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

На правах рукописи

Спитченко Данила Ильич

ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ ПОКОВОК КАЧЕСТВЕННЫХ СТАЛЕЙ СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ В НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ

05.16.02 – Металлургия черных, цветных и редких металлов

Диссертация на соискание
ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель:
профессор, кандидат технических наук
Михаил Дмитриевич Казяев

Екатеринбург – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 4
1 ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КАЧЕСТВЕННОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ 11
1.1 Энергоресурсосбережение при обработке металла в нагревательных и термических печах 12
1.1.1 Топливосжигающие устройства 13
1.1.2 Футеровочные материалы 22
1.2 Комплексные мероприятия по повышению энергоэффективности тепловой обработки металлической продукции 23
1.3 Технологии тепловой обработки крупногабаритных изделий из качественных сталей 28
1.3.1 Тепловая обработка прокатных валков 28
1.3.2 Тепловая обработка роторов 30
1.4 Выводы и постановка задач исследования 31
2 КАМЕРНАЯ ВЕРТИКАЛЬНАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ ПЕЧЬ ДЛЯ НАГРЕВА КРУПНЫХ ПОКОВОК СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИИ 35
2.1 Конструкция печи 35
2.2 Рекуперативная горелка Ecomax 5 39
2.3 Нагреваемые изделия 42
2.4 Особенности тепловой работы и методы изучения теплообмена в рабочем пространстве печи 43
2.5 Выводы 45
3 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ КАМЕРНОЙ ПЕЧИ ПРИ НАГРЕВЕ КРУПНЫХ ПОКОВОК 46
3.1 Экспериментальное исследование сложного внешнего теплообмена при нагреве поковки ротора турбины 46
3.2 Методика обработки экспериментальных данных 50
3.3 Расчет внешнего теплообмена при нагреве поковки ротора турбины 54

3.4 Результаты расчетов сложного внешнего теплообмена при нагреве поковки ротора турбины 64
3.5 Выводы 64
4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГАЗОДИНАМИКИ В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ ПЕЧИ 66
4.1 Постановка задачи 67
4.2 Исследование движения газов в свободном объеме рабочего пространства модели вертикальной камерной печи 72
4.3 Кратность циркуляции продуктов сгорания и газообмен в рабочем пространстве вертикальной печи 79
4.4 Определение функциональной зависимости Nu=f(Re) для расчета конвективной составляющей теплообмена 89
4.5 Выводы 96
5 ТЕПЛООБМЕН ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ПОКОВКИ РОТОРА ТУРБИНЫ В ПЕЧИ СТРУЯМИ ВОЗДУХА, ПОДАВАЕМОГО ЧЕРЕЗ РЕКУПЕРАТВНЫЕ ГОРЕЛКИ 98
5.1 Локальный тепловой баланс II зоны печи при ее охлаждении с садкой103
5.2 Выводы 106
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 108
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ 111
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 114
ПРИЛОЖЕНИЕ 129

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Человечество достигло современного уровня развития во многом благодаря буму металлургических технологий последних полутора веков. Невозможно представить себе развитого общества без использования продукции из различных металлов и сплавов. Постоянно растущие потребности человечества вызывают неизбежное увеличение объема выпуска металлической продукции, а научный прогресс требует создания новых материалов со специальными свойствами – прочностными, магнитными, электрическими и пр.

Бурный рост потребления и, как следствие, рост производства металлургической продукции приводит к тому, что в последнее время наблюдается дефицит энергетических и материальных ресурсов, наряду с общим ухудшением экологической обстановки. Проблемы энергоресурсосбережения и экологической безопасности приобрели глобальный характер. Так, например, на саммите G8, состоявшемся в 2006г. в г. Санкт-Петербурге были приняты принципы «Глобальной энергетической безопасности», одним из ключевых среди них являлся следующий: «Сбережение энергоресурсов равносильно их производству, и зачастую именно оно представляет собой более рентабельный и экологически ответственный способ обеспечения растущего спроса на энергию» [1, 2].

В России проблема энергоресурсосбережения стоит особенно остро. Так, по данным [3] Россия в 2013г. занимала десятое место по показателю энергоемости ВВП среди десятки стран-лидеров по размеру ВВП. Энергоемость отечественной экономики в 2,9 раза выше энергоемкости Германии, в 3 раза выше Японии и в 1,3 раза выше Китая. Такая ситуация во многом объясняется тем, что в энергетике и в металлургии, самых ресурсо и энергоемких отраслях промышленности, сегодня используются технологии и агрегаты, спроектированные и построенные в 60-80х годах 20 века. В свою очередь, одними из самых энергозатратных в металлургии являются тепловые агрегаты, основная масса которых является топливными.

Морально и физически устаревшие тепловые агрегаты обладают крайне низким КПД, что в комплексе с устаревшими затратными технологиями не в состоянии обеспечивать энергоресурсоэффективное производство металлургической продукции и защиту окружающей среды от парниковых газов.

Для обеспечения конкурентоспособности отечественной металлургической продукции, как на внутреннем, так и на внешнем рынке необходимо внедрять новые технологии и осуществлять модернизацию агрегатов всей производственной цепочки. В литературе наиболее полно описаны новые технологии и агрегаты при получении чугуна и стали [4]. Однако не менее остро стоят проблемы энергоресурсосбережения при осуществлении последующих технологий нагрева металла при обработке металлов давлением и термообработке.

Печи для нагрева и термообработки металла являются самым многочисленным классом тепловых агрегатов, как на металлургических, так и на машиностроительных заводах. Тепловая обработка является одним из энергозатратных этапов производства металлической продукции. Поэтому ввод в производство новых технологий и конструкций печей является одним из основных направлений повышения энергоэффективности [5, 6, 7]. С технологической точки зрения, термообработка является одним из важнейших этапов производства качественной металлической продукции, так как именно она определяет итоговые механические и физические свойства готовой продукции.

Актуальность данной работы состоит в изучении и обобщении методов и результатов внедрения новой технологии и современной конструкции термической печи на основе промышленного эксперимента и компьютерного моделирования при тепловой обработке поковки ротора турбины – длинномерного крупногабаритного изделия, сложной геометрической формы.

Степень разработанности темы исследования

На сегодняшний день в промышленности сформировалась острая нехватка современных технологий тепловой обработки высококачественной стальной продукции с низкими затратами энергии и ресурсов. Не менее важной проблемой

является модернизация тепловых агрегатов вертикального типа для проведения обработки крупнотоннажных поковок сложной геометрии. Для решения этих проблем необходим анализ тепловой работы вертикальных печей в комплексе с исследованием процессов газодинамики в рабочем пространстве при нагреве и охлаждении изделий, что в печах этого типа имеет низкую степень разработанности.

Цели и задачи работы

Цель – разработка и внедрение энергоресурсосберегающей технологии тепловой обработки крупнотоннажных изделий из качественных сталей в вертикальной нагревательной печи усовершенствованной конструкции.

В ходе выполнения работы были поставлены и решены следующие задачи:

1. Совершенствование методики расчета теплообмена в рабочем пространстве печи со скоростными горелками и малоинерционной футеровкой при нагреве крупной поковки.
2. Совершенствование методики расчета теплообмена при охлаждении поковки в рабочем пространстве печи.
3. Исследование с помощью компьютерного моделирования процессов газодинамики продуктов горения в рабочем пространстве вертикальной камерной печи с целью определения качественных и количественных характеристик движения газов.
4. Установление основных зависимостей и закономерностей влияния скорости движения газов в рабочем пространстве на интенсивность теплообмена.
5. Формирование рекомендаций для улучшения показателей работы печи.
6. Оценка внедрения в производственный процесс новой энергоресурсосберегающей технологии и конструкции вертикальной камерной термической печи.

Научная новизна

1. Определено соотношение лучистой и конвективной составляющей теплообмена из расчета внешнего теплообмена при нагреве ротора турбины сложной геометрии по ступенчатому режиму.
2. Рассчитан теплообмен при охлаждении садки в печи струями воздуха, подаваемыми через рекуперативные горелки с определением статей отвода тепла от поковки ротора турбины.
3. Определено векторное поле распределения скоростей движения газов по рабочему пространству печи, оснащенной скоростными рекуперативными горелками по результатам трехмерного компьютерного моделирования. Получена сходимость результатов расчета теплообмена и моделирования процессов газодинамики.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость

- Исследована тепловая работа агрегата – камерной печи новой конструкции на всех этапах ведения технологии тепловой обработки.
- Получены зависимости, позволяющие производить расчет тепловой работы схожих по конструкции печей.
- Определены статьи отвода тепла при регулируемом охлаждении садки в печи.
- Определены характер движения, скорости газов и кратности циркуляции в рабочем пространстве печи, позволяющие рассчитывать конвективную составляющую теплообмена в вертикальных печах.

Практическая значимость

- Экспериментально доказана эффективность применения высокоскоростных рекуперативных горелок в вертикальных термических печах при осуществлении сложных совмещенных режимов нагрева и охлаждения изделий.
- Доказана эффективность последовательного нагрева и регулируемого охлаждения садки в одном тепловом агрегате.

- Внедрена новая энергосберегающая технология точной тепловой обработки крупнотоннажных поковок, объединяющая этапы нагрева, выдержки и контролируемого охлаждения в рамках одного агрегата.

Методология и методы исследования

Исследование базируется на данных, полученных в ходе полномасштабного промышленного эксперимента, выполненного на печи №22 цеха №37 ПАО «Уралмашзавод». Эксперимент проводился по заранее разработанной методике с использованием измерительных приборов, имеющих сертификаты о прохождении государственной поверки, что гарантирует достоверность полученных данных. Обработка экспериментальных данных производилась с использованием положений теории тепло-массообмена, механики движения жидкостей и газов, теории металлургических процессов. При этом не выявлено расхождений полученных результатов с общепризнанными положениями о физических процессах, протекающих в рабочем пространстве промышленных печей.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика проведения промышленного эксперимента.
2. Результаты исследования теплообмена при нагреве крупнотоннажных поковок в печи, с использованием современных энергосберегающих технологий.
3. Результаты исследования теплообмена при регламентированном охлаждении крупнотоннажных поковок в печи путем продувки воздухом через горелочные устройства.
4. Апроксимирующая зависимость для расчета конвективной составляющей теплообмена в печах подобной конструкции.
5. Результаты внедрения в производство энергоресурсосберегающей технологии тепловой обработки изделий сложной геометрии в печи новой конструкции, оснащенной скоростными рекуперативными горелками и футеровкой из волокнистых материалов.

Степень достоверности полученных результатов основана на использовании данных, полученных в ходе промышленного эксперимента в

условиях действующего производства. Расчеты велись по общепризнанным методикам и в соответствии с известными положениями о процессах, протекающих в рабочем пространстве промышленных печей. Достоверность полученных результатов подтверждается отзывом ПАО «Уралмашзавод».

Личный вклад автора:

- постановка цели и задач исследования;
- анализ существующих энергоресурсосберегающих технологий при производстве металлической продукции;
- подготовка и проведение промышленного эксперимента;
- расчет сложного теплообмена по экспериментальным данным;
- компьютерное моделирование процесса газодинамики в рабочем пространстве;
- вывод апроксимирующих зависимостей для расчета конвективной составляющей теплообмена;
- расчет теплообмена при охлаждении поковки ротора в рабочем пространстве печи;
- Обобщение результатов исследования тепловой работы печи новой конструкции при внедрении энергоресурсосберегающей технологии тепловой обработки изделий сложной геометрической формы.

Апробация работы

Основные результаты работы обсуждены и доложены на следующих конференциях международного и всероссийского уровня:

1. I всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Теплофизика и информатика в образовании, науке и производстве» (Екатеринбург, 2012г.).
2. Международная научно-практическая конференция «Теория и практика тепловых процессов в металлургии» (Екатеринбург, 2012г.).
3. II всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием

«Теплофизика и информатика в образовании, науке и производстве» (Екатеринбург, 2013 г.).

4. Международная научно-практическая конференция «Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло» (Екатеринбург, 2014г.).
5. VII международная научно-практическая конференция «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология» (Москва, 2014г.).
6. Международная научно-практическая конференция «Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности» (Екатеринбург, 2015г.).

Публикации

По содержанию диссертационной работы опубликовано 8 научных статей, 2 из них в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 129 страницах, состоит из введения, 5 глав, заключения, имеет в составе 46 рисунков, 15 таблиц, список сокращений, список литературы, содержащий 89 наименований, 1 приложение.

1 ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КАЧЕСТВЕННОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ

До недавнего времени увеличение объемов производства металлической продукции достигалось только количественным ростом – за счет увеличения объемов потребляемого сырья и топлива. Это привело к тому, что в мировом масштабе наблюдается падение качества сырья, что выражается в необходимости перерабатывать все большие объемы, даже для сохранения текущих темпов производства. Сегодня производителям приходится внедрять менее энерго- и ресурсозатратные технологии для более полного использования сырья и топлива. С геологической точки зрения Россия имеет огромное преимущество, благодаря наличию значительных запасов полезных ископаемых. Это позволяло длительное время не следовать за общемировыми тенденциями «сбережения». Однако в настоящее время рост цен на сырье и энергоносители стал проявляться и в нашей стране, что наряду с ухудшающейся экологической обстановкой, привело к необходимости скорейшего освоения энергоресурсосберегающих технологий. Энерго- и ресурсосбережение тесным образом связано с проблемами улучшения экологической обстановки. Основными источниками загрязнений являются энергетика и производственные отрасли промышленности. Соответственно, при уменьшении ресурсо- и энергопотребления будет снижаться и нагрузка на окружающую среду [1].

Металлургическая промышленность является одной из самых ресурсо- и энергозатратных отраслей, а черная металлургия – это одна из базовых отраслей промышленности. Так, в 2012 году ее доля в ВВП России составляла 1,4% и 8% в промышленном производстве, при этом черная металлургия использовала 5,3% электроэнергии и более 8% всего внутрироссийского потребления природного газа [8]. Также, государством определены [8] основные тенденции и направления в развитии металлургии, которыми являются:

- «Повышение эффективности использования сырья и энергоресурсов.
- Внедрение новой техники и технологий.

- Ресурсо- и энергосбережение при снижении негативного воздействия на окружающую среду».

С практической точки зрения, переход на менее затратные технологии неразрывно связан с модернизацией устаревшего и вводом в строй нового оборудования в металлургической отрасли. При этом внедрение принципиально новых технологических цепочек является довольно затратным. Поэтому в рамках действующих предприятий, как правило, ограничиваются совершенствованием уже существующих технологий и модернизацией оборудования, автоматизацией, а также оптимизацией производственных процессов. [9, 10, 11].

Значительную часть металлургического оборудования составляют нагревательные и термические печи, представленные не только на металлургических предприятиях, но и в составе металлургических производств машиностроительных предприятий [4, 5, 6, 12].

1.1 Энергоресурсосбережение при обработке металла в нагревательных и термических печах

Задача нагревательных и термических печей – нагрев садки со строго заданной скоростью и поддержание температуры выдержки с заданным перепадом температур по поверхности и сечению изделий. При этом энергосбережение сводится к наиболее полному использованию химической энергии топлива в рамках одного агрегата, минимизации потерь тепла в окружающее пространство и снижении общего объема вредных выбросов.

Химическая энергия топлива преобразуется в тепловую энергию продуктов сгорания, которые в свою очередь нагревают рабочее пространство и покидают его, все еще имея высокую температуру, достигающую значений до 1200 °С. С каждым кубометром продуктов сгорания, нагретых до температуры 1000 °С из рабочего пространства уносится от 1100 до 1400кДж тепловой энергии [4]. Если принять во внимание количество нагревательных и термических печей на предприятиях и их производительность, то получается колоссальное количество теряемой энергии, которую необходимо утилизировать. На сегодня доля

использования этой энергии составляет 25 % [13, 14]. Физическое тепло отходящих газов можно использовать в рамках того же агрегата, в котором оно образуется. Самым распространенным способом утилизации тепла дымовых газов является подогрев воздуха, подаваемого на горение. Для этого используются регенеративные и рекуперативные устройства различных конструкций. За счет подогрева воздуха может достигаться значительный экономический эффект. Так, подогрев воздуха, подаваемого на горение, до 600 °С дает 34% экономии топлива [4]. Однако, подогрев такого высокого уровня требует применения специальных конструкций теплообменных аппаратов из жаропрочных материалов, поэтому на практике температура воздуха редко превышает 450 °С, но и это дает экономию в 26%.

1.1.1 Топливосжигающие устройства

Энергосбережение при сжигании топлива в металлургических печах не ограничивается утилизацией тепла отходящих из рабочего пространства газов. Эффективность использования химической энергии топлива, в первую очередь, определяется наиболее полной ее передачей в виде теплоты обрабатываемому металлу, то есть зависит от интенсификации теплообмена в рабочем пространстве. В нагревательных и особенно в термических печах, наряду с интенсификацией теплообмена, требуется поддержание минимально возможного перепада температур по рабочему пространству. Это требование к повышению качества выпускаемой металлической продукции а, следовательно, к повышению конкурентоспособности и ресурсоэффективности.

Одним из способов повышения равномерности нагрева является установка плоскопламенных горелок на своде печи. Такая система отопления в основном устанавливается на проходных и методических печах. Одним из современных примеров применения плоскопламенных горелок является печь с шагающим подом, построенная фирмой Firma Maerz-Gautschi (Германия) в сотрудничестве с фирмой Kromschroeder (Германия) [15]. Последняя поставила систему отопления печи, состоящую из плоскопламенных горелок BIO…K. В комплексе с

автоматикой они позволяют осуществлять качественное сжигание природного газа с поддержанием постоянного коэффициента избытка воздуха, а также плавное и ступенчатое регулирование мощности.

В настоящее время перепада температур в ±5 °С по рабочему пространству позволяет добиться применение высокоскоростных горелочных устройств, со скоростью истечения газов из носика горелки более 70 м/с. Наряду с повышением равномерности температурного поля в рабочем пространстве, применение высокоскоростных горелочных устройств позволяет повысить коэффициент теплоотдачи конвекцией металлу, а значит поднять энергоэффективность печи, что особенно актуально для низкотемпературных агрегатов, где доля теплообмена излучением невелика. Применение высокоскоростных горелочных устройств позволяет организовать в рабочем пространстве циркуляционное движение продуктов сгорания с зонами высоких скоростей вблизи поверхности металла.

Разработано и выпускается большое количество разнообразных высокоскоростных горелок. Одной из наиболее удачных конструкций являются горелки серии BIC/ZIC (рисунок 1.1) немецкой компании Elster Kromschroeder [16].

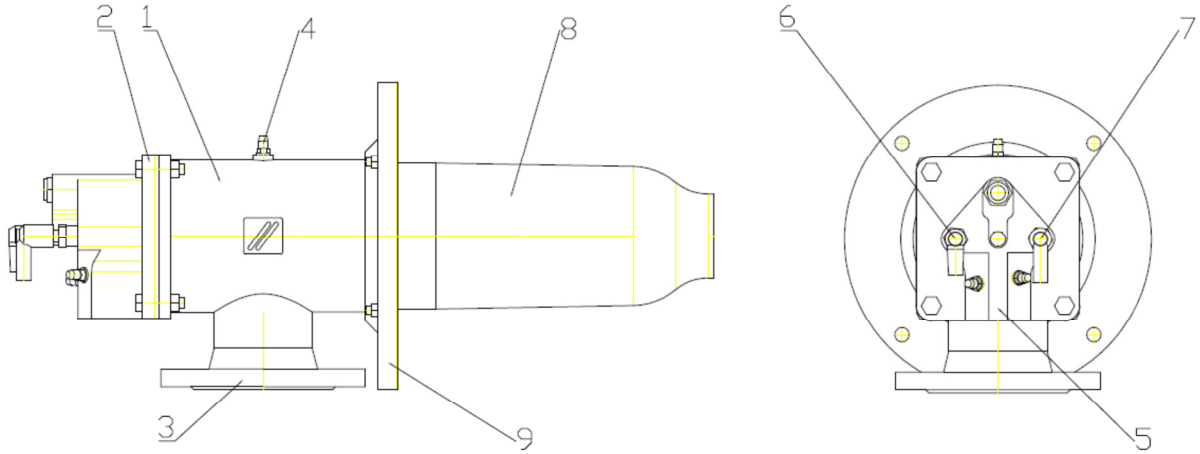

Рисунок 1.1 – Общий вид горелки BIC 140

1 – корпус горелки, 2 – газовая часть, 3 – патрубок для подачи воздуха, 4 – штуцер для измерения давления воздуха перед горелкой, 5 – патрубок для подачи газа, 6 – запальный электрод, 7 – электрод контроля пламени, 8 – керамический насадок, 9 – установочный фланец

Основной отличительной особенностью этих горелочных устройств является наличие керамической камеры сгорания, в которой начинается сжигание природного газа в ограниченном объеме. Благодаря этому, на выходе из носика горелки удается достичь скоростей истечения до 120 м/с. Горелки данной серии имеют большие пределы регулирования тепловой мощности, электроды розжига и контроля пламени и могут работать в полностью автоматическом режиме.

Одними из самых распространенных отечественных высокоскоростных горелочных устройств являются горелки фирмы «Общемаш» (рисунок 1.2). Смешение газа и воздуха, а также воспламенение смеси происходит внутри корпуса горелки. Благодаря началу процесса горения внутри ограниченного объема, скорость истечения из носика горелки достигает 160 м/с [17].

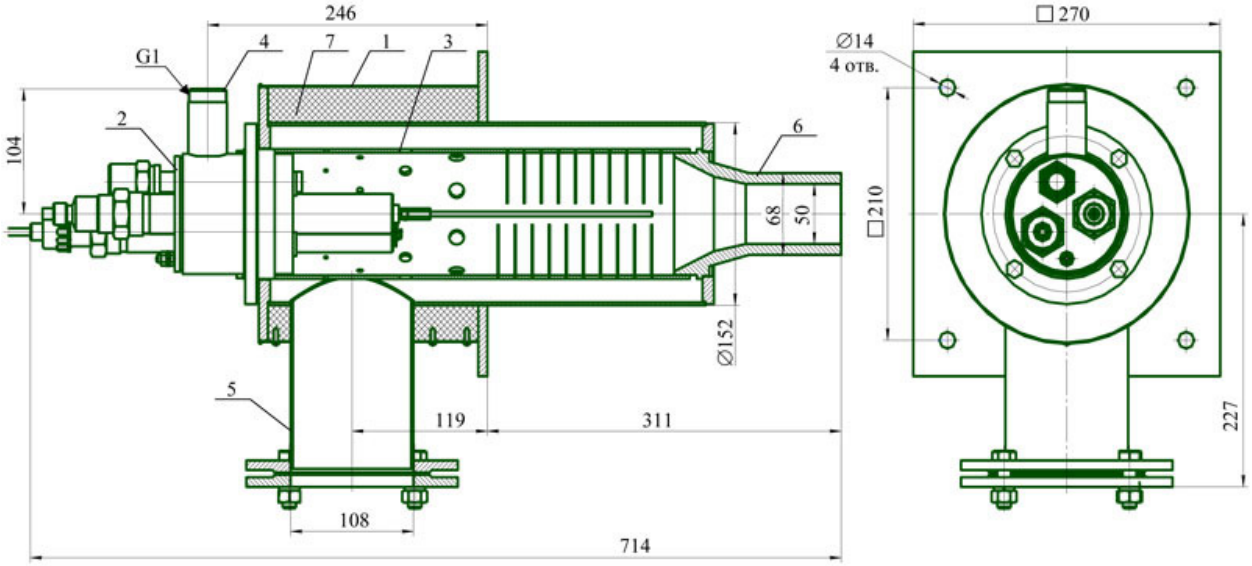

Рисунок 1.2 – Горелка ГТС-20 фирмы «Общемаш» [17]

1 – корпус горелки, 2 – газораспределительная головка, 3 – газораспределительная камера, 4 – патрубок подачи газа, 5 – патрубок подачи воздуха, 6 – конфузор, 7 – теплоизолирующий кожух

Отличительной особенностью горелок Теска является ступенчатое сжигание природного газа. В камере сгорания газ частично смешивается с воздухом и сгорает с коэффициентом избытка воздуха меньше единицы. На выходе из носика горелки получившиеся продукты неполного сгорания смешиваются с воздухом второй ступени и сгорают в коротком высокоскоростном факеле. Ступенчатое сжигание топлива приводит к более

равномерному распределению температурного поля по длине факела и позволяет существенно снизить выбросы оксидов азота NO_x [18].

Все перечисленные горелочные устройства могут работать с воздухом, который подогревается в отдельно стоящем рекуператоре. При этом возникает необходимость строительства футерованных воздухо- и дымопроводов, особенно в случае распределенного отвода газов из рабочего пространства, и потери тепла в них, что снижает энергоэффективность системы рекуперации.

Применение рекуперативных горелочных устройств позволяет отказаться от футерованных воздухопроводов и существенно уменьшить толщину теплоизоляции дымопроводов, наряду с организацией распределенного отвода отходящих газов из рабочего пространства.

Распространенной отечественной рекуперативной горелкой является конструкция ЗАО «Комас» [19]. Горелка имеет встроенный рекуператор, обладает широким диапазоном регулирования коэффициента избытка воздуха и высокой степенью рекуперации тепла отходящих газов. Дымовые газы удаляются из рабочего пространства через горелочные устройства за счет тяги, создаваемой дымососом.

Удачной является рекуперативная горелка Ecomax немецкой фирмы Elster Kromschroeder. Разработано несколько типоразмеров с разной мощностью, а также несколько конструкций встроенных в горелку рекуператоров, имеющих различную степень рекуперации тепла отходящих газов. Более подробно данная горелка описана в разделе 3.2. Результат применения горелок Ecomax в промышленной нагревательной печи описан в [20]. В ходе проведения режима нагрева удалось добиться перепада температур ± 2 °С по поверхности металла. Компьютерное моделирование газодинамики в данной печи показало, что кратность циркуляции газов в рабочем пространстве составила 9,6.

Немецкая фирма WS GmbH разработала и выпускает ряд типоразмеров рекуперативной горелки Recumat [21, 22]. Принцип ее работы и конструкция схожи с горелкой Ecomax, отличается конструкцией камеры горения и рекуператора.

Предшественницей Ecomax является горелка BICR [23]. Горелка разработана на основе модульной системы с использованием стандартного конструктива скоростных горелок BIC. Наружный корпус горелки, подводы газа и воздуха, конструктив запального и электрода контроля пламени совпадают с BIC (поз. 1, 2, 3, 4, 5, 6 рис. 1.3). Удлинена внутренняя конструкция горелки и за счет наличия вытяжного кожуха, через который удаляются продукты сгорания, (поз. 7) керамический насадок (поз. 8) играет роль рекуператора для подогрева воздуха, идущего на горение.

Примером перспективной отечественной конструкции рекуперативного горелочного устройства может служить горелка ГСР (ОАО «ВНИИМТ») [24, 25, 26]. Горелки серии ГСР имеют встроенный теплообменник, выполненный в виде пучка трубок по которым подается воздух на горение. Благодаря такому решению удалось существенно увеличить площадь теплообменной поверхности между воздухом и дымовыми газами, удаляющимися через горелку, а следовательно повысить и степень утилизации тепла. В горелках серии ГСР реализовано двухступенчатое сжигание природного газа, при этом начало горения происходит внутри корпуса горелки в керамической камере сгорания (поз. 5 рис. 1.4), куда первичный воздух подается с коэффициентом избытка меньше единицы.

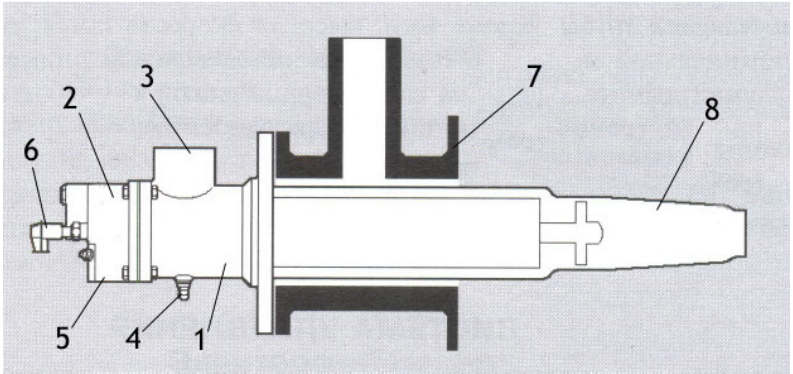

Рисунок 1.3 – Конструкция горелки BICR

1 – корпус горелки, 2 – газовая часть, 3 – патрубок для подачи воздуха, 4 – штуцер для измерения давления воздуха перед горелкой, 5 – патрубок для подачи газа, 6 – запальный электрод, 7 – вытяжной кожух, 8 – керамический рекуператор

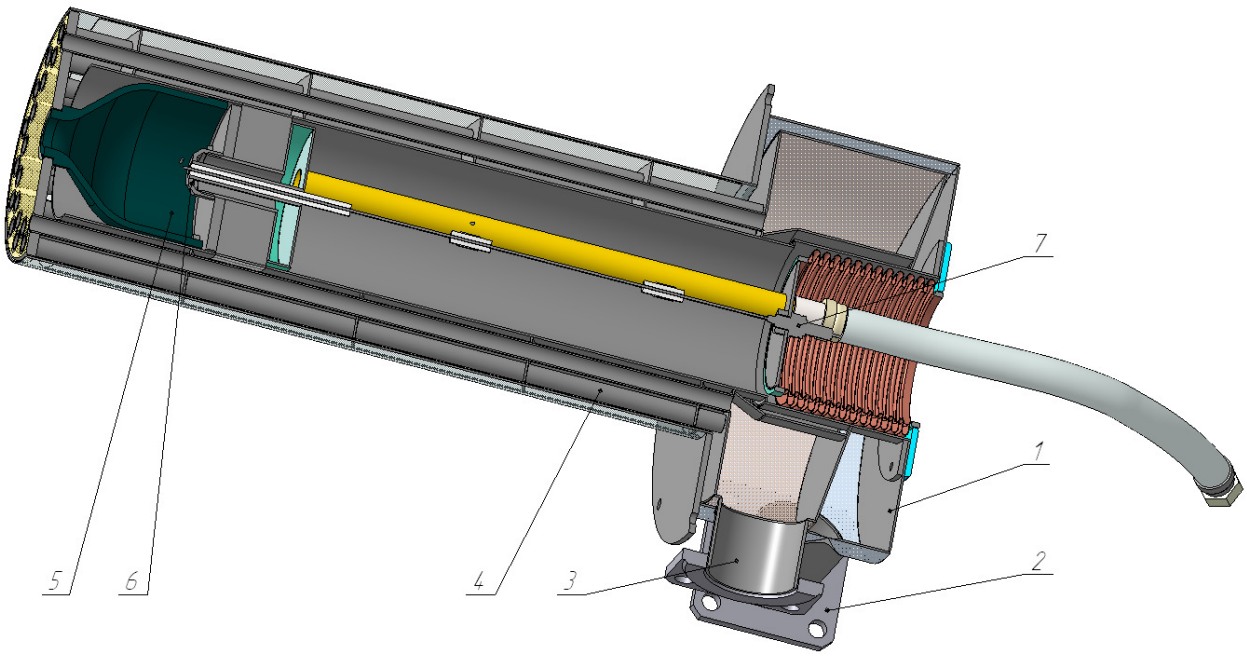

Рисунок 1.4 – Горелка скоростная рекуперативная ГСР-150

1 – наружный корпус, 2 – патрубок подвода воздуха, 3 – патрубок отвода продуктов сгорания, 4 – теплообменник, 5 – керамическая камера сгорания, 6– газовое сопло, 7 – электрод розжига и контроля пламени

К перспективным отечественным конструкциям можно отнести горелку УралТермоКомплекс (УТК). Для увеличения площади поверхности теплообмена рекуператор горелки имеет продольные сплошные ребра [27, 28]. Особенностью горелки УТК является трехступенчатая подача воздуха для сжигания природного газа (рис. 1.5). Воздух первой ступени подается через отверстия 13, проходит завихритель 8 и смешивается со струей природного газа из сопла 9 с коэффициентом избытка воздуха 0,45. Полученная смесь зажигается электродом 10 внутри камеры сгорания. Воздух второй ступени подается в камеру сгорания через отверстия 14, увеличивая коэффициент избытка воздуха до 0,6. Остальной воздух смешивается с выходящими из камеры сгорания продуктами неполного горения природного газа на выходе из носика горелки 16.

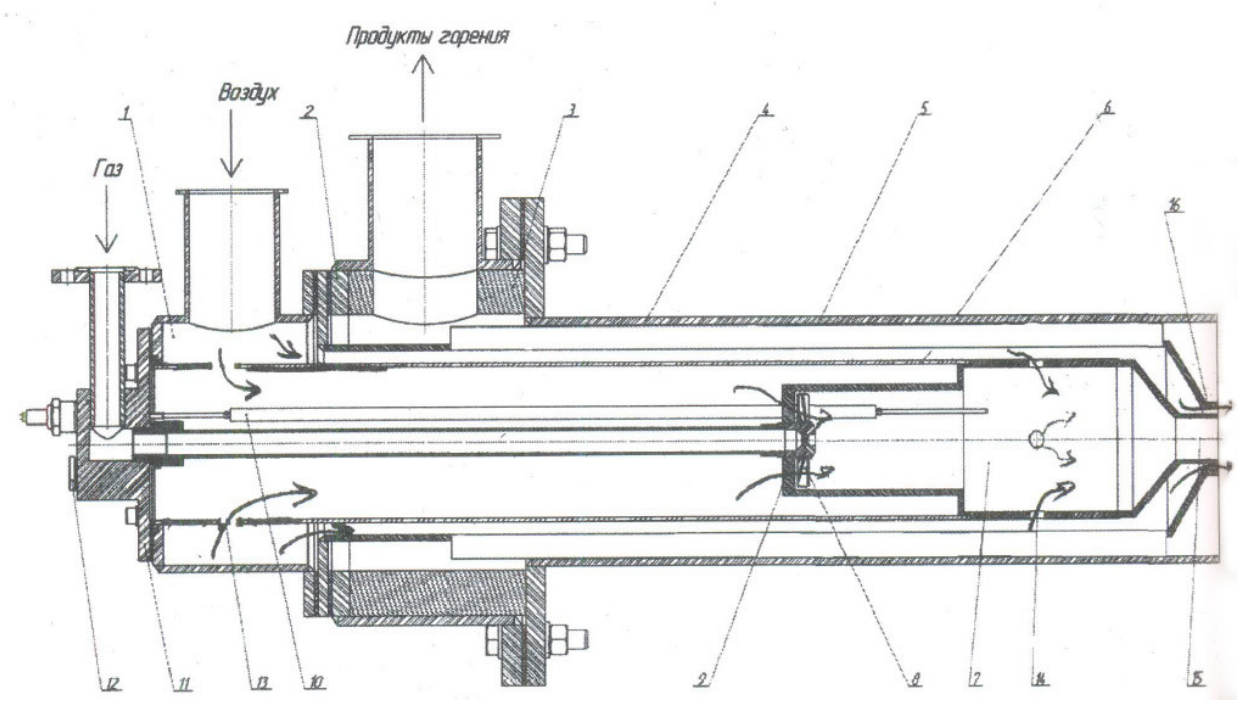

Рисунок 1.5 – Рекуперативная горелка УТК

1 – корпус подвода воздуха, 2 – корпус приемки продуктов горения, 3 – теплоизоляция, 4 – жаровая труба, 5 – рекуператор, 6 – труба подвода воздуха, 7 – камера горения первых ступеней, 8 – завихритель, 9 – газовое сопло, 10 – электрод розжига и контроля пламени, 11 – газовый корпус, 12 – смотровое окно, 13 – отверстия первичного воздуха, 14 – отверстия вторичного воздуха, 15 – выходной патрубок камеры горения, 16 – выходной патрубок третьей ступени

Достичь большей степени утилизации тепла отходящих газов, повысив температуру подогрева воздуха, подающегося на горение позволяют регенеративные горелки. Горелки, имеющие в своей конструкции одну регенеративную насадку должны компоноваться как минимум попарно для обеспечения непрерывного подвода тепла к садке. Также, попарная компоновка горелок с расположением их друг напротив друга, либо в шахматном порядке позволяет организовать циркуляционное движение газов в рабочем пространстве.

