

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования

«Донецкий национальный технический университет»

*На правах рукописи*

**Турулина Юлия Олеговна**

УДК 621.783.2(043)

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПАРАМЕТРОВ ПРОХОДНЫХ ПЕЧЕЙ В УСЛОВИЯХ  
ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ**

Специальность 2.4.6 Теоретическая и прикладная теплотехника (технические  
науки)

**Диссертация**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Бирюков А.Б.

Донецк – 2024

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ОМД – обработка металла давлением;

КИТ – коэффициент использования топлива;

Ст5 – сталь 5;

САУ – система автоматизированного управления;

АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическим процессом;

МНК – метод наименьших квадратов;

ГУ – граничные условия.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
РАЗДЕЛ 1 .....	13
АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ИЗМЕНЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОХОДНЫХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ .....	13
1.1 Исследование применяемых способов контроля температурного состояния металла в металлургических печах.....	17
1.2 Анализ расчетных методов определения технологических параметров печей при работе в произвольных условиях .....	20
1.3 Анализ способов автоматического регулирования работы печи в условиях изменяющейся производительности.....	26
1.4 Цель и задачи исследования .....	28
1.5 Выводы по разделу 1 .....	29
РАЗДЕЛ 2 .....	31
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА С ЦЕЛЬЮ ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОХОДНЫХ ПЕЧЕЙ .....	31
2.1 Постановка задачи.....	31
2.2 Алгоритмы решения задачи определения температурных полей .....	36
2.3 Алгоритм численного решения уравнения теплопроводности применительно к задаче определения температурного состояния металла .....	44
2.4 Алгоритм определения температуры металла на основе использования уравнения Фурье.....	49
2.5 Методика косвенного определения среднemasсовой температуры металла на основе анализа энергосиловых параметров стана.....	57
2.6 Алгоритм решения задачи расчета температурного профиля печи при переменной производительности .....	59
2.7 Разработка метода расширения диапазона регулирования технологических параметров проходных печей за счет изменения шага укладки заготовок.....	61
2.8 Методика применения методов математической статистики к решению задачи обработки полученных результатов .....	65
2.9 Выводы по разделу 2 .....	67
РАЗДЕЛ 3 .....	69
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА МЕТАЛЛА В ПРОХОДНЫХ ПЕЧАХ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ .....	69
3.1 Сравнительный анализ результатов вычислительных экспериментов, полученных с применением метода Фурье и конечно-разностной модели.....	69

3.2 Анализ результатов численных экспериментов, выполненных с применением базовых расчетных зависимостей .....	72
3.3 Анализ результатов численных экспериментов с использованием косвенного определения температуры металла на основании анализа энергосиловых параметров черновой клетки прокатного стана .....	78
3.4 Анализ результатов численных экспериментов по определению температуры уходящих из печи газов.....	82
3.5 Экспериментальное исследование температурного профиля печи при переменной производительности .....	85
3.6 Исследование нагрева металла в печи с шагающими балками .....	89
3.7 Исследование «рваного» режима нагрева .....	102
3.8 Выводы по разделу 3 .....	104
РАЗДЕЛ 4 .....	108
ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	108
4.1 Рекомендации по применению результатов исследований в условиях Филиала №3 ООО «ЮГМК» «Макеевский металлургический завод» .....	108
4.2 Оценка экономического эффекта от снижения брака .....	120
4.3 Выводы по разделу 4.....	121
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	123
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	127
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	141
Приложение А .....	142
Технические характеристики прибора testo 835.....	142
Приложение Б.....	144
Справка о внедрении результатов диссертационной работы на производство .....	144
Приложение В.....	145
Справка о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс .....	145
Приложение Г .....	146
Справка о внедрении результатов диссертационной работы в научную тему .....	146

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Основной объем выплавляемой в мире стали в дальнейшем обрабатывается на прокатных станах в виде заготовок, доведенных до пластического состояния путем нагрева в проходных нагревательных печах.

На практике стоят задачи достижения необходимого уровня энергоэффективности печи, обеспечения надлежащего качества нагрева и минимизации потерь металла с окалиной, которые могут находиться во взаимном противоречии.

Наиболее эффективной с точки зрения обеспечения проектных значений технологических показателей является поддержание процесса функционирования нагревательной печи в номинальном режиме. Однако реальные условия работы прокатных цехов таковы, что зачастую имеют место как колебания производительности, связанные с несогласованностью режимов работы комплекса «печь – прокатный стан», так и изменения, связанные с непостоянством производственной программы.

Для обеспечения качества нагрева металла и рационального расхода топлива при производительности, не соответствующей номинальной, необходима коррекция температурного профиля печи.

Опыт показывает, что основным направлением совершенствования рассматриваемых технологических процессов является установление рациональных значений таких параметров, как температурный профиль печи и шаг укладки заготовок. При этом важное значение приобретает задача контроля и поддержания установленных показателей.

Несмотря на многолетние исследования в области эксплуатации и модернизации печей, проблема совершенствования технологических параметров процесса в условиях постоянно изменяющейся производительности и контроля режима функционирования печи, с учетом вариации показателей, к настоящему времени не решена.

В этой связи задачи определения рациональных технологических параметров проходных печей в условиях изменяющейся производительности и совершенствования способов контроля процесса являются актуальными, имеющими отраслевое значение.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросам определения рациональных (оптимальных) параметров нагрева металла в проходных печах и математического моделирования этих процессов посвящены работы известных исследователей, в их числе Семикин И.Д., Тайц Н.Ю., Губинский В.И., Гусовский В.Л., Бухмиров В.В., Арутюнов В.А., Мاستрюков Б.С. и другие. Несмотря на успешное решение комплекса задач в этой области, остается ряд вопросов, связанных с определением рациональных параметров проходных печей, работающих в условиях переменной производительности, что определяет необходимость дальнейших исследований.

**Цель и задачи исследования.** Цель работы – обоснование рациональных технологических параметров, обеспечивающих повышение эффективности работы проходных печей в условиях изменяющейся производительности.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие основные задачи:

- выполнить анализ режимов функционирования проходных печей в условиях изменяющейся производительности и технологических факторов, определяющих эффективность процесса;
- сформировать математические модели и провести теоретические исследования процесса с целью обоснования рациональных технологических параметров проходных печей;
- провести вычислительные и натурные экспериментальные исследования с целью верификации теоретических результатов и определения рациональных технологических параметров процесса нагрева металла в проходных печах;
- разработать рекомендации по практическому применению полученных результатов исследований.

**Объект исследования** – процесс функционирования проходных печей прокатного производства.

**Предмет исследования** – технологические параметры проходных печей в условиях изменяющейся производительности.

**Научная новизна полученных результатов.**

1. Получили развитие научные методы определения параметров нагрева металла в печах за счет обоснования возможности идентификации температуры металла по зонам и в конце нагрева для известного температурного профиля печи и ее производительности с использованием тепловой диаграммы И.Д. Семикина.

2. Впервые обосновано, что температура продуктов сгорания, покидающих неотапливаемую зону печи, может быть определена на основании итерационного анализа процесса теплообмена между металлом, поступающим в печь при своей начальной температуре, и продуктами сгорания, входящими в неотапливаемую зону при температуре, поддерживаемой в ближайшей сварочной зоне.

3. Впервые доказана возможность установления квазистационарного теплового состояния металла в привязке к продольной координате печи за счет определения и установления температурного профиля печи для произвольной производительности, при котором в процессе прохождения каждой зоны печи металл получает такое же количество теплоты, как в номинальном режиме работы.

4. В развитии методов определения рациональных технологических параметров печи с шагающими балками при работе в условиях переменной производительности научно обоснованы новые методики установления взаимной связи между производительностью печи, температурным профилем и шагом раскладки заготовок для достижения заданного теплосодержания металла в печи и на выходе из нее. В частности, обоснован метод определения оптимального, с точки зрения минимизации расхода топлива, шага раскладки заготовок для печей с шагающими балками.

**Теоретическая значимость работы** заключается в дальнейшем развитии методов определения рациональных параметров проходных печей, предназначенных для нагрева металла перед прокаткой, за счет разработки новых научных методик, позволяющих определять температуру металла для известного температурного профиля печи и ее производительности с использованием тепловой диаграммы И.Д. Семикина, а также уточнять температуру продуктов сгорания, покидающих неотапливаемую зону печи, определять параметры температурного профиля печи, позволяющие обеспечивать квазистационарное тепловое состояние металла в условиях переменной производительности, и обоснованно выбирать рациональные сочетания технологических параметров для печей с механизированным подом.

**Практическая ценность результатов.**

1. Сформирована конечно-разностная математическая модель процесса нагрева металла в проходной методической толкательной печи, работающей в условиях переменной производительности, позволяющая выполнять вычисления для различного сортамента металла и произвольных параметров нагрева.

2. Разработана методика, основанная на применении пакета расчетных зависимостей, которая для проходных печей различного типа (толкательных и с механизированным подом) позволяет при заданных значениях производительности и характеристиках температурного профиля печи определять изменение температурного состояния металла для всех зон нагрева, начиная от момента загрузки до выдачи металла.

3. Предложена методика, позволяющая выбрать требуемый температурный профиль печи для произвольной производительности, установление которого позволит обеспечить заданные значения параметров температурного поля металла при его нагреве и при выдаче из печи, соответствующие работе в условиях номинальной производительности печи.

4. Предложен набор методик, позволяющих для печей с механизированным подом устанавливать связь между такими параметрами



нагрева, как производительность печи, ее температурный профиль и шаг раскладки заготовок.

5. Разработан метод идентификации среднемассовой температуры сортовых заготовок на выдаче из печи на основании анализа текущих энергосиловых параметров первой клетки прокатного стана.

6. Получены уравнения регрессии, устанавливающие зависимость значений температур зон печи с шагающими балками стана 390 Макеевского металлургического завода от производительности печи для новых планируемых к освоению типоразмеров заготовок 100x100, 120x120 и 125x125 мм. Данная разработка принята к внедрению на Филиале №3 ООО «ЮГМК» «Макеевский металлургический завод» (акт о внедрении утвержден управляющим филиалом №3 «ММЗ» ООО «ЮГМК ДОНЕЦК»).

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры технической теплофизики ФГБОУ ВО «ДонНТУ» (справка № 29 – 4/16 от 27.09.24 об использовании в учебном процессе методик расчета нагрева металла в проходных печах при проведении практических занятий по дисциплине «Тепломассообмен» для студентов бакалавров кафедры «Техническая теплофизика» по направлению 22.03.02 – Промышленная теплотехника).

**Методология и методы исследования.** В процессе выполнения работы использована методология системного подхода при рациональном сочетании теоретических и экспериментальных методов исследования. В качестве основы для создания новых научных методов расчета использован метод тепловой диаграммы И.Д. Семикина. Для проверки адекватности разработок привлечен ряд методов, связанных с прямым измерением температуры металла, выдаваемого из печи, моделированием температурного состояния металла при помощи конечно-разностной модели, косвенным определением температуры металла на основе анализа энергосиловых параметров черновой клетки прокатного стана.

Составление уравнений регрессии для автоматического определения требуемых параметров температурного профиля печи Макеевского металлургического завода при освоении процесса нагрева заготовок новых типоразмеров проведено на основании обработки классическими методами математической статистики результатов расчетов, полученных при помощи разработанных методик.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Работа выполнена в соответствии с планами научного направления кафедры технической теплофизики Донецкого национального технического университета «Развитие теоретических и технологических основ рационального управления тепло-массообменными процессами в различных технологиях» и является частью исследований, проведенных в рамках госбюджетной темы «Совершенствование тепломассообменных процессов и режимов работы оборудования для тепловой обработки материалов» № Н-2022-13, при выполнении которой автор принимал участие в качестве исполнителя.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Показано, что введение нового понятия квазистационарного теплового состояния металла в привязке к продольной координате печи и доказательство возможности его установления при работе печи в условиях переменной производительности за счет определения и установления температурного профиля печи, позволяет обеспечить при прохождении каждой зоны печи получение металлом такого же количества теплоты, как в номинальном режиме работы. Расхождения не превышают 1%.

2. Доказана необходимость установления взаимной связи между такими технологическими параметрами печи с механизированным подом как производительность, температурный профиль и шаг раскладки заготовок для достижения заданного теплосодержания металла в печи и на выходе из нее при работе в условиях переменной производительности. В частности решена задача определения оптимального, с точки зрения минимизации расхода топлива, шага раскладки заготовок для печей с шагающими балками. Для рассмотренной

конструкции печи стана 390 Макеевского металлургического завода величина оптимального шага раскладки составила 0,26 поперечного размера сортовой заготовки.

**Степень достоверности и апробация результатов диссертации.** Корректность поставленных задач, достаточный объем аналитических исследований, согласованность результатов теоретических и экспериментальных исследований подтверждают достоверность научных положений, выводов и рекомендаций. Адекватность модели в конкретных условиях подтверждена путем сопоставления результатов с экспериментальными данными. Расхождения не превышают 1%.

**Личный вклад соискателя.** Определена цель и поставлены задачи исследования, произведен обзор публикаций по современному подходу к нагреву металла в проходных нагревательных печах, работающих в условиях переменной производительности; подготовлены основные публикации по теме диссертационной работы; выполнено математическое моделирование процесса нагрева металла; разработаны методики для определения рациональных технологических параметров проходных печей в условиях изменяющейся производительности.

Основные научные результаты диссертации получены соискателем лично и при непосредственном участии автора. Отдельные составляющие теоретических и экспериментальных исследований диссертационной работы выполнены с соавторами научных работ, которые указаны в перечне научных публикаций.

**Публикации.** Основные результаты диссертационных исследований изложены в 15 печатных работах, из них, 9 – в рецензируемых научных изданиях: 3 работ опубликовано в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утверждённых ВАК РФ (2 соответствуют категории К2); 6 – в изданиях, входящих в перечень специализированных научных журналов, утверждённых ВАК ДНР; 6 – в материалах конференций. Публикации в достаточной мере отражают содержание работы.

**Соответствие темы и содержания диссертации паспорту научной специальности.**

Тема и содержание диссертации «Определение рациональных технологических параметров проходных печей в условиях изменяющейся производительности» на соискание ученой степени кандидата технических наук соответствует паспорту научной специальности 2.4.6 – Теоретическая и прикладная теплотехника (технические науки), в частности: п. 9 «Системы обеспечения теплового режима теплоэнергетических, промышленных и коммунальных объектов, теплопотребляющего и тепловыделяющего оборудования, методы их совершенствования. Математическое моделирование и оптимизация энерготехнологических систем промышленных предприятий и систем теплоснабжения зданий, районов и городов» и п. 10 «Теоретические аспекты и методы интенсивного энергосбережения в тепловых технологических системах и процессах. Теоретические основы создания малоотходных и безотходных тепловых технологических установок, способствующих защите окружающей среды».

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа содержит 146 страниц машинописного текста и состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы из 115 источников на 14 страницах, 4 приложений, иллюстрируется 33 рисунками и содержит 15 таблиц.

## РАЗДЕЛ 1

### АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ИЗМЕНЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОХОДНЫХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Проходные нагревательные печи являются основным оборудованием прокатных цехов. От их работы в наибольшей степени зависят качество, объем и экономичность прокатного производства. Ошибки, возникающие при нагреве металла, в большинстве случаев не могут быть исправлены.

Исторически сложилось, что при проектировании нагревательных печей в СССР ставилась цель достижения максимально возможной (форсированной) производительности с максимальной нагрузкой на отапливаемые зоны и поэтому температурные режимы рассчитывались на максимальную производительность.

Постановка подобной задачи была обусловлена дефицитом и всевозрастающим потреблением продукции прокатного производства.

Определенная неэффективность форсированных режимов при нагреве дешевых марок стали компенсировалась большими объемами производства и возможностью обеспечения стабильности технологических параметров [1].

В дальнейшем наблюдается значительный рост мирового производства стали, что существенно меняет ситуацию для отдельных предприятий.

В первую очередь, понизились объемы производства, что привело к сокращению производительности печей.

В условиях жесткой конкуренции, а также постоянного роста цены металла и топлива, возникает необходимость оптимизации процесса нагрева, что позволит значительно сократить потери, связанные с затратами на топливо, максимально уменьшить брак заготовок и потери металла с окалиной.

Вопросам определения рациональных (оптимальных) параметров нагрева металла в проходных печах и математического моделирования этих процессов посвящены работы ряда известных исследователей. Фундаментальные

результаты получены в работах таких ученых, как Семикин И.Д., Тайц Н.Ю., Губинский В.И., Гусовский В.Л., Бухмиров В.В., Арутюнов В.А., Мاستрюков Б.С. и многие другие. В обобщающей статье В.И. Панферова [2] содержатся ссылки на 26 источников. Несмотря на разнообразие подходов, отмечается непереносимое условие для сокращения расхода топлива – перенос максимума тепловой нагрузки на последние по ходу металла зоны печи [3].

Снижение расхода топлива позволит также сократить потери металла с окалиной.

Однако, подобная оптимизация для форсированных режимов невозможна. Данное обстоятельство связано с ограничением свободы выбора при распределении тепловой нагрузки по зонам печи.

Совершенствование управления методическими печами является важнейшим звеном в оптимизации комплекса нагревательных печей – прокатный стан по экономическим критериям (прибыль, приведенные затраты и т.п.) в той мере, в какой эти показатели зависят от выбора режимов нагрева [4, 5].

Для более полной оценки работы печи можно выделить следующие параметры: температура нагрева металла, давление и температура в рабочем пространстве печи, температуры подогрева топлива и воздуха, равномерное распределение температуры по сечению заготовки, а также экономичность сжигания топлива.

В качестве возмущающих воздействий для управления процессом нагрева применяются следующие изменяющиеся параметры: производительность печи, калорийность топлива, подача газа и воздуха, теплофизические характеристики металла, потери тепла через футеровку печи и окна, и т.д. [6].

Такие параметры как расход воздуха и топлива на горелки, температура по зонам печи, изменение тяги дымовой трубы являются основными управляющими воздействиями.

В наибольшей степени от режима нагрева зависят следующие статьи расходов: расход топлива, окисление металла при нагреве, расход энергии на

прокатку и расход валков. Вклад остальных составляющих незначителен и практически не зависят от режима нагрева.

Подводя итог, следует признать, что наблюдаемая тенденция к снижению производительности нагревательных печей является закономерным результатом развития отрасли и связана, в первую очередь, со снижением объемов производства продукции отдельными предприятиями на фоне роста мировой выплавки стали и возрастающей конкуренции и послужила стимулом для дальнейшего совершенствования технологического процесса [7, 8]. Несмотря на успешное решение множества задач в этой области остается ряд вопросов, связанных с определением рациональных параметров проходных печей, работающих в условиях переменной производительности.

Вместе с тем, переход на пониженную производительность, независимо от причин его вызывающих, приводит к изменению тепловой мощности на печь по сравнению с номинальным значением. В результате возникает риск нарушения режима горения из-за снижения скоростей газа и воздуха в соплах горелок, рассчитанных на номинальный режим. При этом наблюдается коптящее, вялое и нестабильное пламя. Возрастают потери топлива с недожогом. В продуктах сгорания повышается концентрация кислорода, что влечет за собой повышенный угар металла. Нестабильность факела приводит к возникновению на поверхности металла локальных черных пятен (следствие недогрева) и перегретых областей. Кроме того, эксплуатация горелок в режиме пониженной тепловой нагрузки приводит к сокращению сроков их эксплуатации [9].

Подобная ситуация нередко наблюдалась еще на границе 70-х годов во время вынужденного снижения производительности печи. В последующие годы развитие автоматизированных систем управления (АСУ ТП) сопровождалось переоборудованием отопления печей и отладкой режимов горения, что привело к устранению вышеописанных проявлений, по крайней мере, на современных печах [10, 11].

