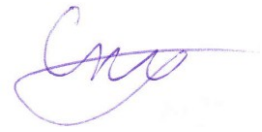


На правах рукописи



СПИТЧЕНКО Данила Ильич

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

05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2019

Работа выполнена на кафедре «Теплофизика и информатика в металлургии» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина».

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор,
КАЗЯЕВ Михаил Дмитриевич

Официальные оппоненты: **Темлянцев Михаил Викторович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк, проректор по научной работе и инновациям;

Ашихмин Александр Анатольевич, кандидат технических наук, ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники», г. Екатеринбург, заместитель заведующего лабораторией теплотехники и систем отопления нагревательных печей

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск

Защита состоится «15» марта 2019 г. в 15:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.05 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=287445>

Автореферат разослан «___» _____ 20___ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сулицин Андрей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

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. 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. Аппроксимирующая 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 аппроксимирующих 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

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 8 научных статьях, 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы актуальность темы, степень разработанности, определены цели и задачи работы, дана оценка практической и научной значимости.

В первой главе проведен обзор современных энергоресурсосберегающих технологий, оборудования и конструкций при производстве качественной металлической продукции. На основании проведенного в первой главе анализа разработана и предложена новая технология тепловой обработки роторов крупных турбин с использованием универсального теплового агрегата – топливной вертикальной термической печи оснащенной волокнистой футеровкой, скоростными горелочными устройствами и системой комплексного автоматического управления.

Ступенчатый нагрев с небольшими скоростями предотвращает появление термических напряжений. Резкий нагрев до температуры выше A_{c1} выполняется для получения требуемого размер зерна. Охлаждение воздухом в рабочем пространстве печи позволяет достичь скоростей достаточных для получения требуемых механических и физических свойств, при этом минимизировать температурные напряжения и их дальнейший переход в статические напряжения.

Во второй главе дано описание конструкции агрегата для проведения новой энергоресурсосберегающей технологии тепловой обработки крупных поковок – камерной вертикальной термической печи, а также особенностей ее тепловой работы и методов изучения теплообмена в рабочем пространстве.

С целью энергоресурсосбережения, повышения качества продукции, а также для улучшения условий труда и экологической обстановки проведено

полное техническое перевооружение печи, в ходе которого: кирпичная футеровка стен и крышки печи заменена на футеровку из современных волокнистых материалов в виде модульных блоков; устаревшие горелочные устройства заменены на современные скоростные рекуперативные горелки Kromshroeder ECOMAX 5FTR; установлена современная многоуровневая система автоматического управления тепловым режимом печи.

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 теплотрат на нагрев кирпичного пода. Горелка каждого последующего яруса повернута на 90° относительно предыдущего, что показано на рисунке 1.