В России исследованиями в области регенеративного подогрева воздуха в нагревательных печах занимается ОАО «ВНИИМТ» [29, 30]. Опыт промышленного внедрения показал, что замена рекуперативного подогрева воздуха на регенеративный с применением малогабаритных регенеративных

насадок дает экономию природного газа до 25% [31]. Пример регенеративной печи конструкции ОАО «ВНИИМТ» представлен на рисунке 1.6.

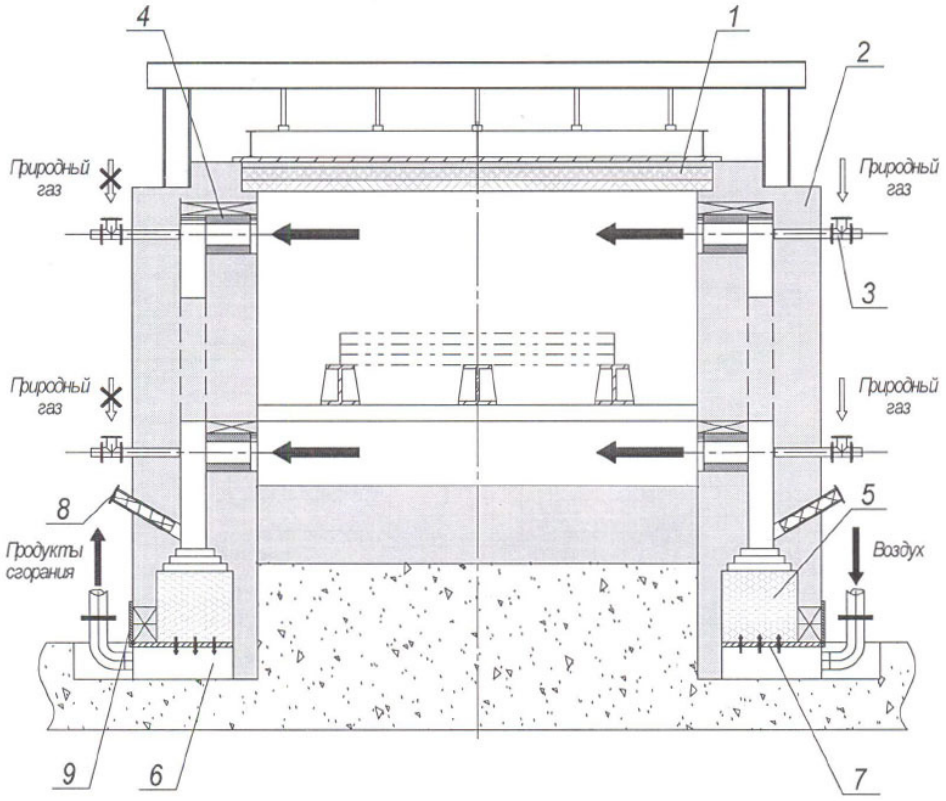

Рисунок 1.6 – Регенеративная печь ВНИИМТ

1 – плоский подвесной свод, 2 – корпус регенеративной насадки, 3 – газовая фурма с запальником, 4 – горелочный тоннель, 5 – регенеративная насадка из корундовых шаров, 6 – распределительная коробка, 7 – поднасадочная решетка, 8 – люк для засыпки корундовых шаров, 9 – окно выгрузки насадки

В регенеративной печи организована попеременная работа горелочных устройств (поз. 3, 4 рис. 1.6) расположенных друг напротив друга на боковых стенах печи. Подогрев воздуха осуществляется в регенеративной насадке (поз.5) из корундовых шаров, подлежащей легкой замене при выходе из строя.

В регенеративных горелках Regemat немецкой фирмы WS шесть регенеративных насадок, переключающие клапана и стартовая горелка объединены в один компактный модуль [21]. Через группу из трех регенераторов попеременно поступают горячие отходящие газы и подогреваемый воздух (рисунок 1.7). Особенностью данной горелки является режим беспламенного горения FLOX позволяющий осуществлять равномерно распределенное по всему

объему рабочего пространства сжигание газа. Это приводит к резкому сокращению концентрации NO_x в продуктах горения, повышению равномерности температурного поля в рабочем пространстве и экономии топлива до 60% [22]. Однако сложная конструкция и необходимость использования легированных сталей и жаропрочной керамики приводит к значительной стоимости данных горелочных устройств.

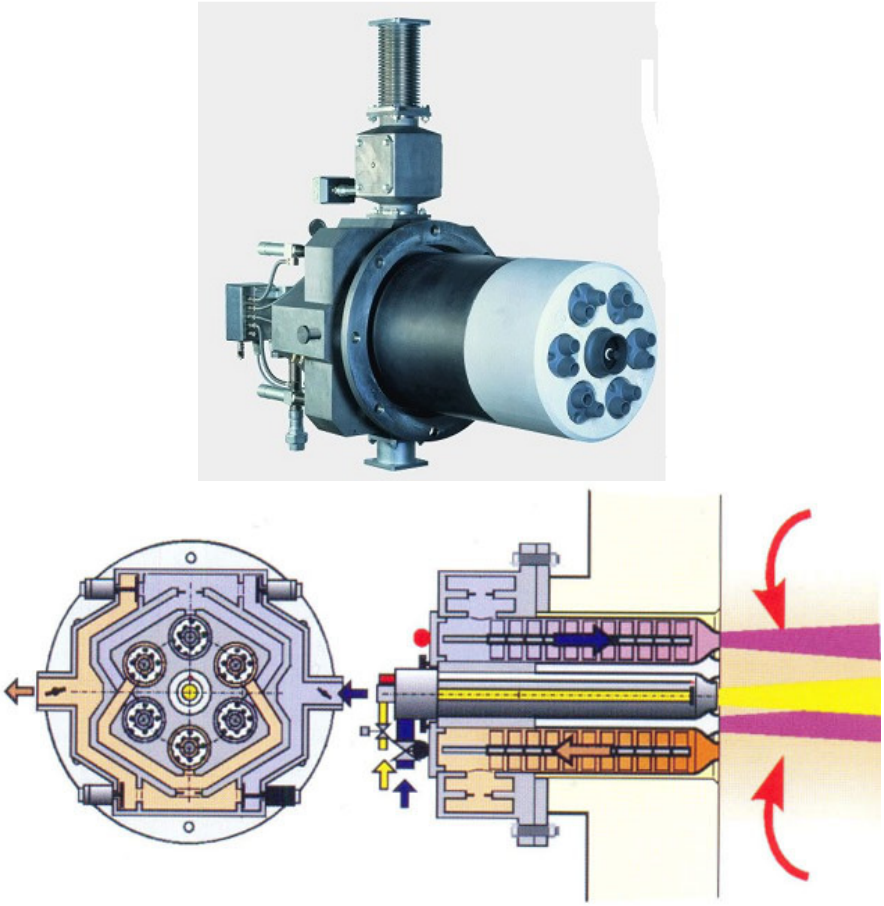

Рисунок 1.7 – Регенеративная горелка Regemat

Применение скоростных топливосжигающих устройств позволяет интенсифицировать теплообмен и резко повысить равномерность температурного поля в рабочем пространстве печи, что в конечном итоге приводит к повышению ресурсоэффективности. Применение скоростных рекуперативных и регенеративных горелок дополнительно к вышеперечисленному снижает расход топлива. Однако, по технологическим ограничениям бывает невозможно применить рекуперативные и регенеративные горелки, например, когда требуется поддерживать в рабочем пространстве восстановительную атмосферу путем сжигания топлива с коэффициентом избытка воздуха меньше единицы. Также, в

текущих условиях часто экономически не целесообразно применение сложных и дорогих устройств, имеющих самые высокие показатели по энергоэффективности. Поэтому большинство современных печей оснащаются скоростными горелками с отдельно стоящим рекуператором, реже – рекуперативными горелками.

1.1.2 Футеровочные материалы

С точки зрения энергосбережения – наиболее важными характеристиками футеровочных материалов являются наименьшие теплопроводность и теплоемкость для минимизации потерь тепла в окружающую среду. В нагревательных и термических печах нагреваемый материал, как правило, имеет механический контакт только с подом. Соответственно требования по механической стойкости к футеровке стен и свода минимальны. В связи с этим все более широкое применение получают волокнистые огнеупорные и теплоизоляционные материалы. Волокнистые материалы обладают большими преимуществами по сравнению с традиционными штучными огнеупорами: кажущаяся плотность очень низка (от 80 кг/м^3), вследствие чего коэффициент теплопроводности крайне мал (0,1…0,3 Вт/мК). Существуют волокнистые материалы более высокой плотности, при этом обладающие достаточно низкой теплопроводностью (0,3 Вт/мК). Способность таких материалов выдерживать значительную распределенную нагрузку делает возможным их применение в качестве теплоизоляционного слоя футеровки подин.

Применение волокнистых материалов позволяет значительно снизить массу футеровки, снизить потери тепла с аккумуляцией тепла кладкой и теплопроводностью через нее. Только за счет этого можно достичь экономии топлива в 30…40% [32]. В настоящее время большинство новых нагревательных и термических печей строятся с использованием модульной технологии футеровки. Замена кирпичной футеровки на модульную волокнистую в печи, являющейся объектом данного исследования, позволила сократить потери

теплопроводностью и с аккумуляцией тепла в 6,3 раза – с 2118 кВт до 335 кВт [33].

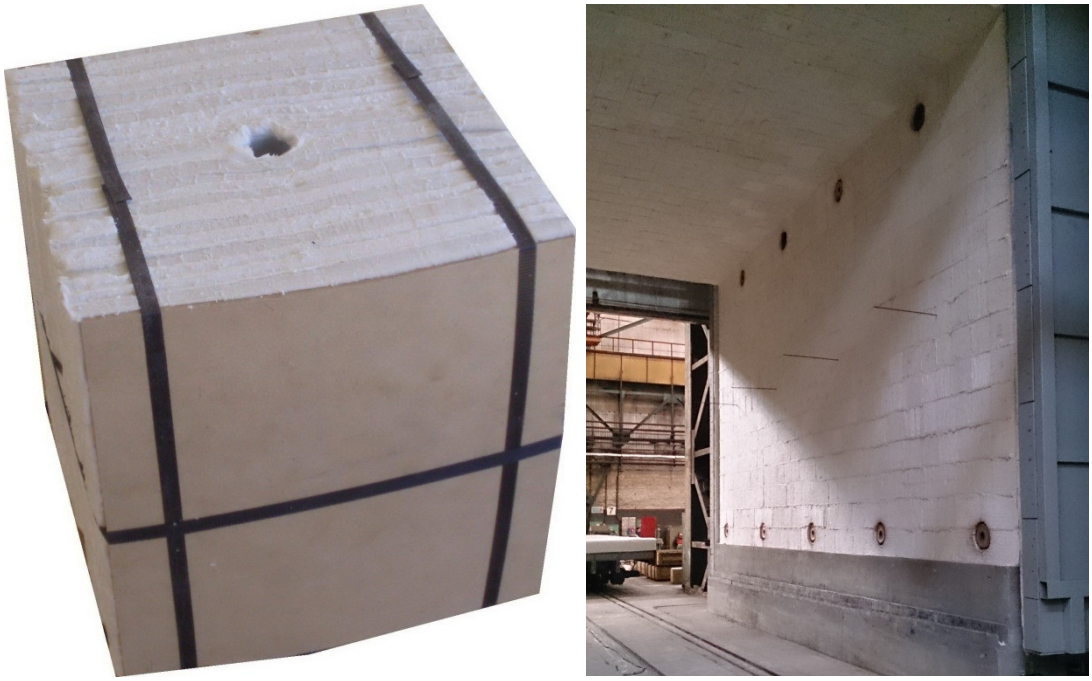

Рисунок 1.8 – Волокнистый футеровочный модуль (слева) Модульная волокнистая футеровка печи (справа)

1.2 Комплексные мероприятия по повышению энергоэффективности тепловой обработки металлической продукции

Для достижения наибольшего экономического и экологического эффекта требуется комплексное применение современных энергоэффективных материалов и оборудования, а также разработка и внедрение новых энергоресурсосберегающих технологий. Применительно к нагревательным и термическим печам такой подход заключается в применении:

- новых более эффективных режимов нагрева и термообработки [34, 35].
- низкотеплопроводных футеровочных материалов;
- современных высокоскоростных горелочных устройств с эффективной утилизацией тепла отходящих газов;
- современной автоматической системы управления технологическим процессом [36, 37].

Показательный пример такого подхода при конструировании термической печи периодического действия описан в [38, 39, 40, 41, 42]. Футеровка выше уровня пода выполнена из керамоволокнистых материалов. Печь оснащена импульсной системой отопления и современной автоматикой безопасности и ведения температурного режима. Примененные при проектировании и строительстве печи технологии позволили достичь распределение поля температур в рабочем пространстве печи на этапе выдержки ±5°С, а также снизить удельный расход условного топлива почти в 2 раза.

Применение рекуперативных горелок, работающих в импульсном режиме, в комплексе с волокнистой футеровкой и современной системой автоматического управления дает еще более значительное улучшение показателей работы печи. Так, по данным [43] после технического перевооружения с внедрением обозначенных выше материалов и оборудования, удалось увеличить производительность печи на почти 74% при снижении абсолютного расхода топлива на 13%, удельного расхода топлива на 62,5% при достижении равномерности нагрева ±2°С по поверхности изделий.

Комплексное техническое перевооружение печи с заменой футеровки на волокнистые материалы, установкой скоростных рекуперативных горелок, современной системы управления температурным режимом – довольно затратно и, к сожалению, не всегда является экономически осуществимым. Но даже частичная модернизация может принести достаточный эффект [44, 45]. Так, компаниями «НПК «УралТермоКомплекс», НПФ «Горелочный центр» и «Перол» была частично модернизирована подогревательная роликовая печь на Челябинском металлургическом комбинате. На печи установлены 32 короткопламенные горелки ВН-1/150 конструкции горелочного центра ВНИИМТ для сжигания коксодоменной смеси взамен устаревших 64 горелок ДНС-150/65, ролики новой конструкции, сохранена кирпичная конструкция футеровки и не установлена система автоматического управления. Даже частичная модернизация позволила снизить расход топлива на 10%, при увеличении производительности на 12…15% и резком повышении качества нагрева металла.

Пример ввода в строй новой проходной печи для термообработки, выполненной с применением современных волокнистых материалов и скоростных горелок показывает, что можно добиться очень высокой равномерности нагрева (перепад по длине оси на выгрузке не превышает 5 °С) наряду с повышением производительности печи на 25% и снижением удельного расхода топлива на 34% [44, 46].

В ходе термической обработки много внимания уделяется не только проблемам, связанным с эффективностью процессов нагрева металла, но также и регламентированному охлаждению. В частности во многих современных камерных термических печах реализованы алгоритмы охлаждения с заданной скоростью до 150 °С/ч в воздушной среде путем продувки воздухом через горелки. Более подробно процесс охлаждения садки в камерной печи описан в главе 5. В случае же производства проката современные технологии позволяют отказаться от термических печей для нагрева перед закалкой, а использовать остаточное тепло прокатного нагрева, в качестве закалочной среды использовать воздух под давлением, что позволяет добиться большей стабильности, контролируемости экологичности, процесса закалки [47].

Одним из действенных способов повышения эффективности теплообмена является струйно-факельное отопление. Данный метод отопления печей подробно описан в [2, 6, 48, 49]. Его суть заключается в нагреве специальными струйно-факельными горелками, направленными непосредственно на садку. Коэффициенты конвективного теплообмена в этом случае могут достигать 300 Вт/м^{2}К. Благодаря такому интенсивному нагреву удается существенно сократить время нагрева, а обеспечить высокий КПД позволяет утилизация тепла отходящих газов непосредственно в рабочем пространстве. Сжигание топлива в печах с струйно-факельным отоплением происходит непосредственно вблизи нагреваемых изделий, что позволяет дополнительно повысить теплоотдачу на металл и снизить тепловую нагрузку на футеровку. Опыт эксплуатации печей с струйно-факельным отоплением для нагрева трубной заготовки на Северском трубном и Первоуральском новотрубном заводах показывает достаточно высокую

эффективность данной технологии. Так, удалось снизить расход топлива в 1,9-2,2 раза, увеличить стойкость футеровки, в 2 раза снизить выбросы оксидов азота, повысить производительность печи на 15%. Разработаны и внедрены в производство нефутерованные печи струйного нагрева [50, 51]. В их конструкции футеровка заменена на металлическое ограждение рабочего пространства, поверхность которого является струйно-факельной образующей и одновременно поверхностью нагрева воздуха, идущего на горение. Струйный метод отопления также активно применяется за рубежом в проходных и методических нагревательных печах цветной металлургии: итальянской фирмой COIM [52], немецкой Otto Junker GmbH [53], а также в США.

Однако данный метод имеет очень ограниченную область эффективного применения. Струйно-факельное отопление обеспечивает качественную тепловую обработку изделий и высокий КПД только при нагреве круглых, или узких листовых [54] изделий в печах непрерывного действия с сосредоточенным дымоотводом. Данный метод не может применяться в садочных печах в виду разнообразной геометрии обрабатываемых изделий.

Одной из главных проблем тепловой обработки крупногабаритных изделий является мелкосерийный, а в настоящее время и штучный характер производства, что в комплексе со сложной геометрией и большой массой металла делает невозможным применение высокопроизводительных непрерывно работающих печей. Для тепловой обработки данного типа продукции используются камерные печи периодического действия. Большое разнообразие массы и размеров выпускаемых изделий требует установки целого парка печей, что приводит к большим затратам на их поставку и обслуживание. Поэтому в настоящее время на машиностроительных предприятиях часто вся номенклатура продукции обрабатывается в печах, спроектированных под самые большие из возможных габаритов садки. Это приводит к понижению КПД агрегатов и перерасходу топлива, но позволяет экономить на расходах по закупке большого количества печей и их обслуживании.

Примером агрегата, имеющего возможность обработки изделий значительно отличающихся по габаритам с высоким КПД является печь с разделяющимся рабочим пространством, с выкатным подом площадью 62,8м^2 [55, 56]. Печь предназначена для проведения термообработки сварных изделий. На подине печи может устанавливаться специальная перегородка, позволяющая разделять рабочее пространство на 2 части по 6 и 12,6 м длиной (рисунок 1.9). В случае тепловой обработки габаритных изделий используется все рабочее пространство. В случае обработки небольшой садки, на подину устанавливается перегородка, и неиспользуемая часть рабочего пространства отключается. Футеровка стен и свода выполнена по специальной панельной технологии из волокнистых материалов. Система отопления основана на 30 скоростных рекуперативных горелках Ecomax 5M, работающих в импульсном режиме. Печь оборудована современной трехуровневой АСУ ТП, позволяющей проводить термообработку в полностью автоматическом режиме с поддержанием заданной температуры в пяти виртуальных зонах управления. Примененные в конструкции печи технологии позволили добиться равномерности нагрева в ±3 °С по рабочему пространству на этапе выдержки. В ходе проведения режима с установленной перегородкой, температура в неиспользуемой части рабочего пространства не превышала 40°С, что обеспечивается герметичной перегородкой.

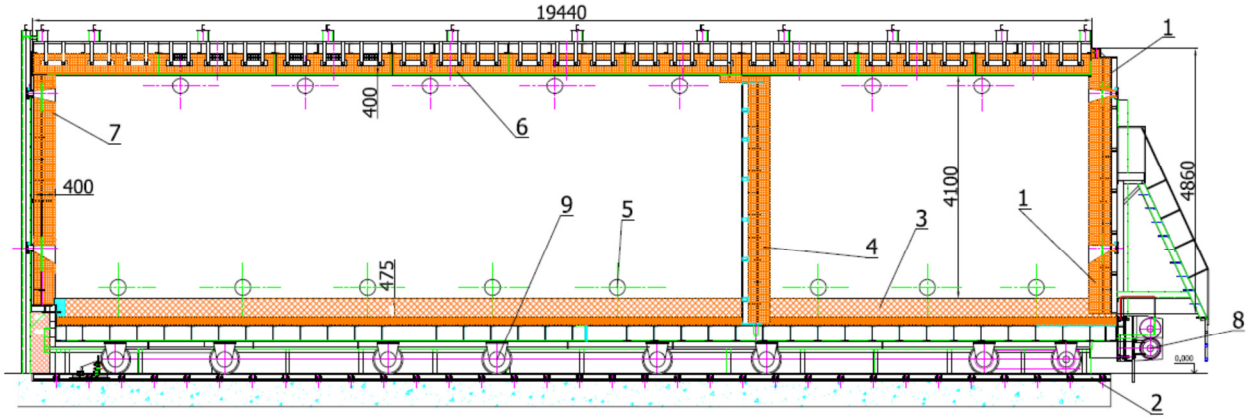

Рисунок 1.9 – Продольный разрез печи

1 – парапет, 2 – рельсовый путь, 3 – выкатной под печи, 4 – съемная перегородка, 5 – горелка Ecomax 5M, 6 – сводовая панель, 7 – торцевая панель футеровки печи (торец), 8 – мотор-редуктор; 9 – ходовая часть пода

1.3 Технологии тепловой обработки крупногабаритных изделий из качественных сталей

Конкуренция на рынке сбыта металлопродукции неизбежно приводит к необходимости повышения качества изделий и энерго/ресурсоэффективности их производства. Крупногабаритные изделия – валки прокатных станов, ротора турбин изготавливаются из высоколегированных сталей с большим содержанием хрома, ванадия, вольфрама и других элементов [57, 58]. Качество готовых изделий во многом определяется их физическими и механическими свойствами, получаемыми в ходе термической обработки, виды и режимы которой должны обеспечивать оптимальные эксплуатационные параметры. Таким образом, нагрев металла при термообработке является одним из важнейших этапов производства качественных стальных крупногабаритных изделий [59 – 63].

1.3.1 Тепловая обработка прокатных валков

Режимы тепловой обработки валков являются достаточно длительными и включают множество операций. Массивность валков приводит к необходимости значительных временных затрат для получения нужной структуры и минимизации термических напряжений. Основными требованиями, предъявляемыми к прокатным валкам, являются: высокая твердость поверхностного (рабочего) слоя бочки при упругой и прочной ее сердцевине и особые, отличные от бочки свойства на шейках валка.

Предварительную термообработку проводят для получения мелкодисперсной перлитной структуры по сечению валка и устранения карбидной сетки с целью предупреждения образования флокенов, понижения твердости и уровня остаточных напряжений, получения необходимых вязкости и прочности сердцевидной части валка и шеек [64]. Традиционно, во время первичной термообработки валки подвергают аустенитизации с отпуском. После обработки давлением поковки выдерживают при температуре 300-400 °С для формирования структуры перлит плюс карбиды. Затем садку нагревают до

температуры 700 °С с небольшой скоростью и проводят выдержку с целью минимизации внутренних напряжений и выравнивания поля температуры по сечению поковок. Дальнейший подъем температуры до 870-970 °С (в зависимости от марки стали) проводят с более высокой скоростью. В конце нагрева производят длительную выдержку и охлаждение на воздухе для получения однородного аустенита. Однако такой режим термообработки не позволяет полностью исключить карбиды из структуры поковки. Более эффективным является применение серии последовательных нагревов до высоких температур, разделенных охлаждением на воздухе [65]. В настоящее время эта идея получила развитие в качестве термоциклирования – серия интенсивных нагревов и охлаждений с отсутствием выдержек при высоких температурах. Метод основан на накоплении полезных свойств от цикла к циклу и позволяет улучшить механические свойства с получением более однородной структуры по сечению валка [66].

Цель окончательной термообработки – получение заданных механических свойств и структуры по всему сечению валка. Одним из самых современных методов проведения финишной термообработки является градиентный нагрев в специальных пламенных установках с последующей закалкой и отпуском [67]. При таком способе выше температуры аустенитизации нагревается только поверхностный слой бочки валка заданной толщины. В настоящее время разработано несколько конструкций специальных агрегатов скоростного нагрева вертикального и горизонтального типов [68 – 70], позволяющих осуществлять высокоскоростной нагрев поверхностного слоя бочки валка и последующую закалку в водной, либо водо-воздушной среде. При этом скорости нагрева могут достигать до 700°С/ч с регулируемой в широких пределах скоростью охлаждения. Во время проведения теплового режима обрабатываемый валок вращается вокруг своей оси. Это позволяет повысить равномерность температурных полей по сечению, а также свести к минимуму коробление. При этом термообработке подвергается только бочка валка, а шейки находятся либо за пределами активной зоны агрегата, либо защищены специальными теплоизоляционными вставками. В

агрегате [70] камера скоростного нагрева конструктивно объединена со спрейерной установкой, что позволяет свести к минимуму временной промежуток между концом высокотемпературного нагрева и началом закалки. Применение градиентного нагрева в комплексе со спрейерным охлаждением позволяет получить рабочий слой большей, по сравнению с ТПЧ и ТВЧ, толщины с высокой твердостью, состоящий в основном из мартенсита и нижнего бейнита. Кроме того, градиентный нагрев в топливных агрегатах по сравнению с обработкой ТПЧ, ТВЧ и объемного нагрева является менее энергоемким.

1.3.2 Тепловая обработка роторов

К роторам турбин предъявляются повышенные требования по геометрическим допускам, механическим свойствам и сопротивлению хрупкому разрушению. Для соответствия предъявляемым требованиям заготовки массивных роторов также проходят несколько сложных циклов тепловой обработки с большими временными и энерго затратами.

После ковки заготовки роторов подвергаются первичной термообработке, которая, как правило, включает в себя нормализацию и высокий отпуск для обеспечения равномерной по сечению структуры и снятия напряжений после ковки. Агрегатами для проведения этих операций являются камерные печи с выкатным подом, ввиду чего возможно коробление поковок, вызванное неправильной их посадкой в печь. Заготовки, коробление которых оказывается больше допустимого, подвергаются процедуре правки с предварительным нагревом до 700-800 °С и последующим отпуском для снятия напряжений.

Целью окончательной термической обработки роторов является обеспечение высоких механических свойств и как можно более низких значений критической температуры хрупкости, что достигается получением мелкого зерна аустенита и мартенситной, либо бейнитной структуры по сечению ротора. Для этого изделия подвергают одинарной, или двойной закалке с последующим отпуском, либо нормализации с отпуском [71 – 73]. Для предотвращения коробления, финишную тепловую обработку роторов проводят в вертикальных

камерных печах, где изделия подвешиваются на специальных траверсах в вертикальном положении. Из-за массивности подвергаемых тепловой обработке роторов, нагрев осуществляется с небольшими скоростями (не более 80 °С/ч) ступенчато, с одной, или несколькими промежуточными выдержками для выравнивания поля температур по поверхности и сечению изделий и минимизации напряжений. Для получения мелкого зерна нагрев от последней изотермической выдержки до температуры аустенизации необходимо осуществлять с максимально возможной скоростью, а продолжительность выдержки при этой температуре должна быть минимальна [74]. Обеспечение необходимых физических свойств в процессе нормализации зависит от скорости и равномерности воздушного охлаждения. В традиционной технологии, изделия после выдержки при температуре аустенитизации перемещали из печи в специальную охлаждающую камеру. После охлаждения ротор подвергают высокому отпуску при температуре 620-650°С. Для этого изделия снова помещали в печь. Перенос изделия в охлаждающую камеру являлся дополнительной технологической операцией, при которой происходило неконтролируемое охлаждение на воздухе с недостаточной скоростью, что приводило к ухудшению физических свойств поверхностного слоя роторов. Обратный перенос изделия в печь приводил к дополнительным энергозатратам и увеличению общей длительности финишной термообработки.

1.4 Выводы и постановка задач исследования

Для повышения качества роторов и валков и повышения энергоэффективности их производства особую важность приобретает разработка технологии тепловой обработки, исключающая неконтролируемые процессы охлаждения, лишние технологические операции и увеличение количества печей. Комплектация печей скоростными рекуперативными топливосжигающими устройствами и системами автоматизации, а также малоинерционной волокнистой футеровкой, обеспечивает возможность высокоскоростного нагрева и охлаждения металлопродукции в одном тепловом агрегате с минимальным

перепадом температур по рабочему пространству, что позволяет получить все необходимые физико-механические свойства готовых изделий.

С учетом описанных выше технологических и технических аспектов разработана следующая технология тепловой обработки роторов крупных турбин (рис 1.10) с использованием нового универсального теплового агрегата – топливной вертикальной термической печи с волокнистой футеровкой, оснащенной скоростными горелочными устройствами и системой комплексного автоматического управления:

- нагрев со скоростями не более 50 °С/ч с одной, или несколькими промежуточными выдержками до температуры на 150-250 °С ниже точки Ac_3 стали;
- выдержка при данной температуре для выравнивания поля температур по сечению изделия;
- нагрев до температуры аустенитизации по мощности печи;
- непродолжительная выдержка при температуре аустенитизации;
- принудительное охлаждение изделия в рабочем пространстве печи воздухом, подаваемым через горелки, со скоростью до 300 °С/ч.
- нагрев со скоростями не более 30 °С/ч до температуры высокого отпуска;
- выдержка при температуре высокого отпуска;
- принудительное охлаждение изделия в рабочем пространстве печи воздухом, подаваемым через горелки с регулируемой скоростью.

Ступенчатый нагрев с небольшими скоростями позволит избежать появления термических напряжений. Резкий нагрев до температуры выше Ac_3 позволит получить требуемый размер зерна. Охлаждение воздухом в рабочем пространстве печи позволит достичь скоростей достаточных для получения требуемых механических и физических свойств, при этом минимизировать температурные напряжения и их дальнейший переход в статические напряжения.

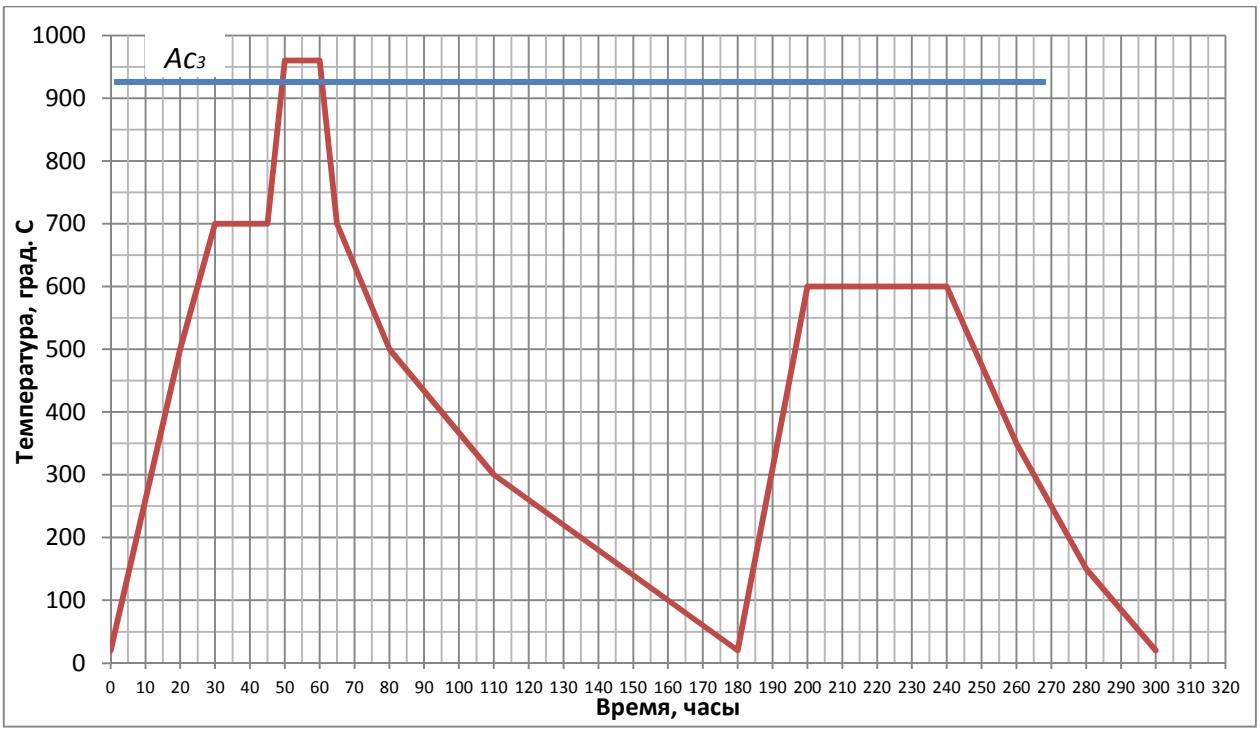

Рисунок 1.10 – Технология тепловой обработки роторов крупных турбин

Из всего многообразия печных агрегатов, применяемых в технологиях тепловой обработки крупных стальных поковок сложной геометрии, в основном используют камерные топливные печи. Самыми эффективными на сегодняшний момент способами улучшения тепловой работы этих агрегатов являются: применение волокнистой модульной футеровки, скоростных рекуперативных, или регенеративных горелочных устройств, трехуровневой системы автоматического управления печью и ее оборудованием, что неизбежно приводит к сбережению тепловой и электрической энергии, резкому сокращению эксплуатационных затрат и ресурса времени на вспомогательные технологические операции, что особенно важно при финишной термической обработке металлической продукции.

Цель дальнейшей работы – внедрение энергоресурсосберегающей технологии тепловой обработки крупнотоннажных изделий из качественных сталей в вертикальной нагревательной печи усовершенствованной конструкции.

Для выполнения работы необходимо решить следующие задачи:

1. Совершенствование методики расчета теплообмена в рабочем пространстве печи со скоростными горелками и малоинерционной футеровкой при нагреве крупной поковки.
2. Совершенствование методики расчета теплообмена при охлаждении поковки в рабочем пространстве печи.
3. Исследование с помощью компьютерного моделирования процессов газодинамики продуктов горения в рабочем пространстве вертикальной камерной печи с целью определения качественных и количественных характеристик движения газов.
4. Установление основных зависимостей и закономерностей влияния скорости движения газов в рабочем пространстве на интенсивность теплообмена.
5. Формирование рекомендаций для улучшения показателей работы печи.
6. Оценка внедрения в производственный процесс новой энергоресурсосберегающей технологии и конструкции вертикальной камерной термической печи.

2 КАМЕРНАЯ ВЕРТИКАЛЬНАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ ПЕЧЬ ДЛЯ НАГРЕВА КРУПНЫХ ПОКОВОК СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИИ

2.1 Конструкция печи

Объектом исследования является камерная вертикальная печь ПАО «Уралмашзавод», предназначенная для термообработки поковок роторов крупных турбин и опорных валков прокатных станов. Первоначально печь была выполнена по традиционной кирпичной технологии и отапливалась тринадцатью скоростными горелками конструкции УЗТМ. Продукты горения из рабочего пространства удалялись через дымоотводящий канал, расположенный в поду печи, дымовой боров и дымовую трубу, общую для нескольких печей. Подогрев воздуха, подающегося на горение, отсутствовал. Ведение теплового режима печи осуществлялось вручную обслуживающим персоналом [75].

Применение кирпичной футеровки, горелок устаревшей конструкции, ручного управления печью приводило к низкому КПД печи, значительным энергозатратам, низкому качеству нагрева.

Для увеличения производительности и КПД печи, уменьшения расхода топлива, повышения качества продукции, а также для улучшения условий труда и экологической обстановки проведено полное техническое перевооружение печи.

В ходе технического перевооружения с целью энергоресурсосбережения были проведены следующие работы:

- Замена кирпичной футеровки стен и крышки печи на футеровку из современных волокнистых материалов в виде модульных блоков чешской компании «Keratech».
- Замена устаревших горелочных устройств на современные скоростные рекуперативные фирмы «Kromshroeder» с узлом утилизации тепла отходящих газов для подогрева воздуха, подаваемого на горение газа, непосредственно в корпусе горелки.
- Замена устаревшей механизации.
- Монтаж АСУТП.

На рисунке 2.1 показан общий вид верхней части рабочего пространства печи. Фото сделано в момент проведения пуско-наладочных работ. Крышки печи раздвинуты, для визуального контроля работы горелок.

