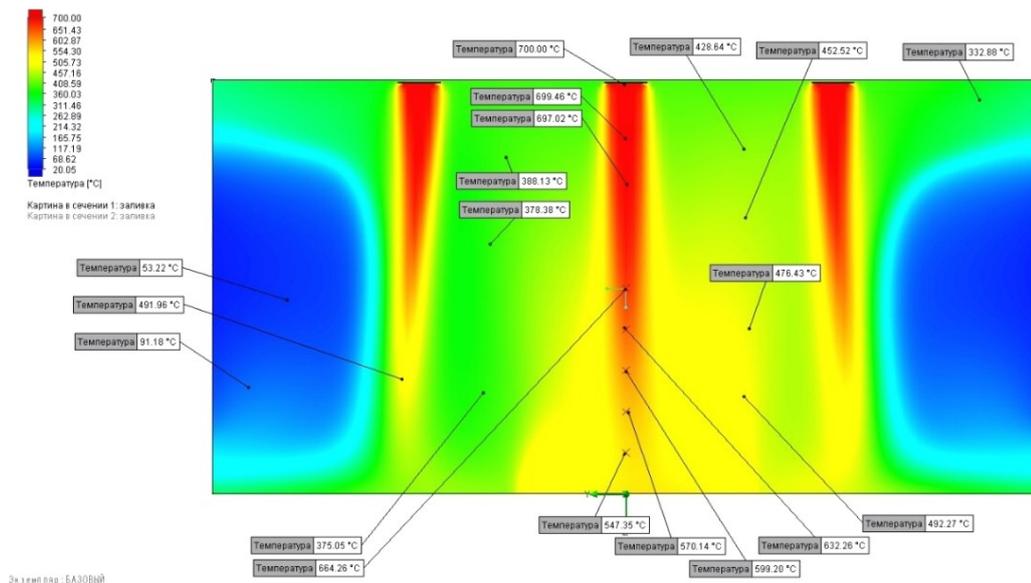


Рисунок 116 – Структура температурного поля для системы истечения струй азота, взаимодействующих с поверхностью при $U_0 = 30$ м/с, $T = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$, $S/d_0 = 5$

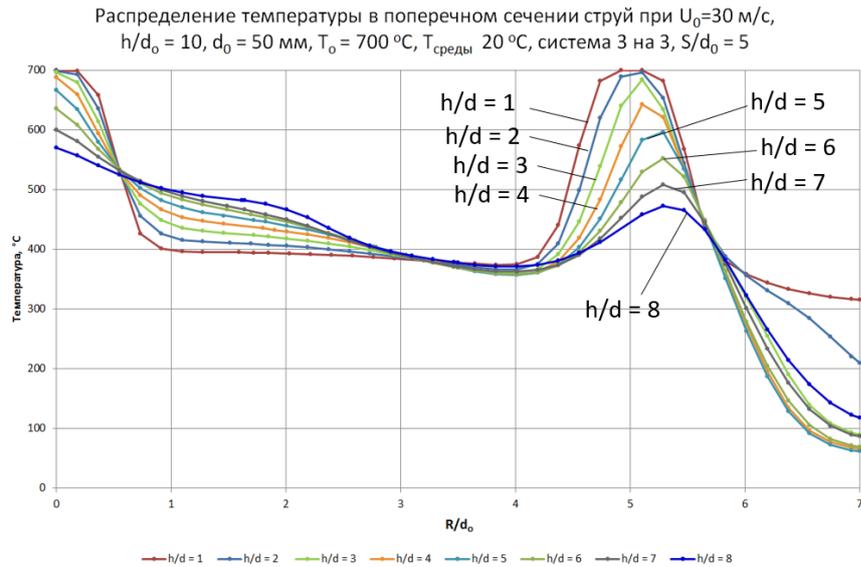


Рисунок 117 - Распределение температуры в поперечном сечении для системы истечения струй азота, взаимодействующих с поверхностью при $U_0 = 30$ м/с, $T = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$, $S/d_0 = 5$

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

4.4 Исследование температурных полей металла для системы истечения струй азота при изменении S/d_0 и h/d_0

На рисунке 118 представлена температура металла для варианта № 1.

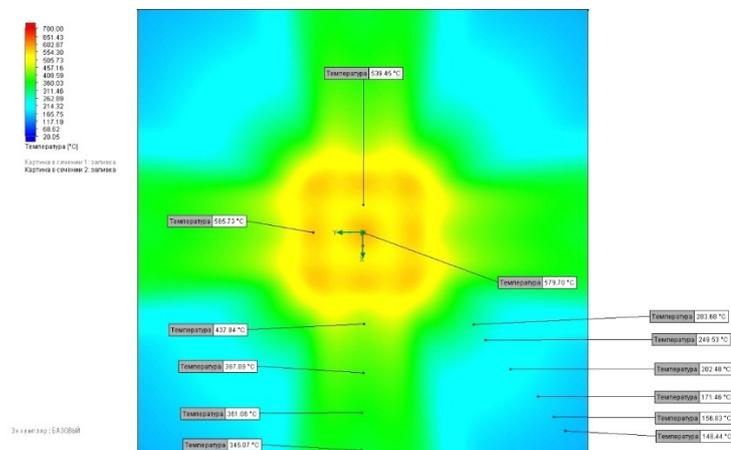


Рисунок 118 – Температурное поле поверхности металла при $U_0 = 30$ м/с, $T = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 5$, $S/d_0 = 2$

Имеется заметные области взаимодействия высокотемпературных струй с поверхностью металла, так как поверхность находится на небольшом расстоянии, но этот процесс не распространяется на всю поверхность взаимодействия с системой струй, так как они не успевают раскрыться для перемешивания и, как следствие, теплообмена. Наибольшая температура металла составляет 580 °С.

На рисунке 119 представлена температура металла для варианта № 3.

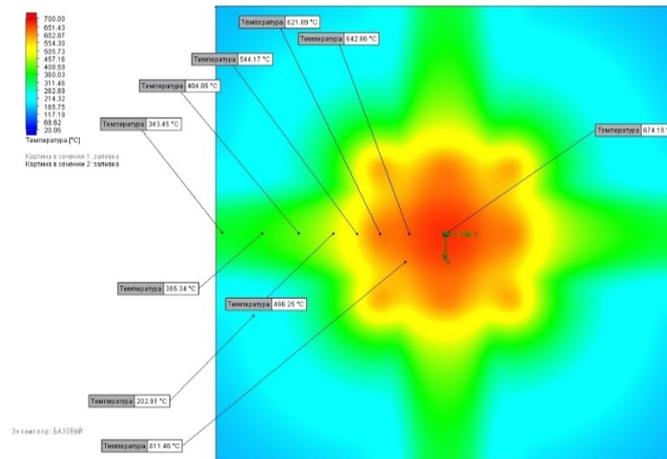


Рисунок 119 – Температурное поле поверхности металла при $U_0 = 30$ м/с, $T = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 5$, $S/d_0 = 3$

Имеется заметная область взаимодействия системы струй с поверхностью металла, так как поверхность находится на небольшом расстоянии, а расстояние между струями подходит для интенсивного взаимодействия веерных потоков. Наибольшая температура металла составляет 675 °С.

На рисунке 120 представлена температура металла для варианта № 5.

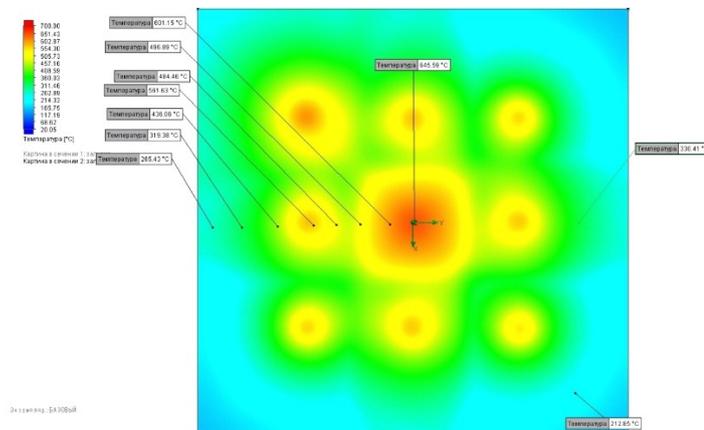


Рисунок 120 – Температурное поле поверхности металла при $U_0 = 30$ м/с, $T = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 5$, $S/d_0 = 5$

Так как поверхность находится на небольшом расстоянии от сопла струй, а расстояние между струями увеличено, происходит появление локальных максимумов на поверхности за счет того, что раскрытие струи не успевает произойти. На поверхности между струями происходит встреча веерных потоков, способствующая более интенсивному теплообмену в этой области, но также, из-за увеличенного расстояния между ними, этого не происходит.

Наибольшая температура металла составляет $645\text{ }^{\circ}\text{C}$, но это только под центральным соплом.

На рисунке 121 представлена температура металла для варианта № 2.

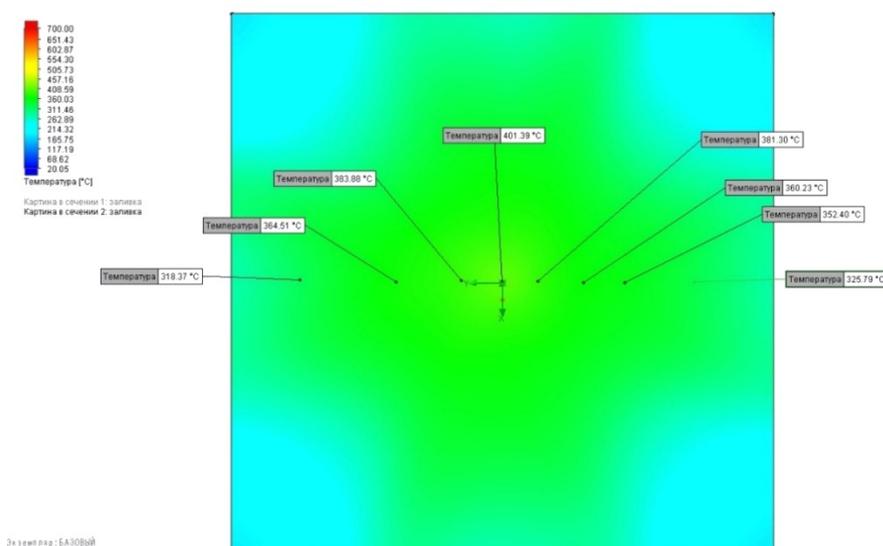


Рисунок 121 – Температурное поле поверхности металла при $U_0 = 30\text{ м/с}$, $T = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$, $d_0 = 50\text{ мм}$, $h/d_0 = 10$, $S/d_0 = 2$

С увеличением расстояния между соплами и поверхностью уменьшаются температуры струй у поверхности, а, следовательно, и температура поверхности. Раскрытия каждой из струй способствует перестроению в одну большую струю с меньшей температурой. Заметное выравнивание температуры у поверхности способствует равномерному нагреву металла, но, до невысоких температур. Наибольшая температура металла составляет $400\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рисунке 122 представлена температура металла для варианта № 4.

