

На правах рукописи

Вохмяков Александр Михайлович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НАГРЕВА МЕДНЫХ И ЛАТУННЫХ
СЛЯБОВ В ПРОХОДНЫХ ПЕЧАХ, ОБОРУДОВАННЫХ СКОРОСТНЫМИ
ГОРЕЛКАМИ**

Специальность 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2012

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

Научный руководитель:

Профессор, кандидат технических наук
Казяев Михаил Дмитриевич

Официальные оппоненты:

Дружинин Геннадий Михайлович, доктор технических наук,
ОАО «ВНИИМТ», директор по науке и технике

Сеничкин Борис Кронидович, кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», доцент кафедры «Теплотехнические и энергетические системы»

Ведущая организация:

ОАО «Уралгипромез»

Защита состоится **«14» мая 2012** года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.05 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина» по адресу: г.Екатеринбург, ул.Мира, 19, главный учебный корпус, ауд. I (зал Ученого совета), тел. (343) 375-95-49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина».

Автореферат разослан **«14» апреля 2012** г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,

Карелов Станислав Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Metallургические и машиностроительные заводы в своей структуре имеют большое число прокатных и кузнечно-прессовых цехов, в которых эксплуатируется огромный парк нагревательных и термических печей, осуществляющих сложные технологии нагрева металлической продукции, как под пластическую деформацию, так и для придания изделиям необходимых физико-механических свойств.

На заводах России печи этого класса исчисляются тысячами. Но спроектированные и построенные в 40-х...70-х годах прошлого столетия нагревательные и термические печи морально и физически устарели и не соответствуют в большинстве случаев современным требованиям технологии нагрева, качества продукции и экономии топлива.

Поэтому одним из наиболее актуальных направлений совершенствования технологического режима нагрева металла является модернизация печного парка заводов, основной эффект которой достигается за счет внедрения современных скоростных рекуперативных горелок.

Применение скоростных горелок позволяет интенсифицировать конвективный теплообмен, исследованием которого активно занимались: Михеев М.А., Кирпичев М.В., Зобнин Б.Ф., Жукаускас А.А., Тимофеев В.Н., Арсеев А.В., Казяев М.Д. и др. Исследования упомянутых авторов в большинстве своем направлены на изучение закономерностей конвективного теплообмена в котельных установках и в печах с горелками простой конструкции. Основная часть исследований выполнялась на стендах и лабораторных установках. В современных печах, оснащенных скоростными автоматизированными горелками, роль конвективного теплообмена изучена слабо. Актуальность данной работы заключается в том, что в ней представлены результаты исследования конвективного теплообмена в проходной печи, оснащенной скоростными рекуперативными горелками, в условиях действующего производства, а также определены пути интенсификации конвективного теплообмена для повышения производительности печи и снижения энергозатрат при нагреве металлов.

Связь работы с крупными научными программами. Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры России» по теме: «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров в области металлургических технологий» (Государственный контракт № 02.740.11.0152).

Целью диссертационной работы является установление соотношения лучистого и конвективного теплообмена в проходных нагревательных печах, оснащенных скоростными горелками, на основе промышленного эксперимента для совершенствования методов расчета при конструировании печей.

Для достижения поставленной цели выделены следующие **задачи**:

1. Разработать методику проведения промышленного эксперимента на проходной нагревательной печи.
2. Провести промышленный эксперимент с определением параметров тепловой работы печи на базе балансовых исследований.

3. Выполнить компьютерное моделирование газодинамики в рабочем пространстве исследуемой печи, с целью выявления влияния режима движения газов на теплообмен.

4. Вывести аппроксимирующую зависимость для определения коэффициентов конвективного теплообмена в подобных печах.

5. Усовершенствовать конструкцию печи для повышения ее энергоэффективности и производительности.

Объект исследования – проходная печь для нагрева медных и латунных слябов, оснащенная скоростными рекуперативными горелками.

Предмет исследования – конвективный теплообмен в условиях повышенных скоростей движения продуктов горения в рабочем пространстве печи.

Методы исследования. Для достижения поставленной цели разработана методика проведения промышленного эксперимента, включающая в себя алгоритм обработки данных, полученных в ходе исследований. Промышленный эксперимент выполнен на проходной нагревательной печи ОАО «Кировский завод по обработке цветных металлов» г.Киров, в условиях действующего производства. Измерения осуществляли современными стационарными и переносными приборами, прошедшими государственную поверку, что определило достоверность полученных результатов. При обработке экспериментальных данных использован расчетно-теоретический анализ, основу которого составили положения теории тепло- и массообмена, теории металлургических процессов и методы математической статистики, при этом противоречий известным физическим положениям установлено не было.

Научная новизна результатов работы.

1. Разработана методика проведения промышленного эксперимента на проходной печи при нагреве медных и латунных слябов в условиях различных технологических режимов.

2. Проведен промышленный эксперимент на исследуемой печи, в ходе которого получены данные о лучистом и конвективном теплообмене при нагреве слябов скоростными рекуперативными горелками, работающими в импульсном режиме.

3. Выполнена обработка экспериментальных данных, позволившая выявить соотношение лучистой и конвективной составляющих внешнего теплообмена при рабочей температуре до 1000°C.

4. Установлена аппроксимирующая зависимость для расчета коэффициентов конвективного теплообмена с учетом кратности циркуляции газов в рабочем пространстве печи.

5. При помощи компьютерного моделирования газодинамики рабочего пространства исследуемой печи определены направления дальнейшей интенсификации конвективного теплообмена для печей подобной конструкции.

Практическая значимость работы.

1. Определено влияние импульсного режима работы скоростных рекуперативных горелок на величину конвективного теплообмена.

2. Усовершенствована методика расчета тепловой работы печи с использованием выведенной аппроксимирующей зависимости, позволяющей рассчитывать конвективный теплообмен.

3. Определены направления по дальнейшему совершенствованию конструкции проходных печей с боковой системой отопления для повышения производительности печи и снижения энергозатрат при нагреве металла под пластическую деформацию.

Личный вклад автора. Личный вклад автора работы заключается в постановке цели и задач исследования, разработке его методологии, в личном участии при проведении промышленного эксперимента, в обработке экспериментальных данных и разработке основ научного обоснования применения скоростных рекуперативных горелок для интенсификации конвективного теплообмена и в целом тепловой работы печи.

Автор защищает:

1. Методику промышленного эксперимента.
2. Результаты исследований теплообмена в проходной печи при нагреве медных и латунных слябов скоростными рекуперативными горелками.
3. Аппроксимирующую зависимость для определения параметров конвективного теплообмена.
4. Результат энергосбережения при интенсификации конвективного теплообмена.

Реализация результатов. Рекомендации по дальнейшей интенсификации конвективного теплообмена за счет рационализации геометрии рабочего пространства проходной печи представлены в ОАО «Кировский завод по обработке цветных металлов». Результаты исследований конвективного теплообмена использованы ООО «НПК «УралТермоКомплекс» при выполнении предпроектной проработки новой конструкции нагревательной печи с шагающим подом для ОАО «Кировский завод по обработке цветных металлов».

Апробация работы. Материалы диссертации доложены и обсуждены на международной научно-практической конференции «Творческое наследие Б.И.Китаева», УГТУ-УПИ (г.Екатеринбург, 2009 г.) и на научно-технической конференции «Теория и практика нагревательных печей в XXI веке» (г.Екатеринбург, 2010 г.).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы изложено в 11 научных статьях, из них 3 опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложена на **131** страницах машинописного текста и содержит **22** таблицы, **62** рисунка и список использованной литературы, содержащий **63** наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована актуальность темы диссертации, цель и задачи работы, дана характеристика ее научной новизны и практической значимости.

Первая глава посвящена обзору выполненных исследований по конвективному

теплообмену в различных системах, а также современным топливосжигающим устройствам с высокой скоростью истечения струи.

Во второй главе дано описание исследуемого объекта, проходной печи для нагрева медных и латунных слэбов, оснащенной скоростными рекуперативными горелками, работающими в импульсном режиме «включено-выключено».

Проходная нагревательная печь

Печь была подвергнута комплексной модернизации, в ходе которой: кирпичная футеровка печи была заменена на футеровку из мягких керамоволокнистых материалов; система отопления печи построена на автоматизированных скоростных рекуперативных горелках Еsomax 5М; внедрена многоуровневая система автоматического регулирования тепловым режимом печи по 4 зонам. Общий вид печи представлен на рисунке 1. Основные характеристики проходной нагревательной печи представлены в таблице 1.