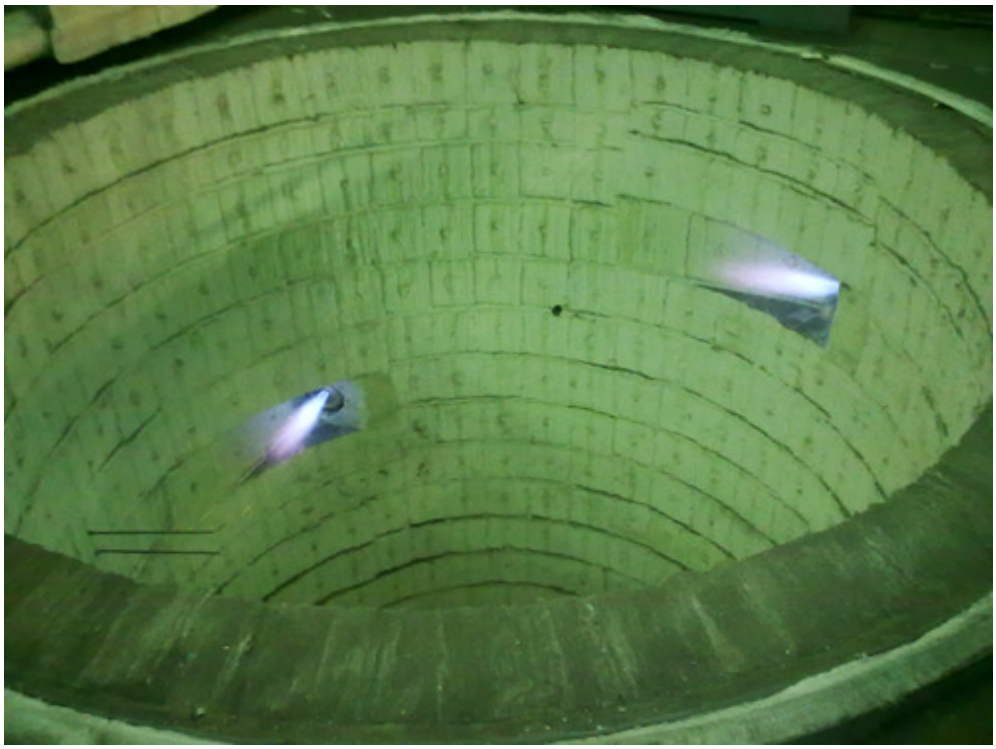

Рисунок 2.1 – Общий вид верхней части рабочего пространства вертикальной печи

Изделие в печи подвешивается на траверсе, опирающейся на специальные балки. Полукрышки печи конструктивно объединены с опорными балками траверсы, что позволило выполнить герметизацию рабочего пространства печи за счет вертикального перемещения крышек под весом садки. В свободном состоянии крышки печи подняты над верхней частью печи на специальных пружинах. При загрузке садки в печь, полукрышки опускаются под весом опирающейся на них траверсы с изделием и плотно соприкасаются с верхней частью печи.

На печи установлено 11 скоростных горелок рекуперативного типа ECOMAX 5FTR. Горелки работают в импульсном режиме, по принципу «включено-выключено» и расположены тангенциально по одной в каждом из десяти ярусов по высоте. В нижнем ярусе расположено две горелки для компенсации теплозатрат на нагрев кирпичного пода. Горелка каждого

последующего яруса повернута на 90° относительно предыдущего, что показано на рисунках 2.2 и 2.3.

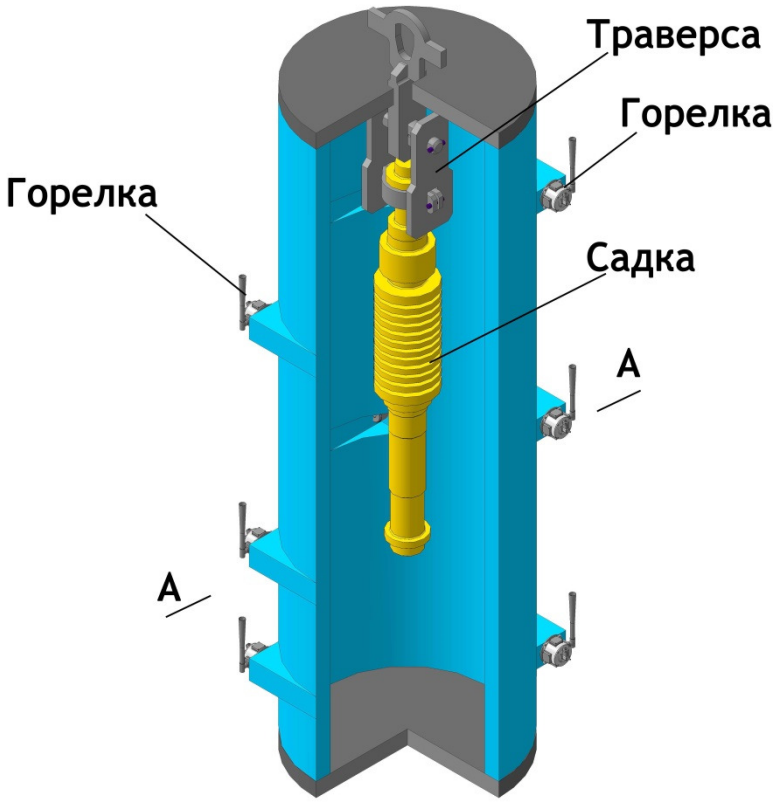

Рисунок 2.2 – Схема вертикальной термической печи

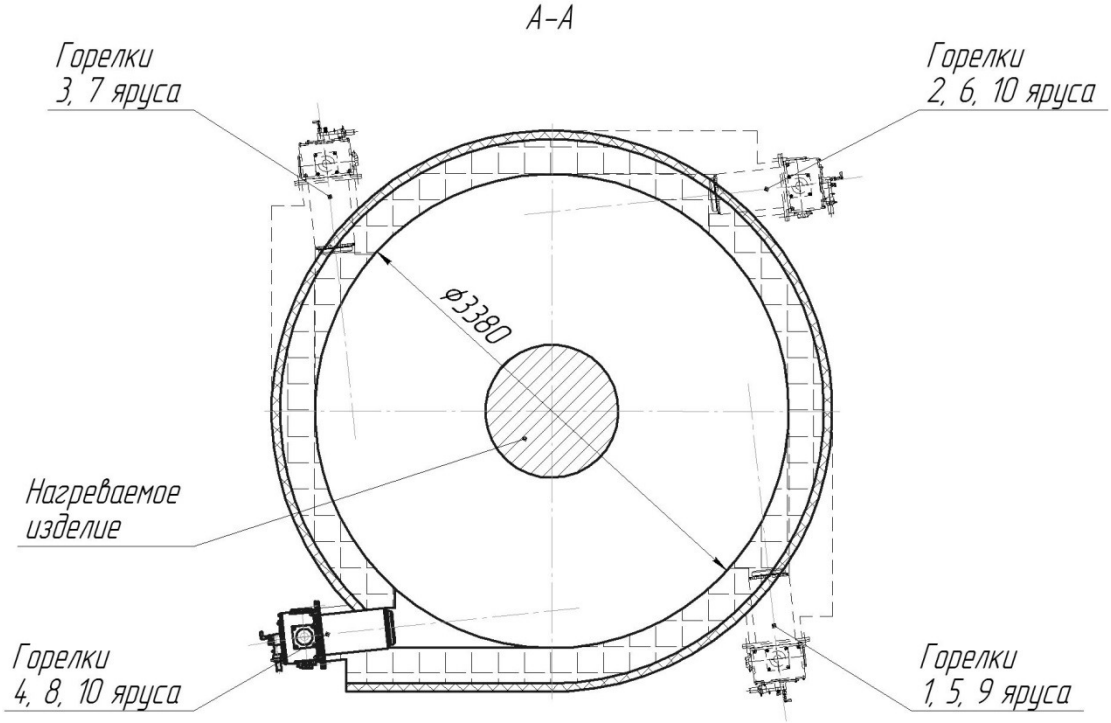

Рисунок 2.3 – Поперечный разрез печи

Основные характеристики вертикальной камерной термической печи представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Техническая характеристика печи

Наименование параметра	**Значение параметра**
Тип печи	Вертикальная термическая
Размеры рабочего пространства печи, мм: высота диаметр	 12 000 3 380
Режим работы	Периодический
Масса садки (максимальная), т	60
Температура нагрева металла (максимальная), °С	1000
Максимальная скорость нагрева садки, °С/ч	80
Топливо и его теплота сгорания $Q_н^р$, кДж/м^3	Природный газ, 34 000
Тип горелок	Рекуперативные скоростные Ecomax 5 FTR, Elster Kromschroeder
Номинальная тепловая мощность горелки, кВт	250
Количество горелок	11
Номинальный расход газа на одну горелку, м^3/ч	25
Расход газа на печь (max), м^3/ч	236
Давление природного газа перед печью (max), кПа	5,0
Давление природного газа перед горелками, кПа	3,6
Расход воздуха на горение и на эжектирование дымовых газов (max), м^3/ч	6 750,0
Расход воздуха на охлаждение садки (max),	6 750,0

Наименование параметра	Значение параметра
$м^3/ч$	
Давление воздуха перед печью (max), кПа	15,5
Давление воздуха перед горелками (max), кПа	13,5
Количество зон теплового регулирования, шт.	5

Печь оснащена современной системой управления технологическим процессом. Ведение теплового режима осуществляется полностью автоматически, оператор только производит запуск и контролирует протекание технологического процесса. В каждой виртуальной зоне теплового регулирования, кроме нижней, расположено по две горелки, в нижней зоне расположено три горелки. На каждую зону предусмотрено по две термопары. Управление температурным режимом в зоне осуществляется по показаниям основной термопары, вторая термопара служит для контроля показаний основной.

2.2 Рекуперативная горелка Ecomax 5

В ходе проведения технического перевооружения вертикальная термическая печь была оборудована современными горелками немецкого производства Elster Kromshroeder серии Ecomax.

Данное горелочное устройство относится к классу высокоскоростных. [76] Особенностью серии Ecomax является встроенный непосредственно в горелку рекуператор. Благодаря такому конструктивному решению, воздух, подаваемый на горение, может подогреваться до температуры 400 °С, при температуре отходящих газов 1000 °С. Схема горелки представлена на рисунке 2.4 [77].

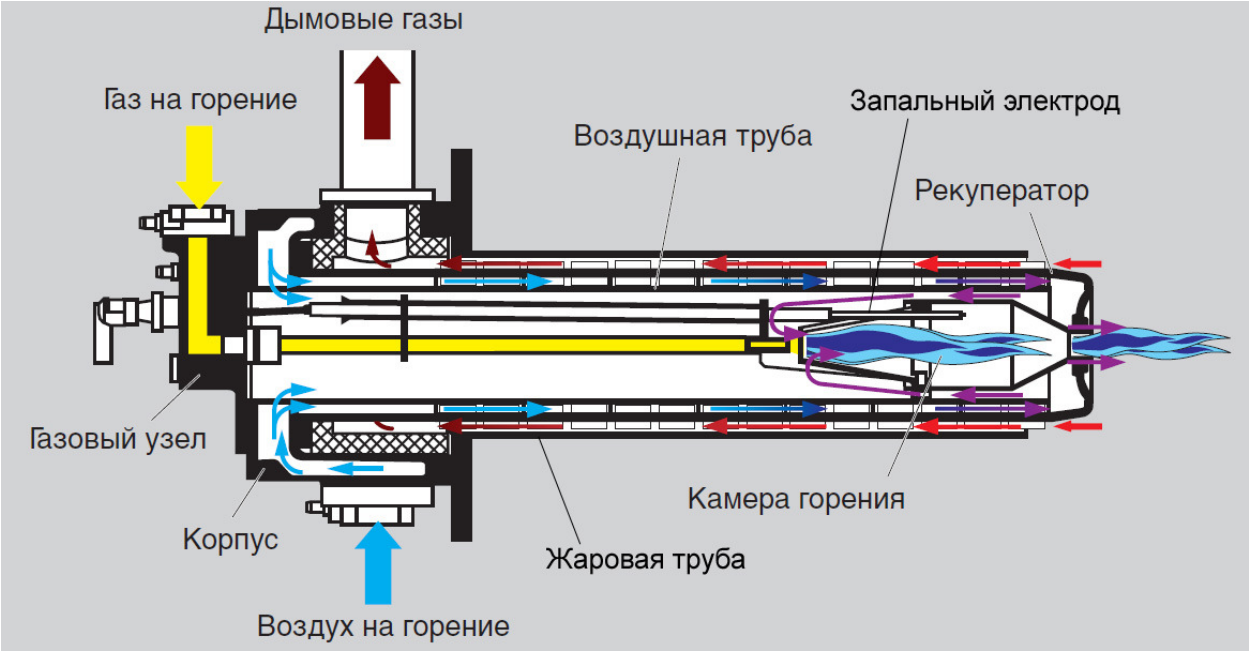

Рисунок 2.4 – Схема внутреннего устройства горелки Ecomax

Газ на горение поступает в горелку через газовый узел. Воздух на горение поступает в корпус горелки, где разделяется на два параллельных потока. Внешний поток проходит по кольцевому тоннелю рекуператора, подогреваясь за счет тепла отходящих газов. Внутренний поток поступает в камеру сгорания первой ступени. В данной камере происходит сжигание природного газа с недостатком воздуха (коэффициент $\alpha<1$). За счет этого в камере сгорания создается повышенное давление. Образовавшиеся продукты сгорания покидают горелку через носик малого диаметра и на выходе смешиваются с подогретым воздухом, образуя короткий высокоскоростной факел, в котором происходит дожигание оставшегося метана и CO, образовавшегося в камере сгорания. Розжиг и контроль пламени осуществляются посредством запального электрода. В момент розжига возникает электрическая искра между электродом и корпусом горелки. После того, как розжиг произведен, автоматика управления горелкой осуществляет контроль за наличием пламени путем измерения тока ионизации, возникающего в запальном электроде. Дымовые газы покидают рабочее пространство печи через кольцевую щель между рекуператором горелки и жаровой трубой. Разрежение в рекуператоре создается эжектором, установленным непосредственно у горелки (рисунок 2.5). Эжекторы горелок соединены с

газоходом, по которому дымовые газы, через дымосос выбрасываются в атмосферу.

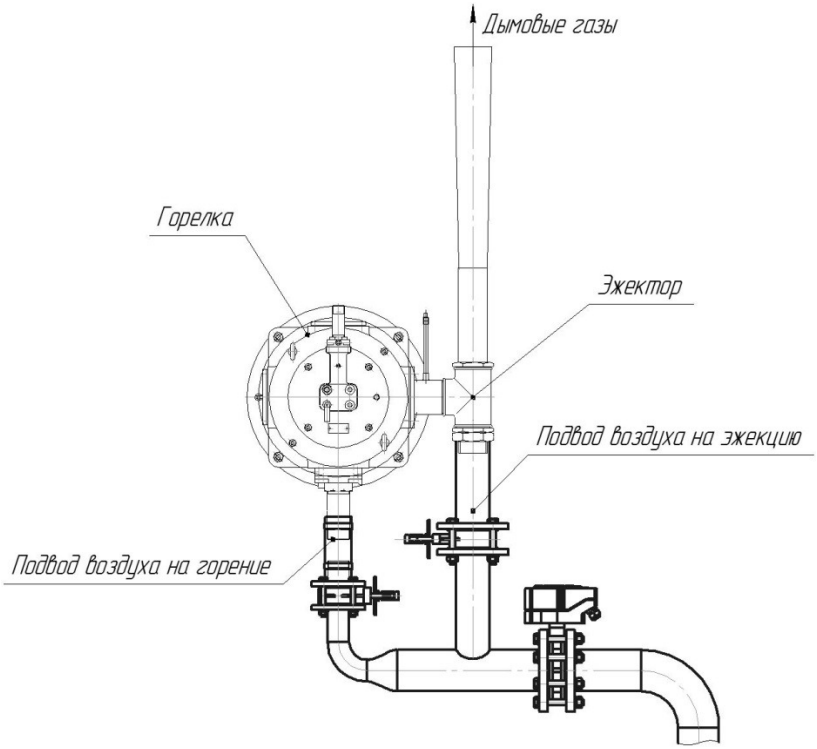

Рисунок 2.5 – Воздушная и дымовая обвязка горелки

Применение скоростных рекуперативных горелок в системе отопления печи имеет ряд преимуществ:

1. Высокоскоростной факел, выходящий из носика горелки, интенсифицирует движение газов в рабочем пространстве печи, повышая конвективную составляющую теплообмена.
2. Размещение рекуператора непосредственно в горелочном устройстве позволяет повысить температуру подогрева воздуха, подаваемого на горение, что приводит к экономии топлива.
3. Индивидуальный подвод теплоносителя, а также отвод продуктов сгорания через каждую горелку обеспечивают равномерность нагрева изделий, и упрощают системы газовоздухоразводки и дымоудаления, освобождая их от физических зон регулирования расходов газа и воздуха и боровов.

4. Ступенчатое сжигание топлива, с одной стороны, приводит к повышению скорости выхода продуктов сгорания из носика горелки, с другой стороны, позволяет резко снизить образование NO_x.
5. Появилась возможность проводить охлаждение садки с заданной скоростью непосредственно в рабочем пространстве. Охлаждение осуществляется путем продувки рабочего пространства воздухом через горелки. Это значительно упростило процедуру проведения режимов нормализации и отпуска.

2.3 Нагреваемые изделия

На рисунке 2.6 схематично показаны поковки опорного валка (а) и ротора турбины (б), подвергаемых термообработке в вертикальной камерной печи. Прокатные валки изготавливают из легированных сталей с повышенным содержанием хрома, молибдена и ванадия, включая стали 45ХНМ, 55Х, 60ХН, 75ХМ и др. Роторы турбин изготавливают из сталей с содержанием хрома и никеля: ХН3М, ХН4МАР, 35ХНМ, 35ХН3МА, 35ХН4МА, 35ХН1МФА, 36ХНМА, 36ХН3МФА, 36ХН1Н и др.

Ввиду специфичности геометрии изделий, в ходе сложного режима термообработки даже незначительное их коробление недопустимо. Поэтому в печи изделия подвешиваются на удерживающей траверсе. Благодаря значительным габаритам рабочего пространства печи в ней могут подвергаться термообработке изделия длиной до 10м, диаметром до 2,5 м и массой до 60т. Стоит отметить, что роторы турбин, имеют значительную длину при сравнительно небольшом диаметре, а опорные валки наоборот – значительный диаметр при относительно небольшой длине. При этом в печь единовременно помещают только одно изделие. Это приводит к низкому коэффициенту заполнения рабочего пространства печи металлом (от 0,02 до 0,2), даже при загрузке в печь изделий с максимально возможными габаритами.

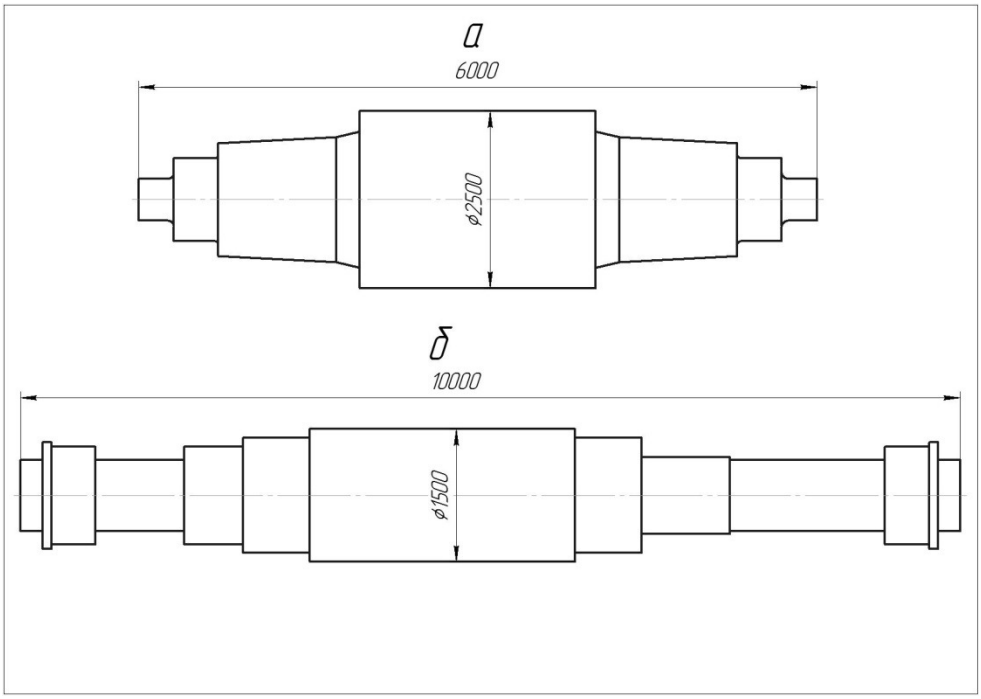

Рисунок 2.6 – Нагреваемые изделия

2.4 Особенности тепловой работы и методы изучения теплообмена в рабочем пространстве печи

Одной из главных особенностей работы печи является выполнение сложных температурных режимов, которые требуются для тепловой обработки легированных сталей сложного состава. Большая масса и переменная конфигурация обрабатываемых изделий приводит к необходимости их ступенчатого нагрева с промежуточными выдержками для выравнивания поля температур по объему изделий. Для уменьшения температурных напряжений в обрабатываемом изделии, нагрев ведут с относительно небольшими скоростями (не более 80 °С/ч). Из-за этих двух факторов, время тепловой обработки садки достигает нескольких суток. На рисунке 2.7 представлен пример температурного режима нагрева под нормализацию в печи с двумя промежуточными выдержками, суммарной длительностью 150 часов [78]. Автоматика управления температурным режимом настроена таким образом, что во всех виртуальных зонах управления поддерживается заданная температура путем изменения интервалов включения/выключения горелок (изменения подаваемой тепловой мощности).

По мере прохождения температурного режима избирательно изменяется тепловая мощность печи – тепловой режим. Это вызвано сложностью геометрии садки при необходимости равномерного нагрева отдельных ее частей различной массы. Также, на тепловой режим влияют промежуточные выдержки, в ходе которых мощность печи либо остается постоянной, либо снижается (рисунок 2.8). Представленный ниже график теплового режима отражает расход газа на печь в целом.

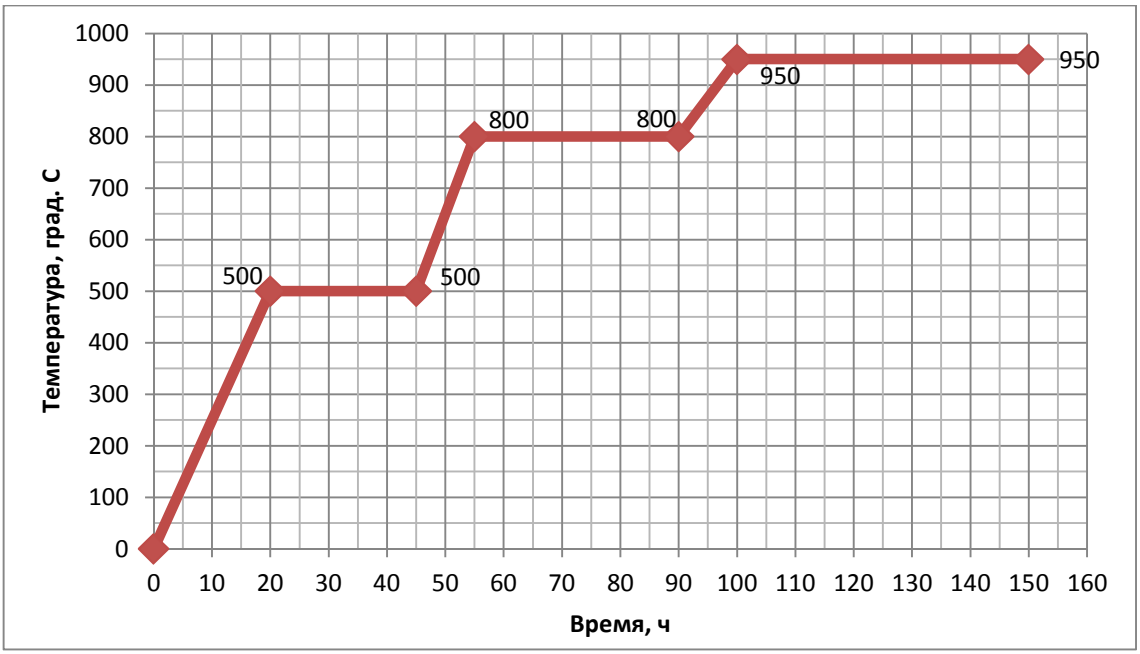

Рисунок 2.7 – Характерный температурный режим нагрева под нормализацию

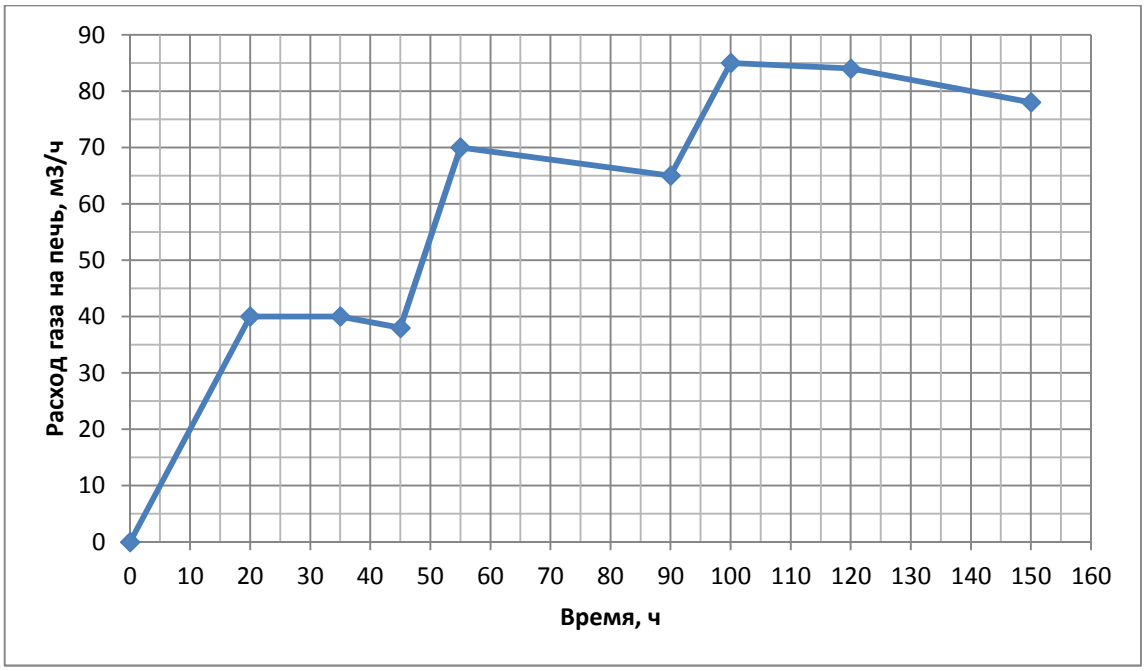

Рисунок 2.8 – Характерный тепловой режим нагрева под нормализацию

Еще одной особенностью, присущей всему классу вертикальных печей, является значительная высота рабочего пространства (см. таблицу 2.1). Такая геометрия печи приводит к большому влиянию геометрического напора на газодинамику рабочего пространства, заставляющего горячие газы устремляться вверх. В печах старой конструкции с низкоскоростными горелочными устройствами, для предотвращения перегрева верхней части рабочего пространства, дымоотвод выполняли в поду печи. Однако такая система отопления противоречила основным принципам конструирования рабочего пространства камерных печей с изменяющейся рабочей температурой и при этом, зачастую, не могла обеспечивать заданную равномерность нагрева изделий, особенно в период температурных выдержек, при которых расходы газа и воздуха сокращаются.

2.5 Выводы

Описанная в данной главе печь выполнена с использованием новейших устройств и материалов. Это должно обеспечить возможность использовать ее для проведения предлагаемой технологии тепловой обработки крупнотоннажных поковок, результатом которой будут изделия повышенного качества.

Для исследования всех параметров теплообмена в рабочем пространстве печи был проведен полномасштабный промышленный эксперимент. Он позволил получить распределение температурного поля по рабочему пространству и садке, а также определить реальный расход газа. Используя экспериментальные данные, был выполнен расчет тепловых потоков на металл [79]. Для подтверждения правильности предположений о характере движения газов в рабочем пространстве печи было проведено трехмерное компьютерное моделирование газодинамики в масштабе один к одному, что позволило получить данные о скоростях газов в отдельных зонах печи и получить данные о параметрах конвективного теплообмена.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ КАМЕРНОЙ ПЕЧИ ПРИ НАГРЕВЕ КРУПНЫХ ПОКОВОК

Исследование было проведено с целью совершенствования технологии нагрева крупногабаритных стальных изделий сложной геометрии с минимальными затратами энергоресурсов. При этом ставилась задача исследования теплообмена между печной средой и поверхностью нагреваемого изделия. Применение новой системы отопления вертикальной печи преследовало цели снижения расхода топлива вследствие высокотемпературного подогрева воздуха в рекуперативных горелках и усиление роли конвективной составляющей внешнего теплообмена с помощью скоростных факелов. Последнее позволяет ставить вопрос о сокращении длительности режима нагрева и, как следствие, снижение энергозатрат при тепловой обработке изделий сложной геометрической формы.

3.1 Экспериментальное исследование сложного внешнего теплообмена при нагреве поковки ротора турбины

После окончания работ по техническому перевооружению печи был проведен полномасштабный промышленный эксперимент, целью которого было выявление возможности проведения сложных технологических режимов термической обработки крупных изделий машиностроения и получение экспериментальных данных, способствующих совершенствованию методов расчета тепловой работы печей данного класса. Для этого в печь поместили опытную садку. На рисунке 3.1 представлен разрез печи с опытной садкой (поковка ротора массой 28 т), закрепленной на траверсе массой 5 т. На поверхности ротора были закреплены восемь контрольных гибких термопар. Концы термопар были выведены через крышку печи и подключены к регистрирующей аппаратуре. Контроль температуры рабочего пространства печи

осуществлялся по показаниям десяти стационарных термопар, установленных по высоте печи по две в каждой из пяти виртуальных зон управления.

В ходе эксперимента был осуществлен сложный технологический режим нормализации с отпуском поковки ротора, при ступенчатом его нагреве (с промежуточными выдержками) и с охлаждением, осуществленном в печи при продувке ее воздухом, подаваемым через скоростные горелки. Режим приведен на рисунке 3.2 и представляет собой реальный технологический процесс термической обработки подобных поковок по новой технологии обработки, предложенной в разделе 1.4.

Предварительно, перед началом эксперимента были определены следующие параметры:

- Теплота сгорания топлива – по данным, предоставленным службой главного энергетика цеха.
- Геометрия рабочего пространства (по чертежам).
- Геометрия нагреваемой опытной садки (непосредственными измерениями).

При проведении режима, были измерены следующие параметры работы печи:

- Температура рабочего пространства (по стационарным термопарам в нескольких точках по высоте П 1.1…5.2).
- Температура поверхности нагреваемого металла на характерных диаметрах (по гибким термопарам М 1…8).
- Расход природного газа (по показаниям счетчика газа).
- Давление природного газа (по показаниям цифрового датчика давления и стрелочного манометра).
- Давление воздуха, подаваемого на горение и эжекцию продуктов сгорания (по показаниям цифрового датчика давления и стрелочного манометра).
- Состав атмосферы рабочего пространства (по показаниям переносного газоанализатора).

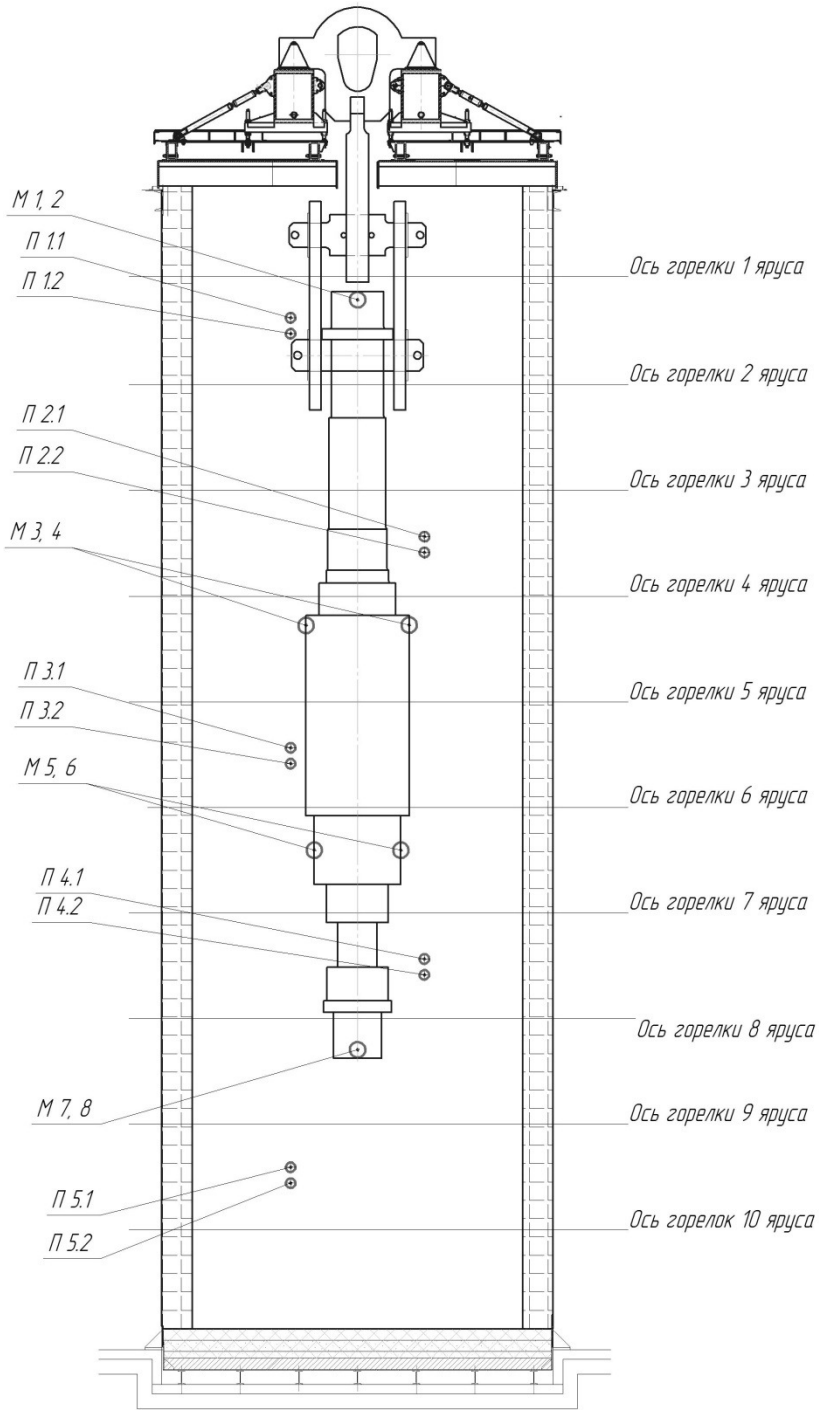

Рисунок 3.1 – Эскиз печи с опытной садкой:

П – печные стационарные термопары. Первая цифра 1, 2, … 5 – номер зоны; вторая цифра 1 – основная термопара, 2 – контрольная термопара. М1…М8 – гибкие термопары, установленные на поверхности поковки ротора турбины

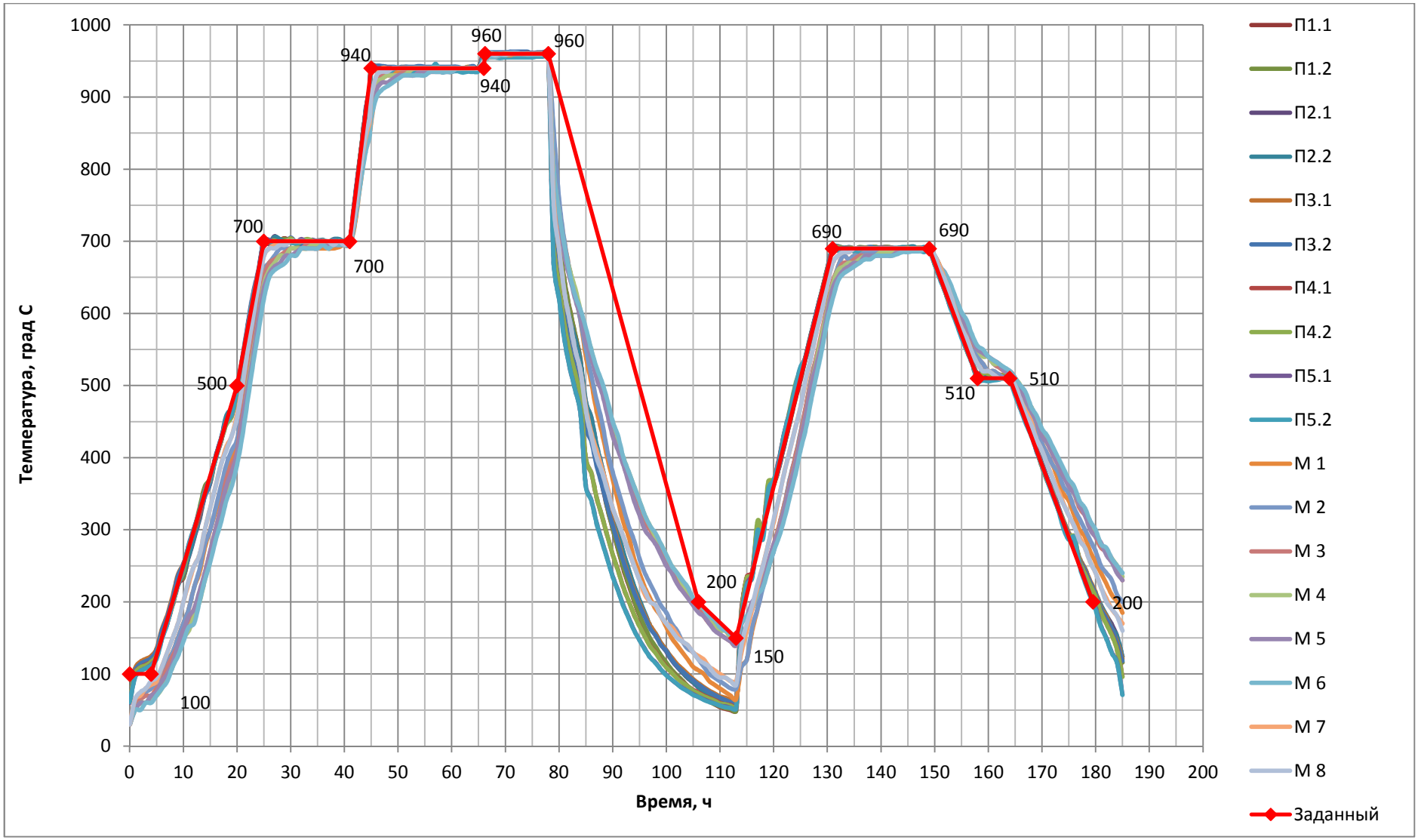

Рисунок 3.2 – Температурный режим нормализации с отпуском поковки ротора турбины при испытаниях печи (обозначения точек измерения температуры показаны на рис. 4.1)

Анализ графика изменения температур (рис. 3.2) показал, что в ходе технологического режима реальная температура рабочего пространства фактически равнялась заданной температуре печи. Перепад температур по показаниям стационарных печных термопар составлял не более 5 °С, а перепад температур по поверхности поковки ротора турбины – не более 10 °С, несмотря на большую разницу диаметров частей ротора. При выдержках разница между показаниями печных и контрольных термопар сокращалась до нуля. Такая высокая равномерность температурного поля в рабочем пространстве печи и на поверхности металла достигнута за счет осуществления перечня мероприятий по техническому перевооружению печи (см. гл.2).