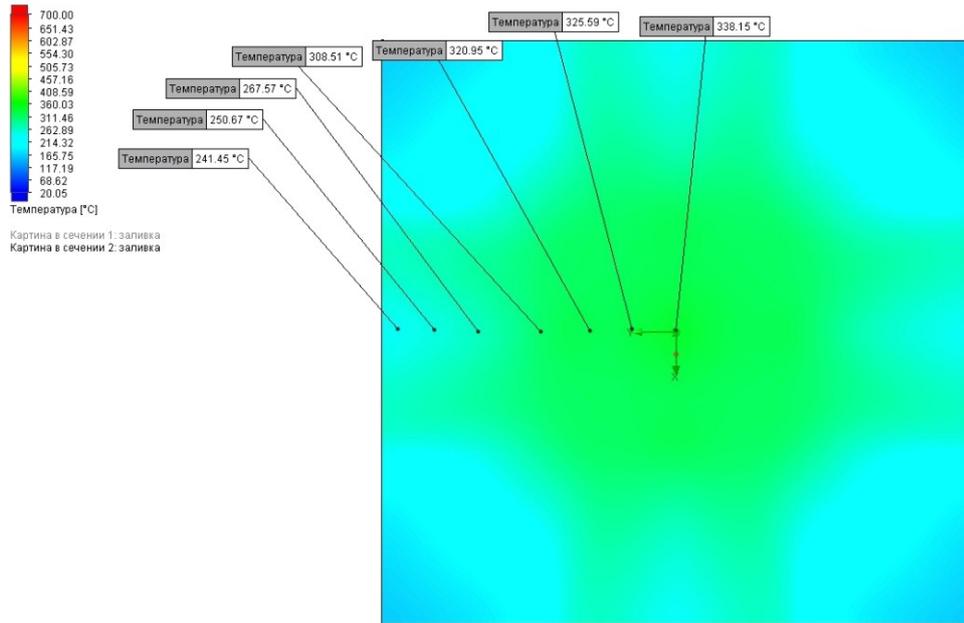


Рисунок 122 – Температурное поле поверхности металла при $U_0 = 30$ м/с, $T = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$, $S/d_0 = 3$

С увеличением расстояния между соплами, между соплами и поверхностью, уменьшаются температуры струй у поверхности, а, следовательно, и температуры поверхности, и интенсивность взаимодействия веерных потоков. Наибольшая температура металла составляет 340 °С.

На рисунке 123 представлена температура металла для варианта № 6.

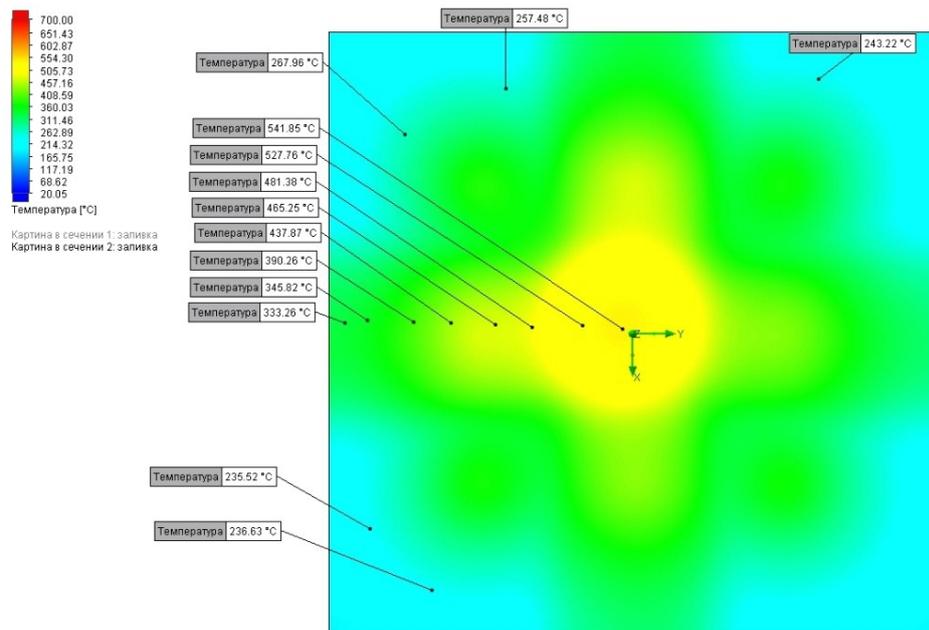


Рисунок 123 – Температурное поле поверхности металла при $U_0 = 30$ м/с, $T = 700$ °С, $d_0 = 50$ мм, $h/d_0 = 10$, $S/d_0 = 5$

Увеличение расстояния между соплами и поверхностью способствуют раскрытиям каждой из струй, а с увеличением расстояния между соплами до оптимального, происходит интенсивное взаимодействие веерных потоков. Это способствует повышению интенсификации теплообмена за счет перемешивания и, как следствие, увеличению температуры поверхности, но неравномерному по всей системе струй.

Ниже, на рисунках 124 и 125 приведены графики изменения температуры поверхности металла в радиальном направлении от критической точки при изменении h/d_0 и S/d_0 .

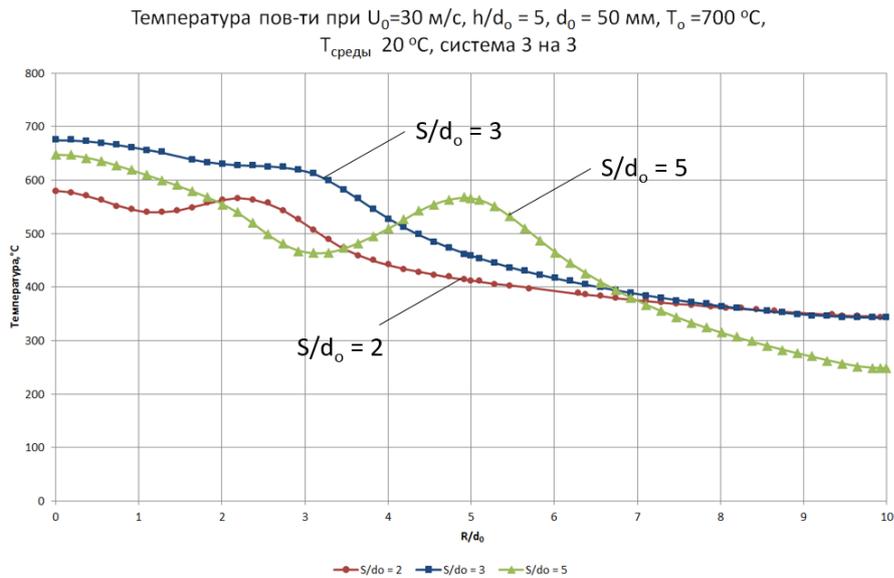


Рисунок 124 - Изменение температуры поверхности металла для $h/d_0 = 5$ при изменении S/d_0

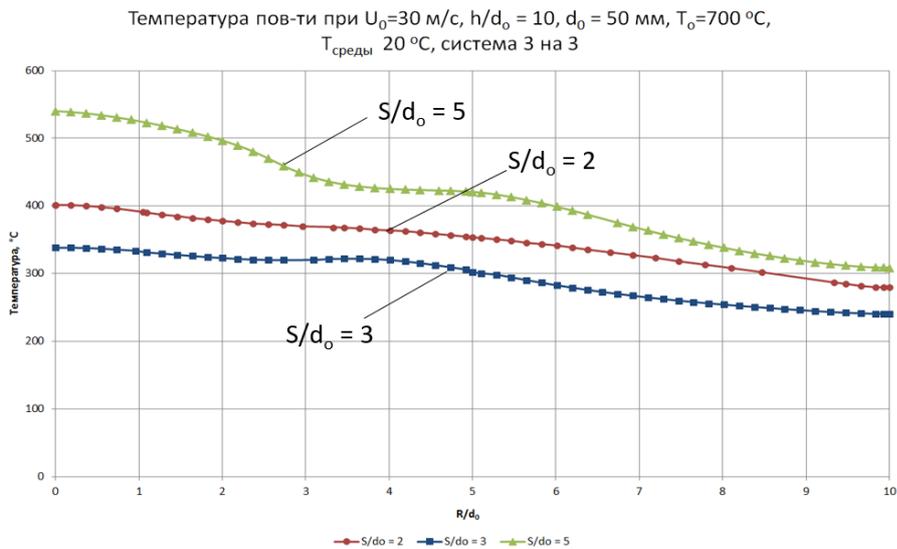


Рисунок 125 - Изменение температуры поверхности металла для $h/d_0 = 10$ при изменении S/d_0

Как уже было отмечено, увеличение расстояния между соплами, повышает локальность нагрева, как в случае с $S/d_0 = 5$ при $h/d_0 = 5$, поэтому необходимо подбирать оптимальное расстояние между соплами отдельно под каждую систему. Расстояние между поверхностью и соплом истечения азота также играет немаловажную роль. При расстоянии $h/d_0 = 10$ удастся добиться более равномерной картины, но с низкими температурами.