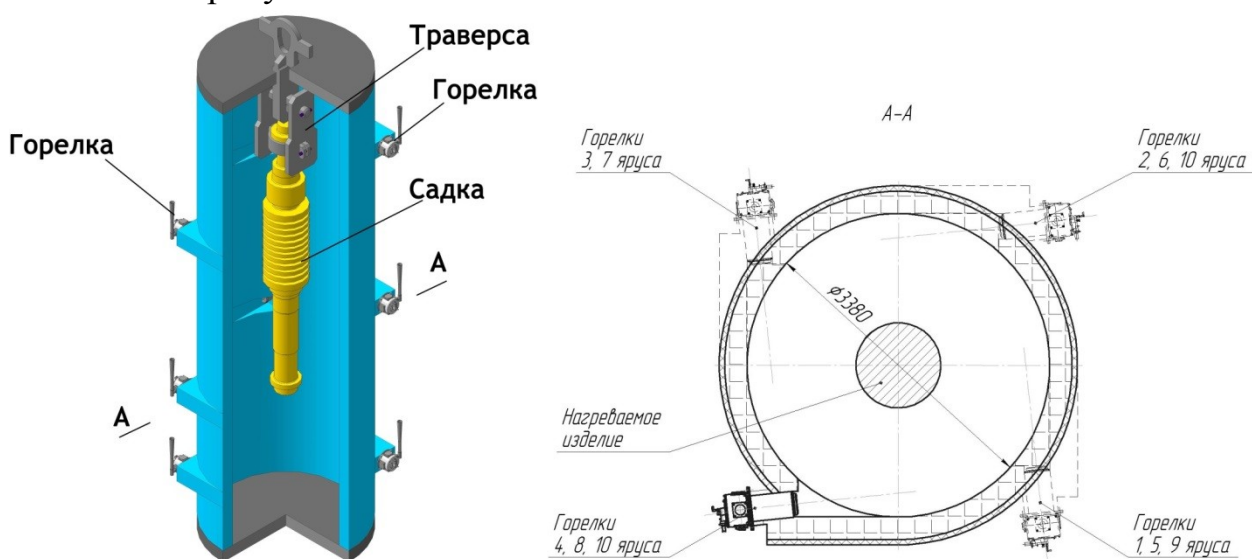


Рисунок 1 – Схема и поперечный разрез вертикальной термической печи

Нагреваемыми в печи изделиями являются поковки роторов крупных турбин и опорных валков. 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: ХНЗМ, ХН4МАР, 35ХНМ, 35ХНЗМА, 35ХН4МА, 35ХН1МФА, 36ХНМА, 36ХНЗМФА, 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. В печи могут подвергаться термообработке изделия длиной до 10м, диаметром до 2,5 м и массой до 60т. Роторы турбин, имеют значительную длину при сравнительно небольшом диаметре, а опорные валки наоборот – значительный диаметр при относительно небольшой длине. При этом в печь одновременно помещают только одно изделие, что 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.

Для исследования 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. Для подтверждения правильности предположений о характере движения газов в рабочем пространстве печи было проведено трехмерное компьютерное моделирование процесса газодинамики в масштабе один к одному, что позволило получить данные о скоростях газов и кратностях циркуляции в отдельных зонах печи.

Третья глава посвящена описанию проведенного промышленного эксперимента, методике обработки экспериментальных данных и расчету внешнего теплообмена в рабочем пространстве вертикальной печи.

Для проведения промышленного эксперимента в печь загрузили опытную садку – поковку ротора турбины с закрепленными на поверхности восемью контрольными термопарами. Контроль температуры рабочего пространства печи осуществляли по показаниям десяти стационарных термопар (рисунок 2). В ходе эксперимента был осуществлен заданный сложный технологический режим нормализации с отпуском, приведенный на рисунке 3. Ступенчатый режим нагрева изделия предопределяет проведение расчетов сложного внешнего теплообмена для каждого периода подъема температуры в отдельности. Также необходимо было учитывать переменный диаметр поковки ротора, и вести расчет для каждого из характерных размеров поковки.

По приращению среднемассовой температуры отдельных частей поковки ротора, определяли количество теплоты, полученное металлом:

$$\Delta Q_M = G_M \bar{c}_M \Delta t_M \text{ кДж}, \quad (1)$$

где G_M – масса отдельных частей поковки, кг;

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

Δt_M – разность среднемассовых температур металла в начале и в конце периода, °С.

Далее, рассчитывают плотность суммарного теплового потока, воспринятого металлом:

$$q_{M\Sigma} = \frac{\Delta Q_M}{F_M \Delta \tau} \text{ Вт/м}^2, \quad (2)$$

где F_M – площадь поверхности отдельных частей нагреваемого металла, м^2 ;

Δt – интервал времени нагрева металла на каждом этапе подъема температуры печи, с.

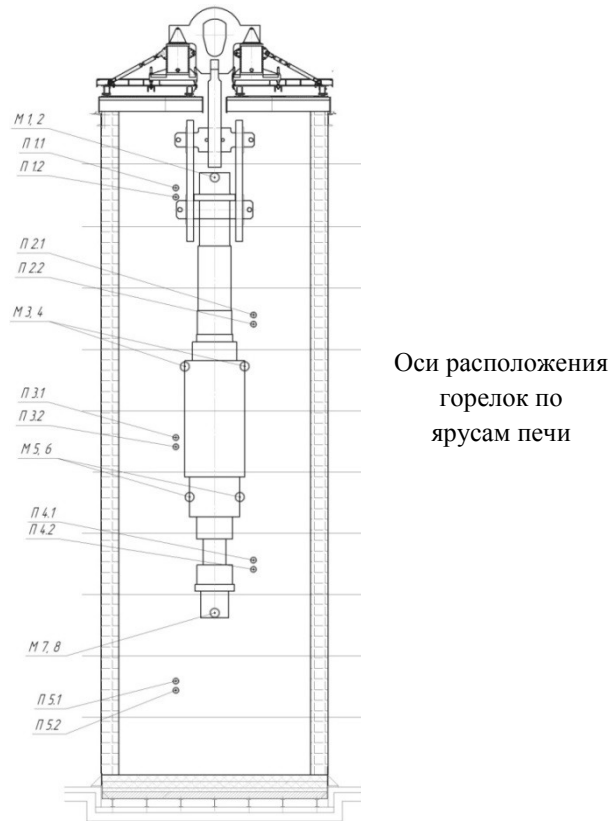


Рисунок 2 – Эскиз печи с опытной садкой:

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

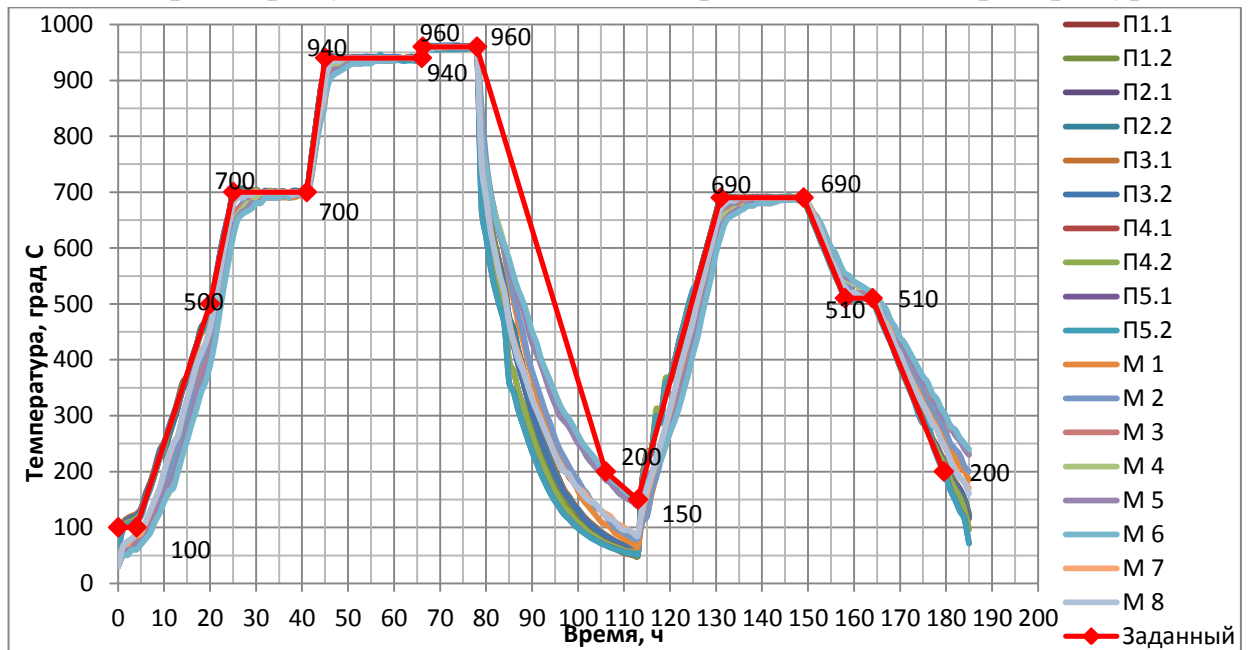


Рисунок 3 – Температурный режим нормализации с отпуском поковки ротора турбины при испытаниях печи (обозначения точек измерения температуры показаны на рис. 2)

При наличии величины $q_{m\Sigma}$ рассчитывали средний суммарный коэффициент теплообмена между рабочим пространством печи и поверхностью металла:

$$\bar{\alpha}_{\Sigma} = q_{m\Sigma} / (\bar{t}_{\text{печ}} - \bar{t}_{\text{пов}}) \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}), \quad (3)$$

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

$\bar{t}_{\text{пов}}$ – 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:

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

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

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

Средний коэффициент лучистого теплообмена:

$$\bar{\alpha}_{\text{л}} = \bar{q}_{\text{м.л}} / (\bar{t}_{\text{печ}} - \bar{t}_{\text{пов}}) \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}). \quad (5)$$

По разности между $q_{m\Sigma}$ и $q_{\text{м.л}}$ определяли плотность теплового потока конвекцией:

$$\bar{q}_{\text{м.к}} = \bar{q}_{m\Sigma} - \bar{q}_{\text{м.л}}, \quad (6)$$

и средний коэффициент конвективного теплообмена:

$$\bar{\alpha}_{\text{м.к}} = \bar{q}_{\text{м.к}} / (\bar{t}_{\text{печ}} - \bar{t}_{\text{пов}}) \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}). \quad (7)$$

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

$$\bar{q}_{\text{м.}\Sigma} = \frac{G_1}{G_{\Sigma}} \bar{q}_{\text{м}\Sigma 1} + \frac{G_2}{G_{\Sigma}} \bar{q}_{\text{м}\Sigma 2} + \frac{G_3}{G_{\Sigma}} \bar{q}_{\text{м}\Sigma 3} + \frac{G_4}{G_{\Sigma}} \bar{q}_{\text{м}\Sigma 4}, \quad (8)$$

где $\frac{G_{1,2,\dots}}{G_{\Sigma}}$ – долевые массовые коэффициенты каждой части нагреваемого изделия в каждой зоне печи;

G_{Σ} – масса всего нагреваемого изделия;

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

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

$$\bar{q}_{м.л} = \frac{F_1}{F_{\Sigma}} \bar{q}_{м.л1} + \frac{F_2}{F_{\Sigma}} \bar{q}_{м.л2} + \frac{F_3}{F_{\Sigma}} \bar{q}_{м.л3} + \frac{F_4}{F_{\Sigma}} \bar{q}_{м.л4}, \quad (9)$$

где $\frac{F_{1,2,\dots}}{F_{\Sigma}}$ – долевым поверхностным коэффициенты каждой части нагреваемого изделия в каждой зоне печи;

F_{Σ} – общая площадь поверхности нагреваемого изделия;

$\bar{q}_{м.л1}, \bar{q}_{м.л2}$ и т.д. – расчетные значения плотностей тепловых потоков излучением для каждой части изделия в каждой зоне печи.