Полученные в ходе промышленного эксперимента данные были использованы для расчета сложного внешнего теплообмена в рабочем пространстве печи.

3.2 Методика обработки экспериментальных данных

Ступенчатый режим нагрева изделия создает необходимость проводить расчеты сложного внешнего теплообмена для каждого периода подъема температуры в отдельности. Также необходимо учитывать переменное сечение поковки ротора, и вести расчет для каждого из характерных диаметров садки. Для каждого периода подъема температуры рассчитывали приращение среднемассовой температуры поковки ротора, и по ней определяли количество теплоты, полученное металлом и плотность суммарного теплового потока. Лучистый тепловой поток на металл определяли с использованием температур на поверхности металла и газов в печном пространстве, используя выражения, представленные в [80]. Конвективную составляющую теплообмена определяли по разности между суммарным и лучистым тепловым потоком [81]. Ниже подробно описан процесс определения всех составляющих внешнего теплообмена между рабочим пространством печи и поверхностью металла.

По приращению среднемассовой температуры поковки ротора, определяется количество теплоты, полученное металлом:

$$\Delta Q_{м} = G_{м}\bar{c}_{м}\Delta t_{м} \text{ кДж}, \quad (3.1)$$

где $G_м$ – масса металла, кг;

$\bar{c}_м$ – средняя теплоемкость металла в интервале температур, $\frac{кДж}{кг \cdot К}$;

$\Delta t_м$ – разность среднемассовых температур металла в начале и в конце периода, °С.

Далее, рассчитывают плотность суммарного теплового потока, воспринятого металлом:

$$q_{м\Sigma} = \frac{\Delta Q_{м}}{F_{м}\Delta\tau} \ {}^{Вт}/_{м^2}, \quad (3.2)$$

где $F_м$ – площадь поверхности нагреваемого металла, м^2;

$\Delta\tau$ – интервал времени нагрева металла на каждом этапе подъема температуры печи, с.

При наличии величины $q_{м\Sigma}$ можно рассчитать средний суммарный коэффициент теплообмена между рабочим пространством печи и поверхностью металла (по балансу теплоты):

$$\overline{\alpha_{\Sigma}} = q_{м\Sigma}/(\bar{t}_{печ} - \bar{t}_{пов}) \ {}^{Вт}/_{(м^2К)}, \quad (3.3)$$

где $\bar{t}_{печ}$ – средняя температура рабочего пространства за период подъема температуры, °С;

$\bar{t}_{пов}$ – средняя температура поверхности нагреваемого металла за период подъема температуры, °С.

Затем, по известным геометрическим и теплофизическим характеристикам печи можно рассчитать среднюю плотность теплового потока излучением:

$$\bar{q}_{м.л} = C_{гкм}\left[\left(\frac{\bar{T}_{печ}}{100}\right)^4 - \left(\frac{\bar{T}_{пов}}{100}\right)^4\right] {}^{Вт}/_{м^2}, [80] \quad (3.4)$$

где $C_{гкм}$ – приведенный коэффициент излучения в системе газ-кладка-металл, $^{Вт}/_{м^2К^4}$;

$\overline{T}_{печ}$ и $\overline{T}_{пов}$ – средние за период температуры рабочего пространства печи и поверхности нагреваемого металла соответственно, К.

Средняя температура рабочего пространства печи определяется по показаниям стационарных термопар, которые располагаются на расстоянии 300 мм от внутренней поверхности футеровки. Керамоволокнистые материалы имеют низкий коэффициент теплопроводности, поэтому температура внутренней поверхности футеровки примерно равна температуре газов в рабочем пространстве печи. Влияние металла садки на показания стационарных термопар мало ввиду значительного расстояния между ними (860 мм в районе самого большого диаметра поковки ротора). Отмеченное выше подтверждается экспериментальными исследованиями, проведенными на печи с высокоскоростными горелками [82]. Поэтому в формуле 3.4 возможно использовать $\overline{T}_{печ}$ в качестве средней температуры газов.

Средний коэффициент лучистого теплообмена:

$$\overline{\alpha_л} = \bar{q}_{м.л}/(\bar{t}_{печ} - \bar{t}_{пов})\ ^{Вт}/_{(м^2К)}. \quad (3.5)$$

По разности между $q_{м\Sigma}$ и $q_{м.л}$ можно определить плотность теплового потока конвекцией:

$$\bar{q}_{м.к} = \bar{q}_{м\Sigma} - \bar{q}_{м.л}, \quad (3.6)$$

и средний коэффициент конвективного теплообмена:

$$\bar{\alpha}_{м.к} = \bar{q}_{м.к}/(\bar{t}_{печ} - \bar{t}_{пов})\ ^{Вт}/_{(м^2К)}. \quad (3.7)$$

Расчет средней суммарной плотности теплового потока для всей поковки производится с учетом долевого массового коэффициента каждой части изделия, для каждой зоны печи, для каждого температурного интервала нагрева в отдельности:

$$\overline{q}_{\text{м.}\Sigma} = \frac{G_1}{G_\Sigma}\overline{q}_{\text{м}\Sigma 1} + \frac{G_2}{G_\Sigma}\overline{q}_{\text{м}\Sigma 2} + \frac{G_3}{G_\Sigma}\overline{q}_{\text{м}\Sigma 3} + \frac{G_4}{G_\Sigma}\overline{q}_{\text{м}\Sigma 4}, \qquad (3.8)$$

где $\frac{G_n}{G_\Sigma}$ – долевые массовые коэффициенты каждой части нагреваемого изделия в каждой зоне печи;

G_Σ – масса всего нагреваемого изделия;

$\overline{q}_{\text{м}\Sigma 1}, \overline{q}_{\text{м}\Sigma 2}$ и т.д. – значения плотностей суммарных тепловых потоков на металл в каждой зоне печи.

При расчете значения лучистой составляющей внешнего теплообмена необходимо учитывать долевой поверхностный коэффициент каждой части нагреваемого изделия, для каждой зоны печи в отдельности и для каждого температурного интервала нагрева:

$$\overline{q}_{\text{м.л}} = \frac{F_1}{F_\Sigma}\overline{q}_{\text{м.л}1} + \frac{F_2}{F_\Sigma}\overline{q}_{\text{м.л}2} + \frac{F_3}{F_\Sigma}\overline{q}_{\text{м.л }3} + \frac{F_4}{F_\Sigma}\overline{q}_{\text{м.л }4}, \qquad (3.9)$$

где $\frac{F_{\text{n}}}{F_\Sigma}$ – долевые поверхностные коэффициенты каждой части нагреваемого изделия в каждой зоне печи;

F_Σ – общая площадь поверхности нагреваемого изделия;

$\overline{q}_{\text{м.л }1}, \overline{q}_{\text{м.л }2}$ и т.д. – расчетные значения плотностей тепловых потоков излучением для каждой части изделия в каждой зоне печи.

Описанная в данном разделе методика исследования сложного внешнего теплообмена с использованием экспериментальных данных позволяет рассчитать передачу теплоты от печной среды к поверхности металла отдельно для лучистой и конвективной составляющих внешнего теплообмена. Доля конвективной составляющей в суммарном тепловом потоке от печной среды к поверхности металла позволит сделать вывод об эффективности работы высокоскоростных горелок в печи данной конструкции.

3.3 Расчет внешнего теплообмена при нагреве поковки ротора турбины

Исследование проводили по методике, представленной в разделе 3.2, с использованием опытных данных, полученных в ходе промышленного эксперимента. Рабочее пространство было условно разделено на четыре зоны по высоте, с учетом различных диаметров поковки ротора. Нумерация зон установлена сверху вниз (рисунок 3.3). Оставшаяся часть рабочего пространства не заполнена садкой. В первой зоне сосредоточена часть поковки ротора с малым диаметром, а также находится специальное удерживающее поковку приспособление – траверса. Во второй зоне находится часть ротора самого большого диаметра. Размеры поковки ротора турбины, использовавшейся в качестве контрольной садки, представлены на рисунке 3.4.

По известным размерам рабочего пространства и ротора (рис. 3.3 и 3.4) был произведен расчет необходимых геометрических параметров рабочего пространства печи и поковки ротора, а также эффективной длины луча и массы металла в каждой из четырех зон. Полученные результаты представлены в таблице 3.1.

Ввиду сложной геометрической формы траверсы как приспособления, удерживающего поковку ротора, расчет его объема ($V_{пр}$) и площади ($F_{пр}$) производили с использованием трехмерного моделирования. Часть траверсы находилась за пределами рабочего пространства печи. На рисунке 3.5 представлена трехмерная модель всей траверсы и части, которая находилась в рабочем пространстве.

С использованием геометрических характеристик, были рассчитаны коэффициенты излучения газовой составляющей свободного объема. Для этого были найдены средние температуры газов по рабочему пространству печи, и средний состав продуктов сгорания топлива.

Все дальнейшие расчеты теплообмена проводили с использованием опытных данных, полученных в ходе экспериментального нагрева поковки, проведенного в соответствии с заданным технологическим режимом (рисунок 3.6). В ходе данного режима металл постепенно нагревался до температуры 960 °С за три периода нагрева, разделенных промежуточными выдержками. Расчет горения топлива и последующие расчеты нагрева металла проводили для каждого из трех интервалов нагрева в отдельности.

Таблица 3.1 – Геометрические параметры печи и поковки по зонам

Параметр	**Зона**			
	I	**II**	**III**	**IV**
Объем рабочего пространства печи, $V_{р.п.}$, $м^3$	39,39	18,39	9,78	12,42
Объем металла в зоне, $V_{мет.}$, $м^3$	0,93	1,81	0,55	0,30
Объем приспособлений, $V_{пр.}$, $м^3$	0,65	0,0	0,0	0,0
Объем свободного рабочего пространства печи, $V_{св.}$, $м^3$	37,81	16,58	9,23	12,12
Площадь поверхности металла, $F_{мет.}$, $м^2$	7,14	7,49	3,21	2,86
Площадь поверхности футеровки, $F_{фут}$, $м^2$	55,59	21,77	11,57	14,70
Площадь поверхности приспособлений, $F_{пр.}$, $м^2$	14,10	0,0	0,0	0,0
Эффективная длина луча, Sэф, м	1,77	2,04	2,25	2,49
Масса металла в зоне, $G_{мет}$, кг	7324	14201	4335	2327

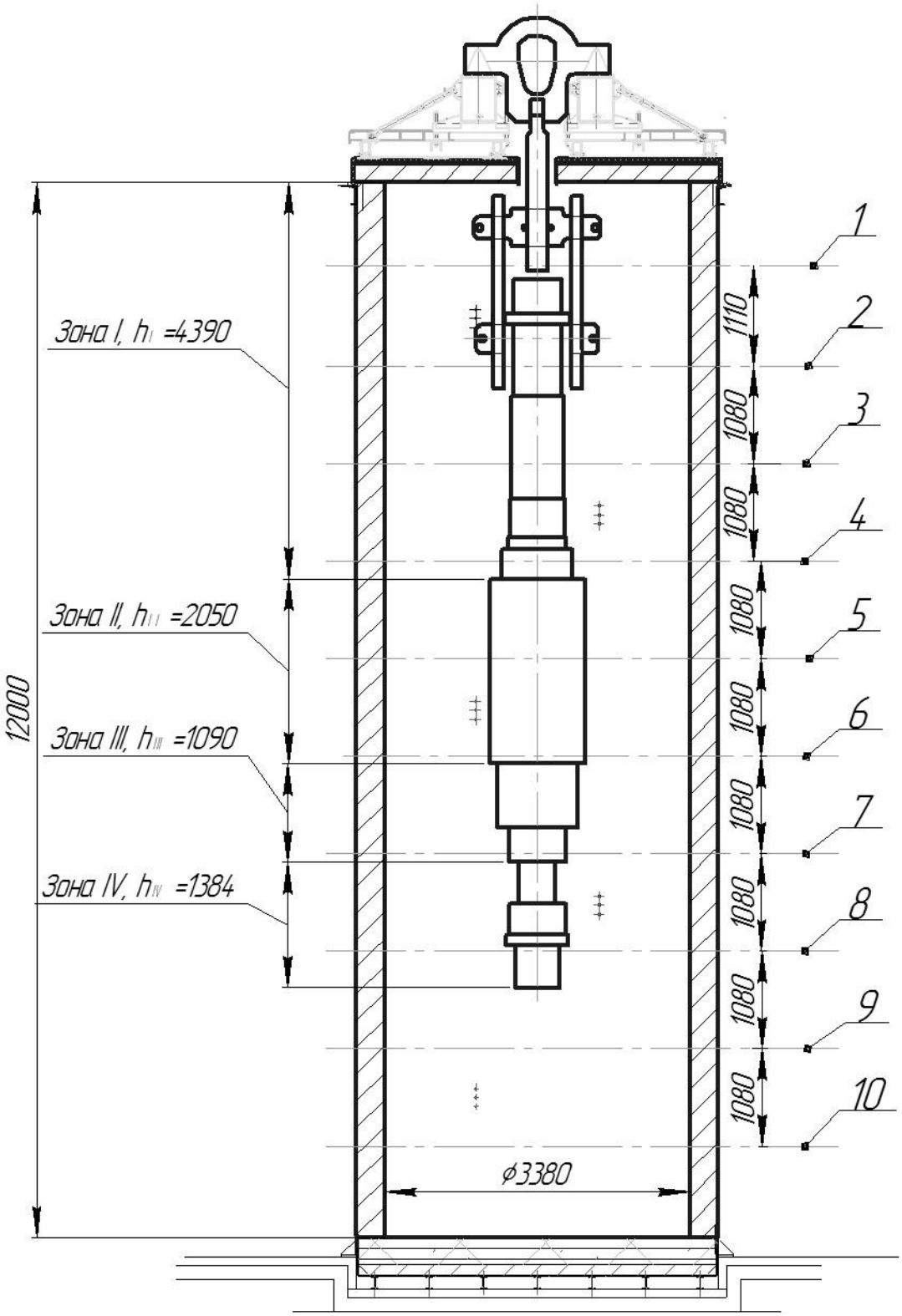

Рисунок 3.3 – Нумерация зон рабочего пространства:

1, 2, 3, … 10 – оси горелок

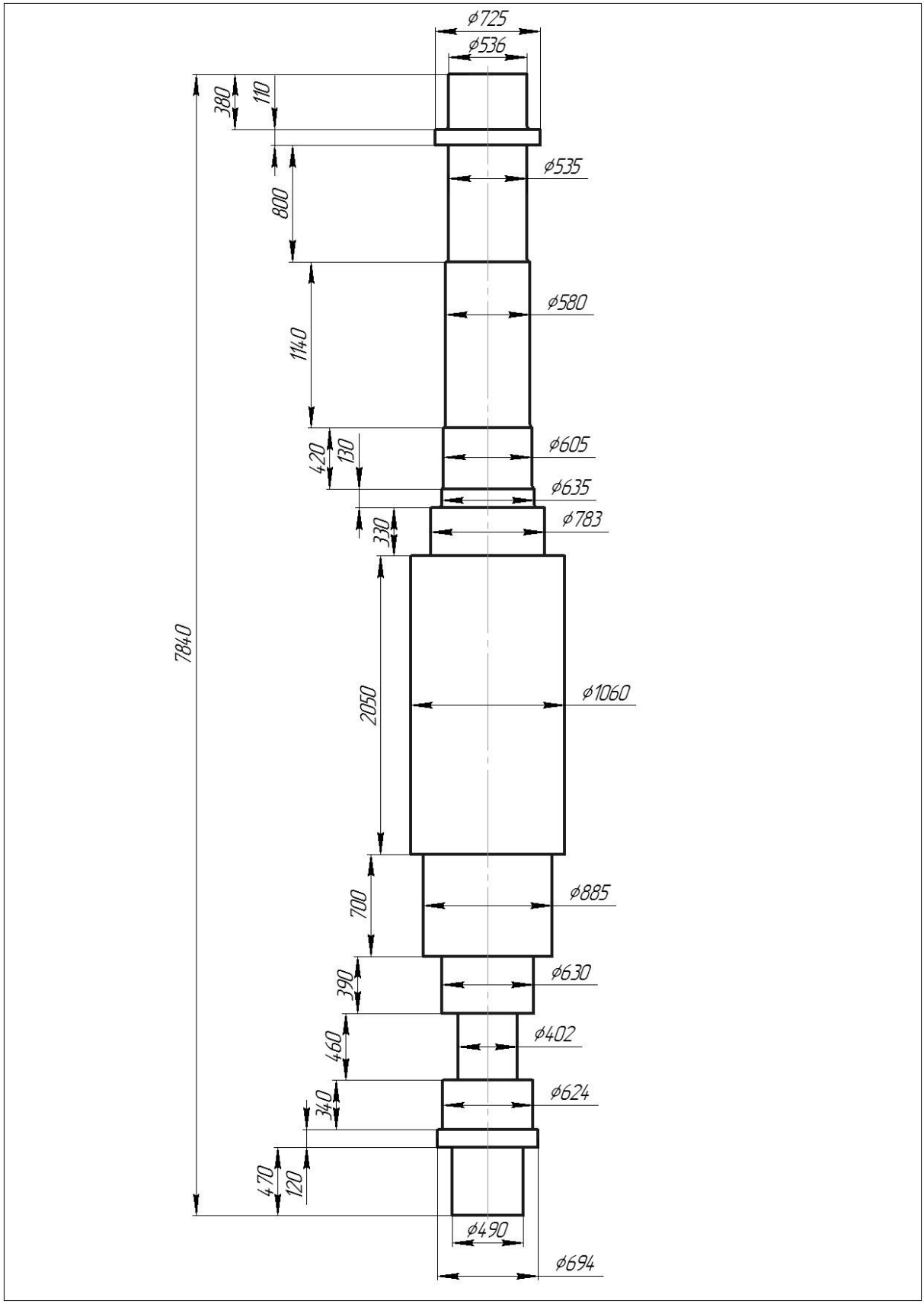

Рисунок 3.4 – Поковка ротора турбины

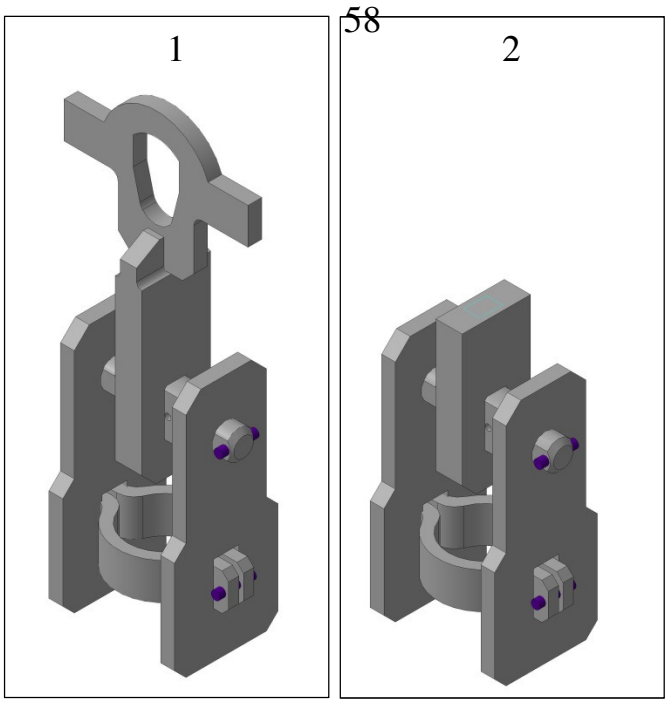

Рисунок 3.5 – Траверса, удерживающая поковку в печи:
1 – полная модель, 2 – модель части траверсы, находившейся в рабочем пространстве

Отличительной особенностью сжигания топлива являлась работа горелочных устройств в импульсном режиме «включено/выключено», настроенных таким образом, что при прекращении подачи газа в горелку, в рабочее пространство печи продолжал вдуваться подогретый воздух в количестве 40% от номинального расхода на горение. Данная настройка позволяет интенсифицировать движение газов в рабочем пространстве при низких температурах, тем самым увеличить конвективную составляющую теплообмена, а также стабилизировать розжиг горелок, однако приводит к повышенному коэффициенту избытка воздуха в рабочем пространстве печи, который определяли путем газового анализа. Прибором для газового анализа служил переносной автоматический газоанализатор, зонд которого вводился в рабочее пространство печи через смотровые окна и отверстия для дополнительных термопар, распределенные по высоте рабочего пространства.

С ростом температуры в рабочем пространстве возрастала тепловая мощность печи, что выражалось в более частом включении горелок и приводило к изменению коэффициента избытка воздуха. Для учета этого

фактора расчет горения топлива проводился для каждого из интервалов нагрева в отдельности.

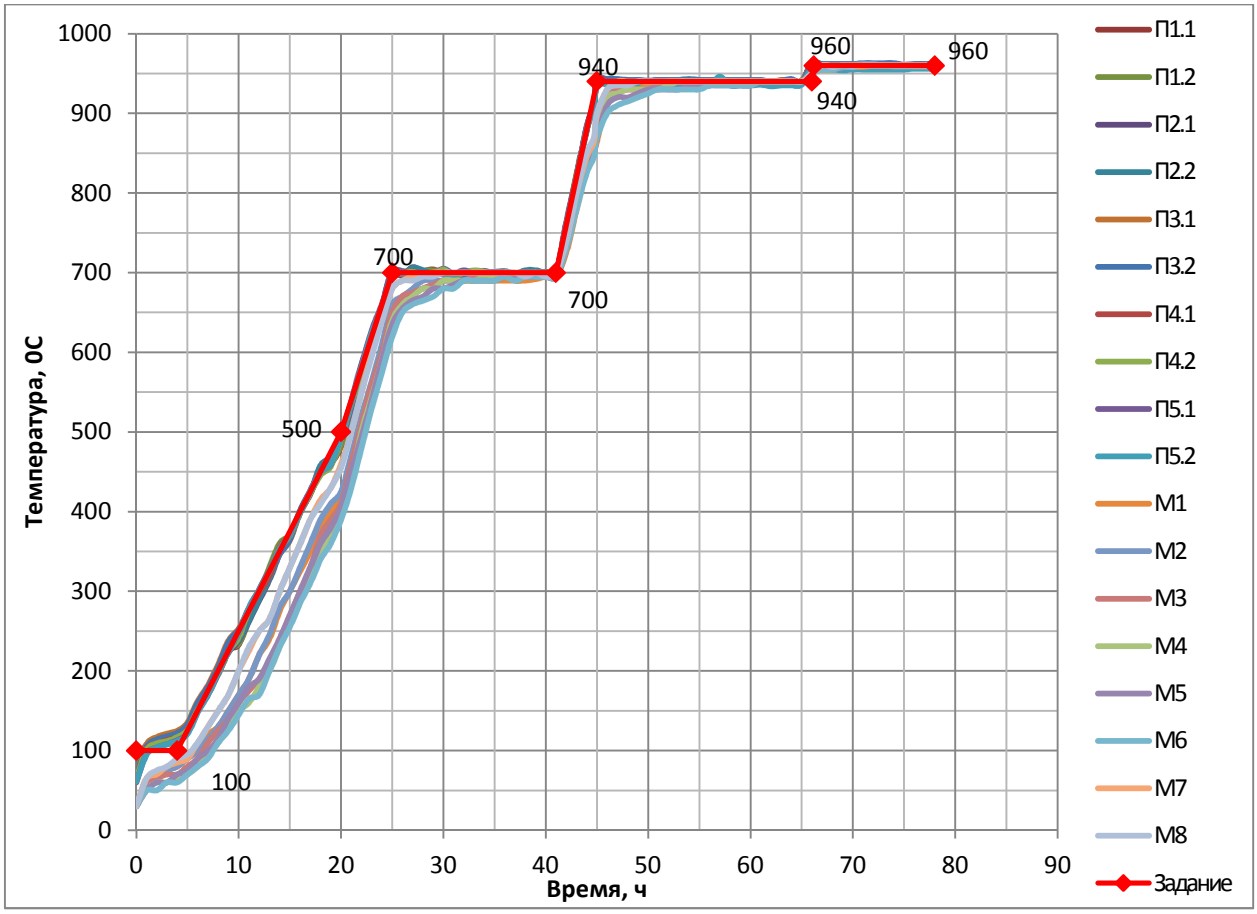

Рисунок 3.6 –Температурный режим нормализации поковки (обозначения точек измерения температуры показаны на рис. 3.1)

Результаты расчета горения топлива и состав излучающих газов представлены в таблице 3.2, где значения H_2O' и CO_2' указаны для реальных показателей коэффициентов избытка воздуха, полученных путем осреднения данных газового анализа для каждого из интервалов нагрева.

Таблица 3.2 – Состав излучающих газов

Интервал нагрева, °С	$Q^p_н$, кДж/м^3	L_0, м^3/м^3	Коэффициент избытка воздуха α	H_2O', %	CO_2', %
100…500	34000	9,67	2,32	8,36	4,50
500…700			1,88	10,21	5,49
700…940			1,79	10,71	5,76

В расчетах теплообмена использовали значение температур, измеренных в ходе режима нормализации, представленного на рисунке 3.6. Значения температур усредняли по четырем зонам рабочего пространства печи и по трем интервалам подъема температуры (таблица 3.3).

Таблица 3.3 –Температуры печи и поверхности поковки, °С

	Рабочее пр-во	Температура поверхности металла			
		Зона I	Зона II	Зона III	Зона IV
Начальная	120	88	66	74	80
В конце нагрева 100…500 °С	489	458	401	414	423
В конце нагрева 500…700 °С	698	680	636	650	655
В конце нагрева 700…940 °С	940	900	878	879	873
Средняя в интервале 100…500 °С	311	267	217	230	243
Средняя в интервале 500…700 °С	616	594	542	555	561
Средняя в интервале 700…940 °С	820	798	785	786	783

Значение приведенного коэффициента излучения $C_{гкм}$ определяли для каждой зоны печи, для каждого периода нагрева [80]:

$$C_{гкм\,mn} = C_0 \cdot \varepsilon_м \cdot \frac{\omega_n + 1 - \varepsilon_{г\,mn}}{[\varepsilon_м + \varepsilon_{г\,mn} \cdot (1 - \varepsilon_м)] \cdot \frac{1 - \varepsilon_{г\,mn}}{\varepsilon_{г\,mn}} + \omega_n}, \frac{Вт}{м^2 К^4} \quad (3.10)$$

где $C_0 = 5{,}67\ {}^{Вт}/_{м^2 К^4}$,

$\varepsilon_м = 0{,}8$ – степень черноты металла;

$\varepsilon_г$ – степень черноты продуктов горения в рабочем пространстве;

ω – степень развития кладки;

m – период нагрева;

n – номер зоны рабочего пространства.

Расчет степеней черноты продуктов горения для каждого из периодов проводили, зная эффективные длины луча $S_{эф}$ в каждой зоне рабочего пространства [80]:

$$\varepsilon_{г\,mn} = 1 - e^{-k_{г\,mn} \cdot S_{эф\,n}}, \quad (3.11)$$

где $k_г$ – коэффициент излучения газовой составляющей свободного объема рабочего пространства.

Степень развития кладки в каждой из четырех зон рабочего пространства рассчитывали, зная площади внутренней поверхности футеровки, поверхностей металла и приспособлений [80]:

$$\omega_n = \frac{F_{фут\,n}}{F_{мет\,n} + F_{пр\,n}}, \quad (3.12)$$

где $F_{фут.}$ – площадь поверхности футеровки;

$F_{мет.}$ – площадь поверхности металла;

$F_{пр.}$ – площадь поверхности приспособлений.

Расчет коэффициента газовой составляющей свободного объема производили по формуле [80]:

$$k_{г\,mn} = \left(\frac{0{,}78 + 0{,}016 \cdot H_2O'^{\,m}}{\sqrt{0{,}01 \cdot (CO_2' + H_2O')^m \cdot S_{эф\,n}}} - 0{,}1 \right) \cdot \left(1 - 0.37 \cdot \frac{T_{г\,m}}{1000}\right) \cdot 0{,}01 \cdot (CO_2'^{\,m} + H_2O'^{\,m}), \quad (3.13)$$

где $T_г$ – средняя температура рабочего пространства за период подъема температуры, К.

Результаты расчетов сведены в таблицу 3.4.

Для нахождения плотностей суммарных тепловых потоков, воспринятых металлом, использовали температурные и геометрические параметры садки и рабочего пространства для каждого из периодов нагрева, для каждой зоны печи. Для получения средней плотности теплового потока в

целом для всей садки использовали выражение 3.8. Результаты расчетов сведены в таблицу 3.5.

Таблица 3.4 – Приведенные коэффициенты излучения системы газ-футеровка-металл

Параметр	Интервал нагрева, °С	Зона I	Зона II	Зона III	Зона IV
$k_{г\ mn}$	100…500	0,183	0,170	0,161	0,153
	500…700	0,178	0,165	0,157	0,149
	700…940	0,163	0,151	0,144	0,136
$\varepsilon_{г\ mn}$	100…500	0,277	0,293	0,304	0,316
	500…700	0,270	0,286	0,297	0,309
	700…940	0,251	0,265	0,276	0,287
ω_n	-	2,62	2,9	3,61	5,13
$C_{гкм\ mn}$, $\frac{Вт}{м^2К^4}$	100…500	3,12	3,29	3,50	3,77
	500…700	3,08	3,25	3,47	3,74
	700…940	2,96	3,13	3,36	3,65

Таблица 3.5 – Плотности суммарных тепловых потоков на поверхностях поковки ротора, $q_{м.\Sigma}$, $\frac{Вт}{м^2}$

Интервал нагрева, °С	Зона I	Зона II	Зона III	Зона IV	Среднее значение
100…500	3283,8	4995	3767,4	2351	4143
500…700	10247,4	14452	10809,6	8045,4	12270
700…940	9517,4	13641	10241,3	6603,1	11466

Используя данные таблиц 3.3 и 3.4 и формулу 3.4, получили значения $q_{м.л}$ для каждого периода нагрева для каждой зоны печи. Зная плотности тепловых потоков, нашли коэффициенты теплообмена излучением, используя выражение 3.5. Среднюю плотность теплового потока излучением

для всей печи для каждого интервала температур получили осреднением по поверхности металла (выражение 3.9). Результаты расчетов сведены в таблицу 3.6.

Таблица 3.6 – Плотности теплового потока излучением на поверхности поковки ротора и коэффициенты лучистого теплообмена

Параметр	Интервал нагрева, °С	Зона I	Зона II	Зона III	Зона IV	Среднее значение
$q_{м.л}$, $\frac{Вт}{м^2}$	100…500	976,2	1930,3	1830,3	1712,6	1556
	500…700	1834,6	5960,7	5363,7	4885,8	4297
	700…940	3299,9	5452,8	5694,1	5663,3	4921
$\alpha_л$, $\frac{Вт}{м^2К^4}$	100…500	22,2	20,5	22,6	25,2	21,6
	500…700	83,4	80,55	87,9	88,8	81,1
	700…940	150	155,8	167,5	181,2	153,8

Используя суммарные плотности тепловых потоков на поверхности поковки ротора, полученные экспериментально (таблица 3.5), и расчетные плотности теплового потока излучением (таблица 3.6) находили по разности плотности тепловых потоков конвекцией (таблица 3.7).

Таблица 3.7 – Плотности тепловых потоков конвекцией на поверхность поковки ротора и коэффициенты конвективного теплообмена

Параметр	Интервал нагрева, °С	Зона I	Зона II	Зона III	Зона IV	Среднее значение
$q_{м.к}$, $\frac{Вт}{м^2}$	100…500	2307,6	3064,7	1936,7	638,4	2587
	500…700	8412,8	8491,3	5445,9	3159,6	7973
	700…940	6217,5	8188,2	4546,9	939,8	6545
$\alpha_к$, $\frac{Вт}{м^2К^4}$	100…500	52,4	32,6	23,9	9,4	35,9
	500…700	382,4	114,7	89,3	57,4	150,4
	700…940	282,6	233,9	133,7	25,4	204,5

3.4 Результаты расчетов сложного внешнего теплообмена при нагреве поковки ротора турбины

Для оценки тепловой работы печи в ходе расчета было произведено осреднение плотностей тепловых потоков и коэффициентов теплообмена для всей поковки ротора в целом. Средние параметры теплообмена представлены в таблице 3.8. Также, для сравнения величины лучистой и конвективной составляющей теплообмена приведено отношение $\bar{q}_{\text{м.к}}/\bar{q}_{\text{м.л}}$.