Выводы по главе 4

Исследована аэродинамика тепловое состояние при взаимодействии системы струй с поверхностью при различном расстоянии сопла до поверхности, а также при изменении расстояния между соплами.

При небольших расстояниях от сопел до поверхности, равных начальному участку струй, необходимо понимать, что раскрытие струй не произойдет и интенсификации теплообмена во всей системе струй можно добиться лишь за счет взаимодействия веерных потоков каждой из струй.

При увеличении расстояния от сопел до поверхности, превышающих начальный участок струй, необходимо понимать, что происходит раскрытие струй, а также взаимодействие друг с другом с образованием одной большей струи, но с температурой ниже, чем температура истечения каждой по отдельности.

5 РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА КОНВЕКТИВНОЙ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СТРУИ С ОГРАНИЧИВАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

5.1 Энергодинамический потенциал (ЭДП). Энергетическая мощность

Как было описано выше характеристики движения струи после ее взаимодействия с ограничивающей поверхностью существенным образом изменяются. Струя теряет изначальную форму и у поверхности теплообмена формируется веерный поток. Структура и режим течения газа внутри веерного потока определяют интенсивность конвективной теплоотдачи на границе «жидкость-твердое тело».

Имеющиеся в литературе [24] 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). Это может быть не совсем корректным, так как веерный поток имеет отличные от струйного потока форму, аэродинамические свойства и тепловое состояние.

Учитывая, что поток газа (например, продукты сгорания топлива или любая греющая среда) имеют температуру и скорость, то можно утверждать, что источник теплоты этот поток, обладающий определенным энергодинамическим потенциалом, Вт/м^2 , (ЭДП), который можно рассчитать по формуле:

$$q_3 = U_{\text{ср}} \cdot c_{\text{ср}} \cdot T_{\text{ср}}, \quad (14)$$

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

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

$c_{\text{ср}}$ – средняя по сечению удельная теплоемкость жидкости или газа, $\text{Вт/м}^3 \cdot \text{К}$.

Энергодинамический потенциал имеет размерность плотности теплового потока и представляет собой количество теплоты, переносимое в единицу времени через единицу площади поперечного сечения потока.

Принципиальное отличие понятий плотности теплового потока q и энергодинамического потенциала q_3 заключается в следующем. Понятие плотности теплового потока q для задач конвективной теплоотдачи означает количество теплоты, которое переносится от жидкости к твердой поверхности (или наоборот) за единицу времени через единицу площади поверхности теплообмена. Таким образом, величина q характеризует интенсивность процесса конвективной теплоотдачи. Энергодинамический потенциал q_3 характеризует свойство потока как источника

или носителя теплоты. Величина q_3 , характеризует удельную энергетическую мощность потока жидкости. На рисунке 126 показана принципиальная схема теплообмена между жидкостью и твердым телом, например, нагреваемым металлом. В двух сечениях 1-1 и 2-2 поток обладает двумя энергодинамическими потенциалами q_{31} и q_{32} .

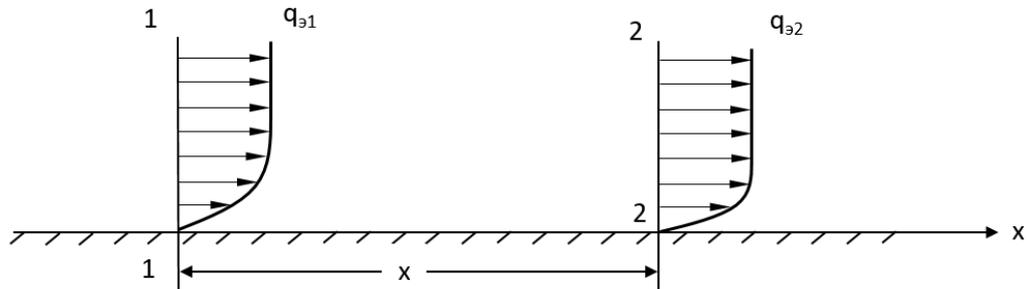


Рисунок 126 - Схема теплообмена между жидкостью и твердым телом

Разность $\Delta q_3 = q_{31} - q_{32}$ представляет собой результат теплообмена потока на расстоянии x .

Наряду с понятием энергодинамический потенциал потока введем понятие энергетическая мощности потока Q_3 , Вт:

$$Q_3 = q_3 S, \quad (15)$$

где S - площадь поперечного сечения потока.

На рисунке 127 показан случай движения жидкости или газа внутри трубы круглого поперечного сечения диаметром d .

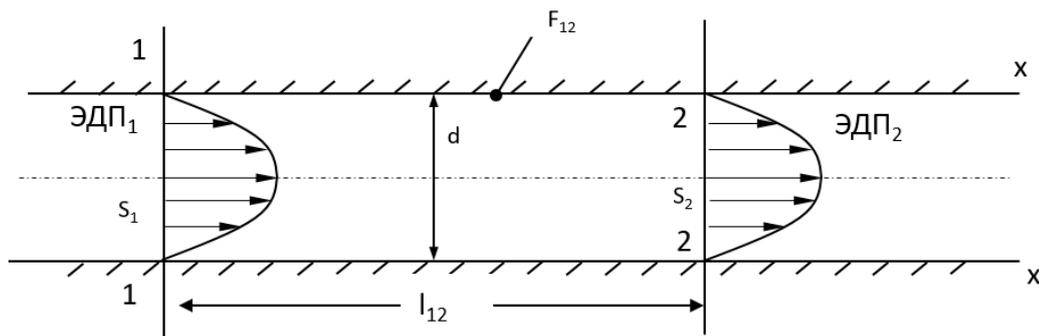


Рисунок 127 - Движение жидкости или газа внутри трубы круглого поперечного сечения

Энергетическая мощность потока в сечениях 1-1 и 2-2 соответственно равна

$$Q_{31} = U_{cp1} \cdot c_{cp1} \cdot T_{cp1} \cdot S_1 \quad (16)$$

$$Q_{32} = U_{cp2} \cdot c_{cp2} \cdot T_{cp2} \cdot S_2 \quad (17)$$

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} .

Используя величину ΔQ_3 , Вт, можно записать:

$$\Delta Q_3 = q_{\text{конв}} \cdot F_{12} \quad (18)$$

где $q_{\text{конв}}$ - средняя величина плотности теплового потока конвекции, Вт/м²

F_{12} – площадь теплообменной поверхности, в данном случае $F_{12} = \pi \cdot d \cdot l_{12}$

$$q_{\text{конв}} = \Delta Q_3 / F_{12} \quad (19)$$

Пример для воздуха:

$U_{\text{ср1}} = 10$ м/с; $T_{\text{ср1}} = 600$ °С; $c_{\text{ср1}} = 1,4411$ Вт/м³·К; $U_{\text{ср2}} = 10$ м/с; $T_{\text{ср2}} = 500$ °С; $c_{\text{ср2}} = 1,4118$ Вт/м³·К; $d = 0,1$ м; $l_{12} = 5$ м.

$$F_{12} = 3,14 \cdot 0,1 \cdot 5 = 1,57 \text{ м}^2.$$

Энергетическая мощность потока в сечении 1-1 рассчитывается по формуле (16):

$$Q_{31} = 10 \cdot 1,4411 \cdot 600 \cdot 3,14 \cdot (0,1)^2 / 4 = 67,87 \text{ Вт}.$$

Энергодинамический потенциал в сечении 1-1 рассчитывается по формуле (14)

$$q_{31} = 10 \cdot 1,4411 \cdot 600 = 8647 \text{ Вт/м}^2.$$

Энергетическая мощность потока в сечении 2-2 рассчитывается по формуле (17):

$$Q_{32} = 10 \cdot 1,4118 \cdot 500 \cdot 3,14 \cdot (0,1)^2 / 4 = 55,41 \text{ Вт}.$$

Энергодинамический потенциал в сечении 2-2 рассчитывается по формуле (14)

$$q_{32} = 10 \cdot 1,4118 \cdot 500 = 7059 \text{ Вт/м}^2.$$

Разность энергетических мощностей:

$$\Delta Q_3 = 67,87 - 55,41 = 12,46 \text{ Вт}.$$

Средняя величина плотности теплового потока конвекции по формуле (19) равна:

$$q_{\text{конв}} = 12,46 / 1,57 = 7,94 \text{ Вт/м}^2.$$

Далее рассмотрим случай применение предложенного метода к случаю удара струи о поверхность.

Допущение: весь поток, состоящий из трех участков, представлен на рисунке 128: 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.

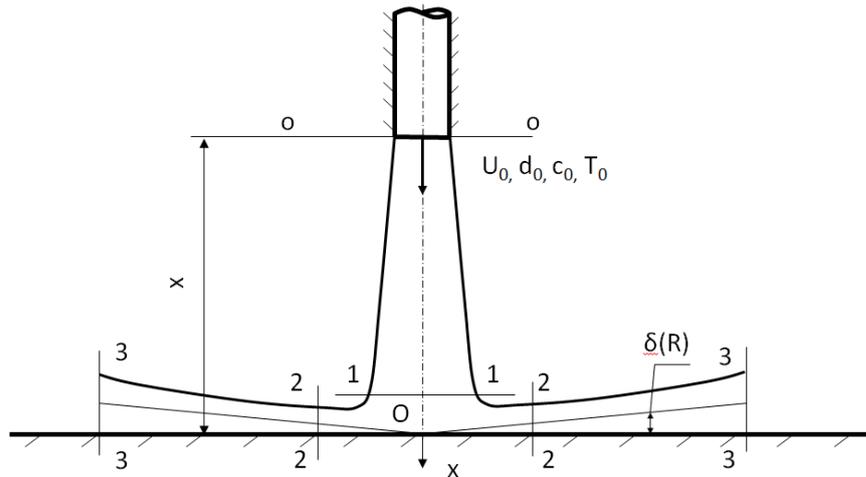


Рисунок 128 - Схема потока при ударе струи о плоскую поверхность

На длине от сечения 0-0 до сечения 1-1 протекают процессы инжекции газовой среды, изменения профиля начальной скорости и профиля начальной температуры и изменения удельной теплоемкости смеси двух газов. На этом участке струйного течения работают законы развития свободной струи. Энергодинамический потенциал и энергетическая мощность описывается соотношениями:

$$q_{э,0} = U_0 \cdot c_0 \cdot T_0 \quad (20)$$

$$Q_{э,0} = U_0 \cdot c_0 \cdot T_0 \cdot S_0 \quad (21)$$

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».