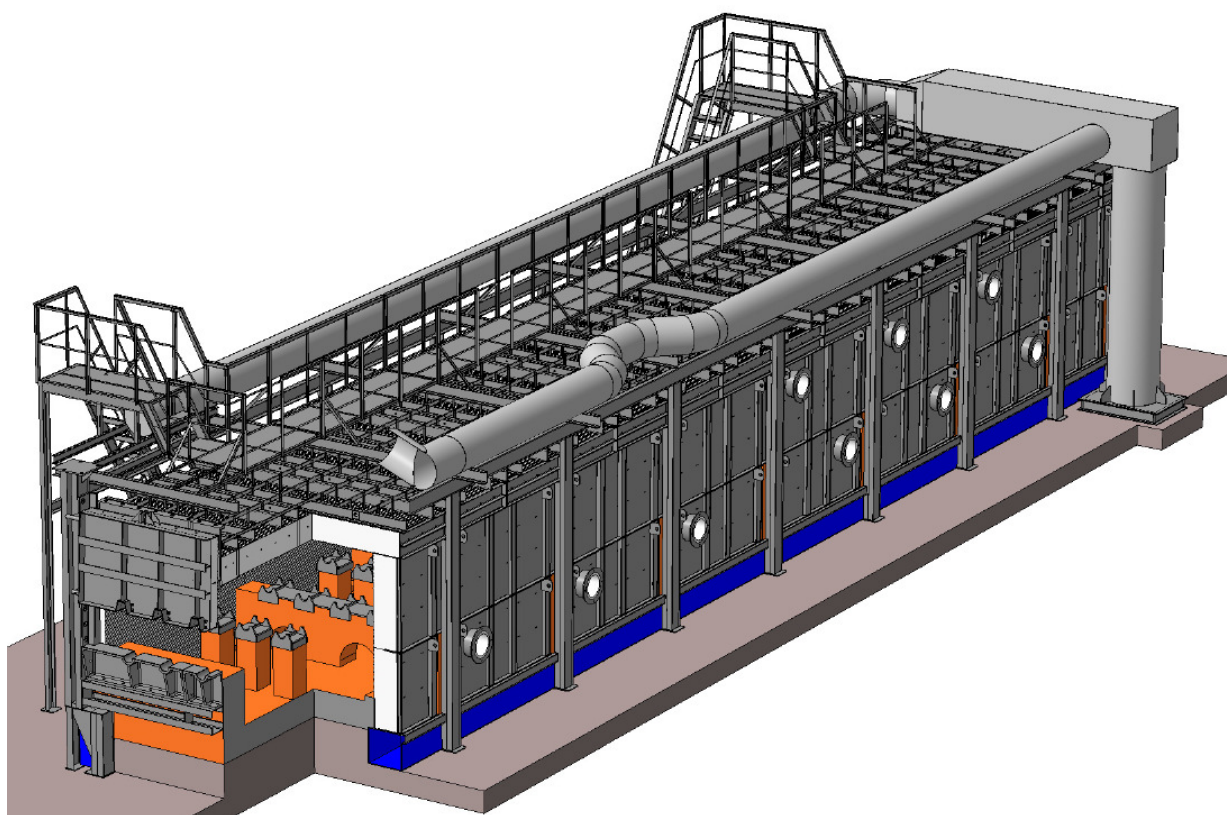


Рисунок 1 – Общий вид печи

Таблица 1 – Основные характеристики печи

№	Наименование показателя	Значения параметров
1	2	3
1	Тип печи	Проходная, нагревательная
2	Размеры рабочего пространства печи, мм: длина ширина высота	20380 2775 1970

1	2	3
3	Режим работы	Непрерывно-дискретный
4	Температура нагрева металла (максимальная), °С	1030
5	Максимальная производительность, т/ч	13
6	Топливо и его теплота сгорания, Q_n^p , кДж/м ³	Природный газ, 33100
7	Тип горелок	Рекуперативные, Есомах 5MB545
8	Максимальная тепловая мощность горелки, кВт	250
9	Количество горелок	20
10	Максимальный расход газа на одну горелку, м ³ /ч	30
11	Расход газа на печь (максимальный), м ³ /ч	600
12	Давление природного газа перед печью, кПа	8 – 9
13	Давление природного газа перед горелками, кПа	5 – 7
14	Расход воздуха на горение, м ³ /ч	6000
15	Давление воздуха перед печью, кПа	12
16	Давление воздуха перед горелкой, кПа	5 – 7
17	Расход воздуха на эжекцию продуктов сгорания, м ³ /ч	12000
18	Количество зон теплового регулирования, шт	4

Основная технологическая особенность печи заключается в ее работе по непрерывно-дискретному режиму. Садка из 22 слябов загружается в печь с интервалом 3..7 мин/сляб, после чего движение металла прекращается до тех пор, пока температура первых слябов не достигнет необходимого значения, после чего металл выдается из печи с тем же интервалом, что и при загрузке.

Второй отличительной особенностью работы печи является импульсный режим работы горелок. Отмеченное выше существенно осложняет определение параметров работы печи и обработку экспериментальных данных.

Скоростная рекуперативная горелка Есомах 5

Рекуперативная горелка представляет собой газогорелочное устройство со встроенным в него рекуператором. Продукты сгорания удаляются из рабочего пространства печи через горелку, обеспечивая подогрев воздуха внутри корпуса горелки до 650°С при температуре уходящих газов 1100°С.

Схема рекуперативной горелки и ее работы представлена на рисунке 2.

Внедрение скоростных рекуперативных горелок позволяет сократить затраты на строительство печи (не нужен рекуператор и боровы), снизить удельный расход топлива и, соответственно, уменьшить эксплуатационные затраты.

Кроме того, импульсный режим работы горелок в сочетании с современной автоматикой позволяют упростить систему отопления печи.

Исследуемый объект, описанный в данной главе, после модернизации соответствует самым передовым требованиям к конструкции подобных печей, а также оснащен современным оборудованием, в т.ч. и газосжигающим. Поэтому для

решения поставленных задач промышленный эксперимент проведен именно на этом объекте.

В третьей главе изложена методика проведения промышленного эксперимента и обработки экспериментальных данных.