Исследование проводили с использованием опытных данных, полученных в ходе промышленного эксперимента. Рабочее пространство печи было условно разделено на четыре зоны по высоте, с учетом различных диаметров поковки ротора. Нумерация зон установлена сверху вниз (рисунок 4). Размеры поковки ротора турбины, использовавшейся в качестве контрольной садки, представлены на рисунке 4.

С использованием геометрических характеристик печи, 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.

Расчет горения топлива проводили для каждого из интервалов нагрева в отдельности. Значения коэффициентов избытка воздуха получали путем осреднения данных газового анализа для каждого из интервалов нагрева.

В расчетах теплообмена использовали значение температур, измеренных в ходе режима нормализации, представленного на рисунке 3. Значения температур осредняли по четырем зонам рабочего пространства печи и по трем интервалам подъема температуры.

Далее, используя методику, описанную выше, рассчитали суммарные, лучистый и конвективный тепловые потоки на металл по зонам рабочего пространства и для каждого периода нагрева, определили коэффициенты теплообмена и провели осреднение по формулам 8 и 9. Результаты расчетов внешнего теплообмена в рабочем пространстве печи во время режима нормализации представлены в таблице 1, где для сравнения доли лучистой и конвективной составляющей теплообмена приведено отношение $\bar{q}_{м.к}/\bar{q}_{м.л}$.