Энергодинамический потенциал смеси газов рассчитывается с учетом энергодинамического потенциала каждого газа в отдельности и доли этого газа в смеси:

$$q_{э,см} = \sum_{i=1}^n q_{э,i} \cdot m_i \quad (22)$$

Расчет параметров струйной части потока проводится в предположении, что струя является свободной. Как известно [3], свободная струя по мере удаления от среза сопла расширяется вследствие вовлечения в движение окружающей неподвижной среды. Изменение радиуса $R(x)$ струи описывается выражением:

$$R(x) = r_0 \cdot \left(0,44 \cdot \frac{x(h)}{d_0} - 0,17 \right) \quad (23)$$

По мере развития струи по ее длине объемный расход через поперечное сечение возрастает и это изменение определяется формулой:

$$V_1 \equiv V(x) = V_0 \cdot \left(0,332 \cdot \frac{x}{d_0}\right) + 0,623 \quad (24)$$

где d_0 и V_0 – соответственно внутренний диаметр сопла и первоначальный объемный расход вытекающего газа на срезе сопла.

Соотношение между скоростью газа (для каждого сечения основного участка струи) на расстоянии r от оси струи и максимальной скоростью на оси струи определяется формулой Шлихтинга:

$$\frac{U(r)}{U_{\max}} = 10,22 \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{3/2}\right]^2 \quad (25)$$

В каждом сечении величина r меняется от 0 до $R(x)$.

По мере увеличения координаты x максимальная скорость на оси уменьшается (кроме начального участка) по закону:

$$U_{\max} = U_0 \cdot \left(\frac{10,21}{2\frac{x}{d_0} + 0,57}\right) \quad (26)$$

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, по рисунку 128. Средняя скорость через сечение 1-1 равна:

$$\bar{U}_1 = V_1 / S_1 = V_1 / \pi \cdot R_1^2 \quad (27)$$

Массовый расход через сечение 1-1 равен:

$$M_1 = \rho_1 \cdot V_1 \quad (28)$$

Массовый расход через сечение 2-2 равен:

$$M_2 = \rho_2 \cdot V_2 \quad (29)$$

Согласно закону сохранения массы:

$$M_1 = M_2 = \rho_1 \cdot V_1 = \rho_2 \cdot V_2 \quad (30)$$

Принимая, что $\rho_1 = \rho_2$, получим, что $V_1 = V_2$. Так как $V_2 = \bar{U}_{\text{вп}} \cdot S_{\text{вп}}$. Получаем $\bar{U}_{\text{вп}} \cdot S_{\text{вп}} = \bar{U}_1 \cdot S_1$, так как $S_{\text{вп}} = l_1 \cdot 2\pi \cdot R_1$. Если принять $\bar{U}_{\text{вп}} = \bar{U}_1$ имеем выражение $S_1 = l_1 \cdot 2\pi \cdot R_1$, откуда:

$$l_1 = \pi \cdot R_1^2 / 2\pi \cdot R_1 = R_1 / 2 \quad (31)$$

Выводы по главе 5

Введены понятия энергодинамического потенциала q_3 и энергодинамическая мощность потока Q_3 .

Разработана методика расчета теплообмена при взаимодействии высокотемпературной струи с нагреваемым металлом, определяющаяся тем, что в качестве определяющих параметров используются параметры веерного потока.

6 ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Часть стали подвергается термической и термохимической обработке, которая способствует повышению качества металла. То есть качество металла определяется работой термических печей. Тепловая обработка в термических цехах является важным, системным фактором технологии. Технический уровень эффективности данного процесса при этом определяется принимаемой технологией, теплотехнической оснащённостью агрегатов и использованием современных систем управления.

Дальнейшее совершенствование печных агрегатов, улучшение их эксплуатационных показателей, технических характеристик является, существенным резервом повышения энергоэффективности и энергосбережения всего комплекса металлургического производства.

Эксплуатация печного парка отрасли в настоящее время сталкивается с рядом острых проблем, главными из которых являются:

- повышенная материально- и энергоемкость производства;
- значительный износ основных производственных фондов;
- невысокий технический уровень производства и связанные с этим качество и конкурентоспособность продукции.

Задача коренного улучшения качества и увеличения выпуска холоднокатаного стального листа является важнейшей в российской черной металлургии, направленной на обеспечение растущей потребности национальной экономики [2].

Термообработку холоднокатаной стальной полосы проводят в печных агрегатах двух типов: печь непрерывного отжига (протяжные печи) и садочные печи (колпаковые) [22]. Данные агрегаты не совершенны, и работают при максимально возможной эффективности, пути повышения которой без изменения технологии на сегодня исчерпаны.

Повышение энергоэффективности в существующей технологии нагрева при термообработке стали на протяжных печах - возможно, как раз за счет использования струй высокотемпературного азота.

Ниже, на рисунках 129 и 130, представлены существующая схема камеры нагрева и схема нагрева при термообработке в протяжных печах на агрегате непрерывного горячего алюминирования (АНГА) [6, 56].

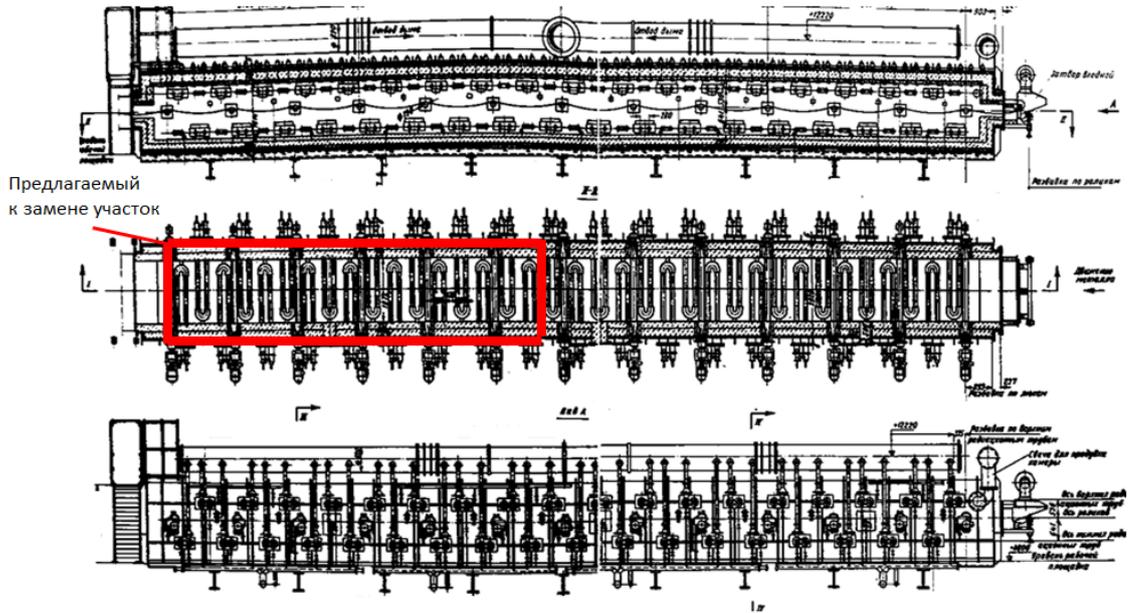


Рисунок 129 - Существующая схема камеры нагрева

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 дожигания	Камера безокислительного нагрева	Камера восстановительного нагрева

Рисунок 130 - Существующая схема нагрева в АНГА

Важную роль играет и тот факт, что при нагреве и выдержке необходимо постоянное использование защитной атмосферы для предотвращения окисления металла. Рациональное решения данной задачи - нагрев струями высокотемпературного азота, которые выступали бы в роли и защитной атмосферы и теплоносителя, реализация которого в значительной степени смогла бы способствовать повышению энергоэффективности и уменьшению вредных выбросов.

Предлагаемая схема нагрева с использованием струйного нагрева для АНГА представлена ниже на рисунке 131.

n = 1	n = 0,8	n = 0,5	800-900 °C
Камера нагрева			Камера безокислительного нагрева
Нагрев ПС природного газа до 500 °C			N_2+H_2

Рисунок 131 - Предлагаемая схема нагрева для АНГА струями высокотемпературного азота

Нагрев осуществляется в двух камерах: камере нагрева и камере безокислительного нагрева.

В камере нагрева металл нагревается по средствам 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.

6.1 Устройство нагрева азота

Для использования азота в качестве теплоносителя его необходимо предварительно нагреть до высоких температур. В устройстве для нагрева газов [46; 71] Данное изобретение относится к теплотехнике и может быть использовано в разных отраслях промышленности при нагреве азота, водорода, инертных газов, а также для использования в качестве защитных сред при нагреве.

Нагрев газов осуществляется следующим образом: разделительная стенка с двух сторон атакуется струями - продуктов сгорания с одной стороны и холодного газа с другой.

В результате активного процесса теплопередачи, подаваемый в камеру нагрева газ (азот) эффективно прогревается до необходимой температуры, двигаясь вдоль разделительной стенки, и затем удаляется из рабочей камеры через выходной патрубок. 3D модель устройства для нагрева азота представлена на рисунке 132.