Таблица 3.8 – Результаты измерений и расчета параметров теплообмена вертикальной камерной печи

Интервал нагрева, °С	Средние температуры, °С		Плотности тепловых потоков, $\text{Вт}/\text{м}^2$			Коэффициенты теплообмена, $\text{Вт}/\text{м}^2\text{К}$		$\bar{q}_{\text{м.к}}/\bar{q}_{\text{м.л}}$
	$\bar{t}_{\text{г}}$	$\bar{t}_{\text{п}}$	$\bar{q}_{\text{м.}\Sigma}$	$\bar{q}_{\text{м.л}}$	$\bar{q}_{\text{м.к}}$	$\bar{\alpha}_{\text{л}}$	$\bar{\alpha}_{\text{к}}$	
100…500	311	239	4143	1556	2587	21,6	35,9	1,7
500…700	616	563	12270	4297	7973	81,1	150,4	1,9
700…940	820	788	11466	4921	6545	153,8	204,5	1,3

3.5 Выводы

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы о работе печи, оснащенной современным оборудованием:

1. Прежде всего, следует отметить, что применение скоростных горелок резко увеличивает конвективную составляющую внешнего теплообмена: доля конвекции в общем внешнем теплообмене в данном случае составляет в среднем во всем интервале температур 61%.
2. С ростом температуры печи увеличиваются обе составляющие внешнего теплообмена: лучистая – на 35 – 40 %, конвективная – на 60 – 65 %. Объяснением этому может быть увеличение скорости нагрева

ротора по мере перехода от нагрева при температуре печи в интервале 100…500 °С к нагреву в интервале 700…940 °С, при котором возрастает тепловая нагрузка печи, и происходит увеличение количества продуктов сгорания и кратности циркуляции газов.

3. Высокая доля конвективной составляющей внешнего теплообмена, создаваемая скоростными горелками обеспечивает более эффективное использование химической энергии топлива, по сравнению с традиционной технологией нагрева низкоскоростными длиннопламенными горелками с преобладанием лучистой составляющей теплообмена, что в комплексе с применением волокнистой футеровки позволяет резко уменьшить расход топлива, повысив КПД. Это подтверждается результатами гарантийных испытаний. Средний расход топлива за самый энергозатратный период нагрева 700…940 °С составил 53,67 $м^3$/ч, полученный удельный расход условного топлива за этот период – 12,45 кг у.т./т, что на 71% меньше удельного расхода условного топлива этой печи до технического перевооружения, оснащенной горелками старой конструкции и кирпичной футеровкой [33, 38, 83].
4. Более того, скоростные рекуперативные горелки резко повысили равномерность нагрева металла, что позволяет получить более равномерные по поверхности и объему механические свойства поковки, тем самым повышая ее качество. С экономической точки зрения это выражается в увеличении конкурентоспособности продукции и снижении доли брака.
5. Оценить эффективность работы высокоскоростных горелок можно путем анализа движения газов в рабочем пространстве печи. Поэтому следующим этапом данной работы было исследование процессов газодинамики с применением методов компьютерного моделирования для получения количественной и качественной картины движения в рабочем пространстве.

4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГАЗОДИНАМИКИ В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ ПЕЧИ

Определение характера движения и скоростей в реальной действующей печи невозможно в виду достаточной ее герметичности и отсутствия необходимого количества технологических отверстий в корпусе для введения зондов, поэтому в данной работе использовали метод моделирования. Предполагается что, полученные результаты моделирования подтвердят эффективность работы скоростных рекуперативных горелок в камерных термических вертикальных печах, позволят сформировать рекомендации по совершенствованию геометрии рабочего пространства термической печи, повысят точность расчетов теплообмена в печах схожей конструкции.

В рамках данной работы использовалось компьютерное моделирование в интегрирующей среде ANSYS Workbench. Выбор компьютерного моделирования обусловлен рядом его преимуществ, по сравнению с физическим:

- Отсутствие необходимости в построении масштабной физической модели. В рамках компьютерного моделирования расчет ведется в виртуальной модели, в масштабе один к одному.
- Возможность задания всех характеристик натурного объекта.
- Высокая скорость обработки данных.

ANSYS Workbench объединяет в единый комплекс все необходимые для решения программные возможности:

- Моделирование геометрии (Design modeler).
- Создание трехмерной сетки (ANSYS ICEM CFD).
- Задание граничных условий (CFX-Pre).
- Расчет газодинамики (CFX-Solver).
- Обработка полученных результатов (CFX-Post).

Результаты моделирования газодинамики в рабочем пространстве печи с использованием программного пакета ANSYS описаны в [84, 85]. Полученная авторами трехмерная модель распределения скоростей в рабочем пространстве хорошо соотносится с опытными данными. Соответственно применение компьютерного моделирования в среде ANSYS Workbench для решения поставленных задач является целесообразным.

4.1 Постановка задачи

Моделирование движения газов в рабочем пространстве вертикальной печи с загруженной в него поковкой ротора турбины осуществлено в масштабе один к одному. Особенностью программы ANSYS CFX является необходимость использования свободного объема, то есть части рабочего пространства, занятой движущимися газами. При этом вводить в расчетную модель футеровку и поковку ротора нет необходимости. На рисунке 4.1 представлена геометрия свободной части рабочего пространства печи, в которой изучали газодинамику. Внутренней границей свободного объема является поверхность поковки ротора и удерживающей его траверсы. Внешней границей модели является внутренняя поверхность футеровки рабочего пространства и выходные сечения горелочных устройств. Геометрическая модель свободной части рабочего пространства была построена в сторонней, по отношению к ANSYS программе, а затем импортирована в Design modeler.

После распознавания модели в Design modeler полученная геометрия была заполнена трехмерной сеткой в ICEM CFD. На рисунке 4.2 представлена модель свободной части рабочего пространства с созданной сеткой, состоящей из 285600 элементов (половина геометрической модели условно не показана для отображения внутренних элементов сетки). Такой дискретности сетки достаточно для решения задачи с необходимой точностью за относительно малый период времени.

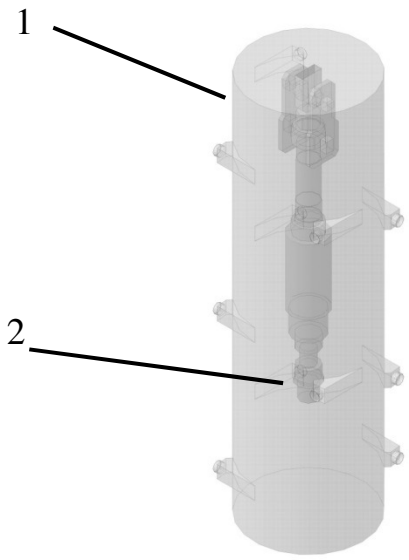

Рисунок 4.1 – Геометрическая модель рабочего пространства, занятого газами:

1 – Внешняя граница модели свободного объема (внутренняя поверхность футеровки печи); 2 – Внутренняя граница модели свободного объема (поверхность поковки ротора и удерживающей его траверсы)

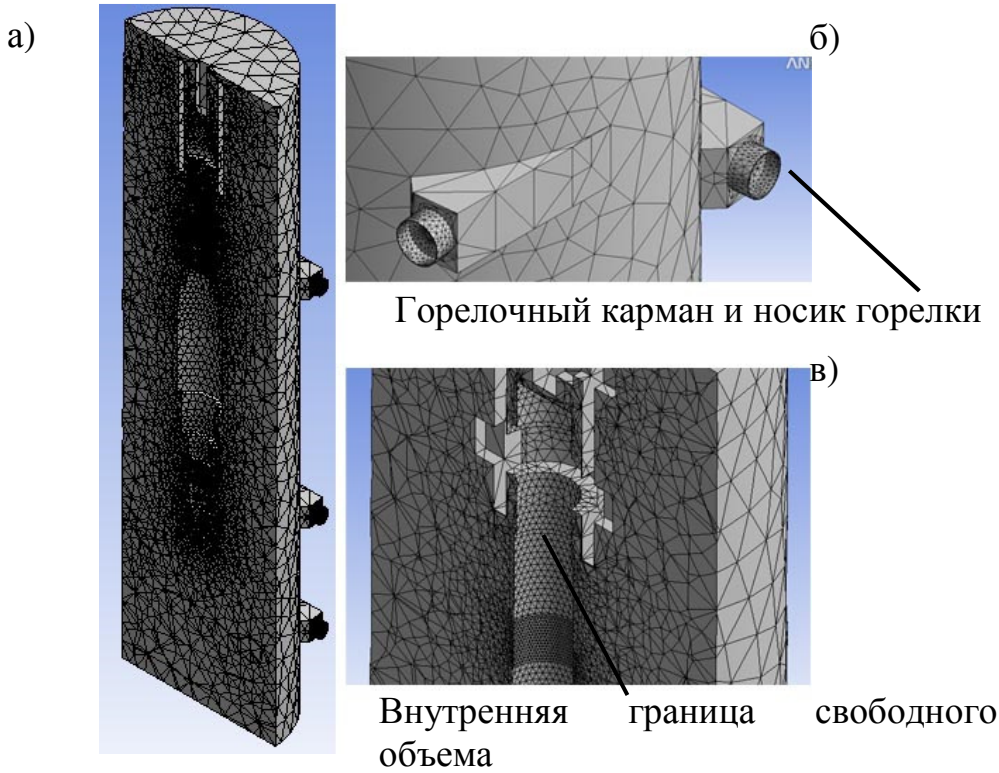

Рисунок 4.2 – Расчетная сетка:

а) общий вид, б) горелочные карманы, в) верхняя часть рабочего пространства

Для задания граничных условий все поверхности, ограничивающие объемную модель, были разделены на следующие группы (рисунок 4.3):

- Вход газов в рабочее пространство – 11 поверхностей (по числу горелок в реальной печи), которые являются входными сечениями носиков горелок. На них задаются входные граничные условия для газов (поз. 1, рис. 4.3).
- Выход газов из рабочего пространства – сечения рекуператоров горелок. На этих 11 поверхностях задаются выходные граничные условия для газов, покидающих рабочее пространство через горелки (поз. 2, рис. 4.3).
- Стенки – внутренняя поверхность футеровки рабочего пространства, поверхность поковки ротора и удерживающей траверсы. На этих плоскостях задаются граничные условия стенок, ограничивающих объем газовой среды (поз. 3, рис. 4.3).

На рисунке 4.3 условно показаны плоскости, относящиеся к группам «вход» и «выход» только одной из 11 горелок. К группе «стенки» относятся все плоскости, ограничивающие модель рабочего пространства, кроме относящихся к группам «вход» и «выход».

Заданная температура газов в рабочем пространстве – 900 °С. В рабочем пространстве печи предположительно преобладает турбулентный характер движения газов (о чем косвенно говорят полученные в главе 3 большие значения коэффициентов конвективного теплообмена (таблица 3.7), поэтому в расчет включили К-ε модель турбулентного течения. Внутренние поверхности футеровки и ротора с траверсой, ограничивающие свободный объем рабочего пространства, задали как неподвижные гладкие стенки.

В качестве входных граничных условий были заданы средние в выходном сечении скорости истечения газов из горелок, рассчитанные с использованием измерений размеров выходных отверстий носиков горелок (рисунок 4.4) и расходов газа и воздуха через каждую из 11 горелок при проведении режима нагрева поковки ротора.

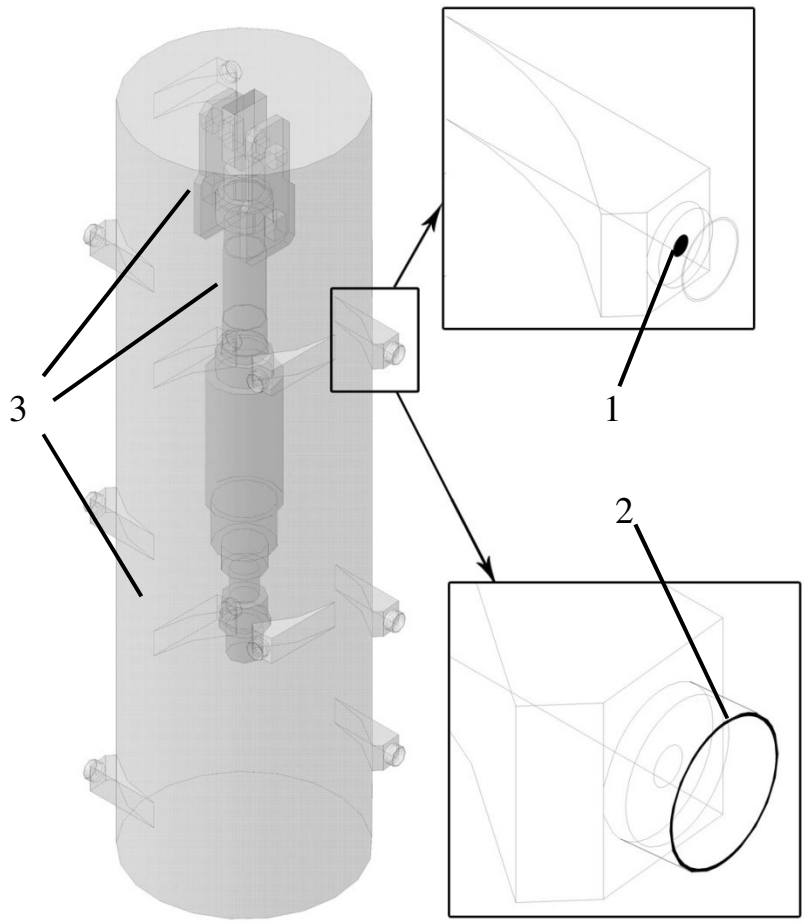

Рисунок 4.3 – Поверхности для задания граничных условий:

1 – вход; 2 – выход; 3 – стенки

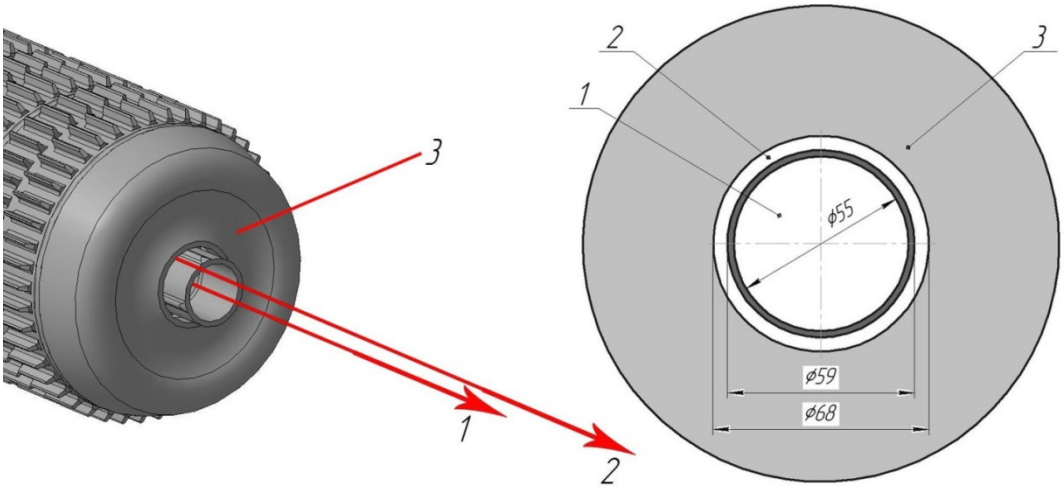

Рисунок 4.4 – Геометрия носика горелки:

1 – выход газов из камеры сгорания (первой ступени горения); 2 – кольцевая щель для выхода подогретого воздуха из рекуператора (для второй ступени горения); 3 – рекуператор

При работе рекуперативной горелки в первую ступень горения поступает примерно 40% расхода воздуха и 100% расхода газа, а оставшиеся 60% воздуха выходят через кольцевую щель носика горелки (вторая ступень горения) (см. рис.4.4). Результаты расчета реальных скоростей представлены в таблице 4.1. Полученную среднюю реальную скорость задавали в CFX-Pre как входное граничное условие к группе плоскостей «вход».

Таблица 4.1 – Характеристики газов на выходе из носика горелки

Среда	Расход при норм. усл., $м^3/с$	Площадь сечения, $м^2$	Температура °C	Средняя скорость при реальной температуре, м/с
Газо-воздушная смесь первой ступени горения	0,03	$2{,}375 \cdot 10^{-3}$	1200	68,15
Воздух второй ступени горения	0,034	$0{,}897 \cdot 10^{-4}$	400	93,87
Газо-воздушная смесь (выходное сечение горелки)	0,064	–	–	81,85

В качестве выходных граничных условий модели к группе плоскостей «выход» задали статическое разрежение, равное -1кПа (по показаниям работающих горелок). Все заданные граничные условия сгруппированы в таблицу 4.2.

После задания граничных условий в математическую модель, был произведен расчет скоростных полей газов в объеме рабочего пространства средствами CFX-Solver. Дальнейшую обработку и представление результатов проводили в программе CFX-Post.

Таблица 4.2 – Граничные условия при моделировании газодинамики

Группа	Граничные условия	
Среда моделирования	Температура, °С	900
	Турбулентность	К-ε модель
Входные граничные условия	Характеристика	Средняя скорость, нормальная к плоскости приложения
	Величина, м/с	82
Выходные граничные условия	Характеристика	Статическое давление
	Величина, кПа	-1
Ограничивающие расчетную область поверхности	Характеристика	Неподвижная гладкая стенка

4.2 Исследование движения газов в свободном объеме рабочего пространства модели вертикальной камерной печи

Для оценки распределения газов по рабочему пространству печи были простроены линии тока (рисунок 4.5), характеризующие движение отдельных микрообъемов при одновременной работе всех 11 горелок. Цвета линий тока соответствуют определенной скорости движения. В левой части изображения приведена шкала зависимости величины скорости от цвета. Чем ближе цвет к синему, тем медленнее скорость. Из-за значительных размеров рабочего пространства, сложно оценить характер движения газов при таком масштабе изображения, однако, можно сделать предварительный вывод о преобладании кольцевых горизонтальных потоков, создаваемых скоростными горелками, с относительно небольшими вертикальными перетоками. Также, несмотря на высокую скорость истечения продуктов сгорания из горелок, в рабочем пространстве печи преобладают

относительно низкие скорости движения газовой среды. Это обусловлено низким коэффициентом заполнения рабочего пространства печи металлом:

$$К_з = \frac{V_{мет.}}{V_{р.п.}}, \text{ где} \quad (4.1)$$

$V_{мет.}$ – объем нагреваемого металла;

$V_{р.п.}$ – объем рабочего пространства печи.

В данном случае коэффициент заполнения рабочего пространства вертикальной печи металлом составлял $К_з$ = 0,045. Такое низкое значение обусловлено универсальностью печи, осуществляющей тепловую обработку индивидуальной продукции (ротора турбин, крупные валки прокатных станов и прочее), обладающей различными объемами.

Чтобы количественно оценить распределение скоростей по рабочему пространству с помощью пакета CFX-Post были построены плоскости векторных полей скоростей, показанные на рисунке 4.6.

В вертикальной плоскости (рисунок 4.7) присутствует несколько циркуляционных потоков. Вдоль стенок рабочего пространства преобладают восходящие потоки, а вдоль поковки ротора в основном проходят нисходящие. Однако в целом, величины скоростей вертикальных потоков невелики.

Проекции векторных полей скорости на условные горизонтальные плоскости 3, 4, 5, 6, 7 (рисунок 4.6) позволяют оценить характер движения газов вокруг поковки ротора турбины и у стен печи. Анализируя проекцию скоростей на плоскость, проходящую через ось третьей горелки (рисунок 4.8) можно сделать вывод о преобладающем кольцевом характере движения. Продукты горения выходят из носика горелки и проходят вокруг поковки ротора, затем некоторый объем удаляется через рекуператор горелки, а основная часть газов подсасывается в факел и снова вовлекается в кольцевое движение по рабочему пространству. Аналогичный характер движения наблюдается во всех условных горизонтальных плоскостях, построенных по осям горелок. В плоскостях, проходящих через ось четвертой (рисунок 4.9) и

седьмой (рисунок 4.12) горелок наблюдается небольшая зона локальной циркуляции газов, которая слабо влияет на общий характер движения.

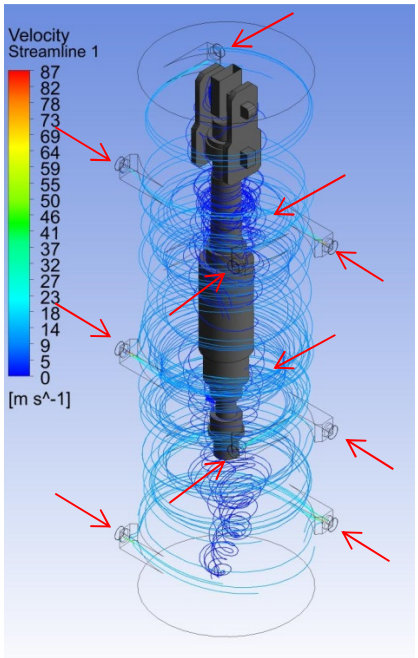

Рисунок 4.5 – Линии тока в объеме рабочего пространства: стрелками обозначены места истечения газов из горелок в рабочее пространство

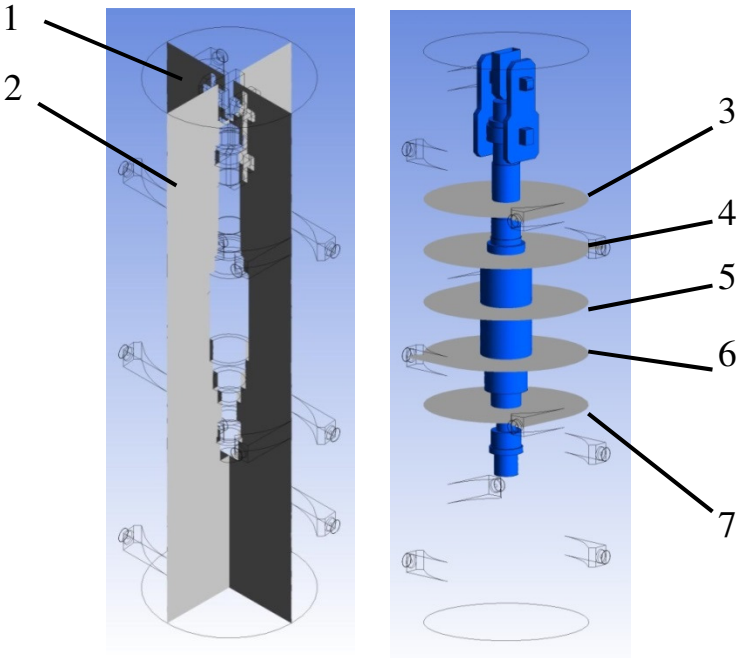

Рисунок 4.6 – Плоскости векторных полей скорости: 1, 2 – вертикальные плоскости, проходящие через центральную ось рабочего пространства под углом 90° друг к другу; 3…7 – горизонтальные плоскости, проходящие через оси соответствующих горелок

а) б)

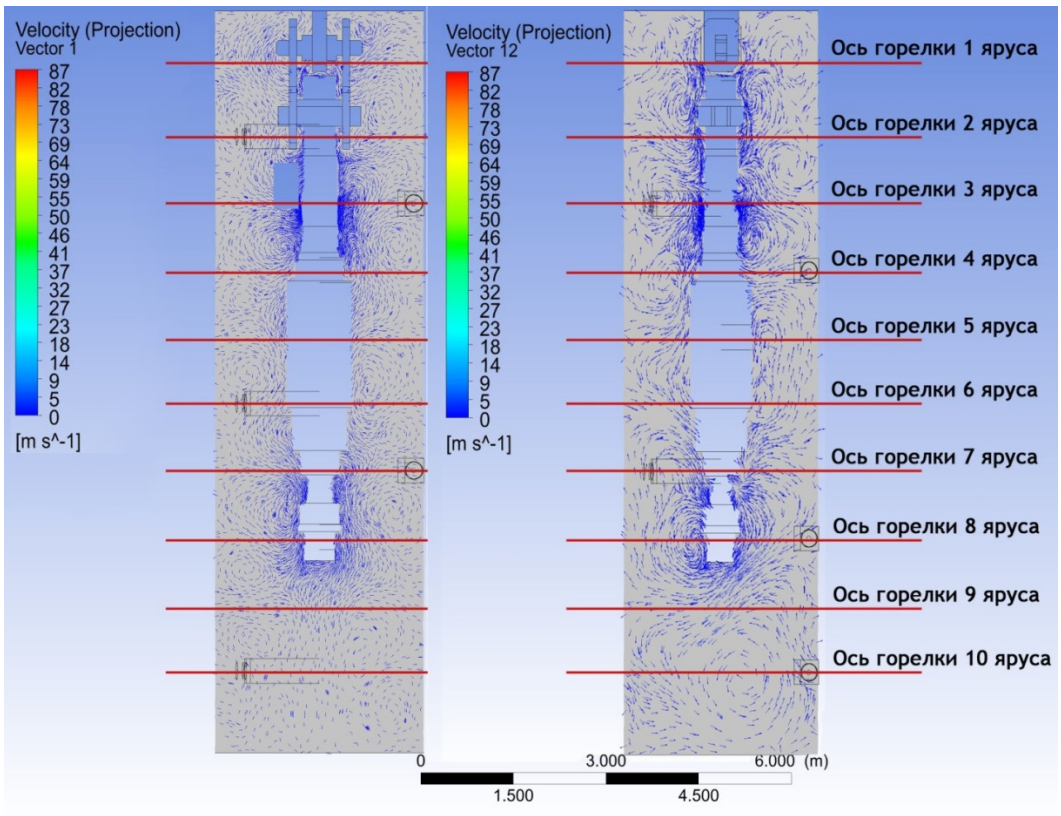

Рисунок 4.7 – Проекции векторного поля скоростей на вертикальные плоскости: а) плоскость 1, б) плоскость 2

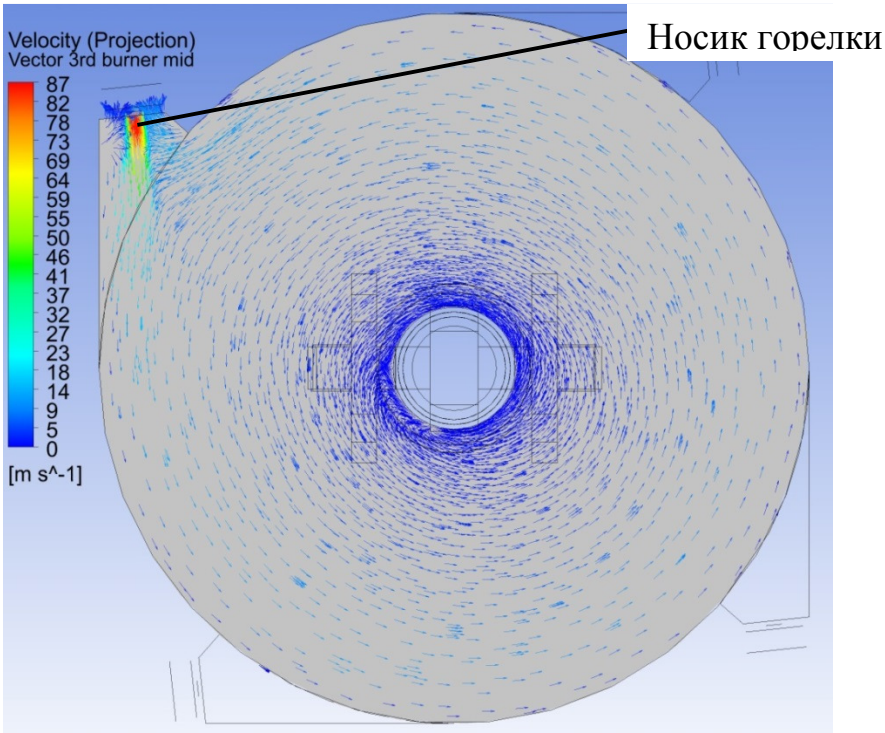

Рисунок 4.8 – Проекция векторного поля скоростей в условной плоскости, проходящей через ось третьей горелки

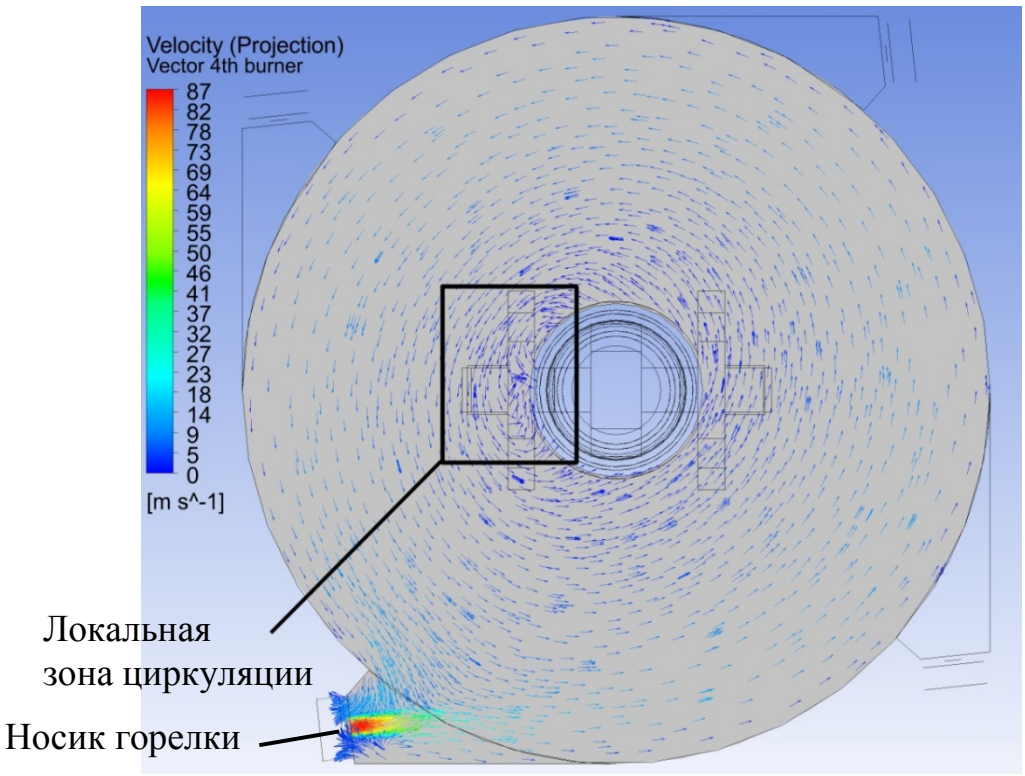

Рисунок 4.9 – Проекция векторного поля скоростей в условной плоскости, проходящей через ось четвертой горелки

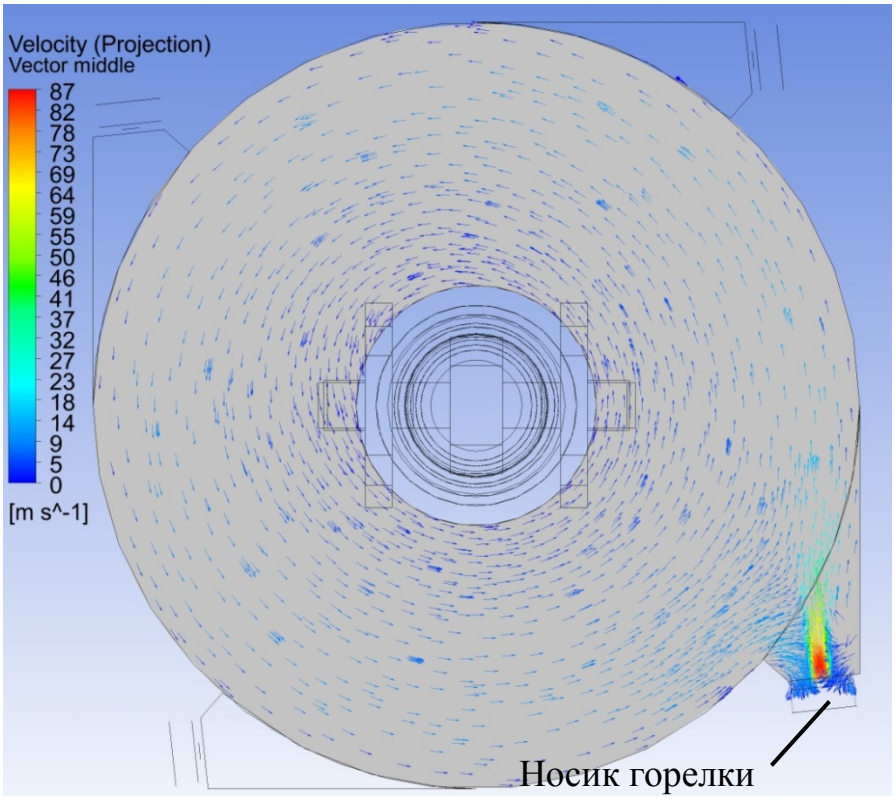

Рисунок 4.10 – Проекция векторного поля скоростей в условной плоскости, проходящей через ось пятой горелки

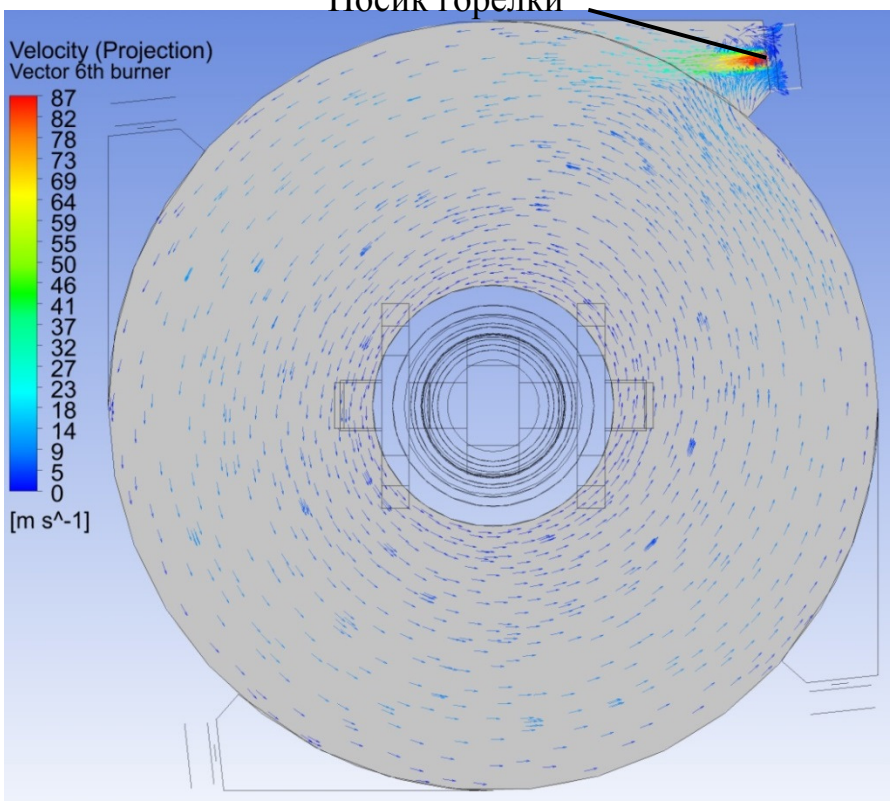

Рисунок 4.11 – Проекция векторного поля скоростей в условной плоскости, проходящей через ось шестой горелки

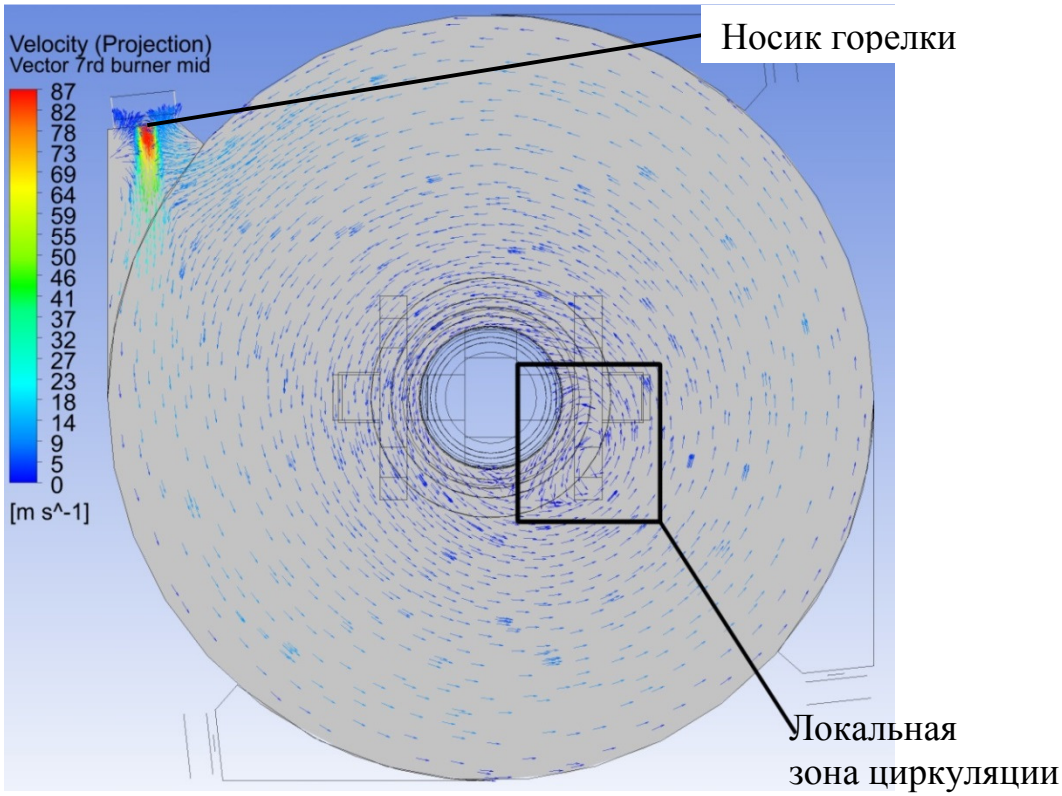

Рисунок 4.12 – Проекция векторного поля скоростей в условной плоскости, проходящей через ось седьмой горелки

Более наглядно оценить распределение скоростей по рабочему пространству позволяет отображение контурных диаграмм на ранее построенных плоскостях. Во всех горизонтальных сечениях рабочего пространства наблюдается схожий характер движения газов, поэтому ниже представлена только контурная диаграмма распределения скоростей движения газов в условной плоскости, проходящей через ось пятой горелки, в районе большего диаметра поковки ротора (рисунок 4.13). Примерно через 30 см после выхода из горелки, скорость продуктов горения падает с 82 м/с до 65 м/с, а на выходе из горелочного кармана скорость на оси факела не превышает 40 м/с. Далее, по всему сечению рабочего пространства наблюдается равномерное поле скоростей с плавным падением от оси движения к центру рабочего пространства и стенкам печи. При этом около стенок рабочего пространства наблюдается «застойная» зона. Общей характеристикой, присущей движению газов в рабочем пространстве печи, кроме преобладающего кольцевого горизонтального движения, является резкое падение скорости потока газов сразу после выхода из носика горелки, обусловленное подсосом периферийных газовых объемов в скоростную струю горелки, что позволяет сделать предварительный вывод о высокой кратности циркуляции газов в плоскостях их движения.