Противоречие, связанное с невозможностью сочетания высокой производительности и экономичных режимов, разрешается по мере расширения

парка методических печей за счет снижения тепловой нагрузки на отдельный агрегат [12].

Помимо объемов производства основными факторами, влияющими на производительность печи, могут быть [13]:

- переменный сортамент металла, поступающий в печь;
- одновременный нагрев заготовок различного сортамента;
- одновременный нагрев заготовок горячего и холодного посадок и др.

В каждом отдельном случае необходима отработка соответствующего рационального режима нагрева. При этом особое внимание уделяется эффективности использования топлива. При переменной производительности печи необходимо установление таких параметров нагрева, при которых удельный расход топлива будет близок к номинальному с обеспечением надлежащего качества нагрева металла.

При смене сортов, номенклатура которых постоянно расширяется, требуется отработка соответствующих режимов [14].

Трудности организации стабильного протекания процесса нагрева мелких по числу заготовок партий различного сортамента усугубляются случайным характером их чередования в печи [15].

С развитием технологий непрерывной разливки стали все чаще находят свое применение одновременный нагрев холодных и горячих заготовок, что позволяет радикально снизить расход топлива, но требует особого подхода к режиму [16, 17].

Одновременный нагрев заготовок различного сортамента сопряжен с риском сочетания недогрева с перегревом отдельных партий металла, что приводит к несопоставимо большим экономическим потерям по сравнению с теми, что возникают при простом снижении производительности [18].

Проведенный анализ имеющихся сведений о рациональных технологических параметрах работы проходных печей прокатного производства показал, что, несмотря на большое количество работ, посвященных



оптимизации нагрева металла в проходных печах, имеется резерв для сокращения расхода топлива, а также улучшения качества получаемого металла. Особый интерес представляют печи, работающие в условиях изменяющейся производительности.

### 1.1 Исследование применяемых способов контроля температурного состояния металла в металлургических печах

Современные способы измерения не позволяют постоянно контролировать температуру по сечению нагреваемого в печи металла с целью обеспечения эффективного управления процессом [19, 20].

В связи с невозможностью постоянного инструментального контроля, в проходных печах применяется так называемое термометрирование – измерение температурного профиля в опытной заготовке, периодически прогоняемой через печь.

На ранних стадиях развития метода измерения осуществлялись с помощью закрепленных внутри заготовки термопар, сигнал от которых передавался термоизолированным кабелем. Схемы присоединения и размещения термопар в заготовке изображены на рисунках 1.1, 1.2 [21, 22]. Иногда, во избежание затруднений, связанных с обеспечением долговечности кабеля, измерения производятся путем помещения термопар в заранее подготовленные отверстия через смотровые окна печи [23].

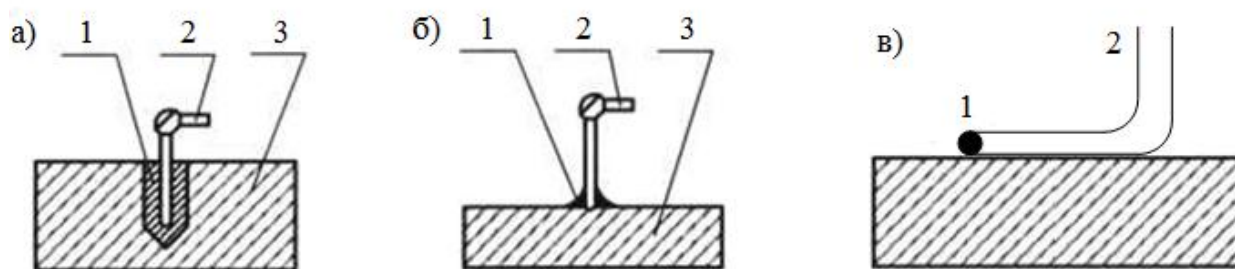


Рисунок 1.1 – Схемы присоединения термопары к заготовке

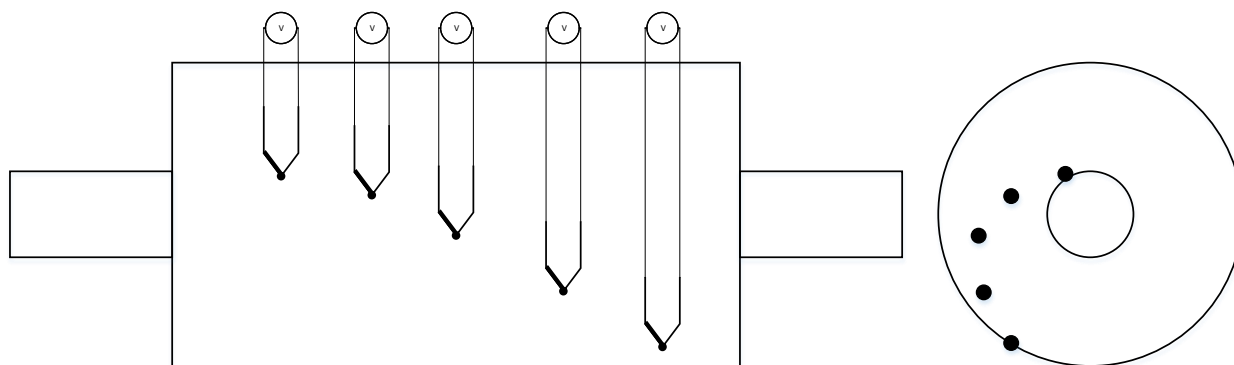


Рисунок 1.2 – Схематичное расположение термопар внутри заготовки

Результатом развития метода термометрирования стала разработка автономного многоканального регистратора данных, способного накапливать информацию от датчиков непосредственно при перемещении устройства в печи. Регистратор устанавливается на опытной заготовке в специальном теплоизолирующем контейнере (рисунок 1.3). После прохождения печи, полученные данные выгружаются на персональный компьютер и подвергаются анализу. При необходимости возможно получение информации в режиме реального времени с использованием радиосигнала [24, 25].



Рисунок 1.3 – Регистратор и контейнер тепловой защиты

Применение регистратора позволяет получить данные о динамике изменения температуры внутри и на поверхности опытной заготовки, а также о

температурном профиле в рабочем пространстве печи. Результаты периодических измерений методом термометрирования находят широкое применение при разработке инструментов управления процессом нагрева, вплоть до автоматического построения математической модели печи [26].

Наряду с прямым измерением температурного профиля внутри заготовки широкое распространение получили способы, базирующиеся на измерении температуры поверхности заготовки [27, 28]. При измерениях могут использоваться термопары, «приклеенные» с помощью теплопроводной субстанции [29], либо пирометры, снабженные светофильтрами [30, 31] и математическим обеспечением [32] для повышения точности измерений в условиях помех, связанных с излучением футеровки и экранирующим воздействием окалины и атмосферы печи.

На протяжении всего развития автоматизированных систем управления применяется косвенный метод контроля, основанный на измерении температуры раската на прокатном стане с применением пирометров [33].

Одним из способов применения косвенного метода является анализ энергосиловых параметров оборудования обработки металла давлением (ОМД).

При разработке технологических процессов и проектировании оборудования основными критериями являются энергосиловые параметры процесса ОМД. Именно поэтому определения этих параметров составляет одну из главных задач теории ОМД.

Для преодоления сопротивления металла деформации и трения на поверхности контакта металла с инструментом необходимо знать усилия, которые нужно приложить к деформируемому телу.

Известно, что расчет энергосиловых параметров и формоизменения в процессах обработки металлов давлением существенно образом зависит от условий нагрева [34, 35]. Однако вопрос идентификации среднemasсовой температуры сортовых заготовок, выдаваемых из нагревательной печи, на основании анализа текущих энергосиловых параметров клетки прокатного стана недостаточно изучен и представляет особый интерес.

## 1.2 Анализ расчетных методов определения технологических параметров печей при работе в произвольных условиях

До настоящего времени метод термометрирования печи является одним из основных, но далеко не единственным, при формировании технологических карт для вводимых в эксплуатацию новых, либо капитально отремонтированных печей, а также при изменении сортамента заготовок и освоении новых марок стали. Указанный метод на ранних стадиях своего развития позволял осуществить адаптацию технологических параметров, определенных на стадии проектирования с использованием расчетных методик и математических моделей. С развитием метода возникают перспективы расширения сферы его применения.

Математические модели применяются при исследовании свойств и особенностей протекания технологического процесса, при непосредственном управлении процессом и разработке системы управления [36]. Исходя из цели моделирования определяется полнота и точность математической модели.

Наибольшее распространение получила модель, основанная на решении уравнения теплопроводности [37] и направленная на обеспечение заданного температурного профиля заготовки, поступающей на прокатный стан. Моделью описывается протекание процесса нагрева по длине печи с учетом изменения теплофизических свойств металла с ростом его температуры. Сформулирована краевая задача, определяющая начальные условия, соответствующие системе уравнений. Распределение значений температуры газов по зонам печи принимается заранее.

Расчетная методика [38] является своеобразным вариантом математической модели и применяется при необходимости определить продолжительность процесса при заданных условиях нагрева либо рассчитать температуру поверхности металла через определенный промежуток времени [39].

В начале расчета задаются распределением температуры по длине печи, учитываются геометрические параметры заготовок и теплофизические свойства металла, определяются допустимые границы технологических параметров. Печь по длине условно разбивается на расчетные участки. Расчеты выполняются последовательно для каждого участка, начиная с первого по ходу перемещения металла.

Вычисления начинаются с определения характеристик внешнего теплообмена в рабочем пространстве, в результате чего получают значение приведенного коэффициента излучения [40].

По уравнению Стефана-Больцмана определяется удельный тепловой поток с излучением от газа к металлу:

$$q = C_{г.к.м} \cdot \left[ \left( \frac{T_{г}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{пов}}{100} \right)^4 \right], \quad (1.1)$$

где  $q$  – удельный тепловой поток с излучением от газа к металлу, Вт/м<sup>2</sup>;  $C_{г.к.м}$  – приведенный коэффициент излучения, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $T_{г}$  – температура печи, К;  $T_{пов}$  – температура поверхности металла, К.

При этом приведенный коэффициент излучения:

$$C_{г.к.м} = C_0 \cdot \varepsilon_m \cdot \frac{w + 1 - \varepsilon_{г}}{[\varepsilon_m + \varepsilon_{г} \cdot (1 - \varepsilon_m)] \cdot \frac{1 - \varepsilon_{г}}{\varepsilon_{г}} + w}, \quad (1.2)$$

где  $C_0$  – приведенный коэффициент излучения абсолютно черного тела,  $C_0 = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $\varepsilon_m$  – степень черноты металла;  $\varepsilon_{г}$  – степень черноты газов;  $w$  – степень развития кладки.

Затем выполняется усреднение значений теплофизических параметров металла и коэффициентов теплоотдачи при заданной температуре поверхности в конце расчетного участка.

Продолжительность нагрева термически массивного тела определяется путем применения диаграммы И. Д. Семикина, исходя из значения относительной избыточной температуры поверхности металла или по формуле:

$$\tau = \frac{r_0 \cdot \rho \cdot 10^3}{K_1 \cdot \bar{q} \cdot 3600} \cdot (i_k - i_n), \quad (1.3)$$

где  $\tau$  – продолжительность (время) нагрева металла, ч;  $r_0$  – толщина прогреваемого слоя, м;  $\rho$  – плотность металла, кг/м<sup>3</sup>;  $K_1$  – коэффициент материальной нагрузки, зависящий от формы тела;  $\bar{q}$  – средняя плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $i_n$  – энтальпия металла в начале нагрева, кДж/кг;  $i_k$  – энтальпия металла в конце нагрева, кДж/кг.

По завершении вычислений на последнем расчетном участке производится сравнение рассчитанной и заданной величин температуры поверхности металла после печи. В случаях несовпадения температур либо нарушения технологических ограничений корректируются исходные данные и выполняются повторные расчеты, вплоть до получения искомого результата.

Приведенная расчетная методика получила широкое распространение при выполнении поверочных расчетов для заданного температурного режима проходной нагревательной печи и находит свое применение при разработке температурных режимов, а также для проектирования профиля печи и технологических карт нагрева [41].

Расширением сферы применения методики является расчетно-экспериментальный метод, который заключается в сопоставлении поверочного расчета реального режима с технологическими показателями, полученными экспериментально [42]. В результате применения данного метода разработана технология нагрева, при которой обеспечивается линейный характер роста среднemasсовой температуры заготовки во времени и минимизируется расход топлива при  $q=const$ .

При всех достоинствах расчетной модели имеются некоторые неудобства, возникающие в процессе выполнения расчетов.

Прежде всего, это объективно существующая неопределенность исходных данных для получения заданного результата. Процедура получения требуемого решения путем перебора не только не гарантирует успеха, но и, по большому счету, является примером некорректно поставленной обратной задачи.

На выходе из печи температура уходящих газов варьируется в пределах 800-1100 °С, что дает достаточно большой разбег при определении коэффициента использования топлива (КИТ) (7-9%).

Необходима разработка метода, позволяющего однозначно определять температуру газа на выходе из печи. При этом должно обеспечиваться заданное теплосодержание металла.

По технологическим соображениям температура в нагревательной (сварочной) зоне печи принимается на 150 – 250 °С выше заданной температуры поверхности металла. Однако при эксплуатации печи в режиме пониженной производительности значение оптимальной температуры газов в сварочной зоне является неопределенным (относительно проектной номинальной производительности). Следовательно возникает необходимость создания удобной и простой методики определения рациональных технологических параметров температурного профиля печи, позволяющих достигать заданные параметры температурного поля нагреваемого металла в условиях изменяющейся производительности.

Применительно к методическим печам, помимо прочего, успешное решение задачи, связанной с однозначным определением температуры уходящих газов, и определение обратным методом температурного профиля печи для нагрева металла с заданным теплосодержанием позволят создать предпосылки для автоматического проектирования режимов нагрева и усовершенствования существующих АСУ ТП.

При расчете нагрева металла в печах основное внимание уделяется продолжительности и рациональным технологическим параметрам нагрева, однако температурное состояние металла на протяжении всего нагрева можно получить лишь при использовании метода термометрирования. В связи с чем, разработка инженерной методики определения температуры металла при его нагреве в проходных печах, работающих в условиях изменяющейся производительности и выполнение ее проверки в реальных условиях является актуальной задачей.

Вопросы, связанные с повышением степени адекватности математических моделей, не теряют своей актуальности на протяжении более чем 50-ти лет (со времен появления первых АСУ ТП) несмотря на значительный прогресс в технологии нагрева металла перед прокаткой.

Для решения данного вопроса могут применяться различные методы. Например, разработка конечно-разностной математической модели может подтвердить адекватность расчетной методики для определения температуры металла при его нагреве в проходных печах, работающих в условиях изменяющейся производительности.

В последнее время в публикациях большое внимание уделяется разработке прогнозных моделей, базирующихся на различных способах повышения энергоэффективности технологического процесса.

Для поддержки проектных исследований печей с шагающими балками создана прогнозная математическая модель, позволяющая исследовать влияние технологических и конструктивных параметров печи на температурное поле металла. Требуемая оптимизация достигается в результате численных экспериментов [43].

Прогнозирование времени нагрева заготовок с учетом аварий и простоев обеспечивается соответствующей моделью [44], а оптимизация при простоях – моделью [45].

Нагрев заготовок с переменными теплофизическими характеристиками и соответствующий тепловой режим описываются математической моделью [46].

Кроме того, разработаны модели, позволяющие повысить скорость вычислений в режиме реального времени [47, 48]. Примеры применения численного моделирования приведены в публикациях [49, 50], а использование экспоненциальной модели для описания нагрева слябов – в работе [51].

С помощью модели [52], обеспечивающей извлечение технологических данных, накопленных в действующей системе АСУ ТП, создаются условия для автоматизированной их обработки с последующей оптимизацией.



Прогнозные модели, основанные на регрессионном анализе, позволяют получать зависимости между основными параметрами технологического процесса. В частности, получены регрессионные модели с высоким коэффициентом детерминации для зависимости расхода газа от среднего времени нахождения заготовок в печи [53, 54], а также для давления [55, 56, 57], температуры слябов [58, 59] и адаптации [60].

При нагреве металла в печах с шагающими балками появляется возможность расширения диапазона регулирования технологических параметров.

Считается, что наиболее рациональным способом укладки является тот, при котором между заготовками имеется зазор не больше половины диаметра или толщины.

Вопрос определения рациональных технологических параметров при нагреве различного сортамента для заданной производительности печи и фиксированном шаге укладки заготовок достаточно изучен [61].

Особый интерес представляет исследование взаимного влияния таких параметров как производительность печи, температурный профиль и шаг раскладки заготовок при решении задачи достижения заданного теплосодержания металла в процессе нагрева при работе печи в условиях изменяющейся производительности.

Приведенные выше способы определения технологических параметров непрерывно действующих печей разработаны для квазистационарных режимов. Их применение в произвольных условиях возможно лишь при исполнении определенных процедур, среди которых одной из важнейшей является диагностика тепловой работы печей.

Вопросы диагностики, рассмотренные в работах [62, 63, 64], связаны с заданием и пересмотром граничных условий в математической модели температурного профиля заготовки при изменении режима нагрева.

В печах с преимущественно лучистым теплообменом при изменении режима нагрева пересмотр граничных условий производится в соответствии с

распределением вдоль печи величины приведенного коэффициента излучения, которое устанавливается по итогам термометрирования.

Для печей с весомым вкладом конвективной составляющей необходим учет изменения коэффициента конвективной теплоотдачи, для определения которого производятся специальные стендовые испытания с целью получения критериальных уравнений либо выполняется математическое моделирование.

По ходу процесса нагрева возможна также оценка на предмет его адекватности путем расчета моментальных тепловых балансов по соответствующим зонам и печи в целом. В случае несогласованности тепловых балансов необходима разработка (подстройка) соответствующего режима. При расчете балансов следует учитывать непостоянство таких параметров, как расход топлива и внешние тепловые потери по длине печи [65].

При переменном режиме, в отличие от квазистационарного, моделирование процесса производится, как правило, непосредственно для каждой заготовки, находящейся в печи. При этом рациональный тепловой режим нагрева определяется путем усреднения прогнозируемых температурных профилей во времени. Кроме того, отдельный контроль каждой заготовки снижает вероятность поступления на стан недогретого металла [66, 67].

### 1.3 Анализ способов автоматического регулирования работы печи в условиях изменяющейся производительности

Прежде всего, следует принять во внимание, что работа печи с абсолютно постоянной производительностью принципиально невозможна в силу воздействия разнообразных обстоятельств, к числу которых, помимо приведенных в разделе 1, относятся также и случайный характер времени обработки отдельных заготовок на прокатном стане, и непостоянство режима работы стана в целом, и множество прочих причин.

Поэтому под термином «производительность» в определенный период времени всегда понимается некая усредненная величина.

Наиболее простыми с точки зрения автоматизации работы методических печей являются случаи, при которых для моделирования процесса и формирования управляющих воздействий достаточно учитывать лишь производительность. Характерной особенностью подобных режимов является своеобразная обезличенность заготовок. В отдельных случаях отличительной особенностью заготовки может служить принадлежность к определенной партии [68]. Обращает на себя внимание такое обстоятельство как присутствие в ранних публикациях детального описания способов определения величины производительности и алгоритмов управления при изменении режимов [69, 70, 71].

В опубликованных в 1970 г. материалах содержится информация о внедрении АСУ, базирующейся на обработке сигналов от пирометров, контролирующих температуру поверхности металла в печи [72]. Отследить дальнейшую судьбу разработки не представилось возможным. Вероятнее всего сохранились лишь отдельные элементы системы [73].