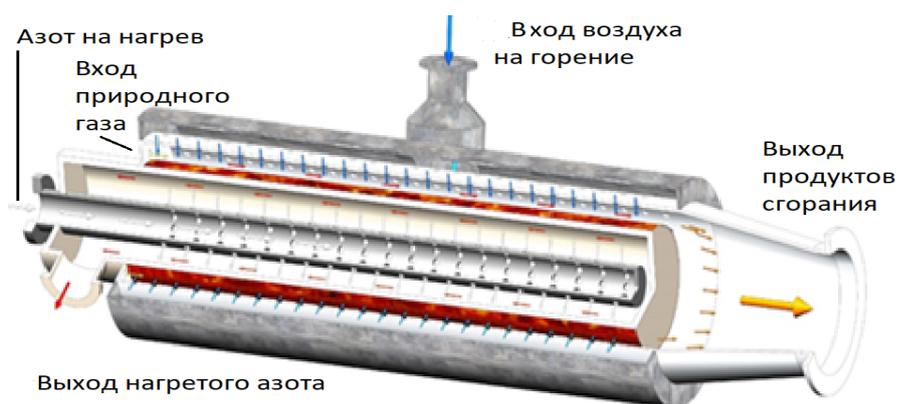


Рисунок 132 - 3D модель устройства для нагрева азота

Подвод газа присоединен к газовой камере с торца. Подвод воздуха осуществляется сверху на корпусе.

Данное устройство позволяет нагреть азот до необходимой температуры без существенных топливных затрат и использования громоздких установок.

6.2 Разработка принципа и конструкции установки струйного нагрева азотом

Как было представлено на рисунке 131, устройство для нагрева стальной ленты струями высокотемпературного азота состоит из двух камер: камеры нагрева, в которой металл нагревается по средствам сжигания природного газа, но с уменьшенным коэффициентом избытка воздуха по длине камеры, для предотвращения нежелательного окисления, и камеры безокислительного нагрева, в которой нагрев осуществляется от 500 до 900 °С смесью высокотемпературных струй смеси азота и водорода в соотношении 95 % и 5 % соответственно. Ниже, на рисунке 133 представлена схема камеры безокислительного нагрева.

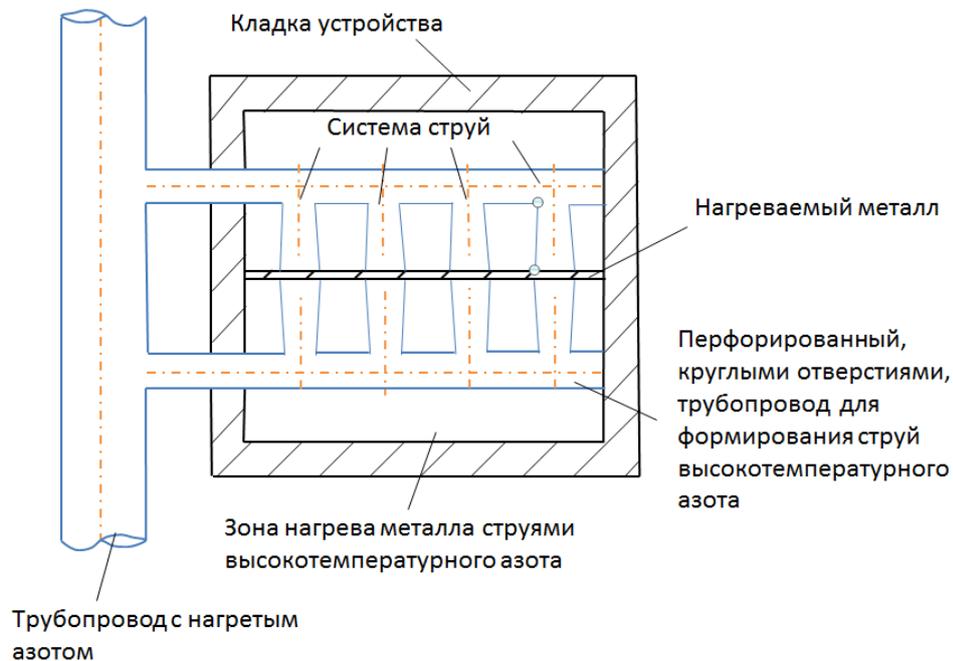


Рисунок 133 – Схема камеры безокислительного нагрева струями высокотемпературного азота

Ниже проведены исследования влияния расстояния между отверстиями (соплами) (S) на значение коэффициента конвективной теплоотдачи, определенной по номограммам [24].

Исходные параметры:

- Диаметр отверстий (сопел) истечения продуктов сгорания, азота (d_0) – 0,05 м.
- Скорость истечения азота (U_0) – 30 м/с
- Расстояние от плоскости истечения ПС до ленты (h) – 0,25 м

При исследовании изменяем величину S/d при зафиксированных значениях исходных параметров. В таблице 9 представлены полученные в результате расчетов значения. График

влияния расстояния между отверстиями (S) на значение коэффициента конвективной теплоотдачи представлен на рисунке 134.

Таблица 11 – Коэффициент конвективной теплоотдачи при изменении расстояния м/у соплами

S/d_0	α , Вт/(м ² ·К)
3	73,5
4	67,2
5	58,8
6	52,5
7	48,3
8	42
9	37,8
10	33,6

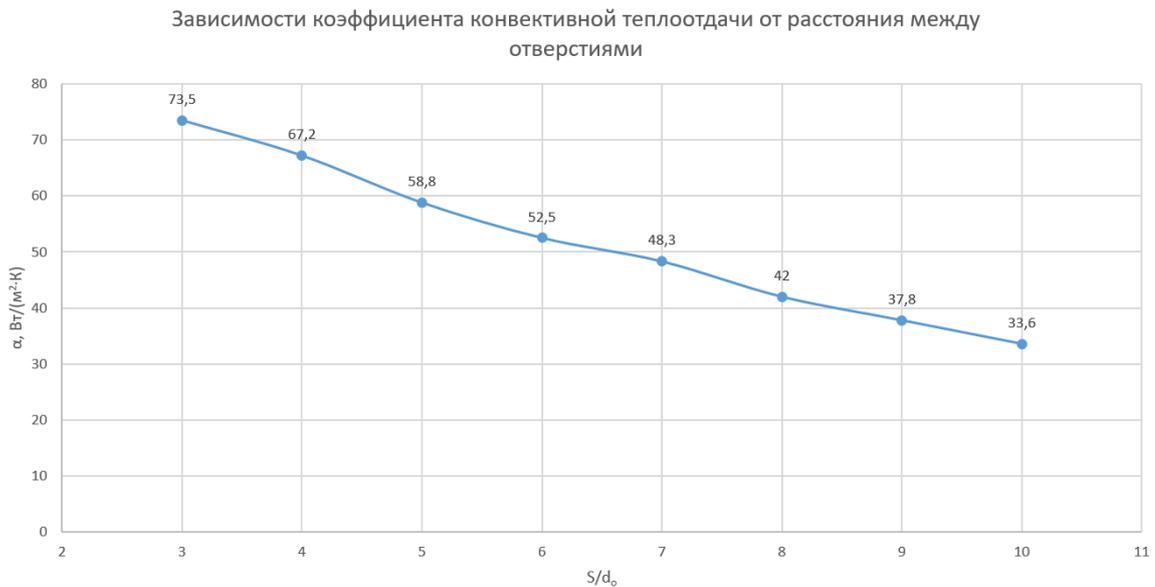


Рисунок 134 – График зависимости коэффициента конвективной теплоотдачи от расстояния между отверстиями

По проведенным расчетом оптимальным расстоянием между отверстиями (соплами) является отношение S/d_0 равное 3-5.

Произведен оценочный расчет длины зоны безокислительного нагрева ленты.

Общие исходные данные для расчета:

- Производительность (P) – 65 т/ч

- Лента – низкоуглеродистая сталь
- Толщина (a) – 0,002 м
- Скорость движения ленты (w) – 1 м/с
- Диаметр отверстий (сопел) истечения продуктов сгорания, азота (d_0) – 0,05 м.

Вариант № 1.

1 участок (нагрев ленты от 20 до 500 °С, продуктами сгорания топлива (ПС).

Исходные данные в варианте № 1:

- Скорость истечения ПС (U_0) – 30 м/с
- Расстояние от плоскости истечения ПС до ленты (h) – 0,25 м
- Двухсторонний нагрев

Принимаем истечение продуктов сгорания природного газа со средней температурой T_0 – 1300 °С из трубок с круглыми отверстиями. Начальная температура металла T_{M1} – 20 °С, конечная температура металла T_{M2} – 500 °С, средняя температура металла T_{MCP} – 260 °С.

Средняя теплоемкость металла в диапазоне температур от T_{M1} до T_{M2} низкоуглеродистых сталей имеет значение $c_{MCP} = 0,514$ кДж/кг·°С [24].

Средняя температура пограничного слоя:

$$T_{\text{погран.слоя}} = 0,5 \cdot (T_{MCP} + T_0) \quad (32)$$

$$T_{\text{погран.слоя}} = 0,5 \cdot (260 + 1300) = 780 \text{ °С}$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией при струйной обдувке из круглых отверстий продуктами сгорания определяют по номограмме [24].

Исходя из номограмм $\alpha = 175$ Вт/ м²К. Умножив на поправочные коэффициенты относительного расстояния (0,84) и температуры (0,58), получаем $\alpha = 85,26$ Вт/ м²К

Расчетная толщина металла при двухстороннем нагреве равна половине толщины ленты $S_{\text{расч}} = \delta/2 = 0,002/2 = 0,001$ м.

Продолжительность нагрева рассчитывается по формуле:

$$t = 0,64 \frac{S_{\text{расч}} \cdot \rho_M \cdot c_{MCP}}{k_\phi \cdot \alpha} \lg \left(\frac{T_0 - T_{M1}}{T_0 - T_{M2}} \right) \quad (33)$$

где ρ_M – плотность металла, кг/м³; k_ϕ – коэффициент формы.

$$t = 0,64 \frac{0,001 \cdot 7850 \cdot 0,514}{85,26} \lg \left(\frac{1300 - 20}{1300 - 500} \right) = 0,00618 \text{ ч} = 22,26 \text{ с}$$

Определение основных размеров и параметров на участке 1.