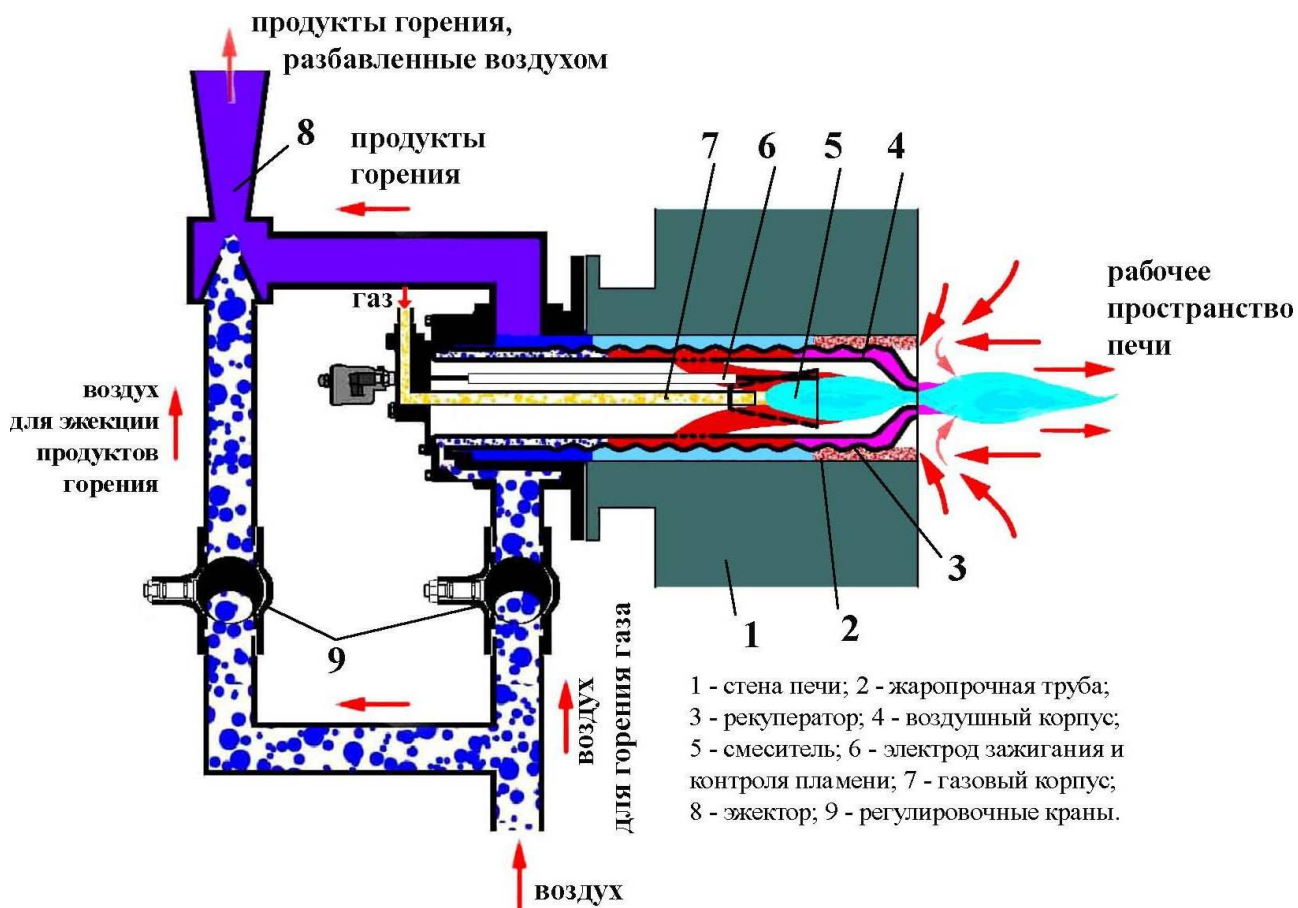


Рисунок 2 – Схема рекуперативной горелки и ее работы

Суть методики с последующей обработкой данных заключается в том, что сальдо-поток и суммарный коэффициент теплообмена определяли из баланса тепла, получаемого нагреваемыми слябами. Далее выполняли расчет плотности лучистого теплового потока и коэффициента лучистого теплообмена и по разнице этих показателей находили плотность конвективного теплового потока и коэффициент конвективного теплообмена, соответственно. Алгоритм расчета теплообмена при нагреве слябов представлен на рисунке 3.

Температуру газов в рабочем пространстве печи измеряли при помощи стационарных термопар. Для определения достоверности показаний стационарных термопар были проведены поверочные замеры отсасывающей термопарой в точках установки стационарных термопар. При этом разность в показаниях термопар не превышала 0,8%, поэтому в расчетах теплообмена за температуру газов принимали температуру, измеренную стационарными термопарами. Такое допущение возможно поскольку применение горелок с высокой скоростью истечения струи, приводит к интенсивному движению газов в рабочем пространстве печи, и, следовательно, к равномерному распределению температур, за исключением тех

случаев, когда термопара устанавливается вблизи металла.

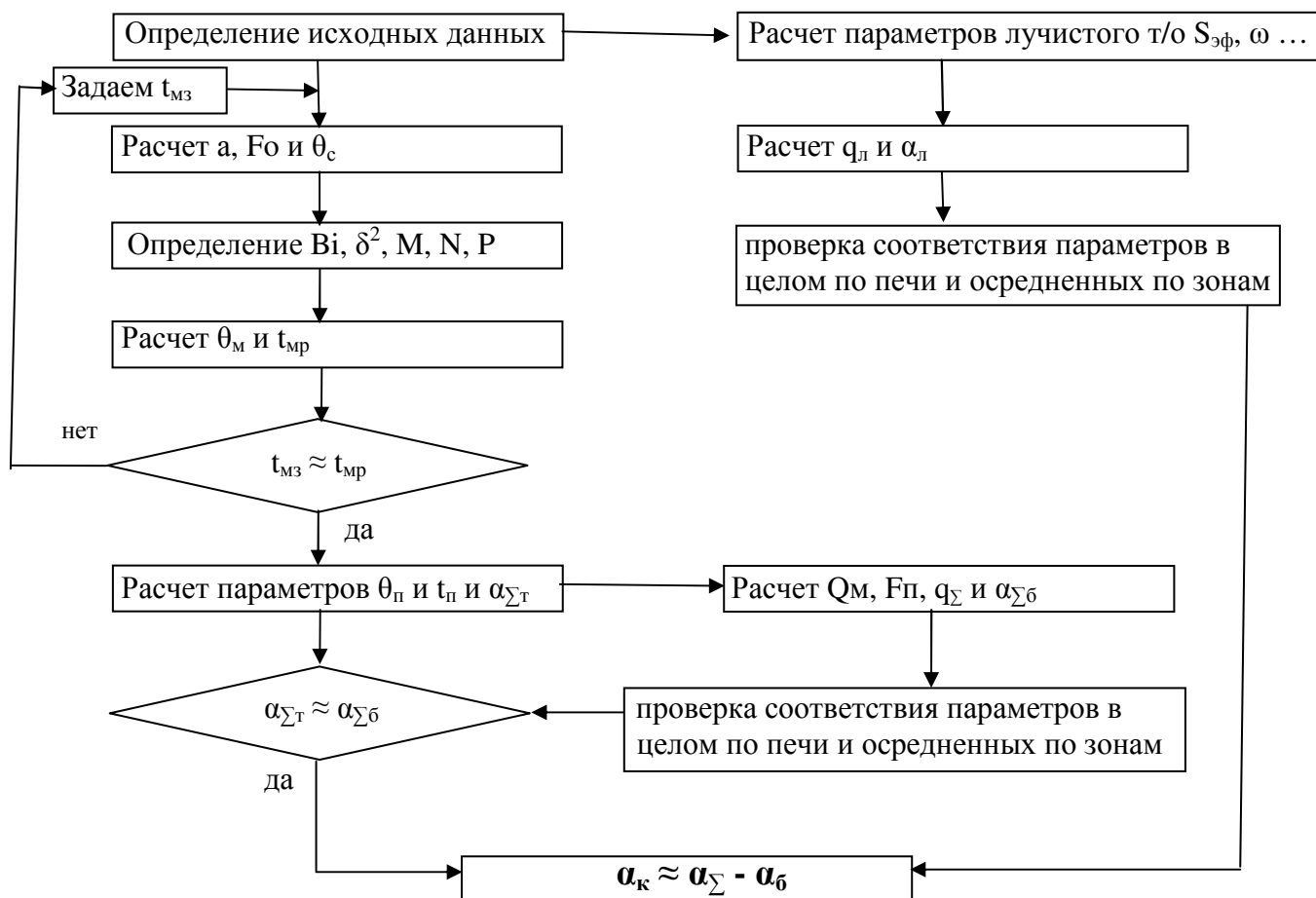


Рисунок 3 – Алгоритм расчета теплообмена при нагреве слябов

Для дальнейшей обработки экспериментальных данных и определения характеристик теплообмена при нагреве слябов непрерывно измеряли температуры в рабочем пространстве печи по зонам, середины сляба, расход природного газа и другие параметры для составления теплового баланса печи.

Схема расположения термопар представлена на рисунке 4.

Расчет суммарных коэффициентов теплообмена в зонах печи

В каждой зоне печи рассчитывали необходимые характеристики теплообмена в границах сечений C0-C1, C1-C2 и т.д. (см. рис.5).

Алгоритм расчета суммарного коэффициента теплообмена представлен на примере нагрева слябов в I виртуальной тепловой зоне печи, т.е. в сечениях C0-C1.

Предварительно задавали среднемассовую температуру сляба $t_{м1}$ в сечении C1.

По справочным данным находили теплоемкость и теплопроводность сляба в сечениях $c_{м1}$ и $c_{м0}$, и $\lambda_{м1}$ и $\lambda_{м0}$ при $t_{м1}$ и $t_{м0}$ и их средние значения, после чего рассчитывали коэффициент температуропроводности и число Фурье.

При известных начальной среднемассовой температуре, конечной температуре середины сляба и температуре газов определяли относительную разность температур:

$$\theta_c = \frac{t_{zI} - t_{cl}}{t_{zI} - t_{m0}}, \quad (1)$$

где t_{zI} , t_{cl} , t_{m0} - температуры газов, середины сляба и среднемассовая в соответствующих зонах и сечениях.

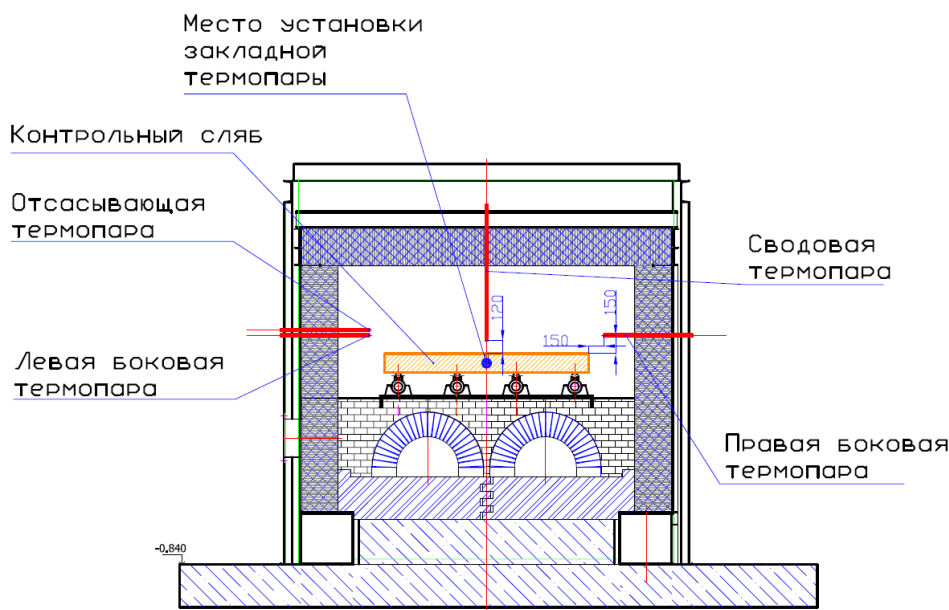


Рисунок 4 – Схема установки термопар для измерения температуры в рабочем пространстве печи и середины сляба