В современных АСУ ТП в зависимости от сложившейся на предприятии ситуации содержится множество опций, включающих и планирование посада, и регулирование горения топлива, и поддержание газодинамического режима печи, и формирования оптимальной стратегии управления, и ведения протокола нагрева каждой поступающей в печь заготовки – от загрузки до фиксации сигнала пирометра обратной связи на черновой клети стана.

При этом в новых публикациях непременно декларируется топливосберегающая направленность работы.

Значительное внимание уделяется оптимизации системы управления работой печи в целом путем совершенствования взаимосвязанных локальных контуров, в частности распределения температуры по зонам, автоматизации режима горения и газодинамического режима [74, 75, 76]. В работе [77] обосновано увеличение регулируемых зон нагрева в печи.

При работе в конкретных условиях необходима разработка уравнений регрессии, устанавливающих зависимость значений температур зон печи от

производительности печи для различного сортамента металла, что позволило бы значительно усовершенствовать имеющиеся АСУ ТП при работе печей в режиме реального времени на металлургических предприятиях.

Встречаются публикации, посвященные новым алгоритмам регулирования [78] и регуляторам [79, 80], и обзорные - по существующим АСУ ТП [81, 82], а также анализу и синтезу регуляторов в системах автоматизации и особенностям их настройки [83]. Отмечается сложность процесса настройки регуляторов и, зачастую, секретность со стороны поставщиков.

Особое внимание к совершенствованию управления несимметричным нагревом связано, по-видимому, с неудовлетворительным качеством нагретых заготовок [84, 85].

#### 1.4 Цель и задачи исследования

Проведенный анализ основных технологических факторов, определяющих эффективность работы проходных нагревательных печей, позволяет определить предпосылки к выполнению дальнейших исследований, заключающихся в следующем.

В сталеплавильном производстве большое значение имеет подготовка металла перед прокатом, а именно его нагрев в проходных нагревательных печах.

Наиболее благоприятной с точки зрения достижения всех необходимых показателей является работа нагревательной печи в номинальном режиме. Однако реальные условия работы прокатных цехов таковы, что зачастую имеют место как колебания производительности, связанные с несогласованностью режимов работы комплекса печь – прокатный стан, так и изменения, связанные с непостоянством производственной программы.

При работе печи в условиях изменяющейся производительности для достижения заданного теплосодержания металла в процессе нагрева

необходимо провести исследование взаимного влияния таких параметров, как производительность печи, температурный профиль и шаг укладки заготовок.

Целью исследования является обоснование рациональных технологических параметров, обеспечивающих повышение эффективности работы проходных печей в условиях изменяющейся производительности.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие основные задачи:

- выполнить анализ режимов функционирования проходных печей в условиях изменяющейся производительности и технологических факторов, определяющих эффективность процесса;
- сформировать математические модели и провести теоретические исследования процесса с целью обоснования рациональных технологических параметров проходных печей;
- провести вычислительные и натурные экспериментальные исследования с целью верификации теоретических результатов и определения рациональных технологических параметров процесса нагрева металла в проходных печах;
- разработать рекомендации по практическому применению полученных результатов исследований.

## 1.5 Выводы по разделу 1

1. Для обеспечения качества нагрева металла и рационального расхода топлива при производительности, не соответствующей номинальной, необходима коррекция температурного профиля печи.

Выявлено, что отклонение температуры металла от заданной вызывает риск перегрева или пережога металла, снижение пластичности, сопряженной с ростом энергозатрат на прокатном стане и сокращение ресурса валков при обработке недогретых либо неоднородно прогретых заготовок.

2. Для измерения температурного профиля в опытной заготовке в проходных печах применяется метод термометрирования.

Результаты периодических измерений методом термометрирования находят широкое применение при разработке инструментов управления процессом нагрева, вплоть до автоматического построения математической модели печи.

3. Широкое распространение получили косвенные методы определения температурного профиля внутри заготовки, основанные на измерении температуры поверхности заготовки или температуры раската на прокатном стане с применением пирометров.

4. Особый интерес представляет исследование энергосиловых параметров клетки прокатного стана. Поэтому, в качестве косвенного метода определения температурного профиля заготовки может послужить разработка метода идентификации среднemasсовой температуры сортовых заготовок на выходе из печи на основании анализа текущих энергосиловых параметров первой клетки прокатного стана.

5. Для контроля температуры поверхности металла в печи внедрены АСУ, базирующиеся на обработке сигналов от пирометров. В современных АСУ ТП в зависимости от сложившейся на предприятии ситуации содержится множество опций, включающих и планирование посада, и регулирование горения топлива, и поддержание газодинамического режима печи, и формирования оптимальной стратегии управления, и ведения протокола нагрева каждой поступающей в печь заготовки – от загрузки до фиксации сигнала пирометра обратной связи на черновой клетки стана.

Разработка уравнений регрессии, устанавливающих зависимость значений температур зон печи от производительности для различного сортамента металла, позволяет значительно усовершенствовать имеющиеся АСУ ТП при работе печей в режиме реального времени на металлургических предприятиях.

6. Сформированы цель и задачи исследований.

## РАЗДЕЛ 2

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА С ЦЕЛЬЮ  
ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
ПРОХОДНЫХ ПЕЧЕЙ

## 2.1 Постановка задачи

Моделирование теплообменных процессов сводится к решению дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности, которое в общем виде записывается как [86]:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} t) + F. \quad (2.1)$$

При этом величина  $F$  характеризует внутренние источники тепла.

Для моделирования изучаемого процесса необходимо выполнить задание условий однозначности [86, с. 51-65].

К таким условиям относят:

- геометрические условия, позволяющие учитывать размеры и форму области пространства, для которой реализуется решение задачи;
- начальные условия, описывающие температурное состояние в начальный момент времени;
- граничные условия – условия, определяющие протекание теплообмена на поверхности металла;
- зависимость теплофизических характеристик металла от температуры.

**Геометрические условия** определяют область пространства, для которой решается задача. При этом значение играют форма и размер данной области. С точки зрения геометрических условий различают одно-, двух- и трехмерную постановки задачи. Форма изучаемой области определяет выбор системы координат, в которой будет записываться рассматриваемое дифференциальное уравнение. Наибольшую глубину изучения процессов позволяет достичь трехмерная постановка задачи. Однако, с другой стороны, она является

наиболее трудоемкой в плане объема вычислений. На практике, в каждом конкретном случае выбирается такая минимальная размерность задачи, которая позволяет достичь приемлемую точность описания изучаемых процессов.

Применительно к толкательной методической печи вся совокупность заготовок, находящихся в ней и непосредственно контактирующих между собой может рассматриваться как прямоугольный параллелепипед, длина которого равна длине внутреннего пространства печи, ширина равна длине нагреваемых сортовых заготовок, а толщина равна толщине заготовок.

В виду достаточно большого отношения длины заготовок к их толщине (минимум 40:1) и высокой равномерности распределения температур в поперечных сечениях газового пространства современных печей влиянием теплообмена на торцевых поверхностях заготовок можно пренебречь. Таким образом геометрической областью для решения поставленной задачи является отрезок нормальный к верхней грани заготовки, концами которого являются:

- середина грани и точка на оси заготовки при отсутствии в печи томильной зоны с монокристаллической подиной (рисунок 2.1 а);
- середины двух противоположных граней заготовки при наличии в печи томильной зоны с монокристаллической подиной (рисунок 2.1 б).

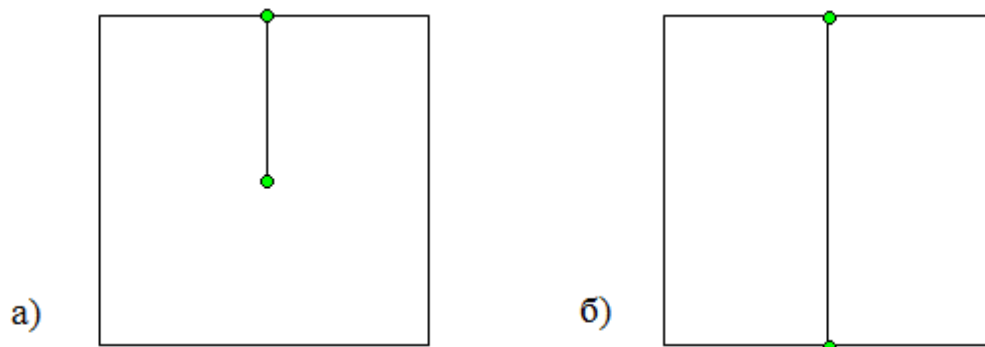


Рисунок 2.1 – Шаблоны геометрической области для решения поставленной задачи, выраженной отрезком нормальным к верхней грани заготовки, в печи: а – при отсутствии томильной зоны с монокристаллической подиной; б – при наличии томильной зоны с монокристаллической подиной



В качестве *начальных условий* задается температурное поле заготовок перед началом тепловой обработки в печи.

В случае равномерного распределения температуры в заготовке перед ее тепловой обработкой начальные условия выражаются в виде:

$$\tau = 0 : t = t_n, \quad (2.2)$$

где  $t_n$  – температура металла при посадке перед началом тепловой обработки, °С.

Теплообмен на поверхности области, для которой решается задача, определяется *граничными условиями*. При создании модели в данном исследовании для задания граничных условий на поверхности заготовки используются исключительно граничные условия третьего рода:

$$q = \alpha \cdot (T_r - T_{\text{пов}}), \quad (2.3)$$

где  $q$  – плотность теплового потока к (или от) рассматриваемой поверхности, Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – итоговый коэффициент теплоотдачи к поверхности металла, в случае необходимости, учитывающий и конвективную составляющую, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\Delta T$  – температурный напор между греющей средой, К.

В общем случае итоговый коэффициент теплоотдачи определяется как:

$$\alpha = \frac{C_{\text{ГКМ}} \left[ \left( \frac{T_r}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 \right]}{T_r - T_{\text{пов}}} + \alpha_k, \quad (2.4)$$

где  $\alpha_k$  – конвективная составляющая коэффициента теплоотдачи к поверхности металла, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

При задании граничных условий в центре заготовки (для осесимметричной задачи) используются граничные условия второго рода:

$$\frac{\partial t}{\partial y} = 0. \quad (2.5)$$

Теплофизические характеристики металла зависят от температуры и определяются по справочным табличным данным [87] или с использованием зависимостей, представленных в [88]:

– средняя теплоемкость стали в интервале температур 0 –  $t$  определяется по эмпирической формуле:

$$c_m(t) = c_{m0} + a_1 \cdot \left( \frac{t}{100} \right)^n + \frac{a_2}{cha_3 \cdot [(t - t_0)/100]}, \quad (2.6)$$

где  $c_m(t)$  – средняя теплоемкость стали в интервале температур  $0 - t$ , Дж/(кг·К);  $c_{m0}, a_1, a_2, a_3, n, t_0$  – постоянные, значения которых для различных марок стали приведены в справочной литературе [88, с. 18];

– истинная теплоемкость стали определяется с помощью кусочно-гладкой функции:

$$c(t) = c_0 + a_1 \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)^n + a_2 \cdot \exp(-a_3 \cdot |t - t_0|), \quad (2.7)$$

где  $c(t)$  – истинная теплоемкость стали, Дж/(кг·К);  $c_0, a_1, a_2, a_3, n, t_0$  – постоянные, значения которых для различных марок стали приведены в справочной литературе [88, с. 19];

– коэффициент теплопроводности стали:

$$\lambda(t) = \lambda_0 + a_1 \cdot \left(\frac{t}{100}\right) - \frac{a_2}{cha_3 \cdot [(t - t_0)/100]}, \quad (2.8)$$

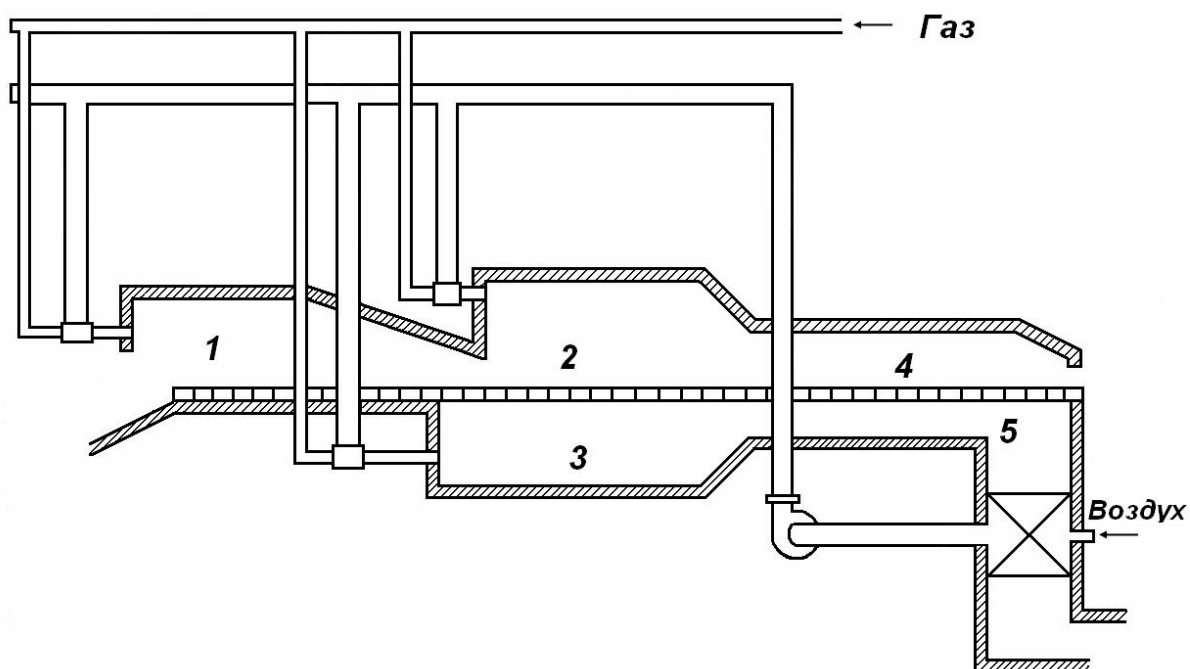
где  $\lambda(t)$  – коэффициент теплопроводности стали, Вт/(м·К);  $\lambda_0, a_1, a_2, a_3, t_0$  – постоянные, значения которых для различных марок стали приведены в справочной литературе [88, с. 19].

Рассмотрим технологическую схему процесса нагрева заготовок в проходной нагревательной печи.

### 2.1.1 Технологическая схема процесса. Входные данные и выходные параметры

В зависимости от типа прокатного стана печи могут быть с наклонным или горизонтальным подом, односторонним или двусторонним нагревом заготовок, иметь различное число отапливаемых зон [89].

В качестве примера рассмотрим принципиальную схему трехзонной методической печи, которая представлена на рисунке 2.2.



1 — томильная зона; 2 — верхняя сварочная зона; 3 — нижняя сварочная зона;  
4 — верхняя методическая зона; 5 — нижняя методическая зона

Рисунок 2.2 – Трехзонная методическая печь

В процессе нагрева заготовки поступают в неотапливаемую методическую зону печи, где осуществляется их медленный нагрев за счет тепла продуктов сгорания топлива, поступающих из отапливаемой сварочной зоны. В некоторых печах отсутствует методическая зона печи, а медленный нагрев заготовок осуществляется в отапливаемой подогревательной зоне печи.

Далее заготовки поступают в сварочную зону, где происходит их интенсивный нагрев, в результате чего температура поверхности нагреваемого металла приближается к заданной. Количество сварочных зон зависит от производительности печи.

Выравнивание температуры по объему заготовки и доведение теплосодержания металла до конечного значения осуществляется в томильной зоне. В некоторых случаях необходимость наличия томильной зоны отсутствует (заготовка – термически тонкое тело).

Рассмотрим входные данные и выходные параметры технологического процесса.

К входным данным относятся:

- марка стали;
- длина сечения заготовок;
- производительность печи;
- шаг раскладки заготовок;
- способ загрузки и выгрузки нагреваемого металла;
- температурный профиль печи (значения температур по зонам печи)

и прочее.

В качестве выходных параметров принимаются:

- продолжительность нагрева;
- температурное поле металла.

## 2.2 Алгоритмы решения задачи определения температурных полей

### 2.2.1 Решение задачи определения температурного состояния металла

Несмотря на большое количество публикаций, посвященных вопросу оптимизации процесса нагрева, в настоящее время по-прежнему имеет место необходимость разработки простой и удобной методики определения температуры металла при его нагреве, особенно при работе печи в условиях переменной производительности.

В связи с этим актуальным вопросом является разработка методики определения температуры металла при заданной температуре зон печи и времени пребывания в них, соответствующей определенной производительности.

В рассмотренных в первом разделе работах метод тепловой диаграммы И.Д. Семикина применяется для определения продолжительности нагрева металла в соответствующей зоне и печи в целом для заданного температурного профиля печи. При этом достигается необходимая среднemasсовая температура металла и надлежащее качество нагрева.

Предлагается новый метод, позволяющий для заданной продолжительности нагрева (соответствующей длине зоны и производительности печи) и температуре в зоне печи, определить температурное состояние металла в конце зоны [90].

Алгоритм расчета сводится к следующему.

По заданной производительности печи определяются скорость и продолжительность нагрева металла в соответствующей зоне.

В толкательной методической печи скорость движения заготовки определяется по формуле:

$$v = \frac{P \cdot 10^3}{3600 \cdot d \cdot l_3 \cdot \rho}, \quad (2.9)$$

где  $v$  – скорость движения заготовок соответствующей зоне или в печи в целом, м/с;  $P$  – производительность печи, т/ч;  $d$  – толщина заготовки, м;  $l_3$  – длина заготовки, м;  $\rho$  – плотность металла, кг/м<sup>3</sup>.

При этом продолжительность нагрева металла составляет:

$$\tau = \frac{L}{3600 \cdot v}, \quad (2.10)$$

где  $\tau$  – продолжительность нагрева металла в соответствующей зоне или в печи в целом, ч;  $L$  – длина соответствующей зоны или печи в целом, м.

Распределение температур по зонам печи задается.

Задается температурное состояние металла на входе в соответствующую зону печи, для которой ведется расчет. Если это первая от загрузки зона, то задаются температура поверхности и среднемассовая температура, соответствующие температурному состоянию металла, поступающего в печь. Для последующих зон в качестве исходных данных задаются характерные температуры металла, полученные в результате расчета предыдущих зон.

Процесс определения температуры поверхности металла является итерационным и сводится к следующему.

Предварительно задается температура поверхности заготовки в конце рассматриваемой зоны печи и определяется плотность теплового потока, падающего на поверхность металла в конце зоны.

При этом плотность теплового потока:

$$q = C_{\text{ГКМ}} \cdot \left[ \left( \frac{T_{\text{Г}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 \right], \quad (2.11)$$

где  $q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $C_{\text{ГКМ}}$  – приведенный коэффициент излучения в системе газ-кладка-металл, определяемый с учетом значений степеней черноты поверхности металла и продуктов сгорания и угловых коэффициентов в системе, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $T_{\text{Г}}$  – температура в соответствующей зоне печи, К;  $T_{\text{пов}}$  – температура поверхности металла, К.

Приведенный коэффициент излучения определяется по формуле:

$$C_{\text{ГКМ}} = C_0 \cdot \varepsilon_{\text{М}} \cdot \frac{w+1-\varepsilon_{\text{Г}}}{w+[\varepsilon_{\text{М}}+\varepsilon_{\text{Г}} \cdot (1-\varepsilon_{\text{М}})] \cdot \frac{1-\varepsilon_{\text{Г}}}{\varepsilon_{\text{Г}}}}, \quad (2.12)$$

где  $C_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела,  $C_0=5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $\varepsilon_{\text{М}}$  – степень черноты металла;  $\varepsilon_{\text{Г}}$  – степень черноты газа для соответствующей зоны печи;  $w$  – степень развития кладки для соответствующей зоны.