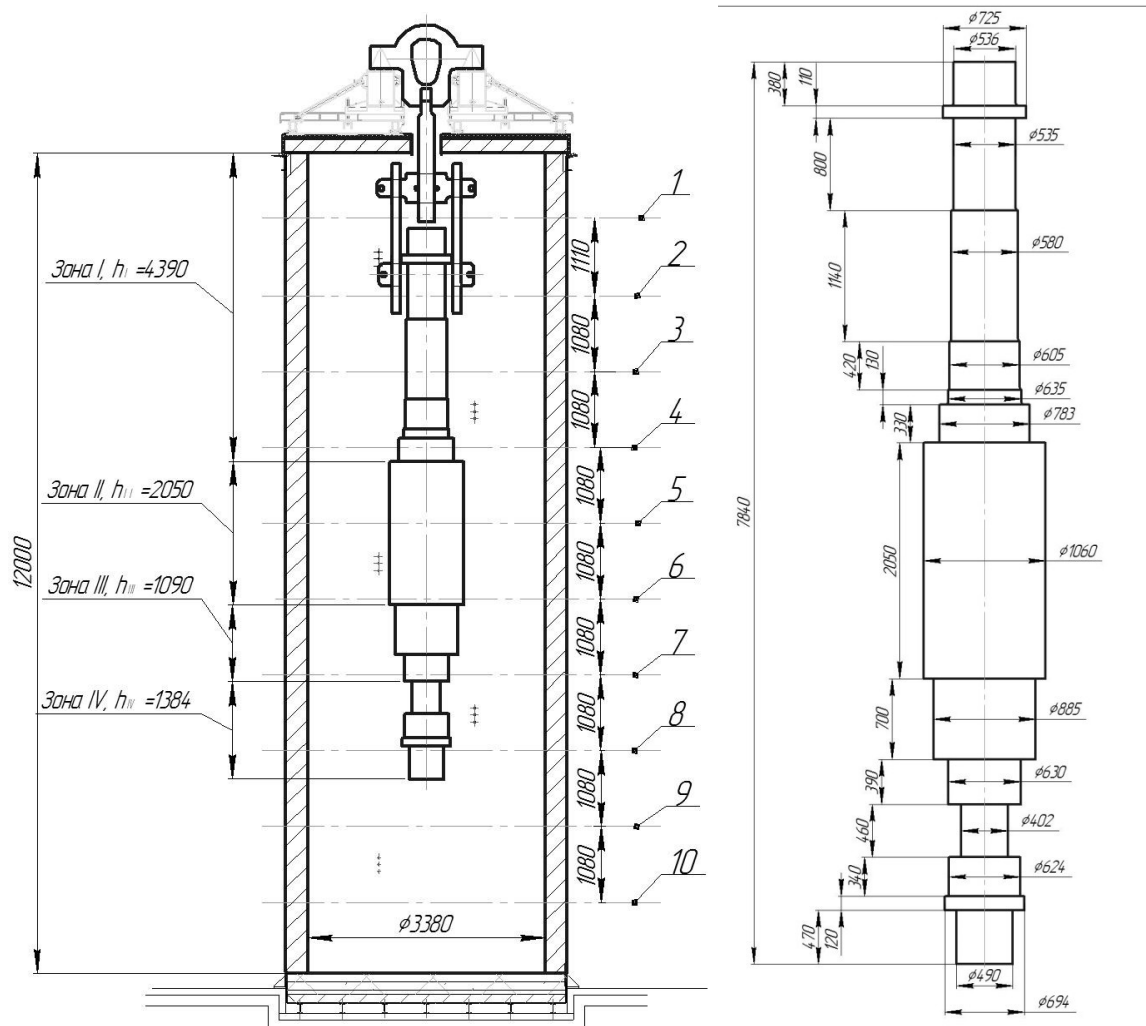


Рисунок 4 – Нумерация зон рабочего пространства и размеры поковки:

1, 2, 3, ... 10 – оси горелок

Таблица 1 – Результаты измерений и расчета параметров теплообмена вертикальной камерной печи.

Интервал нагрева, °С	Средние температуры, °С		Плотности тепловых потоков, Вт/м ²			Коэффициенты теплообмена, Вт/м ² К		$\bar{q}_{м.к}/\bar{q}_{м.л}$
	$\bar{t}_Г$	$\bar{t}_П$	$\bar{q}_{м.с}$	$\bar{q}_{м.л}$	$\bar{q}_{м.к}$	$\bar{\alpha}_л$	$\bar{\alpha}_к$	
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

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

1. 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 %.
3. Высокая доля конвективной составляющей внешнего теплообмена, создаваемой скоростными горелками, обеспечивает эффективное использование химической энергии топлива, что в комплексе с применением волокнистой футеровки позволяет резко уменьшить расход топлива, повысив КПД. Удельный расход условного топлива за самый энергозатратный интервал нагрева 700...940 °С – 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.
4. 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.

Оценить эффективность работы высокоскоростных горелок возможно путем анализа характера движения газов в рабочем пространстве печи. Поэтому следующим этапом данной работы было проведение исследования процесса газодинамики продуктов горения в рабочем пространстве печи с применением методов компьютерного моделирования.

В четвертой главе описаны методика, граничные условия и результаты компьютерного трехмерного моделирования процесса газодинамики в рабочем пространстве печи. В рамках данной работы использовали модель с интегрирующей средой ANSYS Workbench.

Модель была выполнена в масштабе один к одному по отношению к натуральной печи. После распознавания модели в Design modeler она была заполнена трехмерной сеткой из 285600 элементов в ICEM CFD. Для задания граничных условий использовали следующие группы поверхностей: вход – 11 плоскостей сечений носиков горелок; выход – 11 плоскостей сечений рекуператоров горелок; стенки – внутренняя поверхность футеровки рабочего пространства, поверхность поковки ротора и удерживающей траверсы. В качестве входных граничных условий были заданы средние скорости истечения газов из горелок – 82 м/с. Температура среды моделирования – 900 °С, выходное статическое давление – 1кПа.

Расчет скоростных полей газов в объеме рабочего пространства произведен средствами CFX-Solver. Дальнейшую обработку и представление результатов проводили в программе CFX-Post. В результате моделирования процесса газодинамики установлено, что в вертикальной плоскости вдоль

стенок рабочего пространства преобладают восходящие потоки газов, а вдоль поковки ротора, в основном, нисходящие. Однако в целом, величины скоростей вертикальных потоков невелики.

Анализируя проекции скоростей на горизонтальные плоскости (рис. 5), можно констатировать кольцевой характер движения газов вокруг поковки. 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 скорости от оси движения к центру рабочего пространства и стенкам печи. При этом около стенок рабочего пространства наблюдается «застойная» зона.

Резкое падение скорости потока газов сразу после выхода из носика горелки обусловлено интенсивным подсосом периферийных газовых объемов в скоростную струю горелки, то есть наблюдается повышенная кратность циркуляции. Для определения ее среднего по рабочему пространству значения провели расчет расходов в нескольких выделенных объемах струй, выходящих из горелок и распространяющихся по кольцевым траекториям в свободном объеме рабочего пространства. С этой целью построены эпюры скоростей в сечениях горизонтальных плоскостей, проходящих через оси нескольких горелок (рис. 5). Скорости по длине струи 3^й, 5^й, 7^й горелок представлены на рисунке 6, значения кратности циркуляции для этих горелок представлены в таблице 2.