Количество металла, который одновременно находится в печи, определяется по формуле:

$$G = P \cdot t \quad (34)$$

$$G = 65 \cdot 0,00618 = 0,402 \text{ т}$$

Длина полезного пода участка печи ($L_{\text{п}}$) по формуле :

$$L_{\text{п}} = \frac{G \cdot 10^3}{n \cdot \rho_{\text{м}} \cdot k_3 \cdot f_{\text{м}}} \quad (35)$$

где n – число параллельных рядов нагреваемого металла; $f_{\text{м}}$ – сечение металла в одном ряду, м^2 ; k_3 – коэффициент заполнения полезной длины печи (для протяжных печей = 1).

$$L_{\text{п}} = \frac{0,402 \cdot 10^3}{1 \cdot 7850 \cdot 1 \cdot 0,002 \cdot 1,5} = 17,064 \text{ м}$$

Длина габаритного пода участка печи равна длине полезного пода участка печи, так как лента занимает всю длину участка печи.

2 участок (двухсторонний нагрев ленты от 500 до 900 °С азотом)

Скорость истечения азота (w_c) – 30 м/с.

Принимаем истечение азота со средней температурой T_0 – 950 °С из трубок с круглыми отверстиями. Начальная температура металла $T_{\text{м1}}$ – 500 °С, конечная температура металла $T_{\text{м2}}$ – 900 °С, средняя температура металла $T_{\text{мср}}$ – 700 °С.

Средняя теплоемкость металла в диапазоне температур от $T_{\text{м1}}$ до $T_{\text{м2}}$ низкоуглеродистых сталей имеет значение $c_{\text{мср}} = 0,645 \text{ кДж/кг} \cdot \text{°С}$ [24].

Средняя температура пограничного слоя (32):

$$T_{\text{погран.слоя}} = 0,5 \cdot (700 + 950) = 825 \text{ °С}$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией при струйной обдувке из круглых отверстий азотом определяют по номограмме [24].

Исходя из номограмм $\alpha = 175 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$. Умножив на поправочные коэффициенты ширины щели (0,84) и температуры (0,5), получаем $\alpha = 73,5 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

Расчетная толщина металла при двухстороннем нагреве равна половине толщины ленты

$$S_{\text{расч}} = \delta/2 = 0,002/2 = 0,001 \text{ м.}$$

Продолжительность нагрева рассчитывается по формуле (33):

$$t = 0,64 \frac{0,001 \cdot 7850 \cdot 0,645}{1 \cdot 73,5} \lg \left(\frac{1100 - 500}{1000 - 900} \right) = 0,040208 \text{ ч} = 151,46 \text{ с}$$

Определение основных размеров и параметров на участке 2

Количество металла, который одновременно находится в печи, определяется по формуле (34):

$$G = 65 \cdot 0,040208 = 0,2,735 \text{ т}$$

Длина полезного пода участка печи ($L_{\text{п}}$) по формуле (35):

$$L_{\text{п}} = \frac{2,1035 \cdot 10^3}{1 \cdot 7850 \cdot 1 \cdot 0,002 \cdot 1,5} = 116,14 \text{ м}$$

Длина габаритного пода участка печи равна длине полезного пода участка печи, так как лента занимает всю длину участка печи.

Исходные данные для варианта № 2:

- Двухсторонний нагрев
- Скорость истечения ПС природного газа и азота (U_o) – 30 м/с
- Расстояние от плоскости истечения ПС до ленты (h) – 0,5 м
- T_0 продуктов сгорания природного газа (1 участок) – 1300 °С
- T_0 азота (2 участок) – 950 °С

Исходные данные в варианте № 3:

- Двухсторонний нагрев
- Скорость истечения ПС природного газа и азота (U_o) – 70 м/с
- Расстояние от плоскости истечения ПС до ленты (h) – 0,5 м
- T_0 продуктов сгорания природного газа (1 участок) – 1300 °С
- T_0 азота (2 участок) – 1100 °С

Исходные данные в варианте № 4:

- Двухсторонний нагрев
- Скорость истечения ПС природного газа и азота (U_o) – 70 м/с
- Расстояние от плоскости истечения ПС до ленты (h) – 0,25 м
- T_0 продуктов сгорания природного газа (1 участок) – 1300 °С
- T_0 азота (2 участок) – 1100 °С

В таблице 12 приведены расчеты для все вариантов, представленных выше.

Таблица 12 – Обобщенные результаты расчета для всех вариантов

Технологии	Зона нагрева (от 20 до 500 °С), м	Зона 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
Технологии	Зона нагрева (от 20 до 500 °С), м	Зона нагрева (от 500 до 900 °С), м	Длина общая, м
Вариант №2	24,88	169,32	194,20
Вариант №3	15,46	51,54	67,00
Вариант №4	9,93	33,87	43,80

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. Проведенное численное моделирование позволило определить основные конструктивные особенности расположения отверстий (сопел) для камеры безокислительного нагрева.

6.3 Общая схема нагревающей установки

Предлагаемая схема зона нагрева для АНГА представлена на рисунке 124. В состав системы входят: устройство для нагрева азота, устройство безокислительного нагрева струями азота; теплообменное устройство; вентилятор.

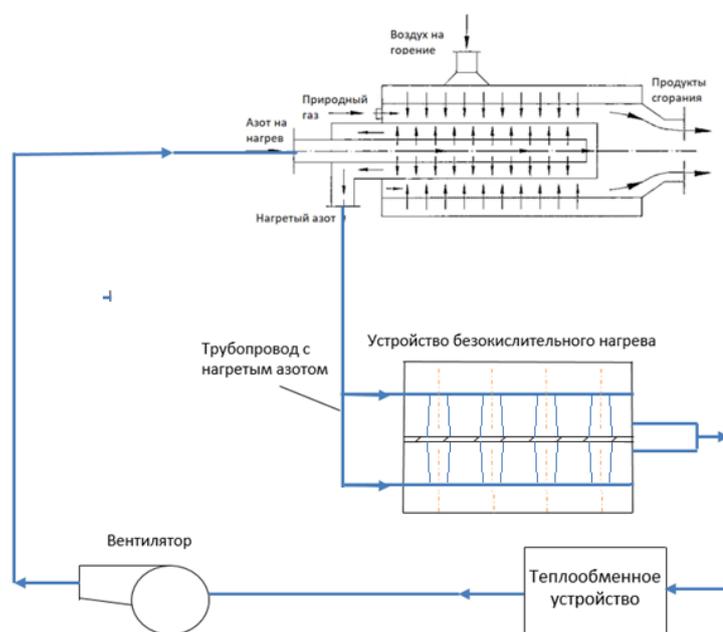


Рисунок 135 - Схема системы для безокислительного нагрева стальной ленты

Нагрев азота производится за счет теплоты продуктов сгорания при сжигании природного газа. Нагретый до необходимой температуры азот направляется по трубопроводу и струями воздействует на стальную ленту (азот используется как теплоноситель и как защитной атмосфера).

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 по главе 6

Предложена эффективная схема нагрева для агрегата непрерывного горячего алюминирования струями высокотемпературного азота. Произведен сравнительный расчет с существующей схемой нагрева.

Выбрано компактное устройство для нагрева азота которое работает без существенных топливных затрат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 верному 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приказ Минпромторга от 05.05.2014 «Об утверждении стратегия развития черной металлургии России на 2014-2020 годы и на перспективу до 2030 года» // СПС Консультант-Плюс // Опубликовано 05.05.2014 на официальном интернет-портале правовой информации <http://www.pravo.gov.ru>.
2. Приказ Минпромторга от 29.05.2007 «Об утверждении стратегия развития черной металлургии России до 2015 года» // СПС КонсультантПлюс // Опубликовано 29.05.2007 на официальном интернет-портале правовой информации <http://www.pravo.gov.ru>.
3. Абрамович Г.Н. Теория Турбулентных Струй. - М.: ЭКОЛИТ, 2011. – 720 с.
4. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. В 2 ч. ч.1: Учеб руководство: Для втузов. – М.: Наука, 1991. – 600 с.
5. Авторское свидетельство №726400 СССР от 05.04.1980, выданное Маликову Г.К., Шкляру Ф.Р., Лобанову Д.Л. на изобретение под названием «Проходная печь скоростного нагрева металла».
6. Аптерман В. Н., Тымчак В. Протяжные печи, – М.: Машиностроение, 1969. - 320 с.
7. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. М.: Металлургия, 1990, - 239 с.
8. Асцатуров В.Н., Краснокутский П.Г., Берковская П.С. Скоростной струйный нагрев металла. – Киев: Техника, 1984. – 120 с.
9. Бальзаминов В.В., Бобарика И.О. Применение численного моделирования газодинамических трактов для задач модернизации рабочих камер установок // Авиационное машиностроение и транспорт Сибири. ИрГТУ, 2015. с. 8 -12.
10. Барон Р.Ф. Криогенные системы. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 408 с.
11. Бевза Д.И., Шураев О.П. Моделирование в пакете Flowvision движения газа и теплообмена в компактном котле-утилизаторе // Инженерные системы-2017. 2017, с. 7 – 15.
12. Белов И.А. Взаимодействие неравномерных потоков с преградами. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1983 - 144 с.
13. Бирюков А.Б. Анализ современного состояния технологий импульсного отопления металлургических печей // Изв. высш. учеб. завед. Черная металлургия. 2014. №4, с. 83-89.
14. Бирюков А.Б. Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах. - Донецк: Ноулидж, 2012. – 250 с.