Степень черноты газа определяется по формуле:

$$\varepsilon_{\text{Г}} = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \beta, \quad (2.13)$$

где  $\varepsilon_{\text{CO}_2}$ ,  $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$  – степень черноты углекислоты и водяного пара, соответственно;  $\beta$  – поправочный коэффициент на парциальное давление водяного пара.

Степень черноты углекислого газа, водяного пара и поправочный коэффициент на парциальное давление водяного пара определяются по номограммам [87, с.308-309] или по формулам:

$$\varepsilon_{\text{CO}_2} = \exp \left\{ - \left[ 1,4918 + 0,3980 \cdot C_{\text{CO}_2}^{-0,2609} + (0,053 - 0,1239 \cdot C_{\text{CO}_2}^{0,1718}) \cdot \right. \right. \\ \left. \left. tr100 + 0,003504 + 0,0009446 \cdot C_{\text{CO}_2}^{0,20} \cdot tr100 \right] \right\}, \quad (2.14)$$

$$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = \exp \left[ 0,5708 - 1,2016 \cdot C_{\text{H}_2\text{O}}^{-0,2146} - (0,0038 + 0,05133 \cdot C_{\text{H}_2\text{O}}^{-0,2105}) \cdot \right. \\ \left. tr100 \right], \quad (2.15)$$

$$\beta = 1 + (-5,0 + 5,3114 \cdot C_{\text{H}_2\text{O}}^{-0,01191}) \cdot P_{\text{H}_2\text{O}}^{0,74+0,03705 \cdot C_{\text{H}_2\text{O}}^{-0,1561}}, \quad (2.16)$$

где  $C_{\text{CO}_2}$ ,  $C_{\text{H}_2\text{O}}$  – параметры, учитывающие парциальные давления углекислоты и водяного пара, соответственно, м·кгс/см<sup>2</sup>;  $t_{\text{Г}}$  – температура газа в

соответствующей зоне печи, °С;  $P_{H_2O}$  – парциальное давление водяного пара, кгс/см<sup>2</sup>.

Средняя плотность теплового потока, поступающего на поверхность металла в пределах зоны, определяется по формулам (2.17), (2.18):

при условии, если  $\frac{q_i}{q_{i+1}} \geq 2$ , то

$$\bar{q} = \frac{q_i - q_{i+1}}{\ln \frac{q_i}{q_{i+1}}}, \quad (2.17)$$

в противном случае

$$\bar{q} = \frac{q_i + q_{i+1}}{2}, \quad (2.18)$$

где  $\bar{q}$  – средняя плотность теплового потока в соответствующей зоне печи, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_i$  – плотность теплового потока в начале соответствующей зоны, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_{i+1}$  – плотность теплового потока в конце соответствующей зоны, Вт/м<sup>2</sup>.

Средняя плотность теплового потока для методической зоны печи (в случае её наличия) определяется по формуле:

$$\bar{q} = \sqrt{q_0 \cdot q_1}, \quad (2.19)$$

где  $q_0$  – плотность теплового потока в начале методической зоны печи, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_1$  – плотность теплового потока в конце методической зоны печи, Вт/м<sup>2</sup>.

Среднемассовая энтальпия заготовки в конце зоны вычисляется по формуле:

$$i_k = \frac{\tau \cdot 3600 \cdot K_1 \cdot \bar{q}}{\rho \cdot r_0 \cdot 10^3} + i_n, \quad (2.20)$$

где  $i_k$  – среднемассовая энтальпия заготовки в конце соответствующей зоны, кДж/кг;  $K_1$  – коэффициент материальной нагрузки, зависящий от формы тела;  $r_0$  – толщина прогреваемого слоя, м;  $i_n$  – среднемассовая энтальпия заготовки в начале соответствующей зоны, кДж/кг.

Среднемассовая температура заготовки в конце соответствующей зоны нагрева определяется путем интерполяции табличных данных по значению среднемассовой энтальпии.

Далее определяется температура поверхности заготовки по формуле:

$$t_{\pi} = \bar{t} + \frac{q \cdot r_0}{K_2 \cdot \lambda} \cdot \frac{K_3 - 1}{K_3}, \quad (2.21)$$

где  $t_{\pi}$  – температура поверхности заготовки в конце соответствующей зоны печи, °C;  $\bar{t}$  – среднемассовая температура заготовки в конце соответствующей зоны, °C;  $q$  – плотность теплового потока в конце соответствующей зоны, Вт/м<sup>2</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала заготовки при  $t_{\pi}$ , Вт/(м·K);  $K_2, K_3$  – коэффициенты усреднения плотности теплового потока и температуры, определяемые в зависимости от величины критерия Био (Bi).

Далее сравнивается температура поверхности заготовки, полученная по формуле (2.21), с предварительно заданной. При несовпадении величин расчет повторяется, начиная с определения плотности теплового потока. При этом в качестве исходной величины принимается температура поверхности металла, полученная по формуле (2.21).

Таким образом, итерационный расчет продолжается до тех пор, пока не будет достигнута сходимость температуры поверхности заготовки в пределах заданной погрешности.

Выполняя аналогичным образом расчеты для последующих зон нагрева, получаем конечное температурное состояние металла.

## 2.2.2 Решение задачи определения температуры уходящих газов

В приведенных выше источниках говорится, что температура уходящих газов в начале методической зоны принимается из интервала 800-1100 °C и в дальнейшем не уточняется. В случае применения методики для моделирования процесса неопределенность этого параметра вызывает неоднозначность задания граничных условий.

В связи с этим, предлагается расчетный метод, который опирается на общепринятую методику тепловой диаграммы И. Д. Семикина и дополнен непосредственно на стадии расчета нагрева металла возможностью уточнения температуры уходящих газов в методической зоне путем решения прямых и обратных задач вычисления среднемассовой температуры и температуры



поверхности заготовки в конце методической зоны в сочетании с методом последовательных приближений [91].

Алгоритм расчета температуры уходящих газов на выходе из печи и температурного режима нагрева металла в методической зоне сводится к следующему.

Произвольно принимается температура уходящих из печи газов ( $t_{yx}$ ) согласно диапазону рекомендуемых значений и основываясь на уравнении Стефана-Больцмана определяются соответствующий ей приведенный коэффициент излучения, а также плотность теплового потока.

Приведенный коэффициент излучения определяется в соответствии с формулой (2.12).

Определяется плотность теплового потока для методической зоны печи по формуле:

$$q_0 = C_{\text{гкм}} \cdot \left[ \left( \frac{t_{yx} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_n + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (2.22)$$

где  $q_0$  – плотность теплового потока в начале методической зоны, Вт/м<sup>2</sup>;  $t_{yx}$  – температура уходящих из печи газов, °С;  $t_n$  – температура металла при посадке в печь, °С.

Для упрощения расчетов степени черноты продуктов сгорания топлива рационально применять формулы (2.14-2.16).

Определяются соответствующие тепловая мощность печи и потери в рабочем пространстве.

Необходимый расход топлива определяется из теплового баланса печи по формуле:

$$B = \frac{1000 \cdot M_0}{Q_n^p}, \quad (2.23)$$

где  $B$  – общий расход топлива на печь, м<sup>3</sup>/с;  $M_0$  – тепловая мощность печи, МВт;  $Q_n^p$  – теплота сгорания топлива, кДж/м<sup>3</sup>.

Температурой поверхности заготовки в конце методической зоны задаемся и определяем соответствующую ей плотность теплового потока, а

затем и среднюю плотность теплового потока для этой зоны по формулам (2.11 и 2.19).

Продолжительность нагрева определяется производительностью печи и длиной методической зоны. Среднемассовая энтальпия заготовки определяется по заданной продолжительности нагрева и далее вычисляется среднемассовая температура металла.

Среднемассовая энтальпия определяется в соответствии с формулой (2.20), а среднемассовая температура заготовки определяется путем интерполяции по табличным данным [87, с. 74].

Исходя из значения среднемассовой температуры, уточняется температура поверхности металла в конце методической зоны по формуле (2.21).

Температура уходящих газов уточняется с учетом теплового баланса печи в соответствии с формулой:

$$t'_{yx} = t_{св} - \frac{P \cdot \Delta i}{C_d \cdot V_d \cdot B}, \quad (2.24)$$

где  $t'_{yx}$  – температура уходящих газов во втором приближении, °С;  $t_{св}$  – температура печи в сварочной зоне, °С;  $\Delta i$  – изменение энтальпии в методической зоне, кДж/кг;  $C_d, V_d$  – теплоемкость и объем дымовых газов, соответственно, кДж/(м<sup>3</sup>·К), м<sup>3</sup>/ м<sup>3</sup>.

Таким образом, температурный режим для заданных условий нагрева определяется путем многократного пересчета всех параметров.

Процедура уточнения температуры уходящих газов и поверхности металла в конце методической зоны производится по внешнему и внутреннему циклам с учетом метода последовательных приближений следующим образом.

Во внешнем цикле уточняется температура уходящих газов в соответствии с уравнением (2.24).

Внутренний цикл заключается в определении среднемассовой температуры и температуры поверхности металла. При этом в начале расчетной процедуры принимается произвольное значение температуры поверхности

заготовки. Затем прямым и обратным методами в определяются и сравниваются значения среднемассовой температуры соответствии с выражениями (2.20) и (2.21).

Итерационный расчет выполняется до тех пор, пока значения среднемассовых температур не совпадут в пределах заданной погрешности. В случае их несовпадения, за исходную величину принимается значение среднемассовой температуры, полученной исходя из выражения (2.20) и выполнение внутреннего цикла продолжается для определения соответствующей температуры поверхности металла для выражения (2.21). Полученное значение температуры принимается как исходное для следующей итерации внешнего цикла.

В случае большого числа итераций расчет может быть сокращен путем введения коэффициента релаксации. Таким образом, температура уходящих газов уточняется в соответствии с:

$$t_{yx}^{n'} = t_{yx}^{n-1} + (t_{yx}^n - t_{yx}^{n-1}) \cdot k, \quad (2.25)$$

где  $t_{yx}^{n'}$  – температура уходящих газов в  $n$ -ом приближении, °C;  $t_{yx}^{n-1}$  – температура уходящих газов в  $(n-1)$ -ом приближении, °C;  $t_{yx}^n$  – температура уходящих газов в  $(n-1)$ -ом приближении после уточнения, °C;  $k$  – коэффициент релаксации.

Таким образом, получаем возможность уточнения температурного состояния металла, а также температуры уходящих из печи газов непосредственно на стадии расчета нагрева металла в методической зоне, что позволяет использовать данный метод для АСУ ТП.

В качестве инструмента подтверждения адекватности предложенных методик возможно применение численных методов решения поставленной задачи.

### 2.3 Алгоритм численного решения уравнения теплопроводности применительно к задаче определения температурного состояния металла

При изучении процессов теплообмена большое распространение получили зональные методы расчета [92].

Самым универсальным и при этом эффективным методом решения дифференциальных уравнений является метод конечных элементов [93, 94, 95]. При этом для тел простой геометрической формы применение метода конечных разностей является более целесообразным так, как он наиболее прост в реализации, но при этом не снижает точность вычислений [96].

Сущность метода конечных разностей заключается в наложении на область исследования сетки правильной формы (при использовании декартовой системы координат – прямоугольной формы). Решение задачи находится для узлов сетки. При этом бесконечно малые приращения величин заменяются конечными разностями [97, 98].

В качестве аппроксимации дифференциальных уравнений применяют явную или неявную конечно-разностную схему. На рисунке 2.3 представлены шаблоны для одномерной постановки задачи.



Рисунок 2.3 – Шаблоны явной и неявной конечно-разностных схем для решения дифференциального уравнения

Координатные слои обозначены индексом «j», а временные – индексом «k». При использовании явной конечно-разностной схемы имеется один узел «j»

на настоящем временном слое «k+1», соответствующем искомой температуре, и три узла сетки «j-1», «j» и «j+1» на предыдущем временном слое «k». Для неявной схемы один узел лежит на предыдущем временном слое, а три узла сетки лежат на настоящем временном слое, при этом «j» соответствует искомой температуре [86, с. 83-91].

В одномерной постановке задачи аппроксимация дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности по явной и неявной конечно-разностным схемам описывается следующим образом:

$$\frac{t_j^{k+1} - t_j^k}{\Delta \tau} = a \cdot \left( \frac{t_{j+1}^k - 2t_j^k + t_{j-1}^k}{\Delta y^2} \right), \quad (2.26)$$

$$\frac{t_j^{k+1} - t_j^k}{\Delta \tau} = a \cdot \left( \frac{t_{j+1}^{k+1} - 2t_j^{k+1} + t_{j-1}^{k+1}}{\Delta y^2} \right), \quad (2.27)$$

где  $\Delta y$  – шаг по координате, м;  $a$  – коэффициент температуропроводности металла,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\Delta \tau$  – шаг по времени, с.

При использовании явной схемы определить значение искомой температуры для рассматриваемых на расчетном отрезке узлов сетки в соответствующий момент времени не составляет особого труда. На границах расчетного сечения значения температуры для узлов сетки определяются из выражений, полученных на основании аппроксимации граничных условий.

Основная расчетная формула при использовании явной схемы:

$$t_j^{k+1} = t_j^k \left( 1 - 2 \frac{a \cdot \Delta \tau}{\Delta y^2} \right) + \frac{a \cdot \Delta \tau}{\Delta y^2} (t_{j+1}^k - t_{j-1}^k). \quad (2.28)$$

При двухстороннем нагреве температура на поверхностях заготовки:

$$t_{п1} = \frac{1}{1 + \alpha \cdot \Delta y / \lambda} \cdot t_2 + \frac{\alpha \cdot t_{г} \cdot \Delta y / \lambda}{1 + \alpha \cdot \Delta y / \lambda}, \quad (2.29)$$

$$t_{п2} = \frac{\lambda / \Delta y}{\lambda / \Delta y + \alpha} \cdot t_{N-1} + \frac{\alpha \cdot t_{г}}{\lambda / \Delta y + \alpha}, \quad (2.30)$$

где  $t_{п1}, t_{п2}$  – температуры на поверхностях заготовки, °С;  $t_2$  – температура в точке, следующей граничной  $t_{п1}$ , °С;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $t_{N-1}$  – температура в точке, предыдущей граничной  $t_{п2}$ , °С.

Условие устойчивости явной конечно-разностной схемы:

$$a \cdot \Delta \tau \leq 0,5 \Delta y^2. \quad (2.31)$$

Для неявной конечно-разностной схемы искомые температуры не могут быть найдены с использованием простых алгебраических выражений, так, как на рассматриваемом временном слое присутствует сразу несколько узлов сетки.

Для произвольного момента времени уравнение (2.27) можно представить в соответствии с:

$$A_j \cdot t_{j-1} + B_j \cdot t_{j+1} - C_j \cdot t_j + F_j = 0, \quad (2.32)$$

где  $A_j, B_j, C_j$  – коэффициенты при температурах предыдущего, последующего и настоящего узлов, соответственно;  $F_j$  – свободный член уравнения, в котором содержится температура рассматриваемого узла на предыдущем временном слое.

При этом для простоты записи индекс временного слоя не приводится.

Эти коэффициенты определяются из выражений:

$$A_j = \frac{a_j \cdot \Delta \tau}{\Delta y^2}, \quad (2.33)$$

$$B_j = \frac{a_j \cdot \Delta \tau}{\Delta y^2}, \quad (2.34)$$

$$C_j = 1 + \frac{2 \cdot a_j \cdot \Delta \tau}{\Delta y^2}, \quad (2.35)$$

$$F_j = t_j^k, \quad (2.36)$$

где  $a_j$  – коэффициент температуропроводности материала для узла сетки «j», м<sup>2</sup>/с.

Значение  $a_j$  определяется итерационным способом, так как зависит от искомой температуры  $t_j$  на соответствующем временном слое.

Алгоритм итерационного процесса заключается в следующем:

- для температур предшествующего временного слоя принимается  $a_j$ ;
- в первом приближении определяется искомое температурное поле;
- заново рассчитывается температурное поле на рассматриваемом временном слое на основании результатов определения  $a_j$ ;

– итерационный процесс считается завершенным при совпадении с заданной погрешностью температур всех узлов сетки, полученных для двух соседних итерационных шагах.

Для упрощения расчетов возможно использование значения  $a_j$  для температур с предыдущего временного слоя без дальнейшего уточнения. Однако это сопровождается увеличением погрешности аппроксимации. При этом установление меньших шагов по координате и времени обеспечит достаточную точность расчетов.

Рассмотрим матричное уравнение, позволяющее установить связь между всеми соседними точками расчетного сечения:

$$t_j = \alpha f_j \cdot t_{j+1} + \beta e t_j. \quad (2.37)$$

Прогоночные коэффициенты  $\alpha f_j$  и  $\beta e t_j$  для произвольных узлов сетки определяются из уравнений:

$$\alpha f_j = \frac{B_j}{C_j - A_j \cdot \alpha f_{j-1}}, \quad (2.38)$$

$$\beta e t_j = \frac{F_j + A_j \cdot \beta e t_{j-1}}{C_j - A_j \cdot \alpha f_{j-1}}. \quad (2.39)$$

Алгоритм решения одномерной задачи методом неявной конечно-разностной схемы сводится к следующему [86, с. 86–87]:

1. Определяется набор величин  $A, B, C, F$  для всех внутренних узлов сетки.

2. Значения коэффициентов  $\alpha f_1$  и  $\beta e t_1$  задаются на левой границе с учетом граничных условий:

- для граничных условий 2-го рода:  $\alpha f_1 = 1, \beta e t_1 = 0$ ;
- для граничных условий 3-го рода:

$$\alpha f_1 = \frac{1}{1 + \frac{\alpha \cdot dy}{\lambda}}, \quad (2.40)$$

$$\beta e t_1 = \frac{\frac{\alpha \cdot dy}{\lambda \cdot t_{cp}}}{1 + \frac{\alpha \cdot dy}{\lambda}}. \quad (2.41)$$

3. Для всех узлов сетки от 2-го до предпоследнего определяются значения прогонных коэффициентов  $\alpha f$  и  $\beta e t$ .

4. На правой границе сетки вычисляется значение температуры с индексом «m» для граничных условий 3-го рода:

$$t_m = \frac{F_m + A_m \cdot \beta e t_{m-1}}{C_m - A_m \cdot \alpha l f_{m-1}}, \quad (2.42)$$

где

$$A_m = \frac{\lambda \cdot dy}{\frac{\lambda}{dy} + \alpha_\Sigma}, B_m = \frac{\alpha \cdot t_{cp}}{\frac{\lambda}{dy} + \alpha_\Sigma}, C_m = 1, \quad (2.43)$$

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала при температуре поверхности заготовки, соответствующей предыдущему временному слою, Вт/(м·К);  $\alpha_\Sigma$  – итоговый коэффициент теплоотдачи на правой поверхности заготовки, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

5. По уравнению (2.37) определяются значения температур для всех узлов сетки от предпоследнего до первого (т.е. справа налево).

Таким образом, следует отметить, что явная схема аппроксимации является более простой в реализации, но условно устойчивой – при невыполнении условия (2.31) приводит к получению недостоверных данных. Неявная схема является безусловно устойчивой, однако имеет некие сложности в реализации.

При решении линейной задачи теплопроводности применяют схему Кранка-Николсона, которая характеризуется более высокой точностью аппроксимации и одновременно учитывает особенности явной и неявной схем. Однако она подразумевает использование шеститочечного шаблона (особенностью является введение понятия доли явной и неявной составляющих, при этом вторая производная от температуры рассматривается в виде суммы явной и неявной составляющих), что предполагает наличие более сложных выражений для расчета, чем в случае неявной конечно-разностной схемы.