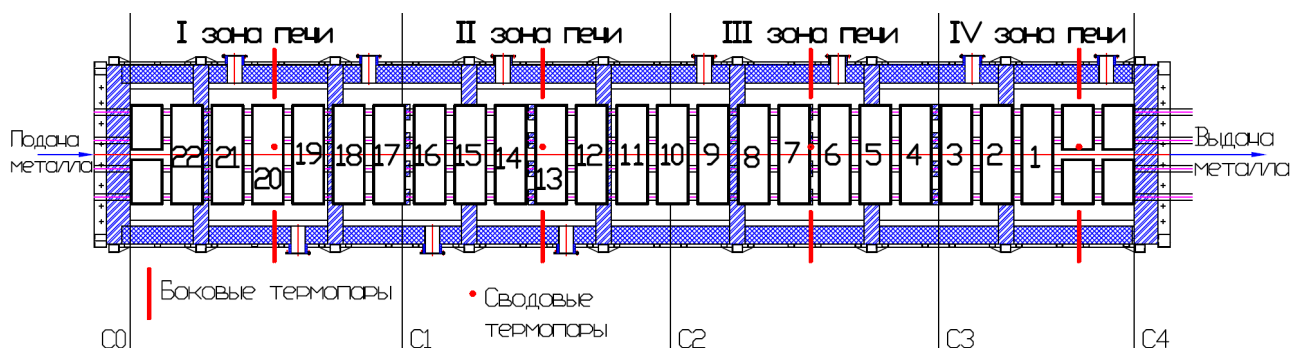


Рисунок 5 – Схема расположения слябов в печи и расчетные сечения

Затем по относительной разности температур (θ_c) и числу Фурье по графикам для неограниченной пластины определяли значение числа Био (и коэффициенты нагрева δ^2 , M , N , P) и относительную температуру массы:

$$\theta_{m1} = M_1 \cdot e^{-(\delta_1^2 \cdot Fo_1)}, \quad (2)$$

из которой находили среднемассовую температуру сляба в конце первой зоны печи:

$$t_{m1} = t_{z1} - \theta_{m1} \cdot (t_{z1} - t_{m0}) \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3)$$

После чего сравнивали среднемассовую температуру сляба, заданную предварительно, и полученную расчетным путем. Если расхождение температур превышало 5%, то повторяли расчет с откорректированным значением среднемассовой температуры. При обработке экспериментальных данных, расчеты повторяли до тех пор, пока значения разности среднемассовых температур не становились близкими к нулю.

Далее находили относительную температуру поверхности:

$$\theta_{n1} = P_1 \cdot e^{-(\delta_l^2 \cdot Fo_1)}, \quad (4)$$

и температуру поверхности сляба в первом сечении С1:

$$t_{n1} = t_{c1} - \theta_{n1} \cdot (t_{c1} - t_{m0}) \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (5)$$

Зная число Био рассчитывали суммарный коэффициент теплообмена:

$$\overline{\alpha}_{\Sigma lm} = \frac{Bi_l \cdot \lambda_l}{S/2} \frac{Bm}{m^2 \cdot K}, \quad (6)$$

где S – толщина сляба, м.

В целях проверки расчетного значения суммарного коэффициента теплообмена выполняли расчет суммарного коэффициента теплообмена из баланса теплоты, получаемой металлом.

Приращение среднемассовой температуры за период нагрева в первой зоне печи:

$$\Delta t_{mI} = t_{m1} - t_{m0} \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (7)$$

Количество теплоты, полученной слябом в первой зоне печи:

$$Q_{mI} = m_{cl} \cdot \Delta t_{mI} \cdot \overline{c}_{mI} \text{ кДж}, \quad (8)$$

где m_c – масса сляба, кг.

Поверхность теплообмена сляба при двустороннем нагреве равна:

$$F_n = 2 \cdot A \cdot B \text{ м}^2, \quad (9)$$

где A и B – длина и ширина сляба, соответственно;

Плотность сальдо потока составит:

$$\overline{q}_I = \frac{Q_{mI}}{F_n \cdot \Delta \tau_I} \frac{\kappa Bm}{m^2}, \quad (10)$$

где $\Delta \tau_I$ – время нагрева сляба в первой зоне печи, с.

Суммарный коэффициент теплообмена из баланса теплоты:

$$\overline{\alpha}_{\Sigma Ib} = \frac{\overline{q}_I \cdot 1000}{(\overline{t}_{cl} - t_{n1})} \frac{Bm}{m^2 \cdot K}, \quad (11)$$

$$\text{где } \overline{t}_{n1} = (t_{n1} + t_{n0}) \cdot k \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (12)$$

k – коэффициент, учитывающий тангенс угла наклона кривой нагрева сляба в зоне печи, ($k = 0,5 \dots 0,7$).

Расхождение значений суммарных коэффициентов теплообмена из баланса теплоты и теплообмена не должно превышать 5%.

Аналогично производили расчет суммарных коэффициентов теплообмена во всех остальных зонах печи.

После определения всех параметров теплообмена при нагреве одного сляба по зонам проверяли соответствие зональных параметров теплообмена суммарным по всей печи.

Количество теплоты, полученное слябом при прохождении всей печи:

$$Q_{m, \text{печ}} = m_c \cdot \Delta t_m \cdot \overline{c}_m \text{ кДж}. \quad (13)$$

Суммарное количество теплоты, полученное металлом по зонам печи:

$$Q_{m, \text{зон}} = Q_{mI} + Q_{mII} + Q_{mIII} + Q_{mIV} \text{ кДж}. \quad (14)$$

Разность между $Q_{m, \text{печ}}$ и $Q_{m, \text{зон}}$ не должна превышать 5%.

Средняя плотность сальдо-потока на металл при прохождении сляба по печи

равна:

$$\bar{q}_{печ} = \frac{Q_{м.печ}}{F_n \cdot \tau_{нагрева}} \frac{\kappa Bm}{M^2}. \quad (15)$$

Средняя плотность сальдо-потока на металл при прохождении сляба через отдельные зоны печи:

$$\begin{aligned} \bar{q}_{зон} = & \bar{q}_I \cdot \Delta\tau_I / \tau_{нагрева} + \bar{q}_{II} \cdot \Delta\tau_{II} / \tau_{нагрева} + \bar{q}_{III} \cdot \Delta\tau_{III} / \tau_{нагрева} + \\ & + \bar{q}_{IV} \cdot \Delta\tau_{IV} / \tau_{нагрева} \frac{\kappa Bm}{M^2}. \end{aligned} \quad (16)$$

Средняя плотность сальдо потока в целом по печи должна быть равна средней плотности сальдо потока, осредненного по зонам.

Суммарный коэффициент теплообмена средний по печи:

$$\bar{\alpha}_{печ} = \frac{\bar{q}_{зон}}{(t_z - t_n)} \frac{Bm}{M^2 \cdot K}. \quad (17)$$

Суммарный коэффициент теплообмена, осредненный по зонам печи:

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_{зон} = & \bar{\alpha}_I \cdot \Delta\tau_I / \tau_{нагрева} + \bar{\alpha}_{II} \cdot \Delta\tau_{II} / \tau_{нагрева} + \bar{\alpha}_{III} \cdot \Delta\tau_{III} / \tau_{нагрева} + \\ & + \bar{\alpha}_{IV} \cdot \Delta\tau_{IV} / \tau_{нагрева} \frac{Bm}{(M^2 \cdot K)}. \end{aligned} \quad (18)$$

При равенстве среднего суммарного коэффициента теплообмена в целом по печи и суммарного коэффициента теплообмена, осредненного по зонам, расчет утверждался. В ином случае расчет выполнен не верно.

Далее в соответствии с методикой производили расчет лучистого теплообмена.

Расчет коэффициентов лучистого теплообмена

При расчете суммарных коэффициентов теплообмена по всем зонам печи были рассчитаны температуры поверхности слябов, которые являются ключевым параметром при расчете лучистого теплообмена.

Необходимо отметить, что при расчете лучистого теплообмена не учитывалось излучение факелов, поскольку в скоростных рекуперативных горелках, установленных на печи, смешение газа и воздуха, воспламенение и горение смеси происходит в корпусе горелки, а непосредственно в рабочем пространстве печи происходит только догорание газа в коротком слабосветящем факеле. Поэтому объем факелов всех двадцати горелок по отношению к свободному объему рабочего пространства печи несравненно мал, и рабочее пространство печи, в основном, заполнено продуктами полного горения.