15. Веников В.А. Теория подобия и моделирования. Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., доп. и перераб. – М: Высшая школа, 1976. - 479 с.
16. Винтовкин А.А., Ладыгичева М.Г., Гусовский В.Л., Усачев А.Б. Современные горелочные устройства (конструкции и техническая характеристика), справочник. – М.: Машиностроение-1, 2001 - 496 с.
17. Волков К.Н. Взаимодействие круглой турбулентной струи с плоской преградой // Прикладная механика и техническая физика, 2007, №1 с. 55 – 67.
18. Волков К.Н., Емельянов В.Н., Яковчук М.С. Взаимодействие высокотемпературных струй с охлаждаемой преградой // Супервычисления и математическое моделирование. - Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2017. с. 74 – 81.
19. Волков К.Н., Емельянов В.Н., Зазимко В.А. Турбулентные струи - статистические модели и моделирование крупных вихрей. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014, - 360 с.
20. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008, - 370 с.
21. Гарбарук А.В., Смирнов Е.М. Течения вязкой жидкости и модели турбулентности: методы расчета турбулентных течений. Конспект лекций. Санкт-Петербург.: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. 2010, - 127 с.
22. Глинков М.А. Основы общей теории печей. – М.: Metallurgizdat, 1962. - 576 с.
23. ГОСТ 9293-74. Азот газообразный и жидкий. Технические условия. - Введ. 1976-01-01. - М.: Стандартиформ, 2007. -15 с.
24. Гусовский В.Л., Лифшиц А.Е. Методика расчета нагревательных и термических печей: Учебно-справочное издание. – М.: Теплотехник, 2004. – 400 с.
25. Гусовский В.Л., Лифшиц А.Е. Тепловой расчет печей непрерывного действия: Учеб.-метод. Пособие. – М: Издательский Дом МИСиС, 2002. – 85 с.
26. Гухман А.А. Введение в теорию подобия, 2-е издание. М.: Высшая школа, 1973. - 296 с.
27. Дорохина О.Г., Курносков В.В., Левицкий И.А. Математическое моделирование теплообмена и газодинамики в рабочем пространстве печи для термообработки стальных листов // Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология – Москва, 2012, с. 173-177.
28. Дружинин Г.М., Зайнуллин Л.А., Казяев М.Д., и др. основные направления ресурсосбережения в черной металлургии // Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности. – Екатеринбург (УРФУ), 2014. - ч.1. с. 205 – 212.

29. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003, - 496 с.
30. Иванов А., Требунских Т., Думнов Г. Использование вычислительного комплекса FloEFD /. - М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2014, - 140 с.
31. Изотов Б.В., Шаламов Ю.Н., Безчерев А.С. Математическое моделирование тепловой работы методической печи с импульсным отоплением // Вестник приазовского державного технического университета, № 19, 2009, с. 222 - 226.
32. Илюшин Б.Б. Процессы переноса в турбулентных течениях. Курс лекций. Новосибирск.: ФАО Новосибирский государственный университет, 2009. 102 с.
33. Калиткин Н.Н. Численные методы. - М.: Наука, 1978, - 512 с.
34. Кондрашенко С.И., Тихонова В.Р. Численное моделирование газодинамики и теплообмена в энергоэффективном струйном рекуператоре // Энергосберегающие Технологии в Промышленности. Печные Агрегаты. Экология. М.: Изд. Дом МИС, 2014, с. 253 – 258.
35. Кондрашенко С.И., Тихонова В.Р. Разработка эффективного струйного рекуператора // Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности. – Екатеринбург (УРФУ), 2014. ч.2. с. 47 – 51.
36. Кривандин В.А., Арутюнов В.А, Белоусов В.В. и др. Теплотехника металлургического производства. Т.1. Теоретические основы: Учебное пособие для вузов. – М.: МИСИС, 2001. – 608 с.
37. Кривандин В.А., Белоусов В.В., Сборщиков Г.С. и др. Теплотехника металлургического производства. Т.2. Теоретические основы: Учебное пособие для вузов. – М.: МИСИС, 2001. – 736 с.
38. Крюков А.Ю., Потапов Б.Ф. Математическое моделирование процессов в машиностроении. Пермь.: Перм. Гос. Техн. Ун-т, 2007. – 322 с.
39. Кузнецов Ю.П., Бураков А.В., Перминов А.С., Серебренников С.Н. Мембранные технологии в установках получения азота из воздуха // Сфера. Нефть и газ, 2017. №6. с. 38 – 41.
40. Курбатов Ю.Л., Сапронова Е.В., Сидоров А.С. Построение зональной модели топливной камерной нагревательной печи с асимметрическим факелом и переменной функцией выгорания топлива. // Экотехнологии и ресурсосбережение. 2008. №5. с. 81 – 85.
41. Курносов В.В., Левицкий И.А., Прибытков И.А. Выбор рациональных режимов нагрева массивных заготовок в печах периодического действия // Черные металлы, 2012; № 9: с. 22 – 27.
42. Курносов В.В., Прибытков И.А., Тихонова В.Р. Способ термообработки изделий в горизонтальной печи. Патент РФ № 2494155 от 2012 г.

43. Курнос В.В., Прибытков И.А., Тихонова В.Р. Нефутерованные печи - проблемы и перспективы // Теплотехника и энергетика в металлургии, НМетАУ, г. Днепропетровск, 2011, с. 120 – 122.
44. Курнос В.В., Тихонова В.Р., Прибытков И.А. Способ управления импульсной подачей топлива в нагревательных и термических печах. Патент РФ № RU 2524296, от 2013 г.
45. Курнос В.В., Тихонова В.Р., Прибытков И.А. Способ нагрева газов Патент РФ № RU 2518714, от 2014 г.
46. Курнос В.В., Тихонова В.Р., Прибытков И.А. Устройство нагрева газов Патент РФ № RU 2514810, от 2014 г.
47. Курнос В.В., Шульц Л.А. Проблемы безокислительного необезуглероживающего высокотемпературного нагрева стали в топливных печах и возможные пути их решения // Изв. вузов. Черная металлургия. 2012. № 11. с. 10 – 14.
48. Леонтьев В.А., Маликов Г.Н., Зубкова Н.А. и др. Струйный газовый нагрев и охлаждение листового проката // Сталь. 1981 №2. с 83 – 85.
49. Лисиенко В.Г., Маликов Г.К. и др. Эффективность применения струйно-факельного нагрева в промышленных печах // Сталь. – 1996. – № 6. – с. 45 – 48.
50. Любимов Д.А. Возможности использования прямых методов для численного моделирования турбулентных струй // Аэромеханика и газовая динамика. 2003. №3. с. 14-20.
51. Маликов Г.К., Коршунов В.А., Лобанов Д.Л. Интенсификация теплообмена в секционных печах путем сжигания газа во встречных струях // Металлургическая теплотехника: Тематический отраслевой сборник. – 1976. – № 5. – с. 94 – 98.
52. Маликов Г.К., Лисиенко В.Г., Шлеймович Е.М. и др. Развитие метода струйно-факельной интенсификации процессов нагрева металла // Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности. – Екатеринбург (УРФУ), 2015. с. 310 – 315.
53. Маликов Г.К., Маликов Ю.К., Шлеймович Е.М. и др. Развитие метода струйно-факельного отопления для нагревательных печей и систем прямого нагрева воздуха для вентиляции шахт // Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности. – Екатеринбург (УРФУ), 2018. с. 106 – 112.
54. Маликов Г.К., Маликов Ю.К., Лобанов Д.Л., и др // Использование технологии струйно-факельного отопления (СФО) для низкотемпературного подогрева приточного воздуха // Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности. – Екатеринбург (УРФУ), 2014. – ч.1. с. 311 – 319.

55. Мاستрюков Б.С. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей. – М.: Металлургия, 1986. - 367 с.
56. Миткалинный В.И., Кривандин В.А., Морозов В.А. и др. Металлургические печи: Атлас. Учеб. пособие для вузов. М.: Металлургия, 1987. – 384 с.
57. Мороз В.И., Егорова В.М., Гусев С.В. Нагрев валков холодной прокатки и роликов МНЛЗ под термическую обработку в печи с импульсной подачей теплоносителя // Кузнечно-штамповочное производство и обработка металлов давлением. 2002. №8. с. 29 – 34.
58. Мышкис А. Д. Элементы теории математических моделей. - 3-е изд., испр. - М.: КомКнига, 2007, - 192 с.
59. Официальный сайт компании MetalResearch «Металлургические исследования». Рынок листового холоднокатаного стального проката 2017-2018: Производство в России. URL:http://www.metalresearch.ru/cold_rolled_steel_market_2018.html (дата обращения: 03.03.2019).
60. Официальный сайт компании ЗАО «КОМАС». Горелка ГСПС скоростная с предварительным смешением для сжигания природного газа. URL: http://www.komas.su/komas_gsps.html (дата обращения: 21.04.2018).
61. Официальный сайт научно-производственной компании «ТЕСКА». Газовая горелка ГСС-Р Теска. URL: <http://npp-teska.ru/gorelki.htm> (дата обращения 16.05.2019).
62. Официальный сайт elister kromschroeder. Каталог продукции, горелки газовые рекуперативные ECOMAX URL: <http://kromschroeder.ru/index.php?recuperator> (дата обращения: 21.04.2019).
63. Официальный сайт компании WS Warmeprozessstechnik GmbH в России. Рекуперативные горелки REKUMAT. URL: <http://www.floxural.ru/ws2016/m300.png> (дата обращения: 20.04.2019).
64. Официальный сайт IBS Industrie-Brenner-Systeme GmbH. Рекуперативные горелки RECUFIRE. URL: <https://www.ibs-brenner.de/recuperative-bruner-recufire-ru.php> (дата обращения: 05.05.2019).
65. Официальный сайт компании World Steel Association. Выплавка стали по странам за 2018 год. URL: <https://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2019/Global-crude-steel-output-increases-by-4.6--in-2018.html> (дата обращения: 29.01.2019).
66. Паничев В. В., Соловьев Н. А. Компьютерное моделирование. Учебное пособие. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2008, - 130 с.