На начальных этапах развития численных способов решения дифференциальных уравнений преимущество отдавалось неявным схемам аппроксимации, поскольку они являются безусловно устойчивыми. В XXI веке ряд исследователей [37, 99] обосновали, что с учетом возросших вычислительных мощностей современных процессоров скорость вычислений по



явной и неявной схемам при решении одной и той же задачи оказывается примерно одинаковым:

- при явной схеме имеем простой набор алгебраических выражений для прямого вычисления искомых температур, но более мелкий шаг сетки, для выполнения условия устойчивости;

- при неявной схеме, имеем возможность немного увеличить шаг сетки, но используем более сложные процедуры прогонки.

Для решения поставленных в работе задач принято решение использовать явную схему аппроксимации.

Предлагается произвести сопоставление результатов, полученных по численному методу расчета (по явной конечно-разностной схеме) с результатами аналитического решения Фурье при одинаковых условиях нагрева металла.

## 2.4 Алгоритм определения температуры металла на основе использования уравнения Фурье

Изучая процессы, связанные с теплопроводностью при нестационарном режиме, для аналитического решения задачи применяется метод разделения переменных (метод Фурье) [100, 101].

Имеется тонкая пластина толщиной  $2\delta$ . Во всех точках пластины имеется постоянная температура, равная  $t_0$ . В момент времени  $t_0$  пластина помещается в среду с температурой  $t_c$ , отличной от  $t_0$ . Физические свойства пластины считаем постоянными.

В результате требуется найти температуру как функцию координаты  $x$  и времени  $t$ .

Температурное поле считаем симметричным относительно середины (оси) пластины [102]. Следовательно, имеем равенство нулю производной температуры по  $x$  на оси ( $x=0$ ). При  $x=\delta$  задается граничное условие третьего рода.

Введем избыточную температуру  $\vartheta = t - t_{\text{ж}}$ , тогда дифференциальное уравнение Фурье, начальные и граничные условия определяются из выражений:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2}, \quad (2.44)$$

$$\vartheta|_{\tau=0} = \vartheta_0, \quad (2.45)$$

$$\left. \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad (2.46)$$

$$-\lambda \cdot \left. \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right|_{x=\delta} = \alpha \cdot \vartheta|_{x=\delta}. \quad (2.47)$$

Сущность метода Фурье сводится к следующему.

Частные решения находятся в виде произведений двух функций, зависящих от одного аргумента. При этом общее решение – сумма частных решений. Произвольные постоянные определяются исходя из начальных и граничных условий.

Пусть  $\psi = \psi(x)$  – функция координаты, а  $\varphi = \varphi(\tau)$  – функция времени.

Тогда

$$\vartheta = \psi(x) \cdot \varphi(\tau). \quad (2.48)$$

Подставив в дифференциальное уравнение Фурье, получим:

$$\varphi' \cdot \psi = a \cdot \varphi \cdot \psi''. \quad (2.49)$$

Разделяя переменные, выражение принимает вид:

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{\varphi'}{\varphi} = \frac{\psi''}{\psi}. \quad (2.50)$$

Принимая во внимание, что тождество выполняется при любых значениях координаты и времени, получаем:

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{\varphi'}{\varphi} = \frac{\psi''}{\psi} = \varepsilon. \quad (2.51)$$

Нулевое решение для функции  $\psi(x)$  получается только при  $\varepsilon < 0$ . Представим, что  $\varepsilon = -k^2$ . Тогда

$$\varphi' + ak^2\varphi = 0, \quad (2.52)$$

$$\psi'' + ak^2\psi = 0. \quad (2.53)$$

Постоянная  $k$  определяется из граничных условий. Знак «-» указывает на то, что тепловой процесс стремится к равновесному состоянию.

Решения уравнений (2.52), (2.53) запишем в следующем виде:

$$\varphi(\tau) = C_1 \cdot e^{-ak^2\tau}, \quad (2.54)$$

$$\psi(x) = C_2 \cdot \cos(kx). \quad (2.55)$$

Общее решение температурного поля имеет вид:

$$\vartheta = \psi(x) \cdot \varphi(\tau) = C_1 \cdot C_2 \cdot e^{-ak^2\tau} \cdot \cos(kx). \quad (2.56)$$

Заменим  $C_1 \cdot C_2 = A$ .

Продифференцируем общее решение, рассматривая граничное условие (2.47). Получим:

$$\left. \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right|_{x=\delta} = -k \cdot A \cdot e^{-ak^2\tau} \cdot \sin(k\delta). \quad (2.57)$$

При  $x = \delta$  общее решение имеет вид:

$$\vartheta|_{x=\delta} = A \cdot e^{-ak^2\tau} \cdot \cos(k\delta). \quad (2.58)$$

Тогда

$$-k \cdot A \cdot e^{-ak^2\tau} \cdot \sin(k\delta) = -\frac{\alpha}{\lambda} \cdot A \cdot e^{-ak^2\tau} \cdot \cos(k\delta) \quad (2.59)$$

или

$$\operatorname{ctg}(k\delta) = \frac{k\delta}{\frac{\alpha \cdot \delta}{\lambda}}. \quad (2.60)$$

Обозначим  $\frac{\alpha \cdot \delta}{\lambda} = Bi$ ,  $k\delta = \mu$ , тогда

$$\operatorname{ctg}(\mu) = \frac{\mu}{Bi}. \quad (2.61)$$

При каждом значении  $Bi$  выражение (2.61) имеет бесконечное множество решений.

Следовательно, каждому значению  $\mu$  будет соответствовать свое частное распределение температуры:

$$\begin{aligned} \vartheta_1 &= A_1 \cdot \cos\left(\mu_1 \cdot \frac{x}{\delta}\right) \cdot \exp\left(-\mu_1^2 \cdot \frac{a \cdot \tau}{\delta^2}\right) \\ &\dots \\ \vartheta_n &= A_n \cdot \cos\left(\mu_n \cdot \frac{x}{\delta}\right) \cdot \exp\left(-\mu_n^2 \cdot \frac{a \cdot \tau}{\delta^2}\right). \end{aligned} \quad (2.62)$$

Решение можно представить в виде бесконечного ряда:

$$\vartheta = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \cos\left(\mu_n \cdot \frac{x}{\delta}\right) \cdot \exp\left(-\mu_n^2 \cdot \frac{a \cdot \tau}{\delta^2}\right). \quad (2.63)$$

Найдем постоянную

$$A_n = \vartheta_0 \cdot \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cdot \cos \mu_n}. \quad (2.64)$$

Распределение температуры в безразмерном виде:

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cdot \cos \mu_n} \cdot \cos(\mu_n \cdot X) \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo), \quad (2.65)$$

где  $\theta = \frac{\vartheta}{\vartheta_0} = \frac{t-t_{ж}}{t_0-t_{ж}}$  – безразмерная избыточная температура;  $X = \frac{x}{\delta}$  – безразмерная координата;  $Fo = \frac{a \cdot \tau}{\delta^2}$  – число Фурье (безразмерное время).

При  $Fo \geq 0,3$  ряд становится быстросходящимся, поэтому распределение температуры можно с достаточной точностью описать только первым членом ряда:

$$\theta = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cdot \cos \mu_n} \cdot \cos(\mu_n \cdot X) \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo). \quad (2.66)$$

Обозначим  $D_1 = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cdot \cos \mu_n}$ .

$D_1$  – функция только  $Bi$  (т.к.  $ctg(\mu) = \frac{\mu}{Bi}$ ), следовательно его можно рассчитать для различных значений  $Bi$ .

При температуре на поверхности или в центре пластины  $\cos(\mu_1 \cdot X)$  также является функцией  $Bi$  (т.к. для поверхности пластины  $X = \frac{x}{\delta} = 1$ , то  $\cos(\mu_1 \cdot 1) = \cos \mu_1$ , а для центра  $X = \frac{x}{\delta} = 0$  и  $\cos(\mu_1 \cdot 0) = 1$ ).

Для оси пластины обозначим  $D_1 \cdot \cos(0) = N(Bi)$ , тогда

$$\theta_{X=0} = N(Bi) \cdot \exp(-\mu_1^2 \cdot Fo), \quad (2.67)$$

а для поверхности  $D_1 \cdot \cos(\mu_1) = P(Bi)$ :

$$\theta_{X=1} = P(Bi) \cdot \exp(-\mu_1^2 \cdot Fo). \quad (2.68)$$

Т.к. значения этих температур зависят только от критериев Био и Фурье, то температуры поверхности и центра пластины можно определить по номограммам (рисунки 2.4, 2.5, 2.6).

При  $Fo \geq 0,3$  для решения уравнений (2.67) и (2.68) коэффициенты уравнений сведены в таблице 2.1.

Температуру безграничной пластины можно выразить из формулы для определения безразмерной температуры:

$$\theta = \frac{t - t_{\text{ж}}}{t_0 - t_{\text{ж}}}, \quad (2.69)$$

где  $\theta$  – безразмерная температура;  $t$  – температура в центре и на поверхности безграничной пластины, °С, соответственно;  $t_{\text{ж}}$  – температура газовой среды, куда поместили безграничную пластину, °С;  $t_0$  – начальная температура безграничной пластины, °С.

Тогда, температура в тепловом центре и на поверхности заготовки определяется по формулам:

$$t_{x=0} = t_{\text{ж}} + \theta_{x=0} \cdot (t_0 - t_{\text{ж}}), \quad (2.70)$$

$$t_{x=\delta} = t_{\text{ж}} + \theta_{x=\delta} \cdot (t_0 - t_{\text{ж}}), \quad (2.71)$$

где  $t_{x=0}, t_{x=\delta}$  – температура в тепловом центре и на поверхности безграничной пластины, °С, соответственно;  $\theta_{x=0}, \theta_{x=\delta}$  – безразмерная температура в центре и на поверхности безграничной пластины, соответственно.

Таблица 2.1 – Коэффициенты уравнений (2.67), (2.68) для расчета температуры в характерных точках неограниченной пластины при  $Fo \geq 0,3$  [87, с. 341, 103]

$Bi$	$\mu_1$	$\mu_1^2$	$N_n$	$P_n$	$Bi$	$\mu_1$	$\mu_1^2$	$N_n$	$P_n$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,00	0,0000	0,0000	1,0000	1,0000	2,2	1,1052	1,2216	1,1864	0,5326
0,01	0,0998	0,0100	1,0017	0,9967	2,4	1,1306	1,2782	1,1934	0,5086
0,02	0,1409	0,0199	1,0033	0,9934	2,6	1,1533	1,3301	1,1997	0,4864
0,04	0,1987	0,0395	1,0066	0,9868	2,8	1,1738	1,3779	1,2052	0,4660
0,06	0,2425	0,0588	1,0098	0,9802	3,0	1,1925	1,4220	1,2102	0,4470
0,08	0,2791	0,0779	1,0130	0,9738	3,5	1,2323	1,5185	1,2206	0,4054
0,10	0,3111	0,0968	1,0161	0,9673	4,0	1,2646	1,5992	1,2287	0,3704
0,12	0,3396	0,1154	1,0192	0,9610	4,5	1,2913	1,6676	1,2351	0,3407

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,14	0,3657	0,1337	1,0222	0,9546	5,0	1,3138	1,7262	1,2402	0,3152
0,16	0,3896	0,1518	1,0252	0,9484	5,5	1,3330	1,7769	1,2444	0,2931
0,18	0,4119	0,1697	1,0282	0,9422	6,0	1,3496	1,8213	1,2479	0,2738
0,20	0,4328	0,1874	1,0311	0,9360	7,0	1,3766	1,8951	1,2532	0,2418
0,22	0,4525	0,2048	1,0340	0,9299	8,0	1,3978	1,9539	1,2570	0,2164
0,24	0,4711	0,2220	1,0368	0,9238	9,0	1,4149	2,0018	1,2598	0,1956
0,26	0,4888	0,2390	1,0396	0,9178	10	1,4289	2,0417	1,2620	0,1785
0,28	0,5057	0,2557	1,0423	0,9119	12	1,4505	2,1040	1,2650	0,1518
0,30	0,5218	0,2723	1,0450	0,9060	14	1,4664	2,1504	1,2669	0,1320
0,35	0,5592	0,3127	1,0517	0,8915	16	1,4786	2,1864	1,2683	0,1167
0,40	0,5932	0,3519	1,0580	0,8773	18	1,4883	2,2150	1,2692	0,1046
0,45	0,6244	0,3899	1,0642	0,8634	20	1,4961	2,2384	1,2699	0,0947
0,50	0,6533	0,4268	1,0701	0,8498	25	1,5105	2,2815	1,2710	0,0767
0,55	0,6801	0,4625	1,0759	0,8365	30	1,5202	2,3109	1,2717	0,0644
0,6	0,7051	0,4971	1,0814	0,8235	35	1,5272	2,3323	1,2721	0,0555
0,7	0,7506	0,5633	1,0918	0,7985	40	1,5325	2,3486	1,2723	0,0487
0,8	0,7910	0,6257	1,1016	0,7745	50	1,5400	2,3716	1,2727	0,0392
0,9	0,8274	0,6846	1,1107	0,7517	60	1,5451	2,3872	1,2728	0,0328
1,0	0,8603	0,7402	1,1191	0,7299	70	1,5487	2,3984	1,2729	0,0282
1,2	0,9178	0,8424	1,1344	0,6892	80	1,5514	2,4069	1,2730	0,0247
1,4	0,9665	0,9342	1,1477	0,6520	90	1,5535	2,4135	1,2731	0,0220
1,6	1,0084	1,0169	1,1593	0,6181	100	1,5552	2,4188	1,2731	0,0198
1,8	1,0449	1,0917	1,1695	0,5871	$\infty$	1,5708	2,4674	1,2732	0,0000
2,0	1,0769	1,1597	1,1785	0,5587					

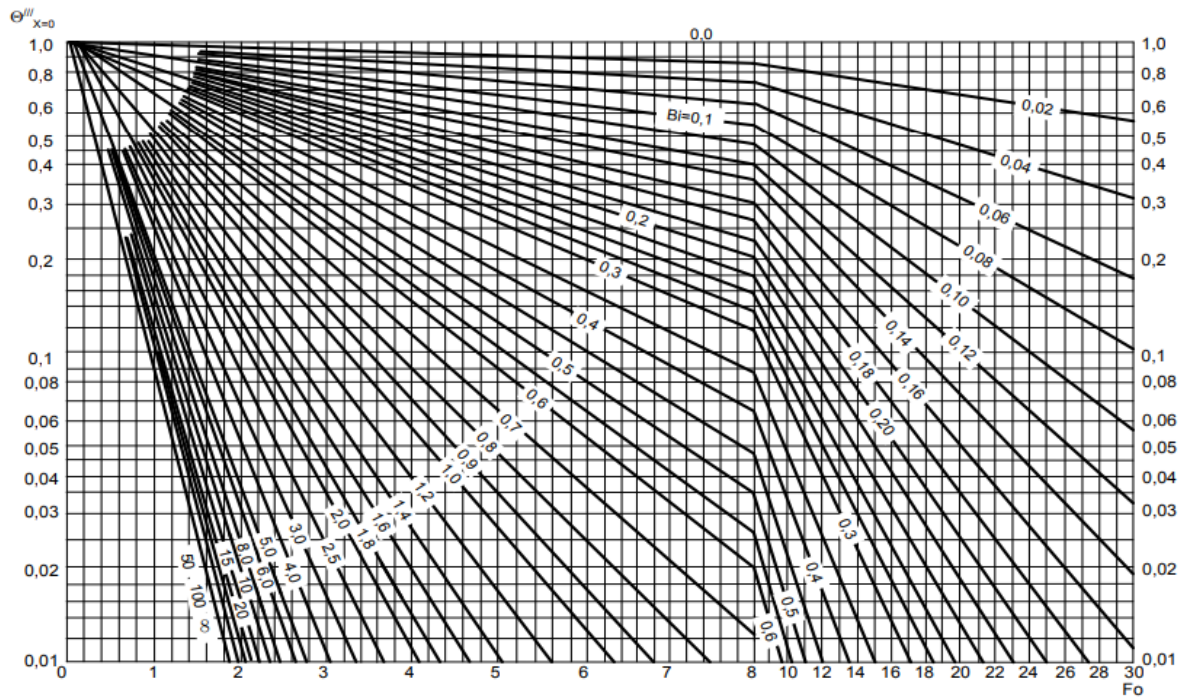


Рисунок 2.4 – Безразмерная температура в тепловом центре неограниченной пластины [87, с. 330]

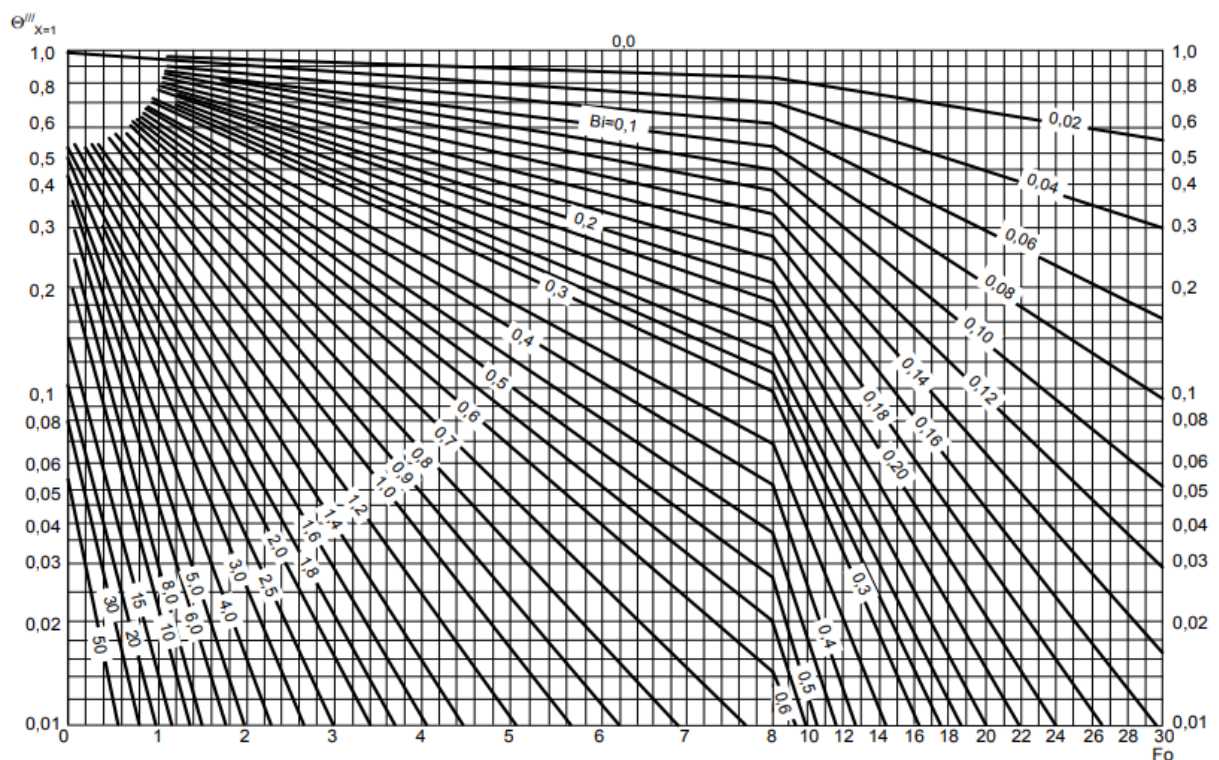


Рисунок 2.5 – Безразмерная температура на поверхности неограниченной пластины [87, с. 329]