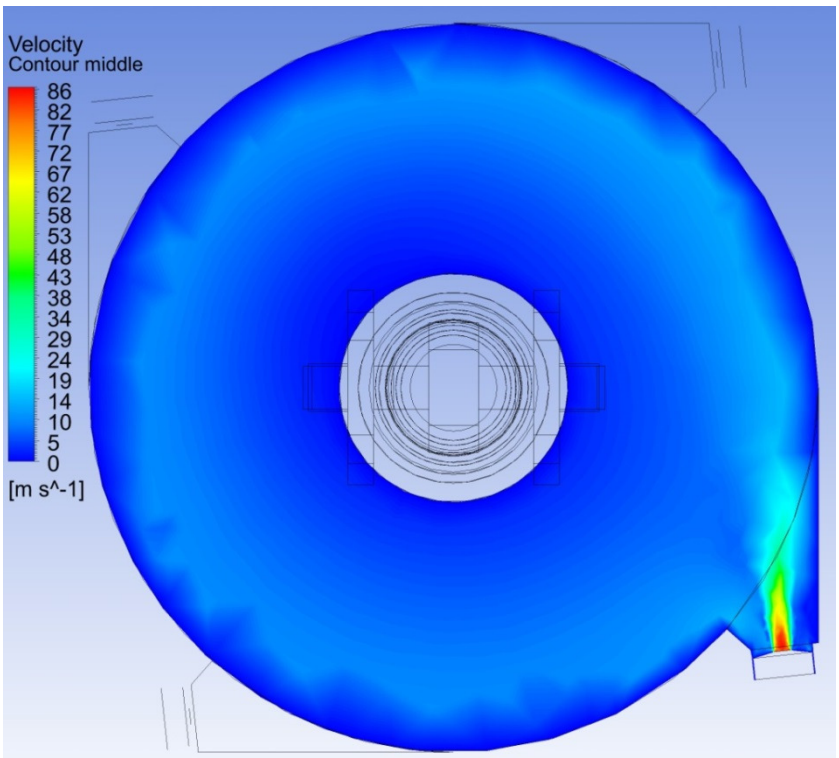

Рисунок 4.13 – Контурная диаграмма распределения скоростей в условной плоскости, проходящей через ось пятой горелки

4.3 Кратность циркуляции продуктов сгорания и газообмен в рабочем пространстве вертикальной печи

Кольцевой характер движения газов в рабочем пространстве приводит к увеличению их объема. При этом многократное прохождение газами свободной части рабочего пространства приводит к осреднению их температуры и повышению равномерности нагрева изделия и стен печи [86].

Для определения среднего по рабочему пространству значения кратности циркуляции расчет проводили в нескольких областях по высоте рабочего пространства, в районе плоскостей, проходящих через оси третьей, пятой и седьмой горелок. Для этого построены эпюры скоростей в сечениях, указанных на рисунке 4.14.

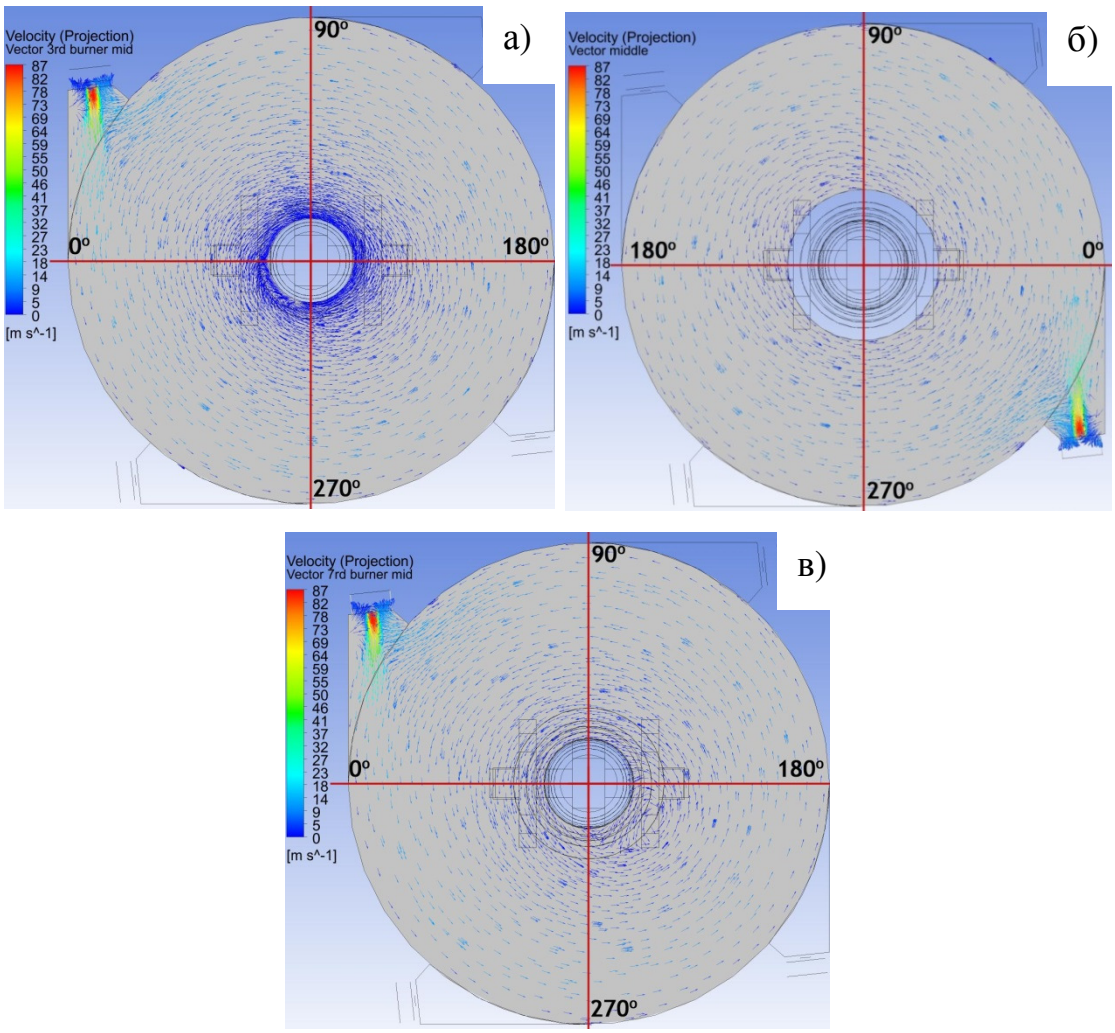

Рисунок 4.14 – Сечения для построения эпюр:

а – третья горелка, б – пятая горелка, в – седьмая горелка.

Горизонтальная ось графика (X[m]) – расстояние по горизонтали в поперечном сечении печи (рисунки 4.15 – 4.20), с началом координат на вертикальной оси печи. Соответственно X[m], Z[m] – расстояние от центра ротора в метрах. Поэтому в центре графиков наблюдается нулевая скорость. Во всех сечениях скорость плавно увеличивается по мере продвижения от центра рабочего пространства к оси потока, а затем резко падает по мере приближения к границе рабочего пространства. Из графика (рисунок 4.15) видно, что уже в сечении 180° (правая часть графика), первом после выхода из третьей горелки, скорость падает до 14 м/с на оси потока.

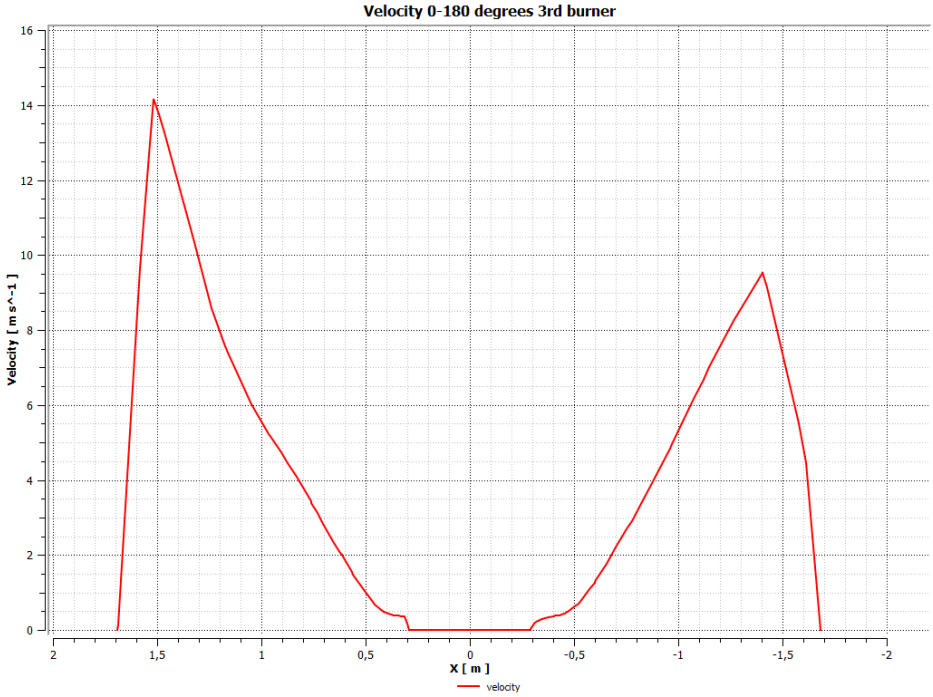

Рисунок 4.15 – Эпюра скоростей продуктов горения от 3$^{\underline{й}}$ горелки в сечении 0-180°

В сечении 270° (правая часть графика, рисунок 4.16) максимальная скорость на оси графика уже не превышает 11 м/с. В сечениях 0° (правая часть графика, рисунок 4.15) и 90° (левая часть графика, рисунок 4.16) максимальная скорость не превышает 10 м/с.

Идентичные поля скоростей наблюдаются также в плоскостях пятой и седьмой горелок, с той лишь разницей, что горелка №5 повернута на 180° относительно горелок №3 и №7.

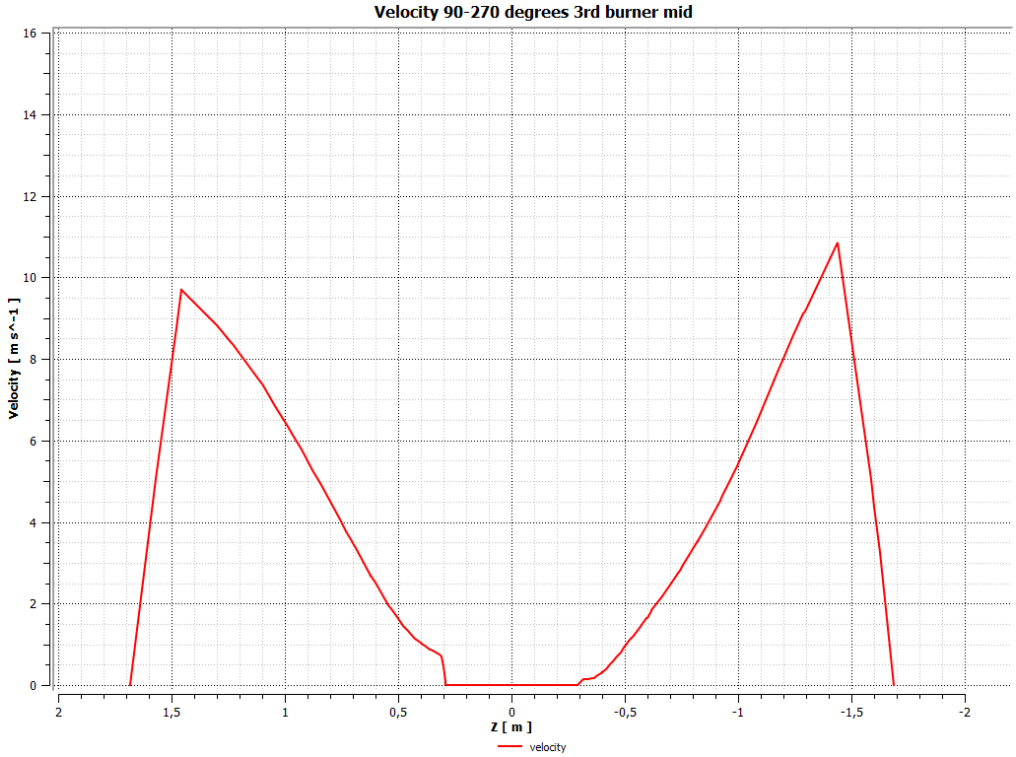

Рисунок 4.16 – Эпюра скоростей продуктов горения от 3$^{\underline{й}}$ горелки в сечении 90-270°

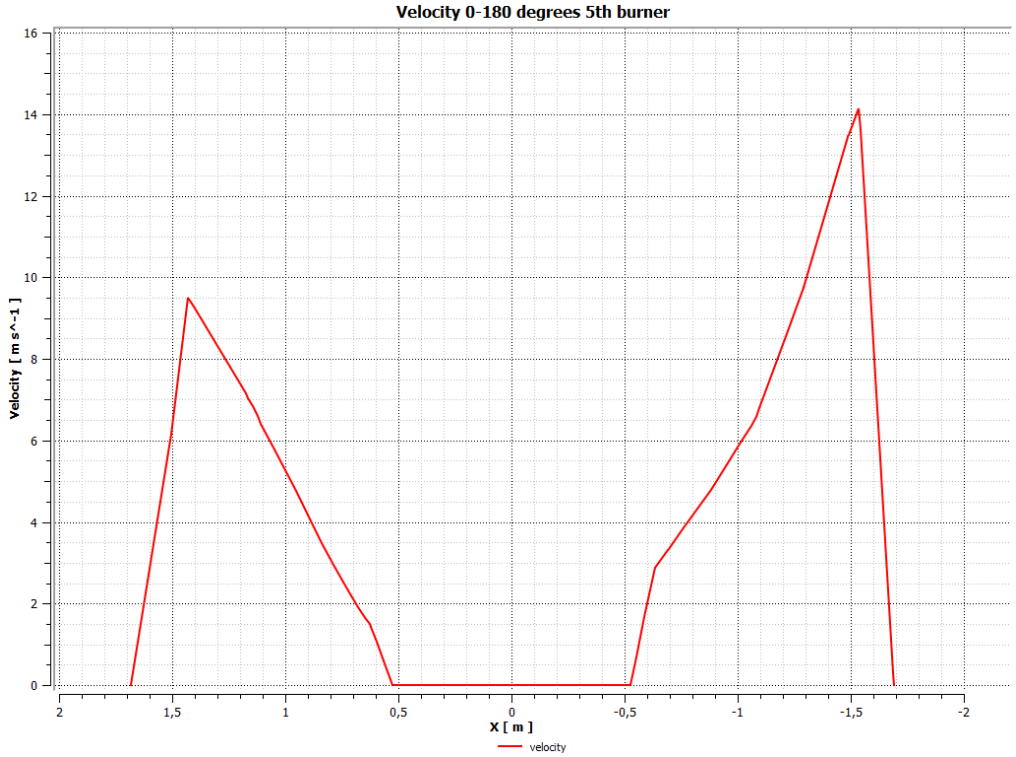

Рисунок 4.17 – Эпюра скоростей продуктов горения от 5$^{\underline{й}}$ горелки в сечении 0-180°

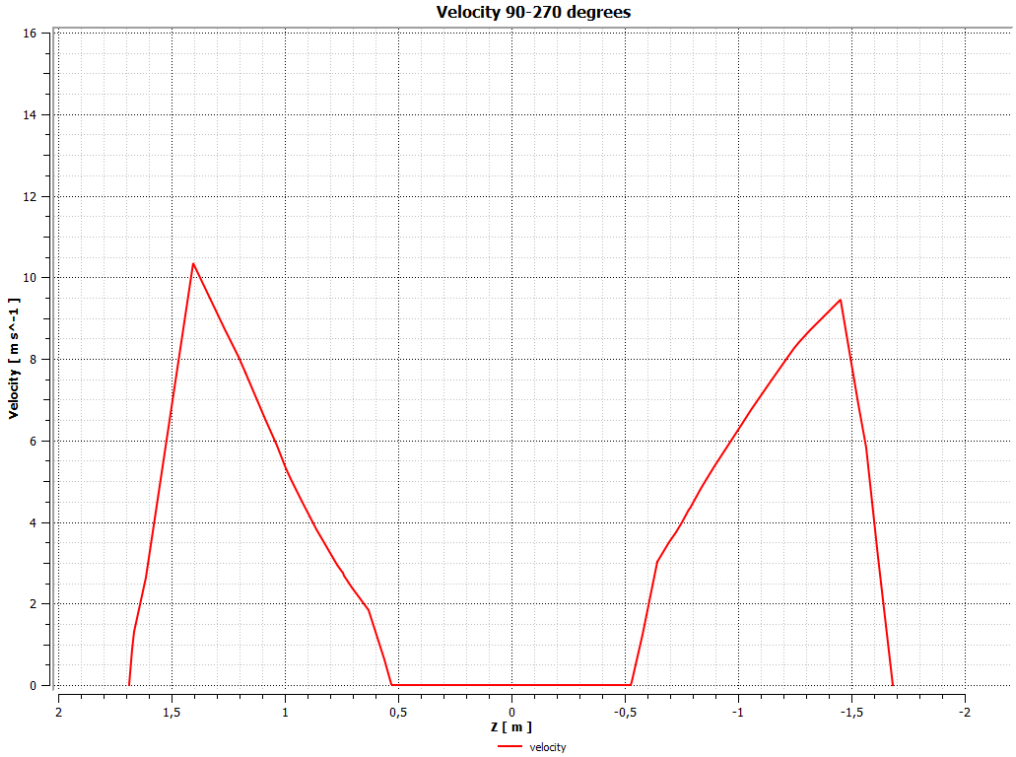

Рисунок 4.18 – Эпюра скоростей продуктов горения от 5$^{\underline{й}}$ горелки в сечении 90-270°

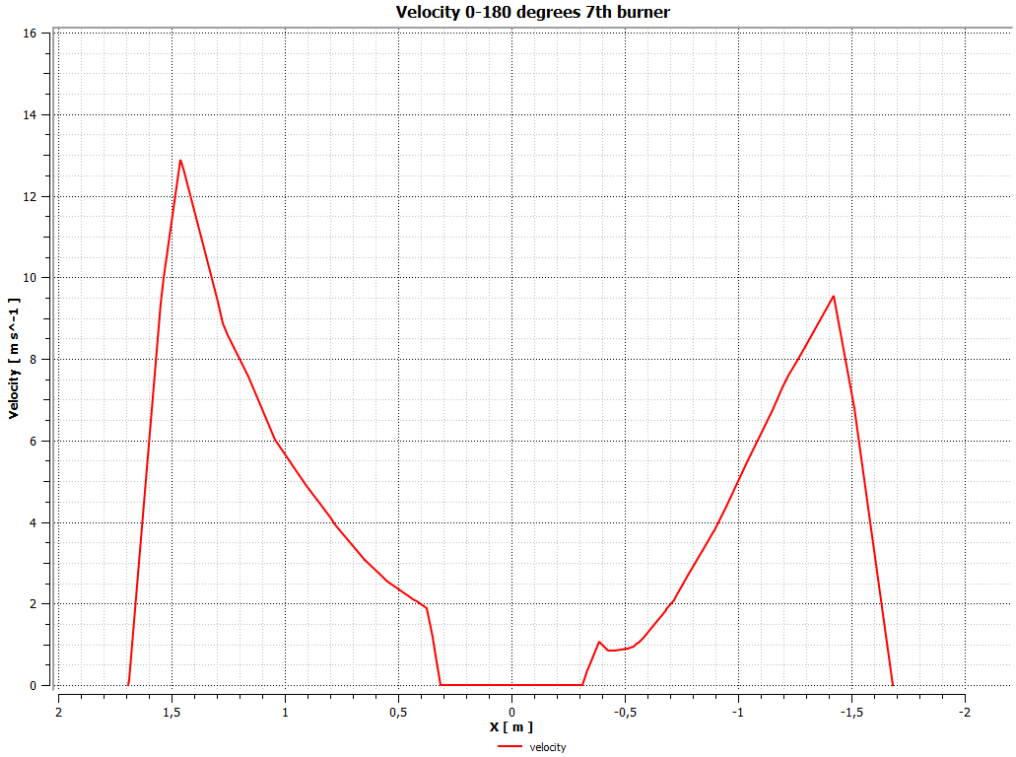

Рисунок 4.19 – Эпюра скоростей продуктов горения от 7$^{\underline{й}}$ горелки в сечении 0-180°

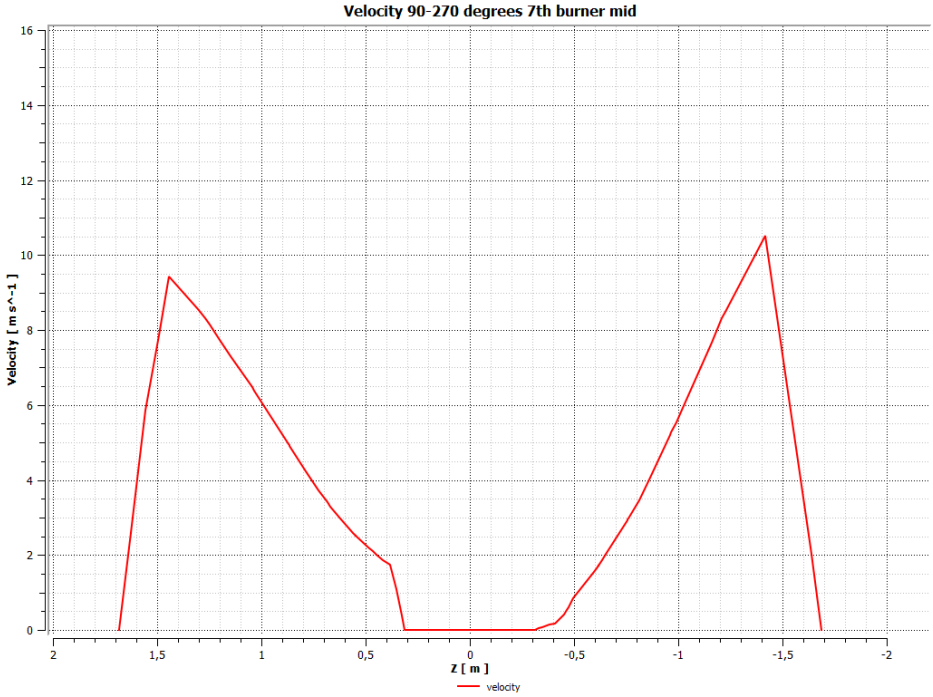

Рисунок 4.20 – Эпюра скоростей продуктов горения от 7^{й} горелки в сечении 90-270°

Для определения кратности циркуляции газов были выделены объемы рабочего пространства в районе горелок №3, 5 и 7 высотой 400 мм каждый. На расстоянии 200 мм вверх и вниз от оси горелки фактически все линии тока имеют горизонтальное направление, что показано на рисунке 4.21, а значит можно считать факел полностью раскрывшимся. Подобные характеристики факела наблюдаются у горелок №3 и №7.

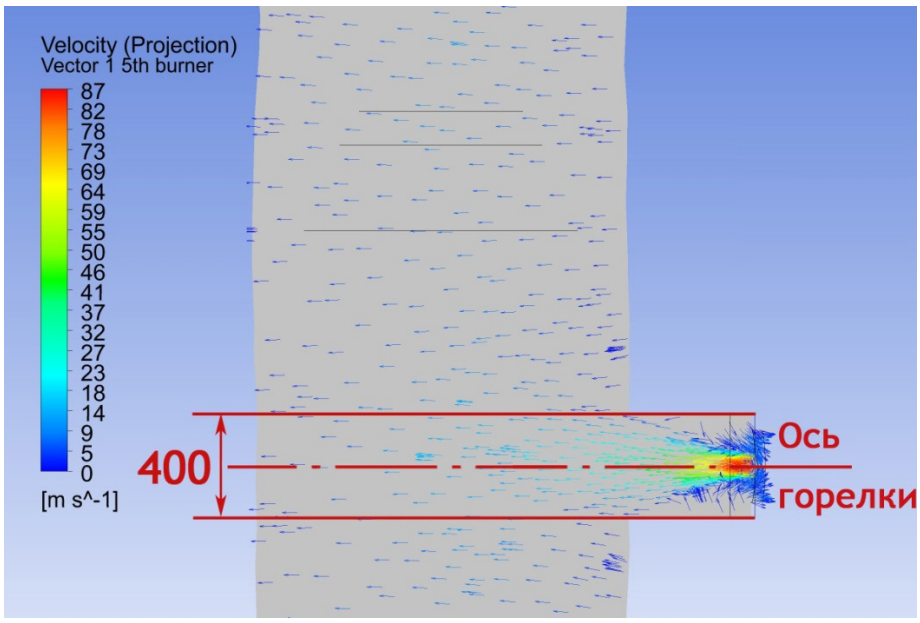

Рисунок 4.21 – Раскрытие факела в вертикальной плоскости

На плоскостях выше и ниже оси горелки на 200 мм также были построены эпюры скоростей в сечениях, указанных на рисунке 4.14. Далее, путем интегрирования были получены средние скорости в сечениях (таблицы 5.3-5.5 для 3^{й}, 5^{й} и 7^{й} горелок соответственно).

Зная условную площадь сечения и скорость газов в нем, определен расход газов в сечении:

$$B_{сеч.} = f \cdot \overline{w}, \text{ где} \quad (4.2)$$

f – площадь сечения условного канала, равная 0,464 м^2,

$\overline{w}$ – средняя скорость в сечении, м/с.

Таблица 4.3 – Средние скорости в сечениях условного канала 3^{й} горелки

Сечение, град.	Скорость на 200 мм ниже оси горелки, м/с	Скорость на оси горелки, м/с	Скорость на 200 мм выше оси горелки, м/с	Средняя скорость в сечении, м/с
0	5,21	5,68	5,43	5,4
90	4,86	4,6	4,93	4,8
180	4,43	4,28	4,21	4,3
270	4,68	4,6	4,82	4,7

Таблица 4.4 – Средние скорости в сечениях условного канала 5^{й} горелки

Сечение, град.	Скорость на 200 мм ниже оси горелки, м/с	Скорость на оси горелки, м/с	Скорость на 200 мм выше оси горелки, м/с	Средняя скорость в сечении, м/с
0	6,1	6,8	6,5	6,5
90	5,2	5,1	5,25	5,2
180	5,25	4,7	4,75	4,9
270	5,75	5,8	5,75	5,8

По данным таблиц 4.3 – 4.5 построены графики скоростей средней и на оси струи в зависимости от пройденного струей пути и сечения рабочего пространства (рис. 4.22 – 4.24). Первая точка соответствует скорости выхода из носика горелки – 82 м/с.

Таблица 4.5 – Средние скорости в сечениях условного канала 7^{й} горелки

Сечение, град.	Скорость на 200 мм ниже оси горелки, м/с	Скорость на оси горелки, м/с	Скорость на 200 мм выше оси горелки, м/с	Средняя скорость в сечении, м/с
0	4,83	5,71	5,68	5,4
90	4,7	4,96	5,07	4,9
180	4	4,14	3,75	4,0
270	4,43	4,43	4,46	4,4

Затем, используя известный расход газов на выходе из горелки, рассчитана кратность циркуляции в сечениях (таблица 4.6):

$$Z = \frac{B_{\text{гор.}}}{B_{\text{сеч.}}} - 1, \text{ где} \qquad (4.3)$$

$B_{\text{гор}}$. – расход газов на выходе из горелки, с учетом реальной температуры, равный 908 м^3/ч.

Таблица 4.6 – Кратность циркуляции

	Сечение, град	Расход газов, м^3/ч	Кратность циркуляции	Средняя кратность циркуляции
Горелка №3 (Зона I)	0	10967	11	9,8
	90	9670	10	
	180	8682	9	
	270	9475	9	

	Сечение, град	Расход газов, $м^3/ч$	Кратность циркуляции	Средняя кратность циркуляции
Горелка №5 (Зона II)	0	10802	11	9,5
	90	8658	9	
	180	8185	8	
	270	9633	10	
Горелка №7 (Зона III)	0	11149	11	9,5
	90	10125	10	
	180	8173	8	
	270	9156	9	

По всем трем сечениям наблюдаются практически одинаковые кратности циркуляции, что говорит о достаточно равномерном распределении газов по рабочему пространству. Благодаря этому достигается высокая равномерность нагрева изделий в печи, оснащенной скоростными горелками.

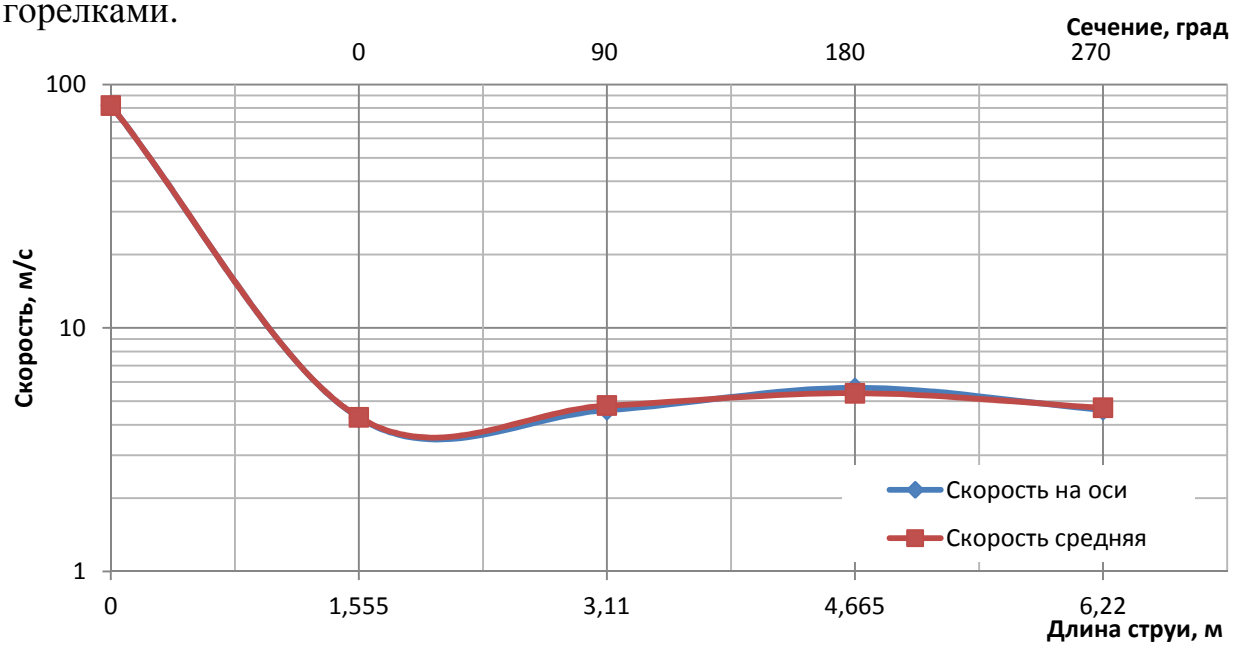

Рисунок 4.22 – Распределение скоростей по длине струи 3^{й} горелки

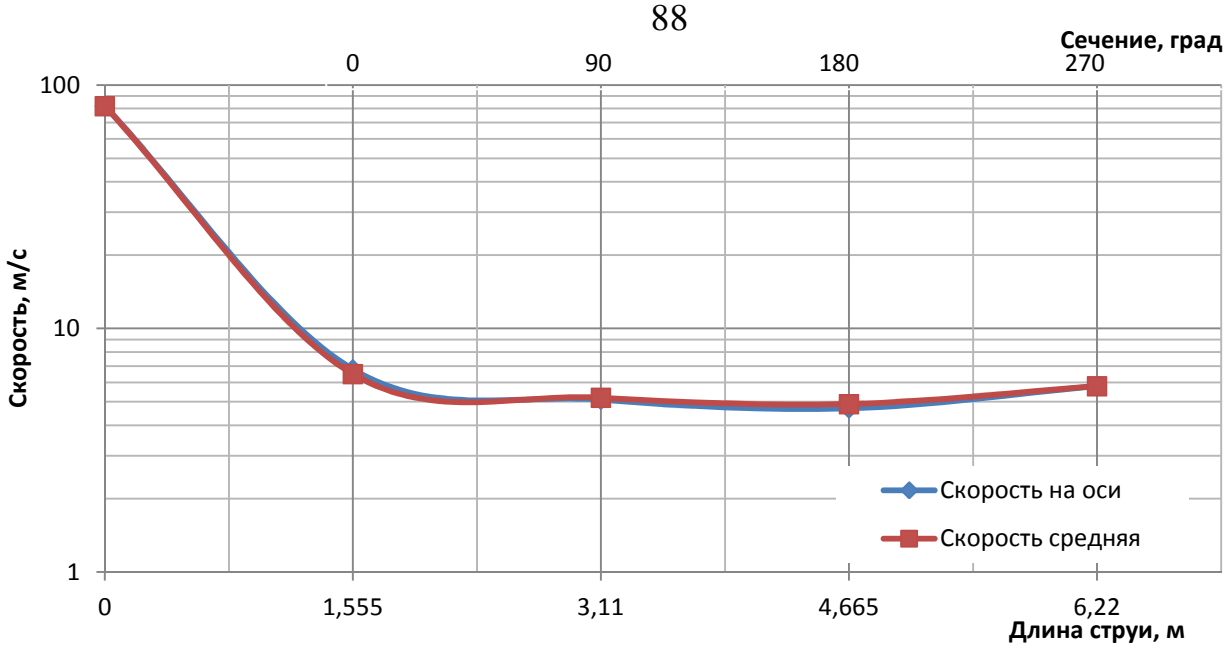

Рисунок 4.23 – Распределение скоростей по длине струи 5^{й} горелки

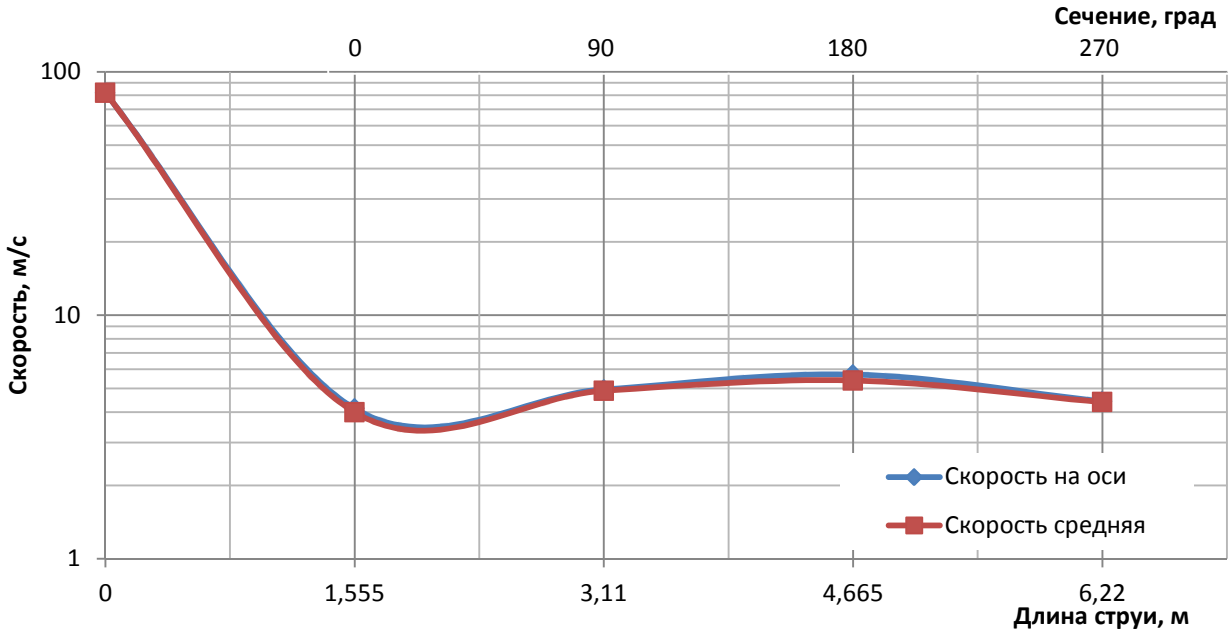

Рисунок 4.24 – Распределение скоростей по длине струи 7^{й} горелки

В ранее проводившихся исследованиях [87] на моделях печей, оснащенных горелками с выходными скоростями продуктов сгорания 20…30 м/с, были получены кратности циркуляции на уровне 2,5…3. Поэтому, полученные значения кратности циркуляции от 9,5 до 9,8 можно считать достаточно высокими. Полученные в данной работе средние значения кратности циркуляции хорошо соотносятся со значениями, выведенными в

[82] для толкательной методической печи, оснащенной тем же типом горелок.