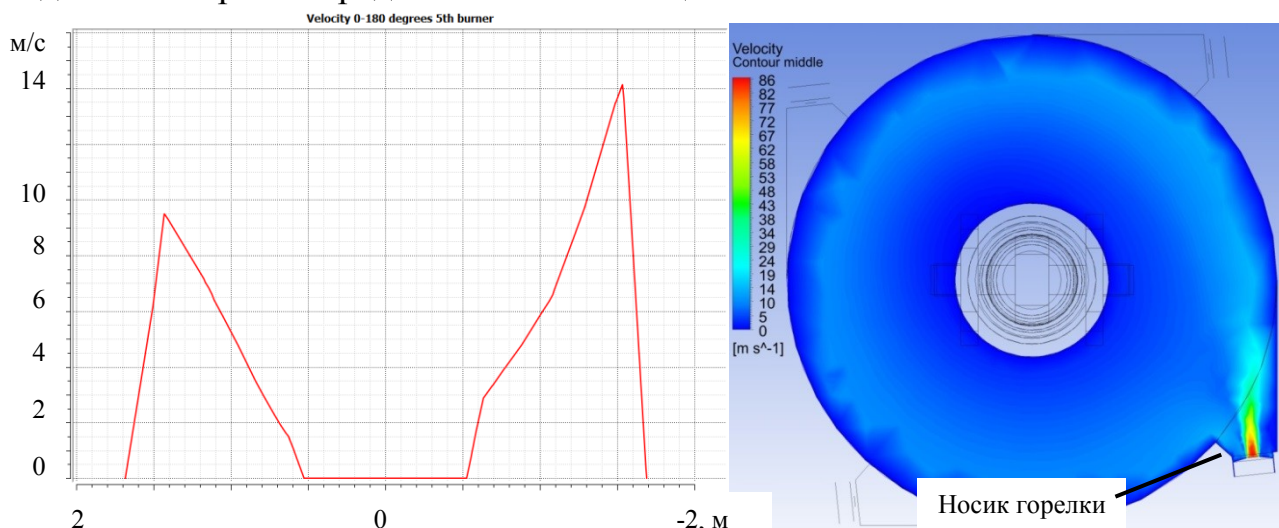


Рисунок 5 – Проекция векторного поля и контурная диаграмма скоростей в условных плоскостях, проходящих через оси третьей и пятой горелок

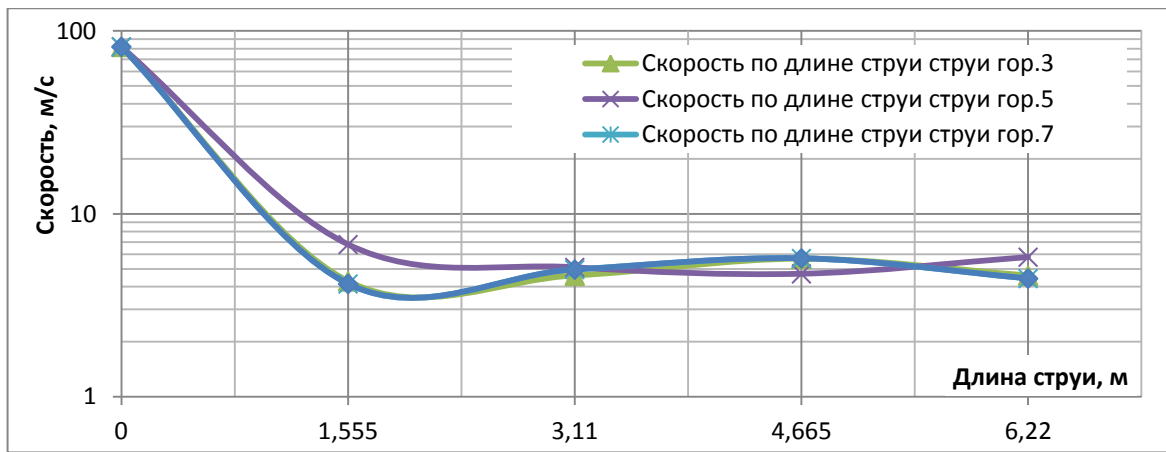


Рисунок 6 – Распределение скоростей по длине струи 3^й, 5^й, 7^й горелок

Таблица 2 – Средняя кратность циркуляции по длине струи.

Горелка №3 (Зона I)	Горелка №5 (Зона II)	Горелка №7 (Зона III)
9,8	9,5	9,5

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 поверхности поковки на всех этапах нагрева (рис. 3).

Далее, используя экспериментальные, расчетные и модельные данные, полученные в третьей и четвертой главе, выводили критериальную зависимость для расчета коэффициента конвективного теплообмена (таблица 3). Существенное отличие коэффициентов C 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. Эти две причины приводят к необходимости проводить расчеты подобных печей с использованием функциональных зависимостей чисел подобия разного вида в зависимости от температуры.