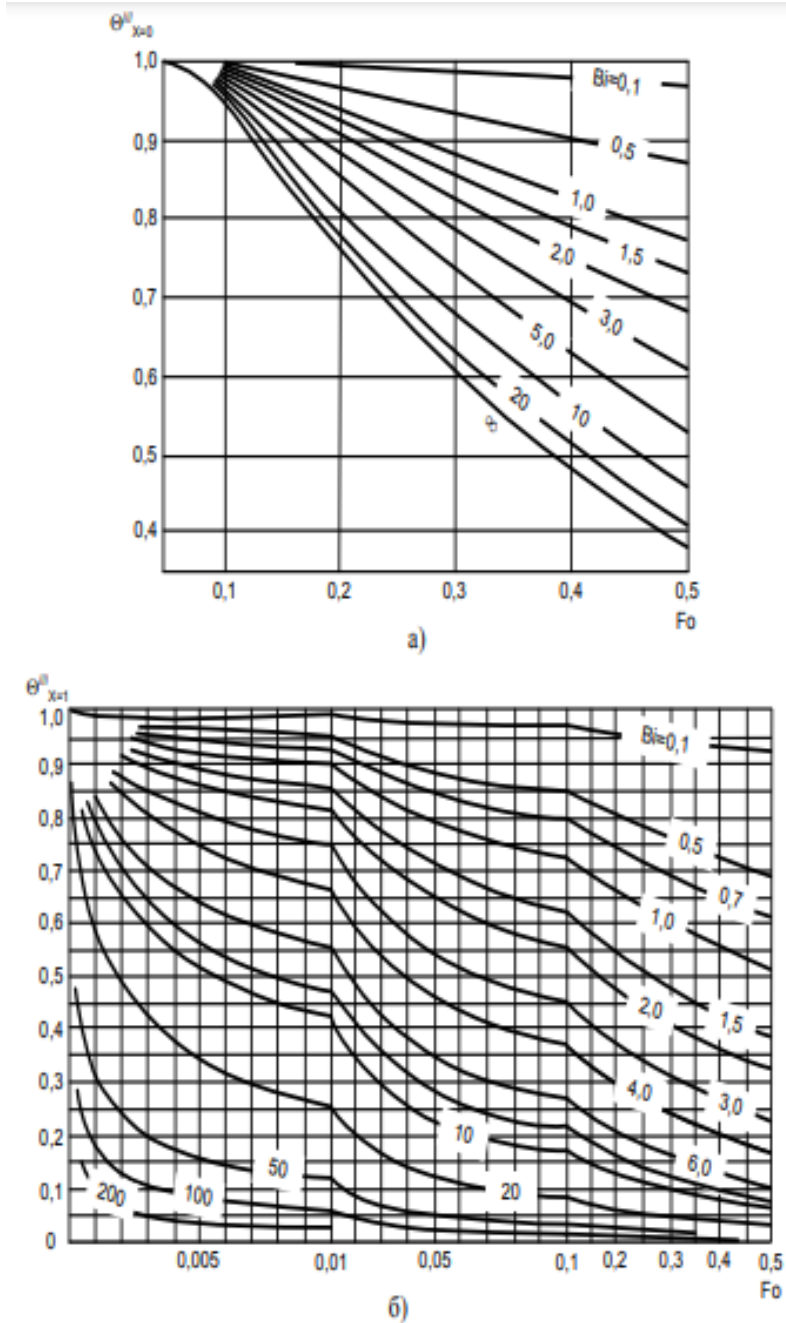


Рисунок 2.6 – Безразмерная температура бесконечной пластины при малых значениях критерия Фурье: а – в тепловом центре; б – на поверхности [87, с. 329-330]

Таким образом, возможно определить температуру на поверхности и в тепловом центре металла при его нагреве в любой момент времени.



## 2.5 Методика косвенного определения среднемассовой температуры металла на основе анализа энергосиловых параметров стана

Предложена методика идентификации среднемассовой температуры сортовых заготовок, полученной при их нагреве в проходной печи на основании анализа текущих энергосиловых параметров первой клетки прокатного стана [104]. Температура заготовки в клетке определяется в зависимости от тока двигателя.

Методика сводится к следующему.

Мощность двигателя определяется значением тока двигателя:

$$N = 1,73 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi, \quad (2.72)$$

где  $N$  – мощность двигателя, кВт;  $U$  – напряжение питания (двигатель постоянного тока), В;  $I$  – ток при прокатке, А;  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности.

Тогда крутящий момент:

$$M_{кр} = N \cdot \eta / \omega, \quad (2.73)$$

где  $M_{кр}$  – крутящий момент, Н·м;  $\eta$  – коэффициент полезного действия двигателя;  $\omega$  – угловая скорость, рад/с.

Угловая скорость при этом:

$$\omega = \pi \cdot n_{пр} / 30, \quad (2.74)$$

где  $n_{пр}$  – частота вращения двигателя при прокатке, об/мин.

Принимаем, в первом приближении:

$$M_{кр} = M_{пр}, \quad (2.75)$$

где  $M_{пр}$  – момент прокатки, Н·м.

Момент прокатки определяется из общеизвестной формулы:

$$M_{пр} = 2 \cdot P \cdot a = 2 \cdot \psi \cdot l \cdot P, \quad (2.76)$$

где  $P$  – сила прокатки, Н;  $a$  – плечо силы прокатки относительно оси вращения вала, мм, для горячей прокатки  $a = (0,45 \dots 0,5) \cdot l$ ;  $\psi$  – эмпирический коэффициент, называемый коэффициентом плеча силы прокатки;  $l$  – длина контакта металла с валком, мм.

При этом длина контакта металла с валком определяется по формуле:

$$l \approx \sqrt{R \cdot \Delta h}, \quad (2.77)$$

где  $R$  – радиус вала, мм;  $\Delta h$  – абсолютное обжатие, мм.

Усилие прокатки определяется по формуле:

$$P = p_{\text{ср}} \cdot l \cdot b_{\text{ср}}, \quad (2.78)$$

где  $p_{\text{ср}}$  – средняя ширина очага, мм;  $b_{\text{ср}}$  – среднее давление по длине контакта, МПа.

Среднее давление можно найти по формуле:

$$p_{\text{ср}} = \frac{4 \cdot k}{\varepsilon \cdot \delta} \cdot \left[ \left( \frac{1}{1 - \varepsilon} \right)^{\frac{\delta - 1}{2}} - \left( 1 - \frac{\varepsilon}{2} \right) \right], \quad (2.79)$$

где  $k$  – коэффициент пластичности, МПа;  $\varepsilon$  – относительное обжатие металла;  $\delta$  – параметр прокатки.

Коэффициент пластичности при этом:

$$k = \frac{1,15}{2} \cdot \frac{(\sigma_{\text{т0}} + \sigma_{\text{т1}})}{2}, \quad (2.80)$$

где  $\sigma_{\text{т0}}$ ,  $\sigma_{\text{т1}}$  – предел текучести до и после прокатки, МПа.

Относительное обжатие металла определяется по формуле:

$$\varepsilon = (h_0 - h_1) / h_0, \quad (2.81)$$

где  $h_0$ ,  $h_1$  – размер заготовки до и после прохода, мм.

Параметр прокатки:

$$\delta = \mu \cdot \frac{1}{h_{\text{ср}}} \cdot \frac{2 - \varepsilon}{\varepsilon}, \quad (2.82)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения при прокатке;  $h_{\text{ср}}$  – средняя толщина заготовки, мм.

Реализация данной разработки в режиме реального времени позволяет контролировать рациональность установленных параметров температурного режима печи.

## 2.6 Алгоритм решения задачи расчета температурного профиля печи при переменной производительности

При работе действующих печей в условиях пониженной производительности не существует универсальных методов проектирования режимов нагрева.

По технологическим соображениям температура в нагревательной (сварочной) зоне печи принимается на 150 – 250 °С выше заданной температуры поверхности металла. Однако при эксплуатации печи в режиме пониженной производительности значение оптимальной температуры газов в сварочной зоне является неопределенным (относительно проектной номинальной производительности). Следовательно, возникает необходимость создания удобной и простой методики определения рациональных технологических параметров температурного профиля печи, позволяющих достигать заданные параметры температурного поля нагреваемого металла в условиях изменяющейся производительности.

Методика определения температурного профиля печи, работающей в условиях пониженной производительности, гарантирует получение заданного теплосодержания металла в конце нагрева [105].

Данная методика предполагает выполнение четырех этапов:

1. Определяется температурный профиль печи в условиях номинальной производительности в соответствии с предложенной выше методикой определения теплового состояния металла в методической зоне проходной нагревательной печи (прямой метод).

2. Определяется температурный профиль печи для условий пониженной производительности с использованием метода расчета, предложенного в данном разделе (обратный метод). Данный метод базируется на поддержании теплосодержания металла по зонам и печи в целом при пониженной производительности на уровне номинального режима.

3. Для определения теплосодержания металла по печи выполняется поверочный расчет с использованием прямого метода. Температурный профиль печи задается исходя из рассчитанного на предыдущем этапе.

4. Расчет считается завершенным при совпадении величин теплосодержания металла в конце сварочной зоны, полученных при работе печи с номинальной производительностью и в рамках поверочного расчета в пределах заданной погрешности. В противном случае параметры температурного профиля печи уточняются по итерационной схеме при помощи прямого метода расчета.

В начале расчета по формулам (2.9) и (2.10) определяются значения скорости и продолжительности нахождения заготовок в печи, работающей в условиях пониженной производительности.

Определяется среднее значение плотности теплового потока в соответствующих зонах или в печи в целом по формуле в соответствии с [106]:

$$\bar{q} = \frac{\rho r_0 \cdot 10^3}{3600 \cdot K_1 \cdot \tau} \cdot \Delta i. \quad (2.83)$$

Значение плотности теплового потока в конце нагрева определяется заданным температурным перепадом по толщине металла на выходе из печи.

Плотность теплового потока в конце сварочной зоны (начале томильной зоны) определяется методом последовательных приближений по формуле:

$$q_2 = \bar{q}_3 \cdot \ln \frac{q_2}{q_k} + q_k, \quad (2.84)$$

где  $q_2$  — плотность теплового потока в конце сварочной (начале томильной) зоны, Вт/м<sup>2</sup>;  $\bar{q}_3$  — средняя плотность теплового потока для томильной зоны, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_k$  — плотность теплового потока на выходе из печи, Вт/м<sup>2</sup>.

Аналогичным образом определяем плотность теплового потока в конце методической (начале сварочной) зоны.

Плотность теплового потока в начале методической зоны (начале нагрева) определяется по формуле:

$$q_0 = (\bar{q}_2)^2 / q_1, \quad (2.85)$$

где  $q_0$  — плотность теплового потока в начале нагрева, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_1$  — плотность теплового потока в конце методической зоны, Вт/м<sup>2</sup>;  $\overline{q_2}$  — средняя плотность теплового потока для методической зоны печи, Вт/м<sup>2</sup>.

Температура печи в начале и конце каждой зоны определяется из выражения:

$$t_r = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{q}{C_{гкм}} + \left(\frac{t_n + 273}{100}\right)^4} - 273, \quad (2.86)$$

где  $t_r$  — температура газа в соответствующей зоне печи, °С.

Приведенный коэффициент излучения вычисляется по формуле (2.12) для каждой зоны, соответственно.

Таким образом, следуя вышеописанному алгоритму расчета рациональных режимных параметров, возможно получение такого же теплового состояния металла при пониженной производительности печи, как и в случае с номинальным режимом.

## 2.7 Разработка метода расширения диапазона регулирования технологических параметров проходных печей за счет изменения шага укладки заготовок

Для печей с механизированным подом появляется возможность расширения диапазона регулирования технологических параметров, связанная с изменением шага укладки заготовок.

Проведем исследование взаимного влияния таких параметров как производительность печи, температурный профиль и шаг раскладки заготовок при решении задачи достижения заданного теплосодержания металла в процессе нагрева при работе печи в условиях изменяющейся производительности. При этом предлагаются методики, позволяющие:

- для заданной производительности печи и шага укладки заготовок определить температурный профиль печи, гарантирующий получение заданного теплосодержания;

- для заданной производительности определить оптимальный с точки зрения расхода топлива шаг укладки;
- для заданной производительности и температурного профиля печи определить шаг укладки, позволяющий получить заданное теплосодержание металла в результате нагрева.

Метод [107] позволяет определить температурный профиль печи при переменном шаге укладки заготовок за счет изменения коэффициента несимметричности нагрева. При этом теплосодержание металла считается постоянным.

Рассмотрим особенности предложенной методики.

По формулам (2.20) и (2.21) определяются среднемассовая энтальпия и среднемассовая температура заготовки в конце методической зоны, с учетом того, что толщина прогреваемого слоя зависит от коэффициента несимметричности нагрева:  $r_0 = \mu \cdot d$ .

Определяется скорость движения заготовок при изменении шага укладки по формуле:

$$v = \frac{P \cdot (d+a) \cdot 10^3}{3600 \cdot d^2 \cdot l_z \cdot \rho}, \quad (2.87)$$

где  $a$  – шаг укладки заготовок, м.

Далее с учетом коэффициента несимметричности нагрева по формуле (2.83) определяются среднее значение плотности теплового потока в соответствующих зонах или в печи в целом.

Предложенная методика для определения температурного профиля проходной печи с механизированным подом, работающей в условиях изменяющейся производительности, позволяет определять параметры нагрева для переменного шага укладки заготовок. При этом обеспечивается заданное теплосодержание металла.

Предлагается методика, позволяющая при работе печи с механизированным подом в условиях переменной производительности определить оптимальный шаг укладки заготовок. Однозначное вычисление

шага укладки заготовок и уточнение температурного профиля печи позволяет гарантировано получить заданное теплосодержание металла в конце нагрева [108].

Настоящая методика заключается в следующем.

Определяются параметры номинального режима с помощью метода тепловой диаграммы И. Д. Семикина. При этом производительность печи и шаг укладки заготовок считаются заданными.

Для рассматриваемой производительности решаем задачу обеспечения определенного для опорного режима теплосодержания металла при работе с разными шагами укладки заготовок. Для решения используется т.н. метод прострела: весь возможный диапазон изменения шага укладки заменяется рядом дискретных значений (например, с шагом 10 мм). Для каждого шага укладки определяется температурный профиль печи и удельный расход теплоты. В рассматриваемом диапазоне шагов укладки идентифицируется искомый экстремум. Затем этот диапазон целесообразно разбить на ряд участков, например, с шагом 1 мм, чтобы, с практической точностью идентифицировать величину оптимального шага укладки заготовок.

Подробнее рассмотрим вычислительный алгоритм определения температурного профиля печи и удельного расхода теплоты для каждого рассматриваемого значения шага укладки заготовок.

Определяются коэффициенты несимметричности нагрева и задается температура газа в сварочной зоне печи.

Далее определяется скорость движения заготовок по формуле (2.87).

Вычисляется общее время и время нагрева металла по зонам печи исходя из выражения (2.10).

В соответствии с методикой устраняющей неопределенность задания граничных условий, описанной выше, определяются значения среднемассовой и температуры поверхности заготовки в конце методической зоны, а также температуры уходящих из печи газов.

Вычисляются значения энтальпии металла по зонам и в конце нагрева в соответствии с формулой (2.20).

Расчет считается завершенным при совпадении полученных значений энтальпии металла с величинами, соответствующими номинальному режиму в пределах заданной погрешности.

В противном случае расчет повторяется заново при другом значении температуры газов в сварочной зоне печи.

Таким образом, методика определения оптимального шага укладки заготовок позволяет минимизировать удельный расход теплоты на нагрев металла. При этом гарантировано обеспечение заданного теплосодержания металла в конце каждой из зон печи.

Также для расширения возможностей регулирования разработана методика, позволяющая при изменении производительности и неизменном температурном профиле печи обеспечить заданное теплосодержание металла за счет изменения шага укладки заготовок.

При работе печи в условиях переменной производительности определение рациональных режимных параметров выполнялось в соответствии с методикой определения температурного профиля методической печи, рассмотренной выше, и дополнено однозначным вычислением требуемого шага укладки заготовок [109].

Алгоритм расчета заключается в следующем.

Определяются параметры номинального режима. При этом шаг укладки заготовок считается известным.

Для модифицированных режимов требуемое конечное теплосодержание металла достигалось путем выбора оптимального шага укладки заготовок при различных производительностях печи. Следует отметить, что метод базируется на постоянстве теплосодержание металла и средних тепловых потоков по зонам печи на уровне номинального режима.



Затем задается произвольный шаг укладки заготовок и определяются коэффициенты несимметричности нагрева путем интерполяции табличных данных [110].

Определяются время нагрева металла по зонам и в печи в целом по формуле (2.9).

По формуле (2.10) определяется скорость нагрева заготовки.

Шаг укладки заготовок определяется исходя из выражения:

$$a = \frac{3600 \cdot d^2 \cdot l_3 \cdot p \cdot v}{P \cdot 10^3} - d. \quad (2.88)$$

Расчет считается завершенным при совпадении полученное значение шага укладки заготовок с предварительно заданным. В противном случае, полученное значение шага укладки принимаем в качестве нового приближения и расчет повторяем заново.

Таким образом, предложенный расчетный метод определения рациональных режимных параметров проходной печи с механизированным подом, работающей в условиях изменяющейся производительности позволяет осуществлять регулирование за счет изменения шага укладки заготовок. При этом для различной производительности печи путем определения необходимого шага укладки заготовок возможно получение заданного конечного теплосодержания металла.

## 2.8 Методика применения методов математической статистики к решению задачи обработки полученных результатов

Для обработки результатов исследования предлагается использование метода статистической обработки – регрессионного анализа с применением метода наименьших квадратов [111].

Регрессионный анализ заключается в определении аналитической связи между показателями (факторами), полученными в результате статистического исследования.

В результате регрессионного анализа выполняются следующие задачи: установление формы зависимости, функция регрессии определяется в виде математического уравнения, что позволяет проводить оценку неизвестных значений зависимой переменной.

Регрессии могут быть линейными и нелинейными. При этом нелинейные регрессии могут быть линейными и нелинейными по оцениваемым параметрам.

В исследованиях принята нелинейная регрессия по объясняющим переменным в виде полинома второй степени.

Общий вид полиномиального уравнения регрессии второго порядка представляет собой выражение:

$$y = a + bx + cx^2, \quad (2.89)$$

где  $x, y$  – факторный и результативный признаки, соответственно;  $a, b, c$  – параметры регрессии.

Параметры регрессии определяются путем обработки статистических данных методом наименьших квадратов.

Метод наименьших квадратов (МНК) [112] представляет собой способ получения минимальной суммы отклонений полученной функции от частных значений.

Определение параметров регрессии для полиномиального уравнения второго порядка осуществляется путем решения системы уравнений:

$$\begin{cases} a \cdot n + b \cdot \sum_{i=1}^n x_i + c \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i \\ a \cdot \sum_{i=1}^n x_i + b \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 + c \cdot \sum_{i=1}^n x_i^3 = \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i \\ a \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \cdot \sum_{i=1}^n x_i^3 + c \cdot \sum_{i=1}^n x_i^4 = \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot y_i \end{cases} \quad (2.90)$$

Для оценки значимости регрессионных уравнений определяется коэффициент детерминации из выражения:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (2.91)$$

где  $\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$  – сумма квадратов отклонений, обусловленная регрессией;  $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$  – остаточная сумма квадратов отклонений.

Полученные регрессионные уравнения могут послужить исходными данными при разработке программного алгоритма для АСУ ТП нагрева металла в проходных печах.

## 2.9 Выводы по разделу 2

1. Отработаны методологические основы проведения научных исследований, направленных на решение поставленных в диссертации задач. Представлены основные этапы создания математической модели, которая позволяет описать процесс нагрева металла в печах и базирующейся на решении дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности в одномерной постановке задачи.