4.4 Определение функциональной зависимости Nu=f(Re) для расчета конвективной составляющей теплообмена

Полученные данные позволяют вывести критериальную зависимость для расчета коэффициента конвективного теплообмена. Коэффициент конвективного теплообмена входит в выражение числа Нуссельта:

$$Nu = \frac{\overline{\alpha_{\text{м.к}}} \cdot L_{\text{э}}}{\lambda_{\text{г}}}, \quad (4.4)$$

где: $\overline{\alpha_{\text{м.к}}}$ – коэффициент конвективного теплообмена, $^{\text{кВт}}/_{(\text{м}^2\text{К})}$,

Lэ – эквивалентный диаметр ротора, м,

$\lambda_{\text{г}}$ – коэффициент теплопроводности газов, $^{\text{Вт}}/_{\text{м} \cdot \text{К}}$.

В свою очередь, число Нуссельта в литературе представляют как функцию чисел Рейнольдса, Прандтля и Грасгофа. Для вынужденного турбулентного движения вдоль поверхности в [88] предлагается выражение:

$$\text{Nu} = \text{C} \cdot \text{Re}^{\text{m}} \cdot \text{Pr}^{\text{n}}. \quad (4.5)$$

Число Рейнольдса определяется выражением:

$$Re = \frac{\overline{w} \cdot L_{\text{э}}}{\upsilon_t}, \quad (4.6)$$

Где υ_t – кинематическая вязкость газов, $м^2/с$.

В ходе промышленного эксперимента проводился нагрев поковки ротора в печи по сложному режиму с несколькими выдержками. Для нахождения средней скорости движения газов в рабочем пространстве в конце каждого интервала нагрева записан фактический расход природного газа. Вывод функциональной зависимости Nu=f(Re, Pr) проводился для трех периодов нагрева, в сечениях рабочего пространства вблизи 3$^{\underline{й}}$, 5$^{\underline{й}}$ и 7$^{\underline{й}}$ горелок. 3$^{\underline{я}}$ горелка расположена в I зоне рабочего пространства, 5$^{\underline{я}}$ – во II зоне, 7$^{\underline{я}}$ – в III зоне (см. рис. 3.3). Расход газа через одну горелку определен, зная, что все они настроены на одинаковую номинальную мощность,

следовательно, имеют одинаковые расходные характеристики. Выход продуктов сгорания определен с учетом большого значения V_{α}=23,48 м^3/м^3, обусловленного особенностями настройки горелок, работающих в импульсном режиме (при прекращении подачи газа, в горелку продолжало подаваться небольшое количество подогретого воздуха для интенсификации теплообмена). Более подробно особенности настроек горелки и проведения теплового режима описаны в разделе 3.3.

Полученные данные сведены в таблицу 4.7. Средний расход продуктов сгорания в расчетных сечениях с учетом кратности циркуляции и температуры представлен в таблице 4.8.

Таблица 4.7 – Расходные характеристики горелки

Интервал нагрева, °С	Расход газа на печь, м^3/ч	Расход газа на горелку, м^3/ч	Выход продуктов сгорания от 1 горелки, м^3/ч
100…500	26,1	2,37	55,7
500…700	58,4	5,31	124,6
700…940	61,4	5,58	131,1

Приведенные в таблице 4.7 расходы получены при нормальных условиях. Из-за сложного режима термообработки необходимо учитывать влияние температуры для каждого из трех интервалов нагрева в отдельности. Для этого, на каждом из трех этапов подъема температуры рассчитаны средние значения температуры рабочего пространства. Средний расход продуктов сгорания в расчетных сечениях с учетом температуры и кратности циркуляции рассчитан по формуле:

$$\overline{\mathrm{B}_t} = \overline{\mathrm{B}_z} \cdot \left(1 + \frac{\overline{t_{\text{г}}}}{273}\right), \qquad (4.7)$$

Где $\overline{\mathrm{B}_z}$ – средний расход с учетом кратности циркуляции, м^3/ч;

$\overline{t_{\text{г}}}$ – средняя температура газов за период, °С.

Таблица 4.8 – Средний расход продуктов сгорания в расчетных сечениях рабочего пространства вблизи 3й (I зона), 5й (II зона) и 7й (III зона) горелок, $м^3/ч$

Интервал нагрева, °С	Средняя температура р.п., °С	Зона I	Зона II	Зона III
100…500	Нормальные условия	598,8	529,2	529,2
500…700		1339,8	1184,1	1184,1
700…940		1408,7	1244,9	1244,9
100…500	300	1256,8	1110,7	1110,7
500…700	600	4284,5	3786,3	3786,3
700…940	820	5639,8	4984,0	4984,0

Далее, зная геометрические размеры сечения для прохода газов, в каждой из зон рассчитаны средние скорости движения газов в рабочем пространстве (таблица 4.9).

Таблица 4.9 – Средние скорости движения газов в рабочем пространстве печи

		Зона I	Зона II	Зона III
Ширина сечения, м		1,4	1,16	1,375
Высота сечения, м		0,4	0,4	0,4
Площадь сечения, $м^2$		0,56	0,46	0,55
Средняя скорость движения газов, м/с	За интервал нагрева 100…500 °С	0,62	0,66	0,56
	За интервал нагрева 500…700 °С	2,1	2,3	1,9
	За интервал нагрева 700…940 °С	2,8	3,0	2,5

Кинематическая вязкость газов определена на основании данных газоанализа. В виду сложного теплового режима, а также особенностей

настройки и работы горелок, по мере нагрева печи изменяется состав газовой среды в рабочем пространстве. В расчетах использовали осреднение по каждому из трех этапов нагрева. Полученные результаты представлены в таблице 4.10.

В качестве эквивалентного диаметра использован диаметр поковки ротора в сечении, проходящем через ось соответствующей горелки. Данные, необходимые для расчета числа Рейнольдса сведены в таблицу 4.11. Полученные значения числа Re для каждого периода нагрева в каждой из зон представлены в таблице 4.12.

Таблица 4.10 – Состав газовой среды в рабочем пространстве

Интервал нагрева, °С	O_2, %	CO_2, %	H_2O, %	N_2, %	Кинематическая вязкость газов, $м^2/с$
100…500	11,91	5,05	8,36	74,68	$4,5\cdot10^{-5}$
500…700	9,76	6,28	10,21	73,75	$9,2\cdot10^{-5}$
700…940	9,1	5,76	10,71	74,43	$1,3\cdot10^{-4}$

Таблица 4.11 – Данные для расчета чисел Рейнольдса

Зона	Параметр	Интервал нагрева, °С		
		100…500	500…700	700…940
I	Средняя скорость, м/с	0,62	2,13	2,8
	Эквивалентный диаметр, м	0,58		
II	Средняя скорость, м/с	0,66	2,27	2,98
	Эквивалентный диаметр, м	1,06		
III	Средняя скорость, м/с	0,56	1,91	2,52
	Эквивалентный диаметр, м	0,885		
	Кинематическая вязкость газов, $м^2/с$	$4,5\cdot10^{-5}$	$9,2\cdot10^{-5}$	$1,3\cdot10^{-4}$

Таблица 4.12 – Числа Рейнольдса

Интервал нагрева, °С	Зона I	Зона II	Зона III
100…500	8072	15734	11082
500…700	13459	26235	18479
700…940	12037	23463	16526

Коэффициент конвективного теплообмена для трех этапов нагрева каждой из зон был рассчитан в главе 3 (таблица 3.7). Средние за каждый период нагрева значения коэффициента теплопроводности газов были определены на основании справочных данных [88]. Данные, необходимые для расчета числа Нуссельта, сведены в таблицу 4.13, а полученные значения – в таблицу 4.14.

Среднее значение числа Прандтля рассчитано по [89] для газов рабочего пространства, с учетом их реального состава для каждого интервала нагрева. Pr = 0,624.

В зоне II находится часть ротора самого большого диаметра, наблюдаются самые высокие плотности тепловых потоков и скорости движения газов, поэтому дальнейшие расчеты производились для зоны II.

Таблица 4.13 – Данные для расчета числа Нуссельта

Зона	Параметр	Интервал нагрева, °С		
		100…500	500…700	700…940
I	Средний коэффициент конвективного теплообмена, Вт/м^{2}К	52,4	382,4	282,6
	Эквивалентный диаметр, м	0,58		

Зона	Параметр	Интервал нагрева, °С		
		100…500	500…700	700…940
II	Средний коэффициент конвективного теплообмена, Вт/м^{2}К	32,6	114,7	233,9
	Эквивалентный диаметр, м	1,06		
III	Средний коэффициент конвективного теплообмена, Вт/м^{2}К	23,9	89,3	133,7
	Эквивалентный диаметр, м	0,885		
	Средний коэффициент теплопроводности газов, Вт/мК	0,039	0,054	0,066

Таблица 4.14 – Числа Нуссельта

Интервал нагрева, °С	Зона I	Зона II	Зона III
100…500	787	895	548
500…700	4072	2232	1451
700…940	2502	3785	1806

Для определения значения степени m в выражении 4.5 воспользовались графическим методом, описанным в [88]. Для этого построили график зависимости Nu=f(Re) в логарифмических координатах. Значение m определяется как тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс, или как отношение катетов. Значение коэффициента С определяется из соотношения $C = Nu/(Re^m \cdot Pr^n)$. На рисунке 4.25 видно, что опытные точки не

укладываются на одну прямую, следовательно значения C и m будут различны для каждого из интервалов нагрева. Для первого участка графика m=0,8. Для второго участка графика m=1,5. Значение степени n приняли равным 0,43 [88].

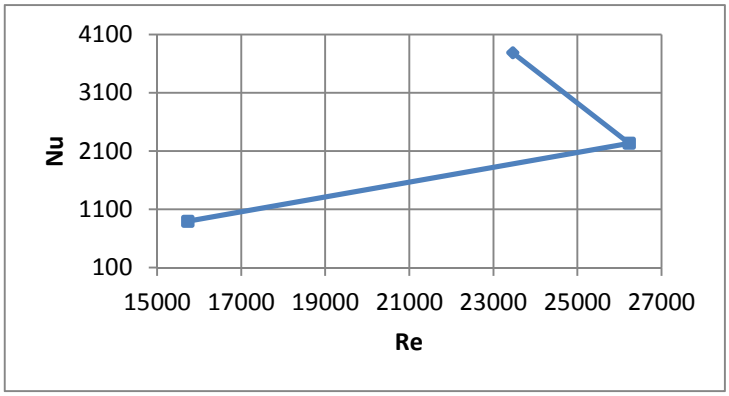

Рисунок 4.25 – график зависимости Nu=f(Re)

Соответственно, для первого и второго интервала нагрева зависимость 4.5 принимает вид:

$$Nu = C \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43},$$

Отсюда коэффициент C для интервала нагрева 100…500 °C равен:

$$C = \frac{895}{15734^{0,8} \cdot 0,624^{0,43}} = 0,481,$$

Окончательный вид зависимости Nu=f(Re,Pr) для нагрева 100…500 °C:

$$Nu = 0,481 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \quad (4.8)$$

Для интервала нагрева 500…700 °C:

$$C = \frac{2232}{26235^{0,8} \cdot 0,624^{0,43}} = 0,797,$$

$$Nu = 0,797 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \quad (4.9)$$

Для интервала 700…940 °C:

$$Nu = C \cdot Re^{1,5} \cdot Pr^{0,43},$$

$$C = \frac{3785}{23463^{1,5} \cdot 0,624^{0,43}} = 0,026.$$

$$Nu = 0,026 \cdot Re^{1,5} \cdot Pr^{0,43} \quad (4.10)$$

4.5 Выводы

Трехмерное моделирование с применением современных аппаратных средств и программных комплексов позволяет значительно упростить задачу получения картины движения газов в рабочем пространстве печи. С помощью компьютерного моделирования удалось в довольно сжатые сроки определить скорости движения газов в рабочем пространстве вертикальной термической печи при проведении технологического процесса термообработки. Высокие кратности циркуляции, полученные в ходе обработки результатов моделирования, хорошо соотносятся с большой долей конвекции во внешнем теплообмене, рассчитанной по опытным данным.

Моделирование подтвердило эффективность применения высокоскоростных рекуперативных горелок в вертикальных термических печах. Равномерное поле скоростей движения газов и высокая кратность циркуляции в рабочем пространстве позволяют достичь высокого качества нагрева, а значит повысить качество продукции и значительно снизить долю брака, тем самым увеличив эффективность всего производственного процесса, исключив затраты энергии и ресурсов на повторную термообработку.

С использованием модельных и опытных данных получены зависимости Nu=f(Re,Pr) (Выражения 4.8, 4.9, 4.10, таблица 4.15). Существенное отличие коэффициентов С и значения степени числа Рейнольдса для разных этапов нагрева обусловлено увеличением тепловой мощности печи по мере нагрева металла, что приводило к увеличению скоростей и температуры газов в рабочем пространстве, изменению их состава.

Увеличение скоростей движения газов в рабочем пространстве по мере его нагрева является особенностью, общей для всех печей, а изменение состава газов (уменьшение коэффициента избытка воздуха) в рабочем пространстве – характерная черта, присущая печам, оснащенным горелками

фирмы Kromscroeder, причины которой описаны в разделе 3.3. В комплексе две эти причины выражаются в значительной разнице коэффициентов конвективного теплообмена в зависимости от температуры, что приводит к необходимости проводить расчеты подобных печей с использованием функциональных зависимостей чисел подобия разного вида в зависимости от температуры.

Таблица 4.15 – функциональные зависимости Nu=f(Re,Pr) для II зоны.

Интервал нагрева, °С	Вид зависимости
100…500	$Nu = 0{,}481 \cdot Re^{0{,}8} \cdot Pr^{0{,}43}$
500…700	$Nu = 0{,}797 \cdot Re^{0{,}8} \cdot Pr^{0{,}43}$
700…940	$Nu = 0{,}026 \cdot Re^{1{,}5} \cdot Pr^{0{,}43}$

Анализ модельных данных позволяет высказать предположение о том, что конвективную составляющую теплообмена можно увеличить путем разделения садок на две печи с соответствующими размерами рабочего пространства. В одной печи осуществлять тепловую обработку протяженных изделий малого диаметра – поковок роторов турбин. В другой печи обрабатывать менее протяженные поковки опорных валков, имеющие больший диаметр. Данное разделение позволит значительно увеличить коэффициент заполнения рабочего пространства металлом, скорости движения и кратность циркуляции газов в рабочем пространстве, что выразится в интенсификации теплообмена конвекцией и, в конечном итоге, приведет к уменьшению расхода топлива на нагрев садки, как один из факторов энергосбережения.

5 ТЕПЛООБМЕН ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ПОКОВКИ РОТОРА ТУРБИНЫ В ПЕЧИ СТРУЯМИ ВОЗДУХА, ПОДАВАЕМОГО ЧЕРЕЗ РЕКУПЕРАТВНЫЕ ГОРЕЛКИ

Данная глава предназначена для выявления возможности увеличения ресурса времени занятости печи технологическим процессом и сокращения непроизводственных операций по перемещению обрабатываемого металла из печи на воздух и обратно в печь при сложных режимах тепловой обработки изделий. Возможность последовательного проведения режима нагрева и охлаждения металлической продукции в одной и той же печи при сохранении качества термической обработки приводит к увеличению производительности печи и снижению расхода топлива.

Проведен промышленный эксперимент нагрева поковки ротора турбины с последующим регламентированным охлаждением ее струями воздуха, подаваемого через рекуперативные горелки по режиму нормализации с высоким отпуском. При осуществлении режима нормализации, в стандартной технологии охлаждение изделия осуществлялось в специальной камере за счет продувки воздухом.

Особенность режима охлаждения струями воздуха прямо в печи заключается в том, что воздух подается в печь через рекуперативные горелки после отключения подачи газа по окончании режима нагрева. Подаваемый в печь воздух охлаждает нагретый металл и футеровку печи, и будучи сам нагрет, удаляется из печи через горелки, нагревая при этом их рекуператоры, которые в свою очередь передают тепло воздуху для охлаждения печи с садкой. По мере охлаждения печи с садкой происходит уменьшение количества удаляемого из печи тепла и постепенное снижение температуры рекуператоров горелок и охлаждающего воздуха, подаваемого в печь. В этом и заключается сложность расчета характеристик теплообмена при струйном охлаждении садки металла в печи с помощью рекуперативных горелок.

Для определения характеристик теплообмена в ходе промышленного эксперимента применялись аппаратные измерения, а также было проведено компьютерное моделирование газодинамики в рабочем пространстве модели печи с садкой, позволившее выявить характер движения газовой среды и величину скорости потоков в различных плоскостях свободного пространства печи.

Расчет характеристик теплообмена при охлаждении поковки ротора осложняется тем, что воздух, поступающий в печь, охлаждает и металл и футеровку печи одновременно. Другая особенность этих расчетов заключается в том, что поковка ротора имеет сложную геометрию с переменными диаметрами по длине, и, следовательно, переменную массу отдельных частей поковки. В связи с этим дальнейшие расчеты теплообмена «металл-футеровка» проводили для самой крупной (с самым большим диаметром и массой) части ротора – «бочки» поковки (см. рисунок 3.4). Необходимые для дальнейших расчетов геометрические параметры «бочки» ротора представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Геометрические параметры «бочки» ротора

Наименование	размерность	Величина
Диаметр	мм	1060
Длина	мм	2050
Боковая поверхность	$м^2$	7,49
Объем	$м^3$	1,81
Плотность	$кг/м^3$	7850
Масса	кг	14201

Для определения количества теплоты, снимаемой охлаждающим воздухом отдельно с «бочки» ротора и с футеровки печи в зоне расположения бочки необходимо составить локальный тепловой баланс зоны, где работают три горелки (№4,5,6 см. рисунок 3.3). Экспериментальные данные по температурам «бочки» ротора, футеровки

печи и воздуха охлаждения представлены графиком на рисунке 5.1 и таблицей 5.2.

Значения температур, помещенных в таблицу 5.2, взяты из графиков 5.1, где все значения температур (кроме температуры воздуха, входящего в печь через горелки) получены прямыми измерениями при проведении экспериментального охлаждения поковки ротора. Температура входящего в печь через горелки воздуха охлаждения получены путем пересчета температуры уходящего из печи воздуха с применением коэффициента рекуперации горелки, изменяющегося с изменением температуры (значения коэффициента предоставлены фирмой-изготовителем горелок).

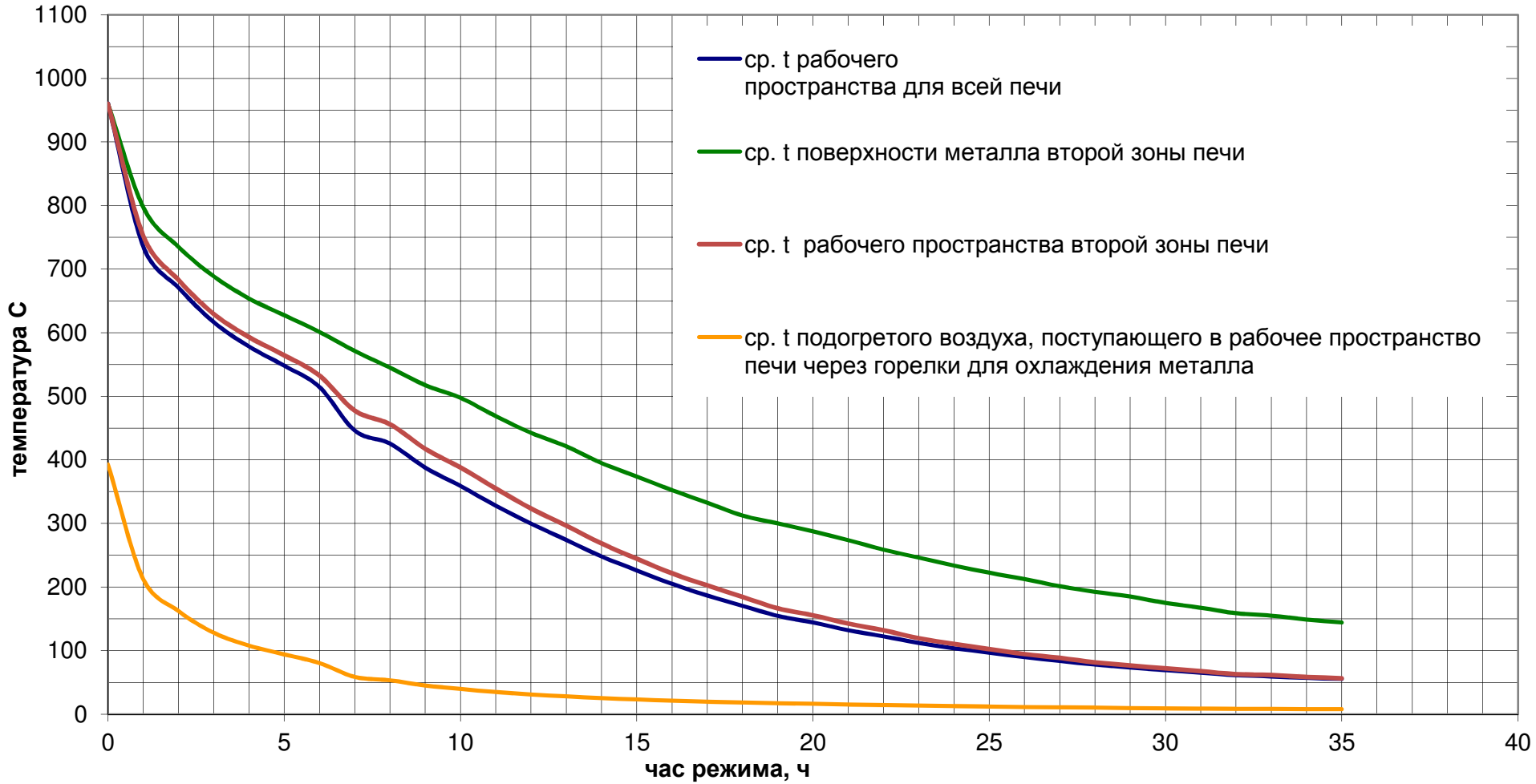

Рисунок 5.1 – Изменение температуры печи, металла и охлаждающего воздуха на этапе режима охлаждения

Поскольку все кривые на графике носят экспоненциальный характер, то получение средних значений температур по линейному закону невозможно. Поэтому на всем временном отрезке охлаждения (35 часов) последовательно выделяются участки, на которых можно провести линейное осреднение параметров, и далее с учетом локального времени участка производится долевое осреднение каждого температурного параметра.

Таблица 5.2 – Экспериментальные данные по температурам при охлаждении II зоны печи

Время от начала охлаждения,ч	Средняя температура поверхности бочки, ^{o}C	Температура воздуха, уходящего из печи, ^{o}C	Коэффициент рекуперации горелок	Температура воздуха, входящего в печь, ^{o}C
0	960	960	0,417	400
1	790	750	0,267	200
3	690	630	0,198	125
5	625	560	0,177	99
7	575	475	0,116	55
10	500	380	0,105	40
15	375	245	0,102	25
20	290	155	0,097	15
25	225	100	0,120	12
30	175	75	0,107	8
35	150	50	0,106	8

В целях определения характеристик теплообмена при охлаждении поковки ротора составлен локальный тепловой баланс II зоны печи, в которой находилась «бочка» поковки ротора турбины.

5.1 Локальный тепловой баланс II зоны печи при ее охлаждении с садкой

На II зону печи, где расположена бочка ротора, оказывают влияние три горелки (№4, №5, №6 – рис. 3.3). Исходные условия для расчета теплового баланса II зоны представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Исходные данные для расчета локального теплового баланса II зоны печи при охлаждении

Наименование параметра	размерность	Величина
Количество горелок	шт	3
Расход воздуха на одну горелку	$м^3/ч$	275
Расход воздуха на три горелки	$м^3/ч$ при нормальных усл.	825
Средняя температура входящего в печь воздуха охлаждения за 35 часов	^oC	44,7
Средняя температура уходящего из печи воздуха	^oC	276,8

Количество теплоты, получаемой воздухом за время охлаждения 35 часов в II зоне печи, определяли по формуле:

$$\Delta Q_{вII} = V_{вII} \cdot \tau_{\Sigma охл}(\overline{t_{в.вых}} \cdot C_в - \overline{t_{в.вх}} \cdot C_в), кДж, \quad (5.1)$$

Где $V_{вII}$ – расход воздуха от трех горелок, м3/ч;

$\tau_{\Sigma охл}$ – общее время охлаждения печи, ч;

$\overline{t_{в.вых}}$ – средняя температура уходящего из печи воздуха, ^oC;

$\overline{t_{в.вх}}$ – средняя температура входящего в печь воздуха охлаждения, ^oC;

$C_в$ – соответствующие средним температурам теплоемкости воздуха, $кДж/м^3К$;

$$\Delta Q_{вII} = 825 \cdot 35(276{,}8 \cdot 1{,}339 - 44{,}7 \cdot 1{,}321) = 8997061 \text{ кДж}.$$

Для определения количества теплоты, отданного «бочкой» ротора во второй зоне, необходимо определить среднемассовую температуру бочки в конце охлаждения через относительные температуры поверхности и середины, числа подобия Фурье и Био. Для этого определили температуропроводность на этапе охлаждения:

$$а_м = \frac{\overline{\lambda_м}}{\overline{C_м}} = \frac{31{,}3}{0{,}798 \cdot 7850} = 4{,}997 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с},$$

$$\overline{C_м} = \frac{0689 \cdot 960 - 0{,}536 \cdot 400}{960 - 400} = 0{,}798 \text{ кДж}/\text{кг} \cdot \text{К}.$$

Число Фурье:

$$Fo_{II} = \frac{а_м \cdot \tau}{R^2} = \frac{4.997 \cdot 10^{-6} \cdot 35 \cdot 3600}{0.53^2} = 2.24.$$

Средняя температура поверхности «бочки» ротора:

$$\overline{t_{повII}} = \frac{(t_{n1} + t_{n2} + \cdots + t_{ni})/n_i \cdot \tau_i}{\tau_\Sigma}, \text{°C},$$

Где t_{ni} – измеренные значения температуры поверхности ротора, °С;

τ_i – время этапа охлаждения, ч;

τ_Σ – суммарное время охлаждения, ч.

$$\overline{t_{повII}} = \frac{(960 + 790 + 690)/3 \cdot 3}{35} + \frac{(625 + 575 + 500)/3 \cdot 7}{35}$$
$$+ \frac{(375 + 290 + 225)/3 \cdot 15}{35} + \frac{(175 + 150)/2 \cdot 10}{35} = 356{,}6\text{°C}.$$

Относительная температура поверхности «бочки» ротора при охлаждении:

$$\Theta_{повII} = \frac{\bar{t}'_{вII} - \bar{t}_{повII}}{\bar{t}'_{вII} - t_{м.нач}} = \frac{44{,}7 - 356{,}6}{44{,}7 - 960} = 0{,}34.$$

При Fo_{II}=2,24 и $\Theta_{повII}$=0,34 из[80] графическим способом определили число Био Bi_{II}=0,22 и относительную температуру массы «бочки» ротора $\Theta_{мII}$=0,4. Отсюда, температура массы «бочки» ротора в конце охлаждения:

$$t_{мIIкон} = \bar{t}_{вII} - (\bar{t}_{вII} - t_{нач}) \cdot \Theta_{мII} = 44{,}7 - (44{,}7 - 960) \cdot 0{,}4 = 410{,}8\text{°C}.$$

Количество теплоты, отданной «бочкой» ротора при охлаждении воздухом, подаваемым через горелки:

$$\Delta Q_{\text{м}II} = G_{\text{м}II} \cdot (t_{\text{м.нач}II} \cdot \text{C}_{\text{м.нач}} - t_{\text{м.кон}II} \cdot \text{C}_{\text{м.кон}}), \text{кДж}, \quad (5.2)$$

$$\Delta Q_{\text{м}II} = 14194 \cdot (960 \cdot 0{,}689 - 410{,}8 \cdot 0{,}537) = 6257283 \text{ кДж}.$$

Количество теплоты, отданной футеровкой воздуху во II зоне печи (деаккумуляция футеровки) за все время охлаждения определяли по выражению:

$$\Delta Q_{\text{фут}II} = G_{\text{фут}II} \cdot \bar{\text{C}}_{\text{фут}}(\bar{t}_{\text{фут.нач}} - \bar{t}_{\text{фут.кон}}), \text{кДж}, \quad (5.3)$$

Где $\bar{\text{C}}_{\text{фут}} = 0{,}93$ кДж/кг · К – теплоемкость футеровки;

G_{futII} – масса футеровки II зоны печи.

$$G_{\text{фут}II} = \left(D_{\text{нар}}^2 - D_{\text{вн}}^2\right)\frac{\pi}{4} \cdot L_{II} \cdot \rho_{\text{фут}}, \text{кг},$$

Где $D_{вн}$=3,38м – внутренний диаметр футеровки;

$D_{нар}$=4,0м – наружный диаметр футеровки, при толщине стен 310мм;

L_{II}=2,16м – высота II зоны (расстояние между осями горелок №4 и №6;

$\rho_{фут}$=200 кг/м^3 – плотность футеровки.

$$G_{\text{фут}II} = (4{,}0^2 - 3{,}38^2) \cdot 0{,}785 \cdot 2{,}16 \cdot 200 = 1560\text{кг}.$$

Среднемассовые температуры футеровки рассчитывали как среднеарифметические при условии стационарного теплового состояния футеровки вначале и в конце режима охлаждения при большом диаметре футеровки печи.

Начальная среднемассовая температура футеровки II зоны печи:

$$\bar{t}_{\text{фут.нач}} = (960 + 50) \cdot 0{,}5 = 505°\text{C}.$$

Конечная среднемассовая температура футеровки II зоны печи:

$$\bar{t}_{\text{фут.кон}} = (50 + 10) \cdot 0{,}5 = 30°\text{C}.$$

Количество теплоты, отданной футеровкой воздуху во II зоне печи по (5.3):

$$\Delta Q_{\text{фут}II} = 1560 \cdot 0{,}93 \cdot (505 - 30) = 689130 \text{ кДж}.$$

Футеровка, также, теряет тепло и вследствие теплопроводности (В.Ф Ратников [80]). Усиленное охлаждение внутренней поверхности футеровки вызывает ускоренный отток тепла с наружной поверхности футеровки, что приводит к ее быстрому остыванию. Этот отток тепла учитывали используя формулу Г.П. Иванцова:

$$Q_{\text{т}} = \bar{\alpha}_{\text{нар}}\left(\bar{t}_{\text{фут.нар.нач}} - \bar{t}_{\text{фут.нар.кон}}\right) \cdot F_{\text{нар}II} \cdot 0{,}001 \cdot \tau, \text{кДж},$$

$$\bar{\alpha}_{\text{нар}} = 10 + 0{,}06 \cdot \bar{t}_{\text{фут.нар}} = 10 + 0{,}06 \cdot 30 = 11{,}8\ {}^{\text{Вт}}/_{\text{м}^2 \cdot \text{К}},$$

$$\bar{t}_{\text{фут.нар}} = (50 + 10) \cdot 0{,}5 = 30°\text{C},$$

$$F_{\text{фут.нар.}} = \pi \cdot D_{\text{нар}} \cdot L_{II} = 3{,}14 \cdot 4{,}0 \cdot 2{,}16 = 27{,}13\text{м}^2.$$

$$Q_{\text{т}II} = 11{,}8 \cdot (50 - 10) \cdot 27{,}13 \cdot 0{,}001 \cdot 35 \cdot 3600 = 1613475 \text{ кДж}.$$

Таким образом, футеровка и «бочка» ротора отдали количество теплоты (методика В.Ф. Ратникова [80]):

$$\Delta Q_{\text{фут}II} + \Delta Q_{\text{м}II} + \Delta Q_{\text{т}II} = 689130 + 6257283 + 1613475 = 8559888 \text{ кДж}.$$

В то же время воздух унес тепло из II зоны печи $\Delta Q_{вII}$ = 8997161 кДж.

Невязка баланса уноса тепла из II зоны печи:

$$\delta Q_{\text{охл}} = \frac{\Delta Q_{\text{возд}II} - \Delta Q_{\text{м}II} - \Delta Q_{\text{фут}II} - \Delta Q_{\text{т}II}}{\Delta Q_{\text{возд}II}} \cdot 100 =$$

$$= \frac{8997161 - 8559888}{8997161} \cdot 100 = 4{,}86\%$$

5.2 Выводы

Учитывая сложность проведенного эксперимента и расчетов, основанных на экспериментальных данных только по одной из зон рабочего пространства печи, такое расхождение между приходом и расходом теплоты при охлаждении печи можно считать допустимым. Предположительно невязка вызвана перемещением воздуха, введенного в II зону, в I зону, расположенную выше.