Таблица 3 – функциональные зависимости $Nu=f(Re,Pr)$ для II зоны.

Интервал нагрева, °C	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	$Nu = 0,026 \cdot Re^{1,5} \cdot Pr^{0,43}$

Моделирование процесса газодинамики в рабочем пространстве подтвердило эффективность применения высокоскоростных рекуперативных горелок в вертикальных термических печах. Равномерное поле скоростей движения газов и большая кратность циркуляции в рабочем пространстве

позволяют достичь высокой равномерности нагрева изделий, а значит улучшить качество продукции и значительно снизить долю брака, тем самым увеличив эффективность всего производственного процесса, исключив затраты энергии и ресурсов на повторную термообработку.

В пятой главе представлено исследование теплообмена при регламентированном охлаждении поковки ротора турбины в печи струями воздуха, подаваемого через рекуперативные горелки. Особенность режима охлаждения поковки в рассматриваемом случае заключается в том, что 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. Постоянно уменьшающаяся температура охлаждающего воздуха существенно осложняет расчеты характеристик теплообмена. Воздух, поступающий в печь, охлаждает и металл и футеровку печи одновременно, поэтому требуется разделение общего количества тепла на части, относящиеся только к охлаждению металла и футеровки в отдельности, что было выполнено при составлении теплового баланса режима охлаждения. Также, в связи с переменным сечением ротора расчеты теплообмена проводили для самой крупной (с самым большим диаметром и массой) части ротора – «бочки» (рис.4). Экспериментальные данные по температурам «бочки» ротора, футеровки печи и воздуха охлаждения представлены графиком на рисунке 8.

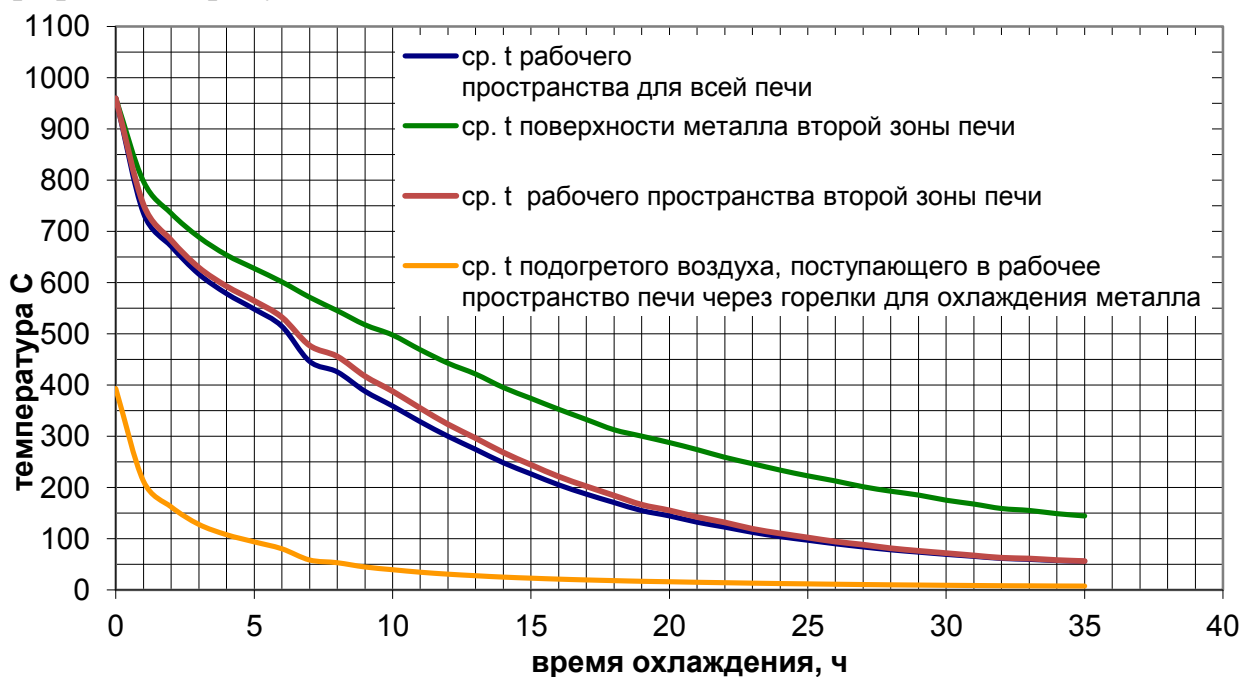


Рисунок 8 – Изменение температуры печи, металла и охлаждающего воздуха на этапе режима охлаждения