2. Разработана удобная и простая методика определения температуры металла на протяжении всего нагрева при заданной температуре печи и продолжительности нагрева, соответствующих определенной производительности.

3. Разработана расчетная методика определения температуры уходящих из печи газов, которая опирается на общепринятый метод тепловой диаграммы И. Д. Семикина и дополнена возможностью уточнения температуры уходящих газов непосредственно на стадии расчета нагрева металла в методической (неотапливаемой) зоне. Уточнение заключается в решении прямых и обратных задач вычисления среднемассовой и температуры поверхности заготовки в конце методической (неотапливаемой) зоны в сочетании с методом последовательных приближений.

4. Для исследования температурного поля металла в процессе его нагрева в толкательных печах разработана одномерная математическая модель. Для решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности использован метод конечных разностей и явная схема аппроксимации. Отработана схема задания условий однозначности для заготовок, включающая в себя геометрические, начальные, граничные условия и задание зависимости

теплофизических характеристик сред и материалов, участвующих в теплообмене от температуры.

5. Для дополнительного исследования процесса нагрева предложено провести сопоставление результатов, полученных с помощью конечно-разностной модели, с результатами аналитического решения задачи теплопроводности по методу Фурье.

6. Разработана методика косвенного определения среднemasсовой температуры металла на основании анализа текущих энергосиловых параметров первой клетки прокатного стана. Реализация данной разработки в режиме реального времени позволяет контролировать рациональность установленных параметров температурного режима печи.

7. Разработана методика определения температурного профиля печи в условиях пониженной производительности. При этом гарантировано получение заданного теплосодержания металла в конце нагрева.

8. Выявлено, что при работе печи с механизированным подом появляется дополнительная возможность расширения диапазона регулирования технологических параметров за счет изменения шага укладки заготовок.

Разработаны методики, позволяющие исследовать взаимное влияние таких параметров как производительность печи, температурный профиль и шаг раскладки заготовок при решении задачи достижения заданного теплосодержания металла в процессе нагрева при работе печи в условиях изменяющейся производительности. Данные методики, позволяют:

- для заданной производительности печи и шага укладки заготовок определить температурный профиль печи, гарантирующий получение заданного теплосодержания;

- для заданной производительности определить оптимальный с точки зрения расхода топлива шаг укладки;

- для заданной производительности и температурного профиля печи определить шаг укладки, позволяющий получить заданное теплосодержание металла в результате нагрева.

## РАЗДЕЛ 3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА  
МЕТАЛЛА В ПРОХОДНЫХ ПЕЧАХ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ3.1 Сравнительный анализ результатов вычислительных  
экспериментов, полученных с применением метода Фурье и конечно-  
разностной модели

Проведено сопоставление результатов, полученных с помощью конечно-разностной модели, с результатами аналитического решения задачи теплопроводности по методу Фурье. Сопоставление результатов выполнялось при одинаковых условиях нагрева, имитирующих нагрев заготовки по режиму с постоянной температурой печи. Совокупность заготовок, находящихся в толкательной печи, условно рассмотрена как бесконечная плита.

Заготовки толщиной  $2\delta=150$  мм с начальной температурой  $t_0 = 120$  °C помещена в газовую среду с температурой  $t_{ж} = 1015$  °C.

Температуры в центре и на поверхности заготовки определялись с интервалом  $\Delta\tau = 0,2$  с на протяжении всего нагрева. В конечно-разностной одномерной модели шаг по координате составляет  $2 \cdot 10^{-3}$  м.

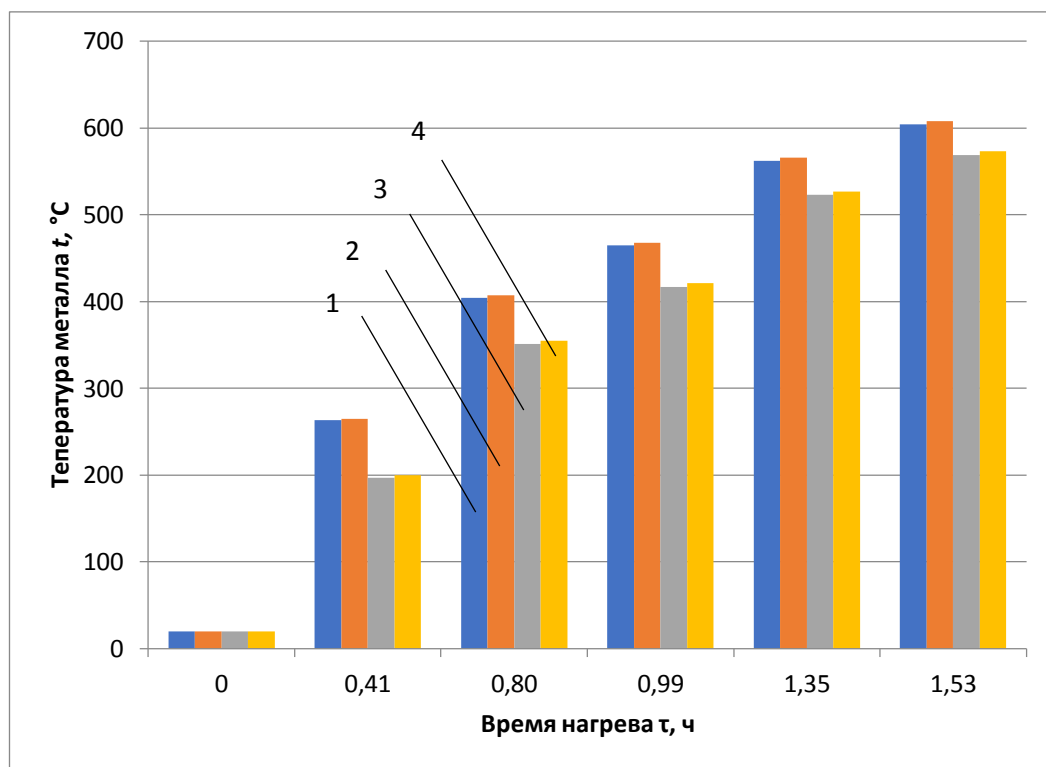
Коэффициент теплопроводности и температуропроводности стали, а также коэффициент теплоотдачи от газообразной среды к поверхности заготовки считаем постоянными на протяжении всего нагрева и соответственно равны  $\lambda = 51$  Вт/(м · К),  $a = 5,29 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с и  $\alpha = 115$  Вт/(м<sup>2</sup> · К).

Температуры в центре и на поверхности бесконечной пластины при нагреве в среде с постоянной температурой можно определить с помощью графиков, представленных на рисунках 2.4, 2.5, 2.6.

В рассматриваемом случае  $Bi=0,169$ , а критерий  $Fo$  изменяется с течением времени. По графикам находим значения безразмерных температур  $\theta$  для каждого момента времени.

При  $Fo \geq 0,3$  решение можно получить при помощи уравнений (2.67) и (2.68). При этом коэффициенты уравнений приведены в таблице 2.1.

Результаты, полученные с помощью конечно-разностной явной схемы и по методу Фурье, представлены в таблице 3.1 и на рисунке 3.1.



1 – температура поверхности металла по методу Фурье; 2 – температура поверхности металла по численному методу; 3 – температура центра металла по методу Фурье; 4 – температура центра металла по численному методу

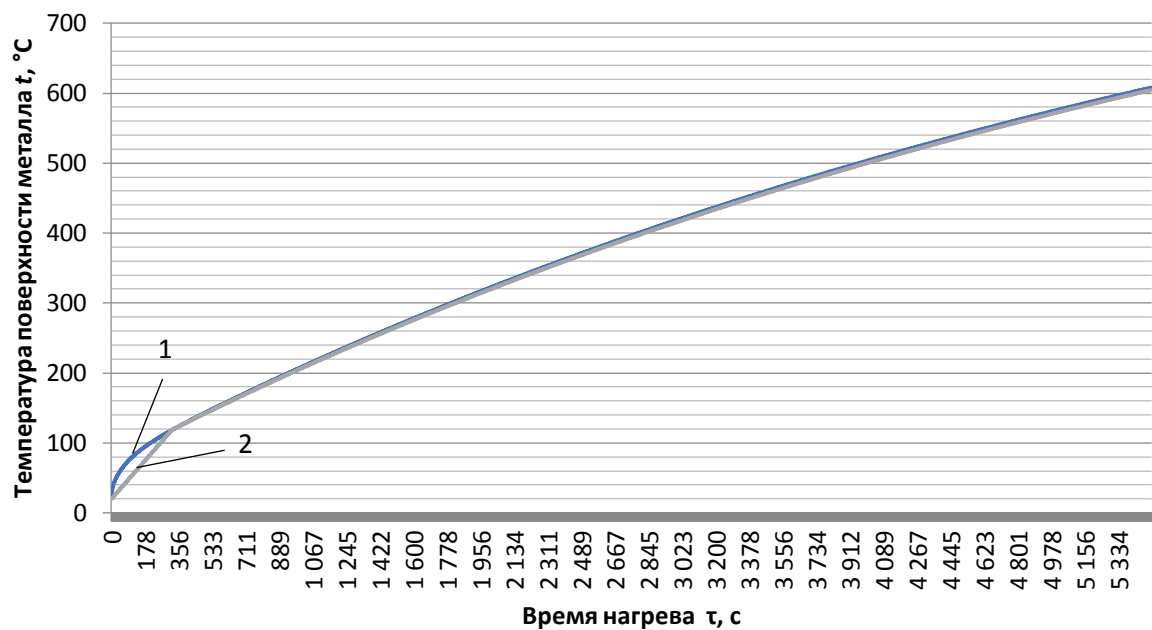
Рисунок 3.1 – Сравнение результатов температур центра и поверхности, полученных по методу Фурье и с помощью численного метода

Графики зависимости температур в центре и на поверхности заготовки от времени нагрева, полученных с помощью метода Фурье и по численному методу, даны на рисунках 3.2, 3.3.

Таким образом, можно сделать вывод, что расхождение значений температур, полученных с помощью метода Фурье и по численному методу, не превышает 1,5%.

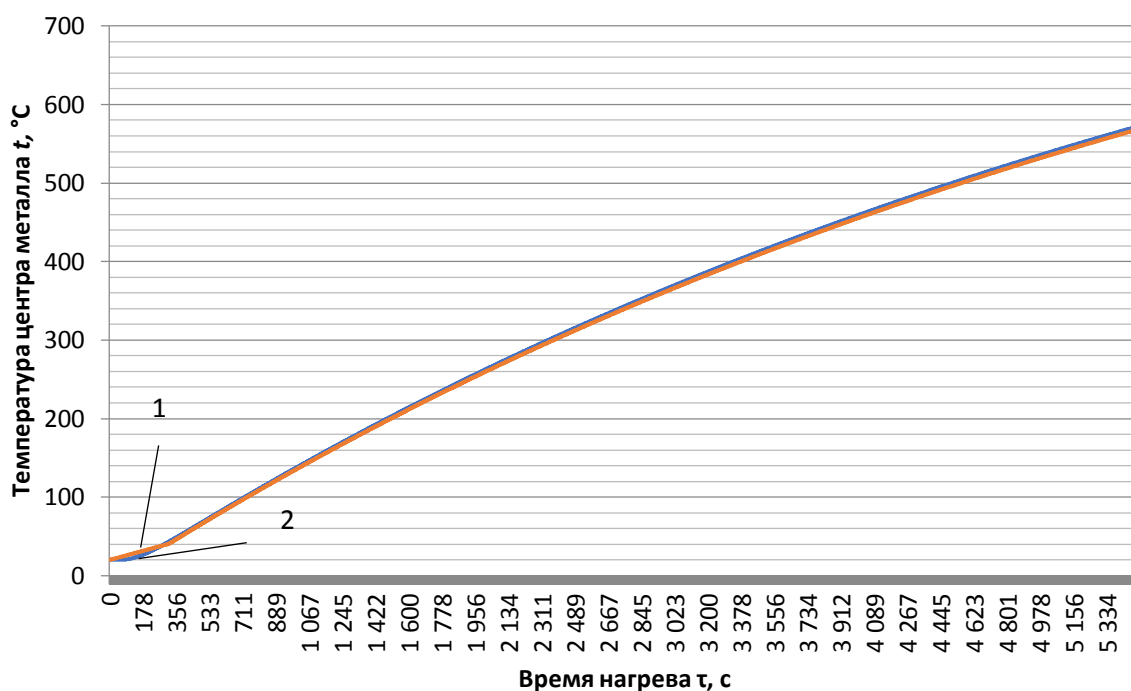
Таблица 3.1 – Результаты вычисления температур центра и поверхности заготовки, полученные с помощью метода Фурье и по численному методу

Длина печи $L$ , м	Значение температуры центра металла по Фурье	Значение температуры поверхности металла по Фурье	Значение температуры центра металла по явной конечно-разностной схеме	Значение температуры поверхности металла по явной конечно-разностной схеме
3,5	197	263	200	265
6,8	351	404	355	407
8,4	417	465	421	468
11,5	523	562	527	566
13	569	604	573	608



1 – температура поверхности по численному методу; 2 – температура поверхности по методу Фурье

Рисунок 3.2 – График зависимости температуры поверхности заготовки от времени нагрева, полученной с помощью метода Фурье и по численному методу



1 – температура центра по численному методу; 2 – температура центра по методу Фурье

Рисунок 3.3 – График зависимости температуры в центре заготовки от времени нагрева, полученной с помощью метода Фурье и по численному методу

### 3.2 Анализ результатов численных экспериментов, выполненных с применением базовых расчетных зависимостей

#### 3.2.1 Анализ результатов для толкательных печей

Для оценки адекватности разработанного инженерного метода определения температуры металла с его использованием и параллельно с помощью математической конечной разностной модели для аналогичных условий однозначности проведены численные эксперименты по определению температурного состояния металла в процессе нагрева и выполнено сравнение их результатов.

Расчет выполнялся для нагрева сортовой заготовки сечением 150x150 мм в пятизонной методической толкательной печи общей длиной 13 м. Начальная температура металла 20 °С. Температуры по зонам: 1015 °С для



подогревательной зоны, 1185 °С и 1205 °С – для сварочных, и 1215 °С и 1230 °С – для последних зон.

Теплофизические свойства металла зависят от температуры и в каждый момент времени определялись по [87, С. 72–77].

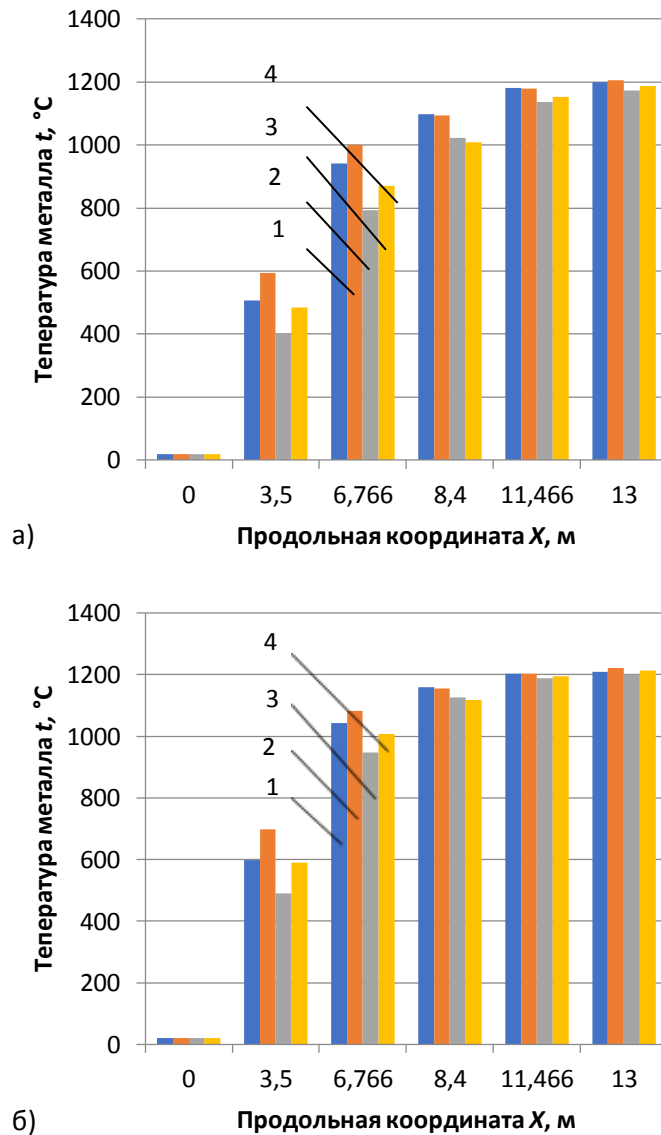
Для вычисления температуры на поверхности заготовки принимаются граничные условия III рода.

Шаг по сечению заготовки принимался  $\Delta x = 9$  мм, а шаг по времени, исходя из условия устойчивости явной конечно-разностной схемы (2.31), составил  $\Delta t = 2,2$  с.

На рисунке 3.4 представлены гистограммы, характеризующие сравнение температуры металла для разных моментов времени, полученные с помощью предложенной в подразделе 2.2 методики и с помощью численного метода расчета (явной конечно-разностной схемы). Вычисления производились для производительностей печи 120 т/ч и 90 т/ч.

Из рисунка видно, что для обеих производительностей во время инерционного периода наблюдается некое расхождение результатов (не более 15%). Далее по мере прогрева металла и до самой его выдачи из печи отличие результатов не превышает 1%.

Можно сказать, что расчеты подтвердили правомерность использования методики определения температурного состояния металла при его нагреве. Наблюдается повышение однородности прогрева после печи с понижением производительности.



1 – температура поверхности металла по предложенному методу; 2 – температура поверхности металла по численному методу; 3 – температура центра металла по предложенному методу; 4 – температура центра металла по численному методу

Рисунок 3.4 – Температура поверхности и центра заготовки по длине печи для производительностей а) 120 т/ч и б) 90 т/ч

### 3.2.2 Анализ результатов для печи с механизированным подом

Подтверждение адекватности предложенной методики проведено для условий методической комбинированной нагревательной печи с шагающими

водоохлаждающими балками стана 390 Макеевского металлургического завода (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – Методическая комбинированная нагревательная печь

Данная печь предназначена для нагрева заготовок сечением 130x130 мм и 150x150 мм из углеродистой качественной конструкционной, легированной и рессорно-пружинной сталей до температуры прокатки. Заготовки длиной 7500 - 12000 мм загружаются в один ряд с помощью внутрипечных роликов. Подача и разгрузка заготовок боковая.

Температура садки соответствует температуре окружающей среды. Температура выдачи составляет 1050 – 1250 °С.

Загрузка заготовок в печь производится по боковому рольгангу.

Нагрев печи осуществляется смешанным газом, состоящим из природного и доменного газа (в случае необходимости добавляется также и коксовый газ) с теплотой сгорания 4000 ккал/Нм<sup>3</sup>. При отсутствии доменного газа в течение короткого времени производится нагрев природным газом (8000 ккал/нм<sup>3</sup>).

Схема расположения зон регулирования температуры и горелок печи представлена на рисунке 3.6.