Проведенный локальный расчет теплового баланса при охлаждении садки металла в печи показал эффективность такого метода охлаждения.

Большую часть тепла (73,1%) охлаждающий воздух получает от нагретой поковки ротора турбины, в то время как дополнительные затраты на охлаждение футеровки составляют всего 8,1% (689130 кДж). При этом 18,8% отдаваемого II зоной тепла уходит в окружающее пространство в виде теплопроводности от наружной поверхности футеровки. Отсутствие в необходимости перемещать изделие из печи для охлаждения, а также необходимости в специальных устройствах для проведения охлаждения только увеличивают энергоресурсоэффективность описываемой технологии тепловой обработки крупногабаритных изделий из качественных сталей.

Проведение нагрева и охлаждения последовательно в одном агрегате исключает неконтролируемое охлаждение изделия с недостаточной скоростью. Охлаждение воздухом, подаваемым через скоростные рекуперативные горелки, позволяет достичь скоростей достаточных для получения требуемых механических и физических свойств. Применение данного типа горелочных устройств создает равномерное поле скоростей в рабочем пространстве, что позволяет получить более однородную структуру по поверхности и сечению обрабатываемых металлических изделий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнение финишной термообработки в новом тепловом агрегате по предложенной в данной работе технологии позволило существенно сократить энергетические затраты на проведение одного из важнейших этапов производства роторов крупных турбин из высококачественных сталей. Средний расход топлива за самый энергозатратный период нагрева 700…940 °С составил 53,67 $м^3$/ч, полученный удельный расход условного топлива за этот период – 12,45 кг у.т./т, что на 71% меньше удельного расхода условного топлива этой же термической печи до технического перевооружения.
2. Применение скоростных рекуперативных горелок позволило значительно увеличить долю конвективной составляющей теплообмена, интенсифицировать теплообмен и добиться высокой равномерности нагрева изделия сложной формы. Это подтверждают результаты обработки опытных данных, проведенные в четвертой главе: доля конвекции во внешнем теплообмене составила в среднем 61% во всем интервале температур; равномерность поля температур по поверхности изделия составила ±5 °С, несмотря на разницу диаметров частей ротора (рисунок 3.4).
3. Высокая доля конвективной составляющей обусловлена большой кратностью циркуляции газов в рабочем пространстве печи, что подтверждено результатами обработки данных, полученных в ходе трехмерного компьютерного моделирования газодинамики. Среднее значение кратности циркуляции в печи составило 9,6. Также с использованием модельных и опытных данных были получены аппроксимирующие зависимости Nu=f(Re,Pr) для каждого из этапов нагрева, на основе которых можно производить расчет нагрева металла в печах со схожей геометрией рабочего пространства.

4. Особенностью технологии термообработки, предложенной в данной работе, является последовательное проведение нагрева металла и охлаждение воздухом в одном агрегате. Благодаря отсутствию промежуточных технологических операций между высокотемпературной выдержкой и охлаждением удалось значительно сократить время, требующееся на проведение термообработки, получить изделие с более равномерной структурой заданного состава. Тем самым повысилась эффективность всей технологии изготовления роторов крупных турбин при увеличении качества продукции.
5. Результатом внедрения новой энергоресурсосберегающей технологии термообработки роторов крупных турбин является повышение производительности и качества готовой продукции. Благодаря оснащению агрегата (камерной вертикальной газовой термической печи) скоростными рекуперативными горелками, волокнистой футеровкой и системой автоматического управления значительно повысилось качество нагрева при сокращении затрат энергии и ресурсов. Данный факт подтверждается отзывом, полученным от ПАО «Уралмашзавод» (приложение 1), где внедрена данная технология и печь для ее проведения.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования:

1. Для повышения энергоэффективности рекомендуется для термообработки роторов (протяженных изделий с малым диаметром) и валков (изделий большого диаметра и малой длины) использовать две специализированных печи с соответствующими габаритами рабочего пространства.
2. Для разработки конструкций двух специализированных печей необходимо выполнить расчет нагрева металла по предложенной технологии, с использованием полученных в данной работе

соотношений конвективной и лучистой составляющих теплообмена для каждого из этапов нагрева.

3. Более эффективную геометрию рабочего пространства двух печей позволит получить трехмерное компьютерное моделирование процессов газодинамики.
4. Для проверки тепловых расчетов компьютерное моделирование процессов газодинамики в дальнейшем целесообразно дополнить моделированием теплообмена между печным пространством и садкой.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

КПД – коэффициент полезного действия.

АСУ – автоматическая система управления.

АРМ – автоматизированное рабочее место.

$\Delta Q_м$ – суммарное количество теплоты, полученное металлом, кДж.

$G_м$ – масса металла, кг.

$\bar{c}_м$ – средняя теплоемкость металла в интервале температур, $\frac{Дж}{кг \cdot К}$.

$\Delta t_м$ – разность среднемассовых температур металла вначале и в конце периода, °С.

$\bar{q}_{м\Sigma}$ – плотность суммарного теплового потока, воспринятого металлом, $Вт/м^2$

$F_м$ – площадь поверхности нагреваемого металла, $м^2$.

$\Delta\tau$ – интервал времени нагрева металла на каждом этапе подъема температуры печи, с.

$\bar{\alpha}_\Sigma$ – суммарный коэффициент теплообмена между рабочим пространством печи и поверхностью металла, $Вт/(м^2К)$.

$\bar{t}_{печ}$ – средняя температура рабочего пространства печи за период подъема температуры, °С.

$\bar{t}_{пов}$ – средняя температура поверхности нагреваемого металла за период подъема температуры, °С.

$\bar{q}_{м.л}$ – средняя плотность теплового потока излучением, воспринятого металлом, $Вт/м^2$.

$C_{гкм}$ – приведенный коэффициент излучения в системе газ-кладка-металл, $Вт/(м^2К^4)$.

$\bar{T}_{печ}$ – средняя температура рабочего пространства печи, К.

$\bar{T}_{пов}$ – средняя температура поверхности нагреваемого металла, К.

$\bar{\alpha}_л$ – коэффициент лучистого теплообмена между рабочим пространством печи и поверхностью металла, $Вт/(м^2К)$.

$\overline{q}_{м.к}$ – плотность теплового потока конвекцией, воспринятого металлом, $Вт/м^2$.

$\overline{\alpha}_{м.к}$ – коэффициент конвективного теплообмена между рабочим пространством печи и поверхностью металла, $кВт/(м^2К)$.

$V_{р.п.}$ – объем рабочего пространства, $м^3$.

$V_{мет.}$ – объем нагреваемого металла (изделия), $м^3$.

$V_{пр}$ – объем приспособления (траверсы), удерживающего нагреваемое изделие, $м^3$.

$V_{св}$ – свободный объем рабочего пространства, $м^3$.

$F_{фут}$ – площадь внутренней поверхности футеровки, $м^2$.

$F_{пр}$ – площадь поверхности траверсы, удерживающей нагреваемое изделие, $м^2$.

$S_{эф}$ – эффективная длина луча, м.

$Q^р_н$ – низшая теплота сгорания топлива, $кДж/м^3$.

α – коэффициент избытка воздуха.

L_0 – расход воздуха, при α=1, $м^3/м^3$.

L_α – расход воздуха, при действительном α, $м^3/м^3$.

ΔV – разность между объемами продуктов сгорания и воздуха, $м^3/м^3$.

V_0 – объем продуктов сгорания при α=1, $м^3/м^3$.

V_α – объем продуктов сгорания при действительном α, $м^3/м^3$.

H_2O' – объемная доля молекул воды в продуктах горения топлива, при действительном α, %.

CO_2' – объемная доля молекул углекислого газа в продуктах горения топлива, при действительном α, %.

$k_г$ – коэффициент для газовой печной среды.

$\overline{T}_Г$ – средняя температура рабочего пространства за период подъема температуры, К.

$\varepsilon_г$ – степень черноты продуктов горения.

$\varepsilon_м$ – степень черноты металла (садки).

ω – степень развития кладки (футеровки) печи.

$К_з$ – коэффициент заполнения рабочего пространства.

В – расход топлива, $м^3$/ч.

$В_{сеч.}$ – расход газов в сечении, $м^3$/с.

$В_{гор.}$ – расход газов на выходе из горелки, $м^3$/с.

f – площадь сечения условного канала, $м^2$.

$\overline{w}$ – средняя скорость в сечении, м/с.

Z – кратность циркуляции.

Nu – число Нуссельта.

$L_э$ – эквивалентный диаметр, м.

λ – коэффициент теплопроводности, $Вт/(м \cdot К)$.

Re – число Рейнольдса.

Pr – число Прандтля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисиенко В.Г. Совершенствование и повышение эффективности энерготехнологий и производств (интегрированный энерго-экологический анализ: теория и практика): В 2 томах. Том 1. – М.: Теплотехник, 2010. – 688 с.
2. Лисиенко В.Г. Хрестоматия энергосбережения / Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г. Изд. 2-е стереотипное. Кн.1. Под ред. В.Г. Лисиенко – М.: Теплотехник, 2005. – 688 с.
3. Гускарова Н.Р. Энергоемкость и энергоэффективность российской промышленности // Пространство экономики. 2014. №2-3.
4. Ярошенко Ю.Г. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии черной металлургии / Ю.Г. Ярошенко, Я.М. Гордон, И.Ю. Ходоровская. Под ред. Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ» 2012. – 670 с.
5. Лисиенко В.Г. Совершенствование и повышение эффективности энерготехнологий и производств. Т. 2. Кн.1. Новые способы, модельные и экспериментальные исследования: монография / В.Г. Лисиенко. – Екатеринбург: УрФУ, 2013. – 592 с.
6. Лисиенко В.Г. Совершенствование и повышение эффективности энерготехнологий и производств. Т. 2. Кн.2. Анализ режимных параметров и конструкций в энерготехнологиях: монография / В.Г. Лисиенко. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – Ч. 1. – 560 с.
7. Тимофеев В.Н. Исследование конвективного теплообмена применительно к нагревательным печам / В.Н. Тимофеев, И.А. Февралева // Всесоюзный научно-исследовательский институт металлургической теплотехники (ВНИИМТ) Бюллетень научно-технической информации. – Свердловск: Металлургиздат, 1958. – С.34-45.

8. Приказ Министерства промышленности и торговли РФ от 5 мая 2014 г. № 839 "Об утверждении Стратегии развития черной металлургии России на 2014 - 2020 годы и на перспективу до 2030 года и Стратегии развития цветной металлургии России на 2014 - 2020 годы и на перспективу до 2030 года". ГАРАНТ.РУ: http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70595824/#ixzz4ZzWANrFJ
9. Основные направления ресурсоэнергосбережения в черной металлургии / Дружинин Г.М., Зайнулин Л.А., Казяев М.Д., Спирин Н.А., Ярошенко Ю.Г., Губинский М.В. // Сборник докладов международной научно-практической конференции «Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло: История, современное состояние, будущее». Часть 1. - Екатеринбург: УрФУ 2014. – с. 205-211.
10. Буркин С.П. Ресурсо и энергосбережение в металлургии. Разработка машин и технологий при инновационном риске: учебник. В 2кн., кн.1 / С.П. Буркин, Е.А. Коршунов, В.В. Шимов и др. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 498 с.
11. Лисиенко В.Г. Интегрированный (обобщенный) энергоэкологический анализ – основа современной теории печей и энергосбережения / В.Г. Лисиенко // Пече-трубостроение: тепловые режимы, конструкции, автоматизация и экология: труды Международного конгресса. – М.: Теплотехник, 2004. – с. 5-13.
12. Эйсмондт Ю.Г. Оборудование термических цехов. В 3 т. Т. 1. Основное термическое оборудование / Ю.Г. Эйсмондт, В.А. Хотинов, М.В. Майсурадзе; под общ. Ред. Ю.Г. Эйсмондта. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – 257 с.
13. Картавцев С.В. Интенсивное энергосбережение и технический прогресс черной металлургии / С.В. Картавцев – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. – 311 с.

14. Ануфриев В.П. Теория и практика энерго-ресурсосбережения: учеб. Пособие / В.П. Ануфриев, Ю.В. Лебедев, Ф.М. Черномуров / Под ред. Ф.М. Черномурова: УГТУ-УПИ – Екатеринбург, 2006. – 403 с.
15. Смольков А.Н. Современные системы отопления печей с применением плоскопламенных горелок / А.Н. Смольков, C. Dossow, G. Wohlschlaeger // Печетрубостроение: тепловые режимы, конструкции, автоматизация и экология: труды международного конгресса. – М: «Теплотехник», 2004. – С.110-117.
16. Спитченко Д.И. Проходная печь с шагающим подом для нагрева слитков из меди и ее сплавов / Д.И. Спитченко, А.М. Вохмяков, М.Д. Казяев, Е.В. Киселев, Д.М. Казяев // Цветные металлы. 2014. №10. – с. 83-87.
17. Официальный сайт ООО «Общемаш» http://www.zzu.ru/gorelki-promyshlennye/gorelki-gazovye-skorostnye-gts.html
18. Шахалевич В.П. Опыт практического применения технологии нагрева ТЕСКА при реконструкции и новом строительстве промышленных печей и тепловых установок / В.П. Шахалевич, А.В. Фролов, В.В. Арсенчук. // Печетрубостроение: тепловые режимы, конструкции, автоматизация и экология: труды III международного конгресса / под ред. В.Г. Лисиенко – Екатеринбург: «Инженерная мысль», 2008. – С. 244-247.
19. Курносов В.В. Термические печи высокоточного нагрева / В.В. Курносов // Новые направления в области теплотехнического строительства, конструкции, технологии материалы. Энергосбережение, экология и промышленная безопасность. Труды IV международного конгресса – М: 2013. – С. 61-70.
20. Вохмяков А.М. Компьютерное моделирование газодинамики в рабочем пространстве печи, оснащенной скоростными рекуперативными горелками / А.М. Вохмяков, М.Д. Казяев // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве:

сборник докладов I Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2012) с международным участием. – Екатеринбург: УрФУ, 2016. - С.25-28.

21. Макий А. Опыт применения горелок WS в нагревательных и термических печах / А. Макий // Печетрубостроение: тепловые режимы, конструкции, автоматизация и экология: труды III международного конгресса / под ред. В.Г. Лисиенко – Екатеринбург: «Инженерная мысль», 2008. – С. 195-199.
22. Казяев М.Д. Применение современных топливосжигающих устройств в нагревательных печах / М.Д. Казяев, А.Ф. Спиглазов, Б.Н. Арсеев, Д.М. Казяев, А.М. Вохмяков // Печетрубостроение: тепловые режимы, конструкции, автоматизация и экология: труды III международного конгресса / под ред. В.Г. Лисиенко – Екатеринбург: «Инженерная мысль», 2008. – С. 152-159.
23. Смольков А.Н. Системы прямого и косвенного отопления печей с применением рекуперативных горелок типа BICR / А.Н. Смольков, G. Wohlschlaeger // Печетрубостроение: тепловые режимы, конструкции, автоматизация и экология: труды международного конгресса. – М: «Теплотехник», 2004. – С. 118-125.
24. Патент на изобретение № 2378573 «РЕКУПЕРАТИВНАЯ ГОРЕЛКА ДЛЯ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА». Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской федерации 10 января 2010г. Дружинин Г.М., Лошкарев Н.Б., Барташ М.Р., Попов А.Б., Хамматов И.М.
25. Лошкарев Н.Б. Новая скоростная рекуперативная горелка для прямого нагрева металла в промышленных печах [Текст]/ Н.Б. Лошкарев, М.Р. Барташ, Г.М. Дружинин, А.Б. Попов, И.М. Хамматов // Сталь. – 2010. - №3. С. 125 – 127.
26. Лошкарев Н. Б. Скоростная рекуперативная горелка ГСР-150 / Н. Б. Лошкарев, А. Х. Мухамадиева // Теплотехника и информатика в

образовании, науке и производстве: сборник докладов IV Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (ТИМ'2015) с международным участием, посвящённой 95-летию основания кафедры и университета. – Екатеринбург : УрФУ, 2015. - С. 96-100.

27. Арсеев Б.Н. Развитие элементов рекуперативных топливосжигающих устройств при модернизации металлургических нагревательных печей // Диссертация в виде научного доклада на соискание ученой степени кандидата технических наук. Екатеринбург: 2011г. – 112 с.
28. Казяев М.Д. Современные направления энергосбережения в нагревательных печах / М.Д. Казяев, Д.М. Казяев, А.М. Вохмяков // Новые направления в области теплотехнического строительства, конструкции, технологии материалы. Энергосбережение, экология и промышленная безопасность. Труды IV международного конгресса – М: 2013. – С. 40-60.
29. Дружинин Г.М. Опыт ОАО «ВНИИМТ» в разработке печей и горелочных устройств для металлургии и машиностроения / Г.М. Дружинин, И.М. Дистергефт // Печетрубостроение: тепловые режимы, конструкции, автоматизация и экология: труды II международного конгресса / под ред. В.Г. Лисиенко – Екатеринбург: «Инженерная мысль», 2006. – С. 49-62.
30. Зайнуллин Л.А. Разработка новых технологий и теплотехнических аппаратов, обеспечивающих снижение энергозатрат и улучшение экологии в металлургии // Л.А. Зайнуллин, Г.М. Дружинин, В.Г. Грезнев // Теория и практика тепловых процессов в металлургии: Сборник докладов международной научно-практической конференции 18-21 сентября 2012г. Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С.237-240.

31. Денисов М.Г. Выбор схем отопления нагревательных печей / М.А. Денисов, Г.А. Михалев // Сталь. 2005. - №6 С. 92-94,
32. Эйсмондт Ю.Г. Оборудование термических цехов. В 3 т. Т. 2. Дополнительное и вспомогательное термические оборудование / Ю.Г. Эйсмондт, В.А. Хотинов, М.В. Майсурадзе; под общ. Ред. Ю.Г. Эйсмондта. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – 203 с.
33. Спитченко Д.И. Техническое перевооружение вертикальной камерной печи для термической обработки крупных поковок / Д.И. Спитченко, Е.В. Киселев, А.М. Вохмяков, М.Д. Казяев, Д.М. Казяев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2013. № 9. – С. 38-42.
34. Жадан И.А. Современные методы строительства и реконструкции термических и нагревательных печей «под ключ» / И.А. Жадан, Т.Б. Ибадуллаев, М.Н. Ефимов // Новые направления в области теплотехнического строительства, конструкции, технологии материалы. Энергосбережение, экология и промышленная безопасность. Труды IV международного конгресса – М: 2013. – С.291-300.
35. Лисиенко В.Г. Совершенствование системы управления и конструкций современных нагревательных и термических печей / В.Г. Лисиенко, Ю.К. Маликов, А.А. Титаев // Новые направления в области теплотехнического строительства, конструкции, технологии материалы. Энергосбережение, экология и промышленная безопасность. Труды IV международного конгресса – М: 2013. – С. 6-11.
36. Автоматизированная система управления тепловым режимом вертикальной термической печи. / Вохмяков А.М., Казяев М.Д., Казяев Д.М. // Сборник «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве – Новокузнецк, 2013. – С. 237-241.

37. Лисиенко В.Г. Конструкция и автоматизация современной камерной термической печи / В.Г. Лисиенко, Ю.К. Маликов, К.А. Сурганов и др. // Металлург. 2008. №2. – С. 57-60.
38. Спитченко Д.И. Техническое перевооружение вертикальной камерной печи для термической обработки крупных поковок. / Д.И. Спитченко, М.Д. Казяев, А.М. Вохмяков, Е.В. Киселев, Д.М. Казяев // Труды международной научно-практической конференции «Теория и практика тепловых процессов в металлургии». – Екатеринбург: УрФУ. 2012 г. – С. 364-370.
39. Лисиенко В.Г. Промышленная печь XXI века. Конструкция, тепловые режимы, автоматизация / В.Г. Лисиенко, Ю.К. Маликов, И.Ю. Медведев, Г.К. Маликов, К.А. Сурганов, А.А. Титаев, Е.Ю. Шахтарин, А.В. Васильев // Печетрубостроение: тепловые режимы, конструкции, автоматизация и экология: труды II международного конгресса / под ред. В.Г. Лисиенко – Екатеринбург: «Инженерная мысль», 2006. – С.12-25.
40. Лисиенко В.Г. Современные подходы к методам предпроектных модельных исследований при создании промышленных печей и агрегатов XXI века / В.Г. Лисиенко, Ю.К. Маликов, Г.К. Маликов, И.Ю. Медведев, М.В. Морозов, К.А. Сурганов, А.А. Титаев // Печетрубостроение: тепловые режимы, конструкции, автоматизация и экология: труды III международного конгресса / под ред. В.Г. Лисиенко – Екатеринбург: «Инженерная мысль», 2008. – С. 6-24.
41. Вохмяков А.М. Комплексная модернизация нагревательных печей / А.М. Вохмяков, М.Д. Казяев, Д.М. Казяев, Б.Н. Арсеев, А.М. Ряпосов // Известия вузов. Черная металлургия. 2009 №12 – С. 4.
42. Вохмяков А.М. Новые конструкции промышленных печей / А.М. Вохмяков, М.Д. Казяев, Д.М. Казяев, М.В. Губинский // Сборник докладов Сборник докладов международной научно-практической конференции «Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло: История,

современное состояние, будущее». Часть 1. - Екатеринбург: УрФУ 2014. – С. 114-118.

43. Вохмяков А.М. Исследование тепловой работы проходной печи для нагрева медных слябов, оснащенной рекуперативными горелками / А.М. Вохмяков, М.Д. Казяев, Б.Н. Арсеев, Д.М. Казяев, А.Ф. Спиглазов // Творческое наследие Б.И. Китаева: труды Международной научно-практической конференции 11-14 февраля 2009 г. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. – С. 337-342.
44. Казяев М.Д. Современные аспекты проектирования и строительства нагревательных и термических печей с использованием новых материалов и топливосжигающих устройств / М.Д. Казяев, М.Р. Барташ, Б.Н. Арсеев, А.Ф. Спиглазов, С.А. Барышников, Н.Б. Лошкарев, А.Н. Лошкарев // Печетрубостроение: тепловые режимы, конструкции, автоматизация и экология: труды II международного конгресса / под ред. В.Г. Лисиенко – Екатеринбург: «Инженерная мысль», 2006. – С.109-112.
45. Суворкина А.С. Реконструкция систем отопления методической печи с инжекционными горелками на подогретом воздухе // А.С. Суворкина, Г.М. Дружинин // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов V Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (ТИМ’2016) с международным участием (г. Екатеринбург, 12-13 мая 2016 г.). — Екатеринбург: УрФУ, 2016. - С.110-113.
46. Якубовская О.П. Техническое перевооружение кольцевой нагревательной печи №1 ТПЦ-1 ОАО «Северский трубный завод» / О.П. Якубовская, М.Д. Казяев // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов I Всероссийской научно-практической конференции студентов,

аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2012) с международным участием (г. Екатеринбург, 29-30 марта 2012 г.). — Екатеринбург : УрФУ, 2012. - С.161-163.

47. Полевой Е.В. Внедрение экологически чистой среды для закалки железнодорожных рельсов с использованием тепла прокатного нагрева / Е.В. Полевой // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов V Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (ТИМ'2016) с международным участием. — Екатеринбург: УрФУ, 2016. - С.86-91
48. Ахмедов Р.Б. Рациональное использование газа в промышленных установках / Р.Б. Ахмедов, О.И. Брюханов, В.Г. Лисиенко и др. Под ред. А.С. Телегина. – СПб.: Недра, 1995 – 352 с.
49. Malikov G.K. Direct Flame Impingement Heating for Rapid Thermal Materials Processing / G.K. Malikov, D.L. Lobanov, Y.K. Malikov // Int. J. Of Heat and Mass Transfer. 2001. Vol. 44 P. 1751-1758.
50. Курносов В.В. Нефутерованные печи струйного нагрева / В.В. Курносов, С.Н. Вострикова, А.В. Милосердов, В.Р. Тихонова, М.М. Ярошок // Печетрубостроение: тепловые режимы, конструкции, автоматизация и экология: труды II международного конгресса / под ред. В.Г. Лисиенко – Екатеринбург: «Инженерная мысль», 2006. – С.219-220.
51. Курносов В.В. Нефутерованные печи с обогреваемым вращающимся барабаном // Теория и практика тепловых процессов в металлургии: Сборник докладов международной научно-практической конференции 18-21 сентября 2012г. Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С.278-282.
52. Официальный сайт COIM srl. http://www.coimsrl.net/
53. Официальный сайт Otto Junker GmbH http://www.otto-junker.de

54. Прибытков И.А. Устройства струйного нагрева ленты как альтернатива печей садочного типа / И.А. Прибытков, В.В. Курносов, С.И. Кондрашенко // Теория и практика тепловых процессов в металлургии: Сборник докладов международной научно-практической конференции 18-21 сентября 2012г. Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 319-325.
55. Вохмяков А.М. Камерная печь с разделяющимся рабочим пространством / А.М. Вохмяков, М.Д. Казяев, Д.М. Казяев // Теория и практика тепловых процессов в металлургии: Сборник докладов международной научно-практической конференции 18-21 сентября 2012г. Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С.182-187.
56. Вохмяков А.М. Камерная печь с разделяющимся рабочим пространством / Вохмяков А.М., Казяев М.Д., Казяев Д.М. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2013. № 9. – С. 30-33.
57. Гервасьев М.А. Влияние температуры закалки на фазовый состав и износостойкость валковых сталей с 5% хрома / М.А. Гервасьев, Ю.В. Худорожкова, М.А. Филиппов // Металловедение и термическая обработка металлов №10 2010 – С.16-20.
58. Лешковцев В.Г. Исследование возможности создания композитных валков с наплавкой из стали 30Н12М6К10Б с карбидно-интерметаллидным упрочнением / В.Г. Лешковцев, А.М. Покровский, А.И. Плохих, О.М. Ховова // Металловедение и термическая обработка металлов №3 2009 – С.38-42.
59. Борисов И.А. Термическая обработка ответственных деталей в энергомашиностроении / И.А. Борисов // Металловедение и термическая обработка металлов №9 1979. – С.2-6.
60. Немзер Г.Г. Тепловые процессы производства крупных поковок / Г.Г. Немзер – Л.: Машиностроение. 1979. – 270 с.

61. Борисов И.А. Влияние перегрева на текстуру и зерно роторной стали / И.А. Борисов // Металловедение и термическая обработка металлов №7 2010. – С.3-9.
62. Вдовин К.Н. Применение термического анализа для исследования структуры и свойств валковых сталей / К.Н. Вдовин, К.Г. Пивоварова, М.А. Лисовская // Металловедение и термическая обработка металлов №6 2014. – С.22-25.
63. Полушин А.А. Анализ температурного режима прокатного валка в процессе термической обработки / А.А. Полушин, В.И. Грызунов, С.В. Каманцев, М.Ю. Минаков // Металловедение и термическая обработка №8 2009 – С.42-45.
64. Якунина О.А. Режимы предварительной термической обработки прокатных валков из сталей с различным содержанием углерода / О.А. Якунина, Е.Ю. Приймак, С.О. Соколов, С.В. Каманцев, В.И. Грызунов //Металловедение и термическая обработка металлов №1 2013 – С.24-28.
65. Гедеон М.В. Термическая обработка валков холодной прокатки / М.В. Гедеон, Соболь Г.П., Паисов И.В. // М.: Металлургия, 1973. – 344с.
66. Полушин А.А. Термическая обработка стальных валков холодной прокатки / А.А. Полушин, С.В. Каманцев, В.И. Грызунов, М.Ю. Минаков // Металловедение и термическая обработка металлов №5 2011 – С.25-29.
67. Борисов И.А. К вопросу о закалке валков из глубоко прокаливающихся сталей / И.А. Борисов, Л.М. Левитан // Металловедение и термическая обработка металлов №4 2010 – С.9-17.
68. Патент SU1157096 МПК7: C21D9/36 C21D1/02 «Агрегат для термической обработки» Немзер Г.Г., Аронов М.А., Башун Е.Е., Лошкарев В.Е., Энно И.К., Ивков И.В., Фулиди В.Г., Баранов В.А.,

Черных В.В., Сорокин В.Г., Карасюк Ю.А., Александров В.А., Гавришко А.С. 27.08.81

69. Патент SU 1740457 МПК: C21D 9/36 «Агрегат для термической обработки» Галинтовский В.И., Щусь В.З., Модылевский В.Б., Будницкий В.С.

70. Патент 2615917 МПК7: F27B19/02 C21D9/38 «Агрегат для термической обработки рабочего валка стана холодной прокатки и способ его термической обработки» Казяев Д.М., Казяев М.Д., Палеев В.С., Вохмяков А.М., Спиглазов А.Ф.

71. Борисов И.А. Технология термической обработки стали 25Х2НМФА применительно к элементам сварного ротора. / И.А. Борисов и др. // сб.: Технология термической обработки поковок роторов для турбин и турбогенераторов. НИИИНФОРМТЯЖМАШ, №13-74-2, С.1.

72. Борисов И.А. Режим окончательной термической обработки роторов / И.А. Борисов и др. // сб.: Термическая обработка цельнокованных роторов турбогенераторов мощностью 800 и 1200 МВт. НИИИНФОРМТЯЖМАШ, № 13-78-11, С.12.

73. Борисов И.А. Влияние продолжительности высокого отпуска на текстуру и зерно перегретой роторной стали / И.А. Борисов, А.В. Дуб // Металловедение и термическая обработки металлов №3 2013. – С.3-9.

74. Борисов И.А. Выбор оптимальных параметров закалки крупных роторов из стали 25ХН3МФА / И.А. Борисов // Металловедение и термическая обработка металлов №12, 1980 – С.2-5.

75. Спитченко Д.И. Техническое перевооружение камерной печи для термообработки массивных поковок / Д.И. Спитченко, М.Д. Казяев // Теплотехника в образовании, науке и производстве: Сборник докладов I Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (TIM’ 2012) с

международным участием. / под ред. Н.А. Спирина. Екатеринбург: УрФУ, 2012 – С. 124-129.

76. Казяев М.Д. Влияние конструкции футеровки и типа топливосжигающих устройств на тепловую работу камерных вертикальных печей / М.Д. Казяев, А.М. Вохмяков, Е.В. Кислев, Д.И. Спитченко, Д.М. Казяев // «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология» VII международная научно-практическая конференция – М. 2014. – С. 224-235.
77. Официальный сайт Elster Kromschroeder GmbH на территории РФ: http://www.kromschroeder.ru
78. Спитченко Д.И. Исследование тепловой работы вертикальной термической печи после технического перевооружения / Д.И. Спитченко, А.М. Вохмяков, Е.В. Киселев, М.Д. Казяев, Д.М. Казяев // Труды II всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Теплофизика и информатика в образовании, науке и производстве» - Екатеринбург: УрФУ, 2013 г. – С. 94-102.
79. Спитченко Д.И. Исследование тепловой работы камерных вертикальных термических печей с различными системами отопления и конструкциями футеровок / Д.И. Спитченко, М.Д. Казяев, А.М. Вохмяков, Е.В. Киселев, Д.М. Казяев // Сборник докладов международной научно-практической конференции «Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло: История, современное состояние, будущее» - Екатеринбург: УрФУ 2014. – С. 205-216.
80. Китаев Б.И. Теплотехнические расчеты металлургических печей / Б.И. Китаев, Б.Ф. Зобнин, В.Ф. Ратников и др. под ред. А.С. Телегина. – М. Металлургия, 1970 – 528 с.
81. Казяев М.Д. Методика и результаты исследования сложного внешнего теплообмена в вертикальной камерной печи для термообработки длинномерных изделий / М.Д. Казяев, А.М.

Вохмяков, Е.В. Кислев, Д.И. Спитченко // Известия вузов. Черная металлургия. 2015. №9. – С. 667-671.

82. Вохмяков А.М. Исследование технологии нагрева медных и латунных слябов в проходных печах, оборудованных скоростными горелками. // Диссертация в виде научного доклада на соискание ученой степени кандидата технических наук. Екатеринбург: 2012г. – 131 с.

83. Казяев М.Д. Исследование теплообмена в вертикальной камерной печи / М.Д. Казяев, А.М. Вохмяков, Е.В. Кислев, Д.И. Спитченко // Сборник докладов международной научно-практической конференции «Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности». – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – С. 295-299.

84. Вохмяков А.М. Исследование газодинамики и конвективного теплообмена в проходной печи, оснащенной скоростными рекуперативными горелками. / А.М. Вохмяков, М.Д. Казяев, Д.М. Казяев // Труды международной научно-практической конференции «Теория и практика тепловых процессов в металлургии». – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 176-182.

85. Вохмяков А.М. Исследование конвективного теплообмена на проходной печи оснащенной скоростными горелками. / Вохмяков А.М., Казяев М.Д., Казяев Д.М. // Цветные металлы, 2011. №12 – С.89-93.

86. Зобнин Б.Ф. Нагревательные печи. Теория и расчет / Б.Ф. Зобнин: Машиностроение, М., 1964 – 312 с.

87. Казяев М.Д. Повышение эффективности сжигания природного газа в камерных нагревательных печах: дис. Канд. Техн. Наук: 05.06.02 / Михаил Дмитриевич Казяев; УПИ. – Свердловск, 1973. – 234 с.

88. Михеев М.А. Основы теплопередачи (3-е изд. Перераб.) / М.А. Михеев – М.: Госэнергоиздат, 1956. – 392 с.

89. Казанцев Е.И. Промышленные печи / Е.И. Казанцев – М.: Металлургия, 1975. – 368с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

УРАЛМАШЗАВОД

ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
УРАЛЬСКИЙ ЗАВОД ТЯЖЕЛОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

СЛУЖБА ГЛАВНОГО ИНЖЕНЕРА

27.06.2018 № 579-111

ОТЗЫВ
о работе аспиранта кафедры «Теплофизики и информатики в металлургии» института Материаловедения и металлургии Уральского Федерального Университета имени Первого Президента России Б.Н. Ельцина
Спитченко Данилы Ильича

В 2012 году на ОАО «Уралмашзавод» были выполнены работы по техническому перевооружению вертикальной термической печи №22 цеха №37 «под ключ».

В ходе работ по техническому перевооружению печи №22 цеха №37 были использованы материалы исследования аспиранта Спитченко Данилы Ильича, а именно:

- теплотехнические расчеты и данные математического моделирования применены при проектировании будущей конструкции печи;
- предложенная технология тепловой обработки поковок роторов из высококачественных сталей успешно применена в ходе пуско-наладочных работ и внедрена в промышленную эксплуатацию.

Спитченко Данила Ильич принимал непосредственное участие в пуско-наладочных испытаниях и отладке режимов термообработки.

Техническое перевооружение включало:

- разработку рабочего проекта;
- проектирование, установку и отладку системы современного рекуперативного газо-сжигающего оборудования немецкой фирмы «Elster Kromshroeder» для сжигания природного газа в комплекте с современной системой АСУ ТП на элементной базе фирмы Siemens, позволяющей экономить расход топлива на 40%;
- футеровку стен и крышек печи керамоволокнистыми блоками, что позволило ускорить процесс нагрева и охлаждения печи, сократить теплопотери в окружающую среду, получить температуру на наружной поверхности кожуха печи, не превышающую 45 ºС;
- проведение пуско-наладочных работ и режимных испытаний.

Печь выведена на проектные показатели и сдана в промышленную эксплуатацию.

Благодаря техническому перевооружению удалось:

- получить перепад температур по поверхности садки ±2 ºС на период выдержки и ±5 ºС на период подъема температур;
- осуществить охлаждение изделий прямо в рабочем пространстве печи без перегрузки в специальные охладительные камеры;
- значительно сократить расход топлива – за весь режим отжига ротора массой 27т суммарный расход топлива составил 3497,5 м^3, суммарное время режима 78ч;
- обеспечить за самый энергозатратный период нагрева 700…940 ºС средний удельный расход условного топлива 12,45 кг у.т./т, что на 71% меньше удельного расхода условного топлива этой термической печи до технического перевооружения.

Служба главного инженера ПАО «Уралмашзавод»

Главный инженер В.В. Янковой