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

Количество теплоты, получаемой воздухом от бочки ротора, определяли по формуле:

$$\Delta Q_{вII} = V_{вII} \cdot \tau_{\Sigma\text{охл}} (\bar{t}_{в.в\text{ых}} \cdot c_{в} - \bar{t}_{в.в\text{х}} \cdot c_{в}), \text{кДж}, \quad (10)$$

Где $V_{вII}$ – расход воздуха в зоне охлаждения, м³/ч;

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

$\bar{t}_{в.в\text{ых}}$ – средняя температура уходящего из печи воздуха, °С;

$\bar{t}_{в.в\text{х}}$ – средняя температура входящего в печь воздуха охлаждения, °С;

$c_{в}$ – соответствующие средним температурам теплоемкости воздуха, кДж/м³К;

Количество теплоты, отданной воздуху «бочкой» ротора:

$$\Delta Q_{мII} = G_{мII} \cdot (t_{м.начII} \cdot C_{м.нач} - t_{м.конII} \cdot C_{м.кон}), \text{кДж}, \quad (11)$$

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

$$\Delta Q_{футII} = G_{футII} \cdot \bar{C}_{фут} (\bar{t}_{фут.нач} - \bar{t}_{фут.кон}), \text{кДж}, \quad (12)$$

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

$G_{футII}$ – масса футеровки II зоны печи, кг.

Футеровка, также, теряет тепло и вследствие теплопроводности в окружающую среду. 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:

$$Q_{т} = \bar{\alpha}_{нар} (\bar{t}_{фут.нар.нач} - \bar{t}_{фут.нар.кон}) \cdot F_{нарII} \cdot \tau, \text{кДж} \quad (13)$$

Таким образом, футеровка и «бочка» ротора отдали количество теплоты:

$$\Delta Q_{вII} = \Delta Q_{футII} + \Delta Q_{мII} + \Delta Q_{тII}, \text{кДж}.$$

Невязка баланса уноса тепла из II зоны печи:

$$\delta Q_{охл} = \frac{\Delta Q_{воздII} - \Delta Q_{мII} - \Delta Q_{футII} - \Delta Q_{тII}}{\Delta Q_{воздII}} \cdot 100 \quad (14)$$

Результаты расчета теплового баланса режима охлаждения сведены в таблицу 4.

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

Таблица 4 – тепловой баланс режима охлаждения «бочки» ротора.

Приход	кДж	%	Расход	кДж	%
Теплота, отданная «бочкой» ротора, $\Delta Q_{МИ}$	6257283	69,5	Теплота, получаемая воздухом, $\Delta Q_{ВИ}$	8997061	100
Теплота, отданная футеровкой воздуху, $\Delta Q_{футИ}$	689130	7,7			
Теплота, отданная футеровкой теплопроводностью, Q_T	1613475	17,9			
Невязка		4,9			
Итого	855988	100		8997061	100

Большую часть тепла (69,5%) охлаждающий воздух получает от нагретой поковки ротора турбины, в то время как дополнительные затраты на охлаждение футеровки составляют всего 7,7% (689130 кДж). При этом 17,9% 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.

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 м³/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 охлаждения 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», 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.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:

1. 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; 0,34п.л. / 0,1п.л.
2. 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. Киселев, Д.И. Спитченко // Известия вузов. Черная металлургия. 2015. №9. – с. 667-671; 0,2 п.л / 0,08 п.л.
Kazyayev M.D. Complex external heat transfer at a vertical chamber furnace for long components / M. D. Kazyayev, A. V. Vokhmyakov, E. V. Kiselev, D. I. Spitchenko // Steel in Translation Volume 45, Issue 9, 1 September 2015, Pages 650-653 (Scopus).

В других изданиях:

3. 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 (ТИМ' 2012) с международным участием. / под ред. Н.А. Спирина.

- Екатеринбург: УрФУ, 2012 – с. 124-129; 0,27 п.л / 0,27 п.л.
(авторские не разделены).
4. 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; 0,27 п.л. / 0,1 п.л.
 5. 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; 0,34 п.л. / 0,11 п.л.
 6. 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» - Екатеринбург: УрФУ 2014. С. 205-216; 0,26 п.л. / 0,1 п.л.
 7. Казяев М.Д. Влияние конструкции футеровки и типа топливосжигающих устройств на тепловую работу камерных вертикальных печей / М.Д. Казяев, А.М. Вохмяков, Е.В. Киселев, Д.И. Спитченко, Д.М. Казяев // Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология» VII международная научно-практическая конференция – М. 2014. – с. 224-235; 0,36 п.л. / 0,12 п.л.
 8. Казяев М.Д. Исследование теплообмена в вертикальной камерной печи / М.Д. Казяев, А.М. Вохмяков, Е.В. Киселев, 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; 0,2 п.л. / 0,08 п.л.