Алгоритм расчета коэффициента лучистого теплообмена далее изложен на примере нагрева слябов в I виртуальной тепловой зоне печи, т.е. в сечениях С0-С1.

Расчет параметров лучистого теплообмена в сечении С0.

- Эффективная толщина излучающего слоя газов:

$$S_{эф0} = \frac{3,6V_{св}}{(F_{фут} + F_{мет} + F_{злис} + F_{прис})} \text{ м}, \quad (19)$$

где $V_{св}$ - свободный объем рабочего пространства печи, м^3 ;

$F_{фут}, F_{мет}, F_{злис}, F_{прис}$ - площади поверхностей футеровки, нагреваемого металла,

глиссажных труб и вспомогательных приспособлений, соответственно, м^2 .

- Степень развития футеровки печи:

$$\omega_0 = \frac{F_{\text{фут}}}{F_{\text{мет}}} . \quad (20)$$

- Коэффициент газового излучения:

$$\kappa_{\text{г0}} = \left(\frac{0,78 + 0,016 \cdot H_2O}{\sqrt{0,01 \cdot (CO_2 + H_2O) \cdot S_{\text{эф}}}} - 0,1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{t_{\text{г0}} + 273}{1000} \right) \cdot 0,01(CO_2 + H_2O), \quad (21)$$

где CO_2 и H_2O - содержание диоксида углерода и паров воды в продуктах горения, %;

- Степень черноты газов:

$$\varepsilon_{\text{г0}} = 1 - e^{-\kappa_{\text{г0}} \cdot S_{\text{эф0}}} . \quad (22)$$

- Приведенный коэффициент излучения:

$$C_{\text{г.к.м.0}} = C_0 \cdot \frac{\varepsilon_{\text{м}} \cdot (\omega_0 + 1 - \varepsilon_{\text{г0}})}{[\varepsilon_{\text{м}} + \varepsilon_{\text{г0}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{м}})] \cdot \frac{1 - \varepsilon_{\text{г0}}}{\varepsilon_{\text{г0}}} + \omega_0} \cdot \frac{Вт}{(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)} . \quad (23)$$

где C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $\frac{Вт}{(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)}$;

$\varepsilon_{\text{м}}$ - степень черноты металла.

Плотность лучистого теплового потока в сечении С0:

$$q_{\text{мл0}} = C_{\text{экм0}} \cdot \left[\left(\frac{t_{\text{з0}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{н0}} + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot \varphi_{\text{м.ст0}} \cdot \frac{Вт}{\text{м}^2} . \quad (24)$$

- Угловой коэффициент с металла на металл:

$$\varphi_{\text{мм0}} = \sqrt{1 + \left(\frac{h}{a_{\text{сл}}} \right)^2} - \frac{h}{a_{\text{сл}}} , \quad (25)$$

где h – расстояние между слябами, м;

$a_{\text{сл}}$ – высота слябов, м.

- Угловой коэффициент с металла на стенку:

$$\varphi_{\text{м.ст0}} = 1 - \varphi_{\text{мм0}} . \quad (26)$$

Аналогично рассчитывали параметры теплообмена для сечения С1.

Средняя плотность лучистого теплового потока в первой зоне:

$$\bar{q}_{\text{млI}} = \frac{q_{\text{млI}} - q_{\text{мл0}}}{\ln \frac{q_{\text{млI}}}{q_{\text{мл0}}}} \cdot \frac{Вт}{\text{м}^2} , \quad (27)$$

Коэффициент лучистого теплообмена в зоне I:

$$\bar{\alpha}_{\text{лI}} = \frac{\bar{q}_{\text{млI}}}{t_{\text{гI}} - t_{\text{нI}}} \cdot \frac{Вт}{(\text{м}^2 \cdot \text{К})} . \quad (28)$$

Аналогичные расчеты выполняли для всех остальных зон печи.

Рассчитав коэффициенты лучистого теплообмена во всех четырех зонах печи, определяли его среднее значение.

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_{\text{л.зон}} = & \bar{\alpha}_{\text{лI}} \cdot \Delta\tau_{\text{I}} / \tau_{\text{нагрева}} + \bar{\alpha}_{\text{лII}} \cdot \Delta\tau_{\text{II}} / \tau_{\text{нагрева}} + \bar{\alpha}_{\text{лIII}} \cdot \Delta\tau_{\text{III}} / \tau_{\text{нагрева}} + \\ & + \bar{\alpha}_{\text{лIV}} \cdot \Delta\tau_{\text{IV}} / \tau_{\text{нагрева}} \cdot \frac{Bm}{(m^2 \cdot K)}. \end{aligned} \quad (29)$$

Полученные данные о суммарных и лучистых коэффициентах теплообмена позволяют определить коэффициенты конвективного теплообмена.

Расчет коэффициента конвективного теплообмена

Коэффициент конвективного теплообмена определяли по формуле:

$$\bar{\alpha}_{\text{ки}} = \bar{\alpha}_{\Sigma i} - \bar{\alpha}_{\text{ли}} \cdot \frac{Bm}{(m^2 \cdot K)}. \quad (30)$$

Для оценки доли конвективной и лучистой составляющих теплообмена рассчитывали их относительные значения:

$$K_{\text{ки}} = \frac{\bar{\alpha}_{\text{ки}}}{\bar{\alpha}_{\Sigma i}} \cdot 100 \%. \quad (31)$$

$$K_{\text{ли}} = \frac{\bar{\alpha}_{\text{ли}}}{\bar{\alpha}_{\Sigma i}} \cdot 100 \%. \quad (32)$$

Нагрев слябов при балансовых исследованиях проходной печи

В ходе промышленного эксперимента было проведено исследование нагрева медных и латунных слябов и основных характеристик тепловой работы печи.

Данные, полученные в ходе эксперимента при нагреве латунных слябов и результаты их обработки представлены в таблицах 2 и 3, а при нагреве медных слябов - в таблицах 4 и 5, соответственно.

Таблица 2 – Экспериментальные данные при нагреве латунных слябов

Параметр	№ сляба (см. рис.4)				
	1	8	14	21	22
Начальная температура середины и поверхности сляба (измеренная), °С	22,5	24	28	28	28,5
Конечная температура середины сляба (измеренная), °С	839	837	843,3	829,5	819
Конечная температура поверхности сляба (расчетная), °С	839,8	838,3	844	831,6	822
Конечный перепад температуры по толщине сляба (расчетный), °С	0,8	1,3	0,7	2,1	3
Время нагрева сляба, мин	233	252	252	251	249

Таблица 3 – Результаты обработки экспериментальных данных (средние показатели при нагреве латунных слябов)

№	Параметр	Зона печи				Средние по печи
		1	2	3	4	
1	Суммарный коэффициент теплообмена (из баланса тепла), Вт/(м²·К)	51,58	118,89	141,30	194,06	97,47
2	Коэффициент лучистого теплообмена, Вт/(м²·К)	41,89	70,70	82,58	86,69	63,41
3	Коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м²·К)	9,68	48,19	58,72	107,37	34,06
4	Доля лучистого теплообмена, %	81,64	63,14	61,66	48,24	65,05
5	Доля конвективного теплообмена, %	18,36	36,86	38,34	51,76	34,95

Таблица 4 – Экспериментальные данные при нагреве медных слябов

№ сляба (см. рис.4)	1	7	13	19	22
Параметр					
Начальная температура середины и поверхности сляба (измеренная), °С	60	29,5	31,5	29	35
Конечная температура середины сляба (измеренная), °С	903	921	919	914	901,5
Конечная температура поверхности сляба (расчетная), °С	903,6	921,2	919,2	914,3	902,2
Конечный перепад температуры по толщине сляба (расчетный), °С	0,6	0,2	0,2	0,3	0,7
Время нагрева сляба, мин	152	154	176	169	167

Таблица 5 – Результаты обработки экспериментальных данных (средние показатели при нагреве медных слябов)

№	Параметр	Зона печи				Средние по печи
		1	2	3	4	
1	Суммарный коэффициент теплообмена (из баланса тепла), Вт/(м²·К)	87,45	190,98	201,49	153,15	166,70
2	Коэффициент лучистого теплообмена, Вт/(м²·К)	42,09	61,47	94,08	80,97	66,93
3	Коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м²·К)	45,37	129,56	107,37	72,17	99,78
4	Доля лучистого теплообмена, %	51,68	34,60	52,64	54,05	40,15
5	Доля конвективного теплообмена, %	48,32	65,40	47,36	45,95	59,85

Структура теплового баланса проходной печи при нагреве латунных слябов приведена в таблице 6.