67. Прибытков И.А. Энергосберегающие способы нагрева металла на основе использования струй. – В кн.: Сб. научн. трудов конференции «Автоматизированные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии». – М.: МИСиС, 2002. с. 375 – 390.
68. Прибытков И.А. Расчет теплового состояния металла при импульсно скоростном нагреве // Изв. вузов. Черная металлургия. 1995. №71 с. 53.
69. Прибытков И.А. О распределении тепловой нагрузки при импульсно-скоростном нагреве металла // Изв. Вузов. Черная металлургия. 1997. №7. с. 66.
70. Прибытков И.А. Об особенности импульсно-скоростного нагрева сверхмассивных в тепловом отношении тел. – В кн.: Материалы XVI международной конференция «Теплотехника и энергетика в металлургии», НМетАУ, г. Днепропетровск, Украина. – Днепропетровск: НМетАУ, 2011. С. 74 – 75.
71. Прибытков И.А., Ганина М.В. Предпроектное исследование и разработка устройства для высокотемпературного нагрева азота. – В кн.: Труды IV Всероссийской научно-практической конференции «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве (ТИМ-2015)» (г. Екатеринбург, 26-27 марта 2015 г.). – Екатеринбург: УрФУ, 2015. ч.2. с. 95 - 101
72. Прибытков И.А., Кобахидзе В.В., Кривандин В.А. О задаче внешнего теплообмена при радиационно-струйном нагреве металла // Изв. вузов. Черная металлургия. 1998. №7. с. 62 – 65.
73. Прибытков И.А., Кузнецова Н.П. К вопросу об импульсно-скоростном нагреве непрерывнолитой заготовки // Изв. вузов. Черная металлургия. 2011. №11. с. 46.
74. Прибытков И.А., Терехова А.Ю. Исследование импульсного охлаждения массивных в тепловом отношении заготовок. - В кн.: Труды VI Всероссийской научно-практической конференции «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве (ТИМ-2017)» (г. Екатеринбург, 11-12 мая 2017 г.). – Екатеринбург (УрФУ), 2017. с. 105 – 110.
75. Прибытков И.А., Титова Г.В., Особенности струйного нагрева термически тонкого металла // Изв. вузов. Черная металлургия. 1993. №9 - 10. с. 51.
76. Прибытков И.А., Титова Г.В., Никонов В.В. Циклированный нагрев струями термически массивного металла // Изв. вузов. Черная металлургия. 1992. №7. с. 59.
77. Пройдака Ю. С. Теплотехника, энергетика и экология в металлургии: коллективная монография. В двух книгах. Книга первая. – Днепропетровск: Новое издание 2017, – 284 с.
78. Ревун М.П., Барышенко А.И., Чепрасов А.И., Башлий С.В., Андриенко А.Н. Новые схемы импульсного отопления нагревательных и термических печей // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2005. №3. с. 97 – 100.

79. Реутов С.А., Прибытков И.А., Кривандин В.А. Аэродинамика ударных струй при их взаимодействии с плоской поверхностью // Изв. вузов. Черная металлургия. 1989. №2. с. 129.
80. Реутов С.А., Прибытков И.А., Кривандин В.А. Экспериментальное исследование смешения ударных струй вблизи плоской поверхности. // Изв. вузов. Черная металлургия. 1989. №3. с. 132.
81. Самарский А.А. Введение в численные методы. - М.: Наука, 1978, - 512 с.
82. Сапронова Е.В., Курбатов Ю.Л., Сидоров А.С., Берковский В.В. Разработка зональной модели топливной камерной нагревательной печи периодического действия с несимметричным факелом и переменной функцией выгорания топлива // Теплотехника и энергетика в металлургии, НМетАУ, г. Днепропетровск, 2008. с. 202 – 203.
83. Седых А.М., Юзов О.В., Афонин С.З. Черная металлургия России на фоне мирового рынка. – М.: ЗАО «Издательство «Экономика», 2009,. – 256 с.
84. Соколов Е.Я., Бродянский В.М. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд. – М.: Энергоиздат, 1981. – 74 с.
85. Сорока Б.С. Системы горения и оборудование для рекуперации тепла промышленных печей: текущий статус и международные тенденции. // Энерготехнологии и ресурсосбережение, 2012. № 2, с. 54 – 68.
86. Тарасевич Ю. Ю. Математическое и компьютерное моделирование. Вводный курс. М.:Едиториал УРСС, 2004, 152 с.
87. Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Ратников П.Э. Возможности применения струйного нагрева металла перед прокаткой. // Литье и металлургия. 2007. №2. с. 63 – 66.
88. Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Менделев Д.В. Математическое моделирование процесса струйного нагрева цилиндрических заготовок в камерной печи // Литье и металлургия. 2010. №3. с. 138 – 140.
89. Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Ратников П.Э. Возможности применения струйного нагрева металла перед прокаткой. // Литье и металлургия. 2007. №2. с. 63 - 66.
90. Титова Г.В., Прибытков И.А., Кадиев К.Т. Распределение коэффициентов теплоотдачи при взаимодействии струи с поверхностью нагреваемого металла. // Изв. вузов. Черная металлургия. 1988. №3. с. 96.
91. Титова Г.В., Прибытков И.А., Кадиев К.Т. Исследование глубины проникновения температурных колебаний при импульсно-скоростном нагреве массивных слябов. // Изв. вузов. Черная металлургия. 1988. №1. с. 132.
92. Тихонова В. Р., Филатов А.В. Численное моделирование организации струйно-факельного нагрева в нефутерованных агрегатах. - – В кн.: Труды IV Всероссийской научно-

практической конференции «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве (ТИМ-2015)» (г. Екатеринбург, 26-27 марта 2015 г.). – Екатеринбург: УрФУ, 2015. с. 155 – 159.

93. Трусов П. В. Введение в математическое моделирование. М.: Логос, 2005 - 440 с.
94. Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г., Гордон Я.М., Шаврин В.С., Носков А.С. Механика жидкости и газа: Учебное пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. - 464 с.
95. Шкляр Ф.Р., Маликов Г.К., Коршунов В.А., Лобанов Д.Л., Конюхов В.П. Тепловая работа опытно-промышленной секции печи для нагрева металла во встречных струях // Сталь. – 1978. – № 3. – с. 227 – 279.
96. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974, - 711 с.
97. Шураев О.П., Бевза Д.И., Валиулин С.Н. Исследование полей скорости и температуры в каналах котла-утилизатора методом численного моделирования. // Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология. 2016. № 3. с. 49 – 56.
98. Шульц Л.А. Энерго-Экологический анализ эффективности металлургических процессов: учебное пособие. – М.: Издательский дом МИСиС, 2012. – 267 с.
99. Юдаев Б. Н. Техническая термодинамика. Теплопередача: Учеб. для неэнергетич. спец. Втузов. М.: Высш. Шк., 1988. 479 с.
100. Юдаев Б.Н., Михайлов М.С., Савин В.К. Теплообмен при взаимодействии струй с преградами. - Москва: Машиностроение, 1977. - 247 с.
101. Cadena-Ramírez, A., Favela-Contreras, A., Dieck-Assad, G. Modeling and simulation of furnace pulse firing improvements using fuzzy control. // Simulation. 2017. №6. p. 477 – 487.
102. Colucci D., Viskanta R. Effect of Nozzle Geometry on Local Convective Heat Transfer to a Confined Impinging Air Jet // Experimental Thermal and Fluid Science. 1996. No.13. p. 71 – 80.
103. Gao N., Sun H., Ewing D. Heat Transfer to Impinging Round Jets with Triangular Tabs // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2003. No. 46. p. 2557 – 2569.
104. Hu L., Lv Y., Tang K., Richards G. An improved methodology for pulse combustion with programmable timing sequence used in reheating furnaces // ISIJ International. 2017. Vol. 57. No. 12. P. 2266 – 2268.
105. Kuntikana, P., Prabhu, S. Heat transfer investigations on methane-air premixed flame jet exiting from a circular nozzle and impinging over semi-cylindrical surfaces. // International Journal of Thermal Sciences. 2018. Vol. 128. p. 105 -123.
106. Lisienko, V.G., Shleimovich, E.M. Improving the thermal characteristics of furnaces and the operating conditions of the lining by improving direct-flame-impingement methods for intensifying the heating of metal. // Refractories and Industrial Ceramics. 2013. Vol. 54. No. 3. P. 188 – 195.

107. Liu, Y., Liu, Y., Tao, S., Wen, Z. Numerical simulation of combustion strategy in a re-generative reheating furnace under low thermal load. // *Journal of Central South University (Science and Technology)*. 2016. Vol. 47. No. 6. p. 1843 – 1849.
108. Schnitzler, M., Böiling, R., Pfeifer, H. Analysis of Combustion Efficiency Using Laser-Induced Fluorescence Measurements of OH-Radicals. // *Energy Technology: Carbon Dioxide Management and Other Technologies*. 2012. p. 93 – 100.
109. Liu, Y.J., Li, J.D., Misra, R.D.K., Wang, Z.D., Wang, G.D. A numerical analysis of slab heating characteristics in a rolling type reheating furnace with pulse combustion. // *Applied Thermal Engineering*/ 2016. Vol. 107. p. 1304 – 1312.
110. Yue, K., Cheng, L., Liu, H., Wang, Y. Analysis of jet blast impact of embarked aircraft on deck takeoff zone. // *Aerospace Science and Technology*. 2015. Vol. 45. p. 60 - 66.
111. Zhang, J.J., Qu, Z.G., Fu, R.P., He, Y.L. Experimental study on the transient thermal characteristics of an integrated deflector under the periodic impingement of a supersonic flame jet. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. Vol. 85. p. 811 – 823.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПРОТОКОЛ ТЕХНИЧЕСКОГО СОВЕЩАНИЯ

ПРОТОКОЛ Технического совещания

10 июня 2019 г.

г. Апрелевка, Московская обл.

ПРИСУТСТВОВАЛИ:От ООО «КОМПЛЕКСНЫЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ» (далее – КОМАС):

Генеральный директор, к.ф.-м.н.

В.В. Курносов

Технический директор

М.М. Ярошок

От Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (далее – МИСиС):К.т.н., профессор кафедры
энергоэффективных и ресурсосберегающих
промышленных технологий

И.А. Прибытков

Ассистент кафедры энергоэффективных и
ресурсосберегающих промышленных
технологий

С.И. Кондрашенко

СЛУШАЛИ СООБЩЕНИЕ:

С.И. Кондрашенко по результатам работы над кандидатской диссертацией на тему: «Исследование и разработка способа нагрева стальной ленты струями высокотемпературного азота».

После обсуждения

РЕШИЛИ:

1. Принять к использованию при проектировании и строительстве нагревательных устройств струйного нагрева результаты, изложенные в рукописи кандидатской диссертации С.И. Кондрашенко на тему: «Исследование и разработка способа нагрева стальной ленты струями высокотемпературного азота»

Генеральный директор ООО «КОМАС»
канд. физ.-мат. наук



В.В. Курносов