Таблица 6 – Структура теплового баланса проходной печи при нагреве латунных слябов

Приход тепла	кВт	%	Расход тепла	кВт	%
1. Химическая теплота топлива	2725,71	85,80	1. Полезная затрата теплоты на металл	936,43	29,48
2. Теплота подогретого воздуха	451,22	14,20	2. Потери теплоты с уходящими газами	1106,89	34,84
			4. Потери теплоты с охлаждающей водой	542,13	17,06
			5. Потери теплоты теплопроводностью	388,26	12,22
			6. Остальные потери	203,22	6,40
Итого:	3176,93	100	Итого:	3176,93	100

Сравнительные показатели проходной печи, оснащенной обычными двухпроводными горелками и скоростными рекуперативными горелками представлены в таблице 7.

Таблица 7 - Сравнительные показатели проходной печи, оснащенной обычными двухпроводными горелками и скоростными рекуперативными горелками

Показатель	Проходная печь, оснащенная обычными двухпроводными горелками	Проходная печь, оснащенная скоростными рекуперативными горелками
Производительность, т/ч	5,555	9,643
Средний расход топлива, м ³ /ч	350,62	267,03
Удельный расход условного топлива, кг усл. топлива/т	72,11	31,64

Из теплового баланса и показателей работы печи, видно: во-первых, КПД печи по сравнению с аналогичными печами существенно выше; во-вторых, при относительно высокой производительности для данного класса печи удельный расход условного топлива укладывается в самые жесткие современные требования энергосбережения.

Из экспериментальных и расчетных данных, представленных в данном разделе видно, что при рабочей температуре 920-930°C существенное влияние на теплообмен оказывает конвекция.

Существенная доля конвективного теплообмена может быть объяснена следующим:

- Первостепенное влияние оказывает скорость истечения продуктов горения из носика горелки, которая достигает 158 м/с. Увеличение скорости турбулизировывает поток, возрастает число Рейнольдса и, соответственно, число Нуссельта.

Существует мнение, что интенсификация конвективного теплообмена за счет увеличения скорости истечения струи приводит к дополнительным затратам энергии, в данном случае это утверждение не актуально, так как повышение скорости истечения струи из носика горелки достигается за счет конструктивного исполнения топливосжигающего устройства: предусмотрено двухступенчатое сжигание газа, первичное сжигание которого происходит в корпусе горелки (в керамической камере), в результате чего резко повышается температура продуктов горения и, следовательно, давление в этой камере, что и приводит к увеличению скорости истечения струи. Также важно отметить, что горелки работают в импульсном режиме всегда с номинальной мощностью, и поэтому скорость истечения струи из носика горелки всегда постоянна.

- Кроме того, на усиление конвекции оказывает рост коэффициента заполнения рабочего пространства печи металлом, что приводит к уменьшению свободного объема рабочего пространства и к увеличению скорости газов в нем. Увеличение коэффициента заполнения является основным направлением интенсификации конвективного теплообмена на исследуемой печи.

Установлено, что при нагреве латунных слябов доля конвективного теплообмена ниже, чем при нагреве медных слябов. Это объясняется более низкой температурой в рабочем пространстве печи при нагреве латуни и, как следствие, уменьшением общего количества газов, циркулирующих в рабочем пространстве.

Исходя из полученных данных, можно сделать однозначный вывод о том, что применение скоростных горелок приводит, во-первых, к интенсификации конвективного теплообмена (его доля по экспериментальным данным достигла 60%) и, во-вторых, обеспечивает равномерное распределение температурных полей в рабочем пространстве печи. Ценность представленных данных заключается в том, что они получены при работе действующего агрегата с соблюдением всех технологических требований к нагреву металла.

Вывод по изложенному материалу: интенсификация конвективного теплообмена обеспечивает повышение производительности печи, снижение удельных расходов топлива и повышение качества нагрева металла.

Конвективный теплообмен, как следует из предыдущего, зависит, прежде всего, от газодинамического режима печи. Выявить характер движения газов при исследованиях данной печи не представлялось возможным ввиду полностью герметичной конструкции.

Для изучения газодинамического режима и выявления его параметров в работе был применен метод компьютерного моделирования, результаты которого представлены **в четвертой главе**.

Моделирование выполнялось в программе ANSYS CFX в масштабе 1:1.

В результате получены данные о движении газов в различных областях рабочего пространства модели печи (см. рис.6, 7 и 8).

На рисунках видно взаимное влияние струй друг на друга. На первом участке истечения струи из носика горелки при скорости истечения 158 м/с, струя увлекает в себя газы, из соседних встречно-паралельных струй, скорость которых падает в среднем до 15...30 м/с. На втором участке истечения струи, после многократного увеличения ее массы, скорость падает до 30-15 м/с. По мере приближения струи к противоположной стенке, часть газов подсасывается в соседние струи, и поэтому масса струи на втором участке снижается. Переток газов между струями приводит к интенсивной циркуляции газов и образованию циркуляционных зон с более низкими скоростями.

Из рисунка 8 видно, что вокруг поверхности нагреваемого сляба образуется «мешок» газов с низкими скоростями движения. На основании этих исследований можно сделать вывод о том, что дальнейшая интенсификация конвективного теплообмена при нагреве слябов в рассматриваемой проходной нагревательной печи возможна за счет уменьшения свободного объема печи, с целью приближения струй к поверхности металла.

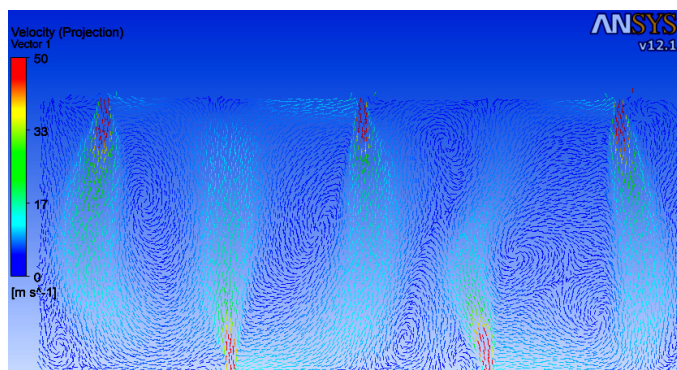


Рисунок 6 – Движение газов
в плоскости верхних горелок

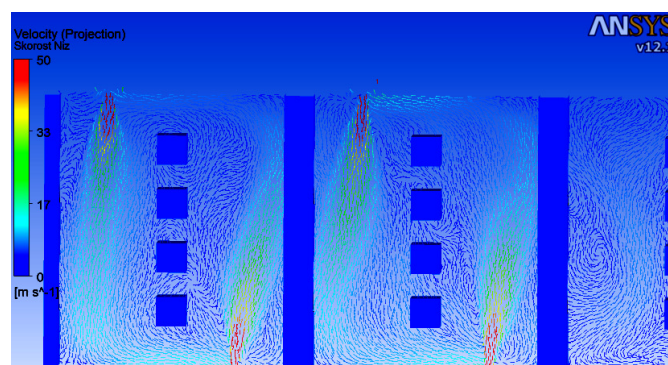


Рисунок 7 – Движение газов
в плоскости нижних горелок

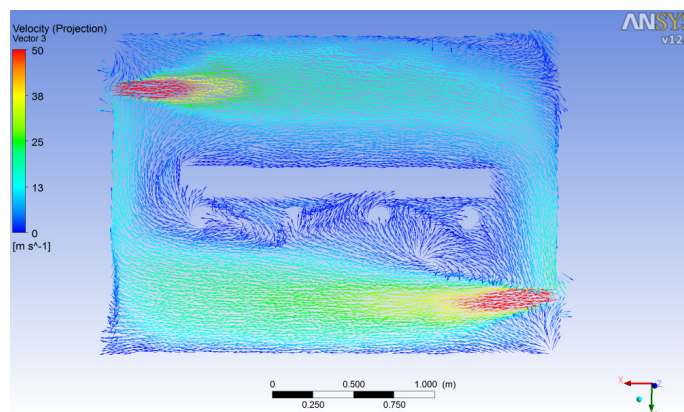


Рисунок 8 – Движение газов в поперечном сечении модели печи

Были проведены измерения скоростей и расходов газов по длине струи в отдельных ее сечениях, что позволило установить количественную характеристику этого массообмена, называемую кратностью циркуляции газов в рабочем пространстве.

Кратность циркуляции характеризуется отношением расхода газов в любом сечении струи к расходу газов, выходящих из носика горелки V_x/V_0 . Исследование газодинамики встречно-параллельных струй позволили установить разнонаправленность векторов отдельных газовых объемов, что приводит к резкому снижению скоростей в циркуляционных зонах.

Изменение кратности циркуляции газов по мере движения струи от горелки до противоположной стенки модели печи показано на рисунке 9.

Из рисунка 9 видно, что до середины длины струи происходит увеличение кратности циркуляции, а, следовательно, и объема струи, т.е. струя интенсивно вовлекает в себя газы соседних струй с низкими скоростями. В дальнейшем наблюдается обратное явление.

В результате обработки данных моделирования установлено, что средняя кратность циркуляции при работе всех газовых струй – 9,6, а средняя скорость по длине струи – 33,8 м/с при начальной ее скорости 158 м/с.

На основании данных, полученных при проведении промышленного эксперимента и моделирования, была выведена аппроксимирующая зависимость для определения величины конвективного теплообмена в проходных печах с шахматным размещением горелок на боковых стенках:

$$Nu = 0,463 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43}, \quad (33)$$

где Nu – число Нуссельта;

Re – число Рейнольдса;

Pr – число Прандтля.

При выведении аппроксимирующей зависимости математический анализ показал, что при расчете числа Рейнольдса необходимо находить среднюю скорость поперечного движения газов с учетом кратности их циркуляции.

В качестве определяющего размера, подставляемого в числа Нуссельта и Рейнольдса рекомендуется эквивалентный размер сляба $L_{эKB}=4F/\Pi$, где F – поверхность сляба, m^2 , а Π – периметр, ограничивающий эту поверхность.

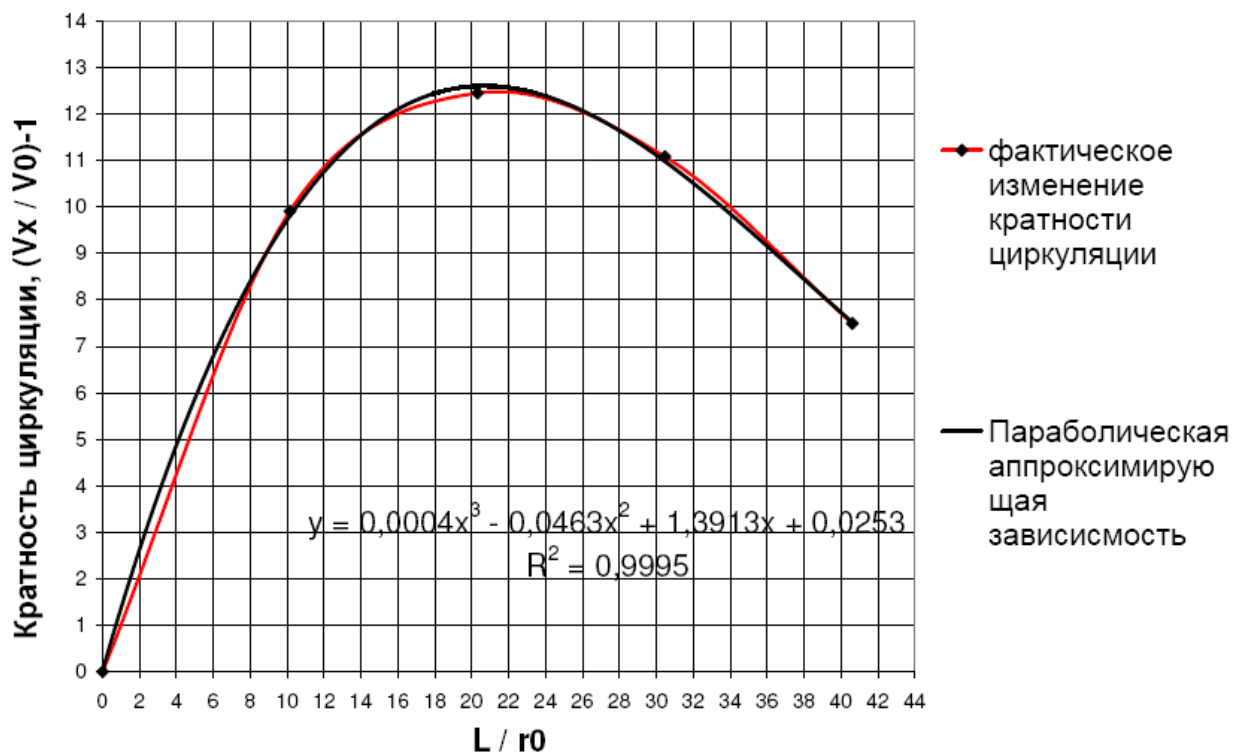


Рисунок 9 – Изменение кратности циркуляции по длине струи: V_x и V_0 - объем струи в любом сечении и на срезе горелки, соответственно; L – длина струи; r_0 – радиус носика горелки

Графическая зависимость $Nu=f(Re, Pr)$ представлена на рисунке 10, из которого видно, что экспериментальные точки лежат вблизи прямой, построенной на основании расчетных данных с использованием выведенной аппроксимирующей зависимости. Данный факт позволяет сделать вывод о том, что выведенная аппроксимирующая зависимость адекватна.

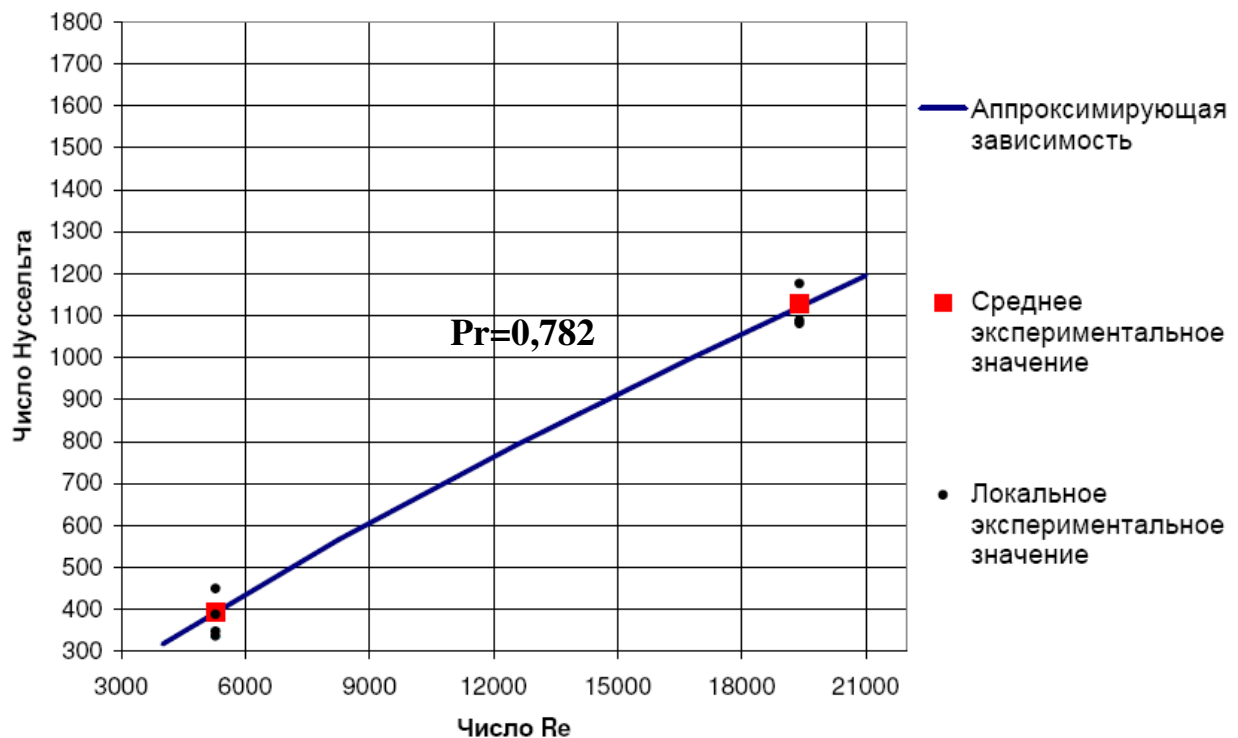


Рисунок 10 – Аппроксимирующая зависимость $Nu=f(Re, Pr)$ по формуле 33

Рационализация геометрии рабочего пространства печи

При моделировании газодинамики в исходной конструкции печи выявлено, что в рабочем пространстве печи вокруг поверхности нагреваемых слябов образуется малоподвижный «газовый мешок» (см.рис.8), что снижает интенсивность конвективного теплообмена. Толщина «газового мешка» по модельным данным составляет ~180 мм сверху и снизу.

Для интенсификации конвективного теплообмена было принято решение уменьшить высоту верхней и нижней частей рабочего пространства печи и приблизить оси горелок к поверхности металла.

Результаты моделирования измененной конструкции печи представлены на рисунках 11-13.

Из представленных рисунков отчетливо видно, что произошло увеличение скорости газовых струй по всей их длине, что в свою очередь привело к усилению циркуляции газов.

В результате обработки данных моделирования установлено, что средняя кратность циркуляции при работе всех газовых струй составила 18,5 (10,6 до изменения размеров рабочего пространства печи), а средняя скорость по длине струи – 42,9 м/с (33,8 м/с до изменения) при начальной скорости 158 м/с.

Из полученных данных видно, что кратность циркуляции газов в рабочем пространстве печи после уменьшения свободного объема рабочего пространства в 0,2 раза увеличилась в 1,75 раза, при увеличении средней скорости струи в 1,27 раза.

Значения коэффициентов конвективного теплообмена до и после изменения конструкции печи представлены в таблице 8, из которой видно, что уменьшение свободного объема рабочего пространства проходной нагревательной печи в 0,2 раза привело к увеличению скорости струи в 1,27 раза и соответственно к увеличению коэффициента конвективного теплообмена на 91...97%.

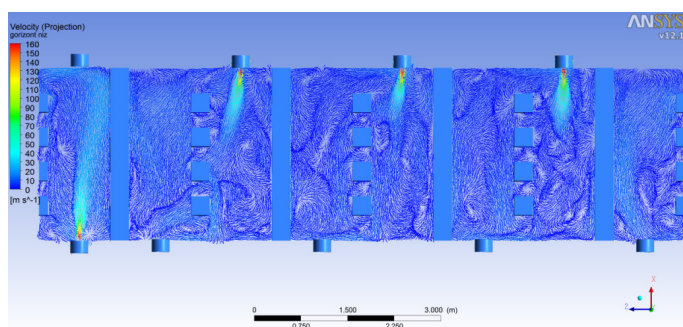


Рисунок 11 – Движение газов в плоскости нижних горелок

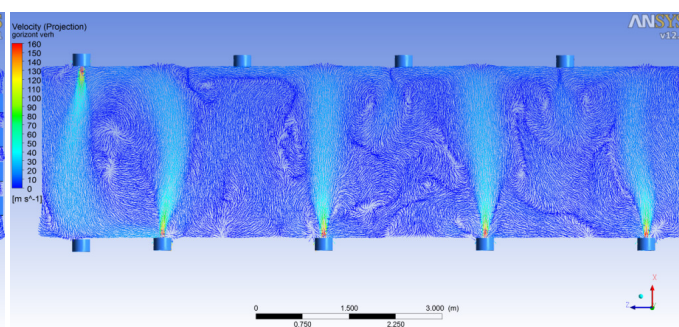


Рисунок 12 – Движение газов в плоскости верхних горелок

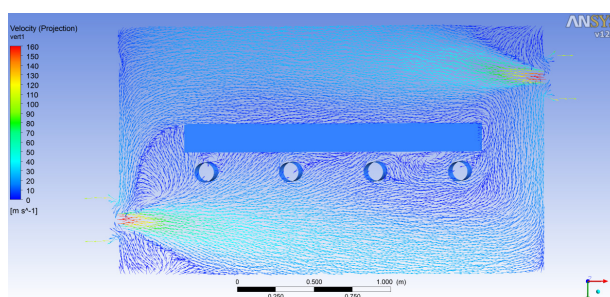


Рисунок 13 – Движение газов в поперечном сечении печи

Таблица 8 – Значения коэффициентов конвективного теплообмена до и после изменения свободного объема рабочего пространства печи.

Наименование	Коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м ² ·К)		
	До изменения конструкции	После изменения конструкции печи	Δ , %
Латунные слябы	34,0	65,1	91,4
Медные слябы	100,0	197,6	97,6

Полученная аппроксимирующая зависимость $Nu=f(Re, Pr)$ позволяет рассчитывать параметры конвективного теплообмена в печах подобной конструкции при их модернизации и при новом проектировании.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

При выполнении работы получены следующие научные и практические результаты:

1. Разработана и отлажена методика проведения промышленного эксперимента по изучению внешнего теплообмена на промышленных печах.
2. Впервые проведен масштабный промышленный эксперимент, позволивший на основе балансовых исследований установить соотношение конвективного и лучистого теплообмена в промышленной печи, оснащенной скоростными рекуперативными горелками, работающими в импульсном режиме.
3. Получены экспериментальные значения коэффициентов конвективного теплообмена и установлена их связь с параметрами газодинамического режима печи, позволившая вывести аппроксимирующую зависимость $Nu=f(Re, Pr)$.
4. При сжигании природного газа в скоростных рекуперативных горелках проходной печи на основании балансовых исследований выявлено улучшение показателей работы печи, а именно: повышение равномерности нагрева металла, снижение расхода природного газа на ~24%, увеличение производительности печи на ~74%, и, как следствие снижение удельного расхода условного топлива на ~56%.
5. Проведено компьютерное моделирование с целью изучения газодинамики в рабочем пространстве проходной нагревательной печи, на основании которого получены данные по кратности циркуляции газов в компьютерной модели печи, выполненной в масштабе 1:1. С помощью компьютерного моделирования определены скоростные поля в рабочем пространстве печи, из чего определены возможные направления интенсификации конвективного теплообмена при нагреве металла. Выполнена рационализация геометрии рабочего пространства печи с последующим моделированием газодинамики, которая привела к увеличению коэффициентов конвективного теплообмена на 91...98%.
6. Результаты диссертационной работы использованы при проектировании новой нагревательной печи высокой производительности.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основное содержание работы отражено в следующих печатных работах в научных изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Комплексная модернизация нагревательных печей / Вохмяков А.М. [и др.] // Известия ВУЗов. Черная металлургия, 2009, №12. - С 56 – 59.
2. Модернизация проходной печи для нагрева медных слэбов под пластическую деформацию / Вохмяков А.М. [и др.] // Цветные металлы, 2011, №4. - С. 85-89.
3. Вохмяков А.М. Исследование конвективного теплообмена в проходной печи, оснащенной скоростными горелками / А.М.Вохмяков, М.Д.Казяев, Д.М.Казяев // Цветные металлы, 2011, №12. - С. 89-93.

В других изданиях:

4. Вохмяков А.М., Казяев М.Д., Лавров В.В. Совершенствование температурного режима секционной закалочной печи «Северского трубного завода» / Материалы Всероссийской студенческой олимпиады, научно-практической конференции и выставки студентов, аспирантов и молодых ученых «Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии». - Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. - С. 55 – 59.
5. Вохмяков А.М., Казяев М.Д., Спиглазов А.Ф., Арсеев Б.Н., Казяев Д.М. Применение современных топливосжигающих устройств в нагревательных печах / Труды III Международного конгресса «Пече-трубостроение: тепловые режимы, конструкции, автоматизация и экология». - Москва: изд. «Инженерная мысль», г.Екатеринбург, 2008. - С.152 - 159.
6. Вохмяков А.М., Казяев М.Д., Лавров В.В. Совершенствование температурного режима проходной нагревательной печи Кировского завода по обработке цветных металлов / Материалы 9-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и специалистов «Энергетики и металлургии настоящему и будущему России». - Магнитогорск: МГТУ, 2008. - С. 101 – 103.
7. Вохмяков А.М., Казяев М.Д., Арсеев Б.Н., Казяев Д.М., Спиглазов А.Ф. Исследование тепловой работы проходной печи для нагрева медных слэбов, оснащенной рекуперативными горелками / Труды международной научно-практической конференции «Творческое наследие Б.И.Китаева». - Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2009. - С. 337 - 342.
8. Вохмяков А.М., Казяев М.Д., Арсеев Б.Н., Казяев Д.М., Киселев Е.В. Методика исследования конвективного теплообмена в нагревательных печах // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Теория и практика нагревательных печей в XXI веке». - Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2010. - С. 61 – 64.
9. Вохмяков А.М., Казяев М.Д., Арсеев Б.Н., Казяев Д.М. Исследование конвективного теплообмена в методической печи для термообработки вагонных осей, оснащенной скоростными горелками / Труды Всероссийской научно-практической конференции «Теория и практика нагревательных печей в XXI веке». - Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2010. - С. 65 - 73.
10. Вохмяков А.М., Казяев М.Д., Арсеев Б.Н., Казяев Д.М. Качество нагрева медных слэбов при работе топливосжигающих устройств в импульсном режиме / Труды

- Всероссийской научно-практической конференции «Теория и практика нагревательных печей в XXI веке». - Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2010. - С. 74 – 82.
- 11.Вохмяков А.М., Казяев М.Д., Казяев Д.М. Автоматическая система управления тепловым режимом камерной термической печи с выкатным подом / Труды VIII Всероссийской научно-практической конференции «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. – Новокузнецк: СГИУ, 2011. – С. 201 – 206.

Подписано в печать
09.04.12

Офсетная печать

Формат 60x84 1/16

Бумага типографическая

Тираж 100 экз.

Заказ 112

Салон оперативной полиграфии «Копирус». Адрес: 620102, Екатеринбург,
пер.Банковский, 8