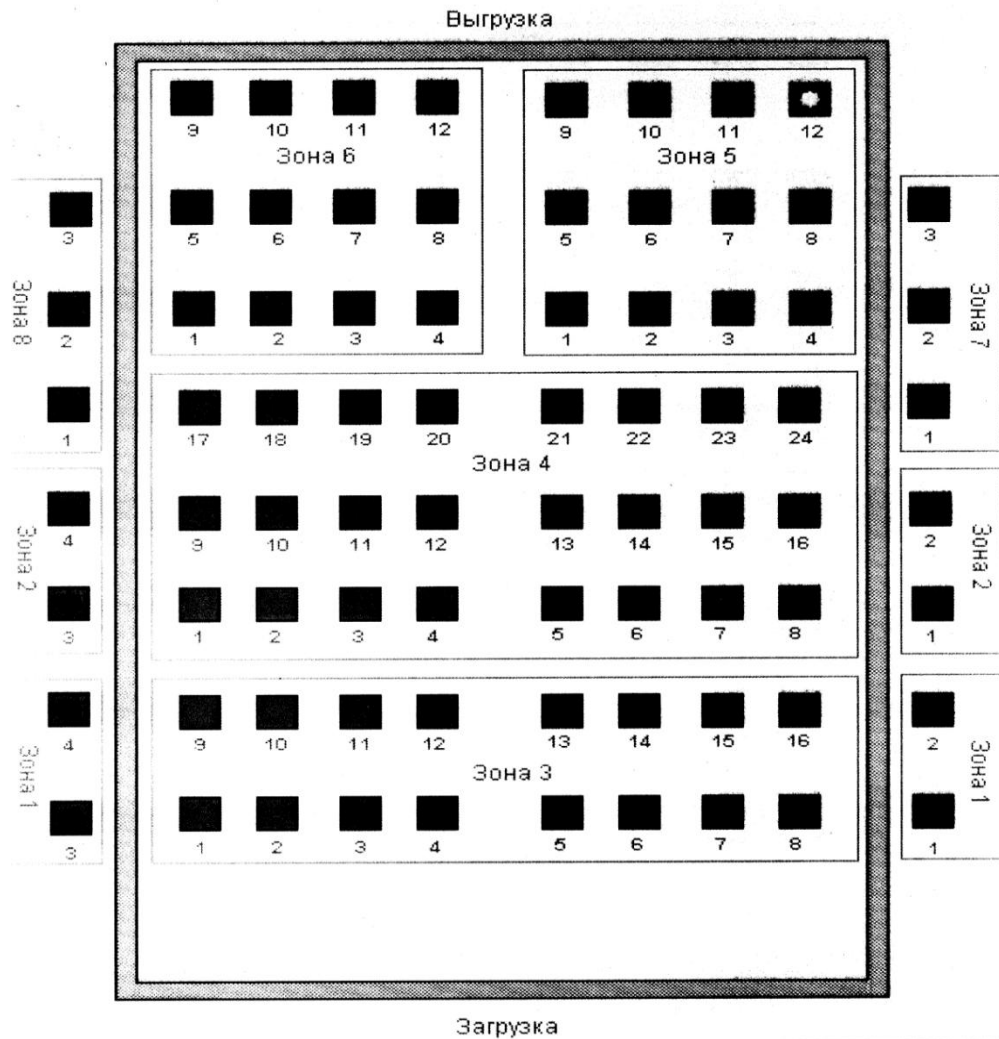


Рисунок 3.6 – Схема расположения горелок и зон регулирования температур

Печь имеет следующие отапливаемые зоны:

1-я и 2-я зоны – нижняя подогревательная и нагревательная, соответственно;

3-я и 4-я зоны – верхняя подогревательная и нагревательная, соответственно;

5-я и 6-я зоны – верхняя томильная левая и правая, соответственно;

7-я и 8-я зоны – нижняя томильная левая и правая, соответственно.

В верхних зонах 3, 4, 5, 6 установлены сводовые струйные горелки; в боковых стенах нижних зон 1 и 2, 7 и 8 - прямоточные горелки. Горелки зон 1, 2, 5, 6, 7 и 8 оборудованы горелками для розжига (запальными) с электрическим устройством зажигания, которые работают только на природном газе. Характеристика горелок по зонам нагрева печи приведена в приложении А.

Топливо – природный газ, теплота сгорания которого составляет 8000 ккал/м<sup>3</sup> (33 МДж/м<sup>3</sup>).

Подача воздуха для горения осуществляется через рекуператор воздухоудувкой. Температура подогрева воздуха составляет 450 °С.

Сжигание топлива производится при избытке воздуха 1,0...1,15 и давлении 12...25 Па на уровне пода печи в районе окна выдачи для исключения подсосов холодного воздуха. Также должно осуществляться небольшое выбивание печных газов из окна выдачи.

При необходимости изменения температуры в зонах нагрева печи, осуществляются регулирования подачи воздуха для горения при одновременном регулировании соотношения «воздух – газ» для каждой зоны дроссельными клапанами в соответствующих трубопроводах подачи природного газа и воздуха.

Заготовки, выдаваемые из печи на стан, должны быть равномерно прогреты по сечению до температур 1100-1180 °С для заготовки 150x150 мм.

Неравномерный нагрев заготовок, а также их перегрев, пережог и оплавление не допускаются.

Обеспечение равномерного распределения температуры по длине прокатываемого на стане раската достигается при необходимости за счет перекоса нагрева заготовок в томительных зонах по длине печи. При этом максимальный перепад температур между передним и задним концами заготовки составляет 20-50 °С.

При расчетах принимался следующий температурный профиль печи: температура в подогревательных зонах составляла 1015 °С, в нагревательных – 1210 °С и 1250 °С, соответственно, и 1200 °С и 1230 °С – в томительных.

Расчет выполнялся для заготовок размером 150x150 мм, производительность печи длиной 13 м – 127 т/ч.

В результате получена температура металла поверхности на выходе из печи 1145 °С, что входит в требуемый диапазон.

Также было получено значение требуемой температуры с помощью прямых измерений – 1140 °С. Измерения проводились для десяти последовательно выдаваемых заготовок инфракрасным пирометром testo 835 (с доверительной вероятностью 0,95 температура поверхности металла составила  $1140 \pm 9^\circ\text{C}$ ).

3.3 Анализ результатов численных экспериментов с использованием косвенного определения температуры металла на основании анализа энергосиловых параметров черновой клетки прокатного стана

Апробация методики проведена для следующих исходных данных.

Нагрев заготовок осуществляется в пятизонной методической комбинированной нагревательной печи с шагающими водоохлождающими балками.

Прокатка заготовок производится на стане 390.

Рабочая клеть №1 среднесортного стана 390 – дуо, бесстанинная, ненапряженная, жесткой конструкции, с валковыми опорами на подшипниках качения, горизонтальная (с горизонтальным расположением валков).

Привод клетки – индивидуальный, горизонтально установленный регулируемый двигатель постоянного тока мощностью 400 кВт.

Рабочая клеть – 600.

Прокатные валки – чугунные цельной конструкции, с одним рабочим калибром; валковая арматура устанавливается непосредственно на раме клетки.

Металл для прокатки – Ст5.

Общие характеристики клетки представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Общие характеристики клетки №1

Редуктор- шестеренная клеть	Общее передаточное отношение привода		71,00
	Коэффициент полезного действия		0,78
	Максимальный момент (момент прокатки)	кН·м	274
	Межосевое расстояние	мм	580
	Максимальное число оборотов привода	об/мин	653
Главный двигатель	Тип	постоянного тока с независимым возбуждением	
	Мощность	кВт	400
	Номинальное число оборотов	об/мин	50
	Максимальное число оборотов	об/мин	1000

Значения тока главного двигателя сняты с помощью амперметра (с доверительной вероятностью 0,95 и классом точности амперметра 1,5).

График изменения значения тока двигателя представлен на рисунке 3.7.

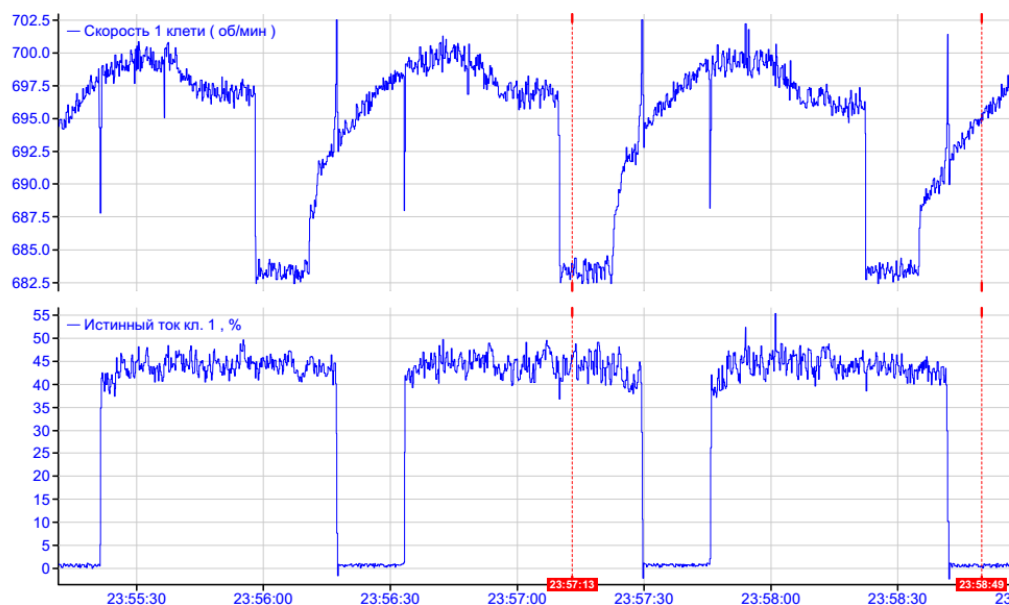


Рисунок 3.7 – График изменения значения тока двигателя при прокатке

Исходя из графика изменения значения тока, при прокатке используется 40% мощности –  $N = 400 \times 0,4 = 160$  кВт.

В качестве исходных данных по калибровке первой клетки: заготовка размером 151,9x151,9 мм; обжатие – 47,9 мм; уширение – 17,1 мм. Исходный размер, прокатываемого профиля  $h_0 = 151,9$  мм. Радиус вала  $R = 300$  мм. Ток при прокатке составляет  $I_{пр} = 45 \% I_H$ ; частота вращения двигателя при прокатке  $n_{пр} = 699$  об/мин; передаточное отношение редуктора 1-й клетки  $u = 71$ .

Результаты расчетов представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты расчетов

Параметр	Значение
Крутящий момент $M_{кр}$ , Н·м	124800
Длина контакта металла с валком $l$ , мм	119,87
Усилие прокатки $P$ , Н	1041128
Среднее давление $p_{ср}$ , МПа	54,1
Относительное обжатие металла $\varepsilon$	0,315
Параметр прокатки $\delta$	2,26
Коэффициент пластичности $k$ , МПа	22,6
Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	39,3

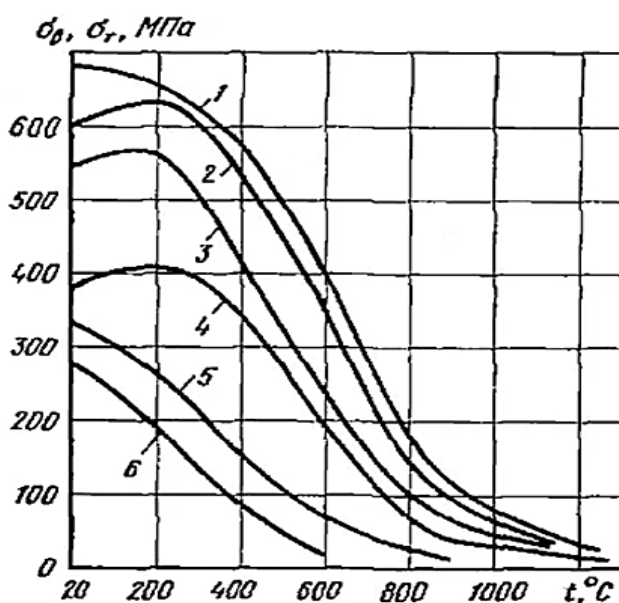
Исходя из значения предела текучести определяется значение температуры нагрева металла по графику, представленному на рисунке 3.8.

Для заготовки марки Ст5 среднемассовая температура нагрева составляет 1100°C.

Полученный результат косвенной идентификации значения среднемассовой температуры металла сопоставлен с расчетным значением, полученным при помощи верифицированной расчетной методики, рассмотренной в подразделе 2.2, для скоростного и температурного режимов



печи, соответствующих моменту эксплуатации производственной линии, для которой были сняты значения тока главного двигателя.



1 – X12Н9Т; 2 – сталь 50; 3 – Ст5; 4 – Ст3; 5 – латунь; 6 – дюралюминий

Рисунок 3.8 – Зависимость предела прочности (текучести) различных металлов и сплавов от температуры [113]

Согласно методики расчет нагрева металла выполнялся для заготовок размером 151,9x151,9 мм в методической комбинированной нагревательной печи с шагающими водоохлаждающими балками стана 390 Макеевского металлургического завода, производительностью 127 т/ч.

При расчетах принимался следующий температурный профиль печи: температура в подогревательных зонах составляла 1015 °С, в нагревательных – 1210 °С и 1250 °С, соответственно, и 1200 °С и 1230 °С – в томительных.

На выдаче из печи получено расчетное значение среднemasсовой температуры металла, которое составило 1105°С

Расхождение между расчетным значением температуры и температуры, полученной по результатам оперативных измерений не превышает 0,5%.

### 3.4 Анализ результатов численных экспериментов по определению температуры уходящих из печи газов

Методика определения температуры уходящих из печи газов изложена в подразделе 2.2.

Уточнение температур уходящих газов и поверхности металла в конце методической зоны проводилось при нагреве заготовок квадратного сечения со стороной 0,15 м, длиной 1,5 м в печи производительностью 30 т/ч, общей длиной 13 м и длиной методической зоны 4,55 м.

Также произведены расчеты для производительностей печи 45 т/ч, 60 т/ч и 75 т/ч.

Результаты итерационного расчета представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Пример итерационного расчета

№ итерации	Температура уходящих газов $t_{yx}$ , °C	Температура поверхности заготовки $t_{n1}$ , °C	Среднемассовая температура $t_1$ , °C
1	600	750	395
2	1175	670	818
3	1059	1130	607
...	...	...	...
18	1104	965	703
19	1101	979	696
20	1102	968	700
21	1101	976	697
...	...	...	...
24	1102	970	700
25	1102	975	698
26	1101	971	698,5
27	1102	973	698,5

В результате обрели сходимость с точностью до 2 °C среднемассовая и температура поверхности металла в конце методической зоны на 26 итерации, а температура уходящих газов – на 19 итерации.

В таблице 3.5 приводятся результаты расчета нагрева заготовок квадратного сечения со стороной 0,15 м, длиной 1,5 м для различной производительности печи длиной 13 м (методическая зона – 4,55 м, сварочная – 5,2 м, томильная – 3,25 м).

Таблица 3.5 – Результаты расчета методической зоны печи при различной производительности

Параметр	Производительность, т/ч			
	30	45	60	75
Температура уходящих газов $t_{yx}$ , °С	1045	1108	1156	1194
Температура газов в сварочной зоне $t_{св}$ , °С	1450	1450	1450	1450
Температура газов в конце томильной зоны $t_k$ , °С	1300	1300	1300	1300
Температура поверхности заготовки в конце методической зоны $t_{n1}$ , °С	1000	891	812	750
Среднемассовая температура в конце методической зоны $t_1$ , °С	748	611	527	468
Среднемассовая температура в конце сварочной зоны $t_2$ , °С	1450	1199	954	820
Среднемассовая температура в конце томильной зоны $t_3$ , °С	1450	1269	995	849
Энтальпия металла в конце нагрева $i_3$ , кДж/кг	1138	823	657	551
Расход топлива $B_T$ , м <sup>3</sup> /с	0,544	0,741	0,945	1,153
Удельный расход тепла $b_{уд}$ , МДж/кг	2,263	2,055	1,965	1,919

Расчет производился при заданном температурном профиле печи. По конструктивным соображениям выбор температуры газов в сварочной зоне производился на 150-250 °С выше заданной температуры поверхности металла, а в томильной – на 50 °С, что составило 1450 °С и 1300 °С, соответственно.

Требование к температуре нагреваемого металла – 1250 °С. Допустимый температурный перепад между поверхностью и центром для указанной заготовки составляет 33,75 °С.

Из приведенных в таблице 3.5 данных следует, что при производительностях 30 и 45 т/ч в печи с вышеуказанными размерами зон при заданных температурах в сварочной и томильной зонах будет наблюдаться перегрев металла.

При производительности 60 и 75 т/ч следует ожидать некоторого недогрева.

В таблице 3.6 приведен пример итерационного расчета с учетом различных коэффициентов релаксации.

Таблица 3.6 – Итерационный расчет для различных коэффициентов релаксации

№ итерации	$k = 0,35$			$k = 0,5$			$k = 0,65$		
	$t_{yx}, ^\circ\text{C}$	$t_{n1}, ^\circ\text{C}$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_{yx}, ^\circ\text{C}$	$t_{n1}, ^\circ\text{C}$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_{yx}, ^\circ\text{C}$	$t_{n1}, ^\circ\text{C}$	$t_1, ^\circ\text{C}$
1	600	750	395	600	750	395	600	750	395
2	801	670	541	887	670	603	974	669	666
3	909	880	589	988	947	628	1039	1007	645
4	1094	887	717	1047	909	678	1088	906	708
5	1091	1014	677	1069	972	676	1088	1001	680
6	1098	937	707	1087	951	695	1102	945	707
7	1097	992	689	1093	976	691	1099	989	691
8	1100	957	702	1097	964	698	1102	960	703
9	1100	981	694	1099	975	696	1101	981	695
10	1101	966	700	1101	970	699	1103	967	701
11	1100	976	696	1100	974	697	1101	977	696
12	1101	969	699	1102	971	699	1102	969	700
13	1102	974	698	1102	974	698	1102	975	698
14	1102	972	698	1101	972	698	1101	971	698
15	1102	972	698	1102	972	698	1102	973	698

Можно сделать вывод, что сходимость исследуемых величин достигается с достаточной степенью точности. Для среднемассовой температуры заготовки

при всех исследуемых коэффициентах – на 13 итерации. Для температуры поверхности металла в конце методической зоны при  $k = 0,35$  и  $k = 0,5$  – на 14 итерации. Температура уходящих газов быстрее всего достигается при  $k = 0,35$  и  $k = 0,65$  на 9 итерации.

Таким образом, получена возможность уточнения температурного состояния металла, а также температуры уходящих из печи газов непосредственно на стадии расчета нагрева металла в методической зоне, что позволяет использовать данный метод для АСУ ТП.

### 3.5 Экспериментальное исследование температурного профиля печи при переменной производительности

Методика определения температурного профиля печи, работающей в условиях изменяющейся производительности, представлена в подразделе 2.6 [13, с.29–33].

Расчеты нагрева заготовок из низкоуглеродистой стали сечением 150x150 мм и длиной 1,5 м выполнялись для трехзонной методической печи общей длиной  $L=13$  м при производительности  $P=60$  т/ч. Металл греется до 1250 °С. Температура отапливаемых зон принимается по технологическим соображениям: в сварочной зоне – 1450 °С, а в конце томильной зоны – 1300 °С.

Параметры номинального режима получены по прямому методу расчета, описанному выше.

В качестве модифицированных рассматривались режимы с производительностью «0,5P», «0,75P», «0,9P». Для каждой производительности с помощью обратного метода определялись значения величин плотности теплового потока по зонам, температуры газов в сварочной зоне и на выходе из печи.

Полученные значения температурного профиля печи подставлялись в поверочный расчет в качестве исходных данных.

Путем корректировки величины температуры газов в сварочной зоне печи проводилось уточнение режимных параметров. При этом должно обеспечиваться постоянство температуры металла на выходе из печи для любого рассматриваемого случая. Процедура уточнения осуществлялась методом последовательных приближений по прямому методу расчета. Результаты расчетов приведены в таблице 3.7.

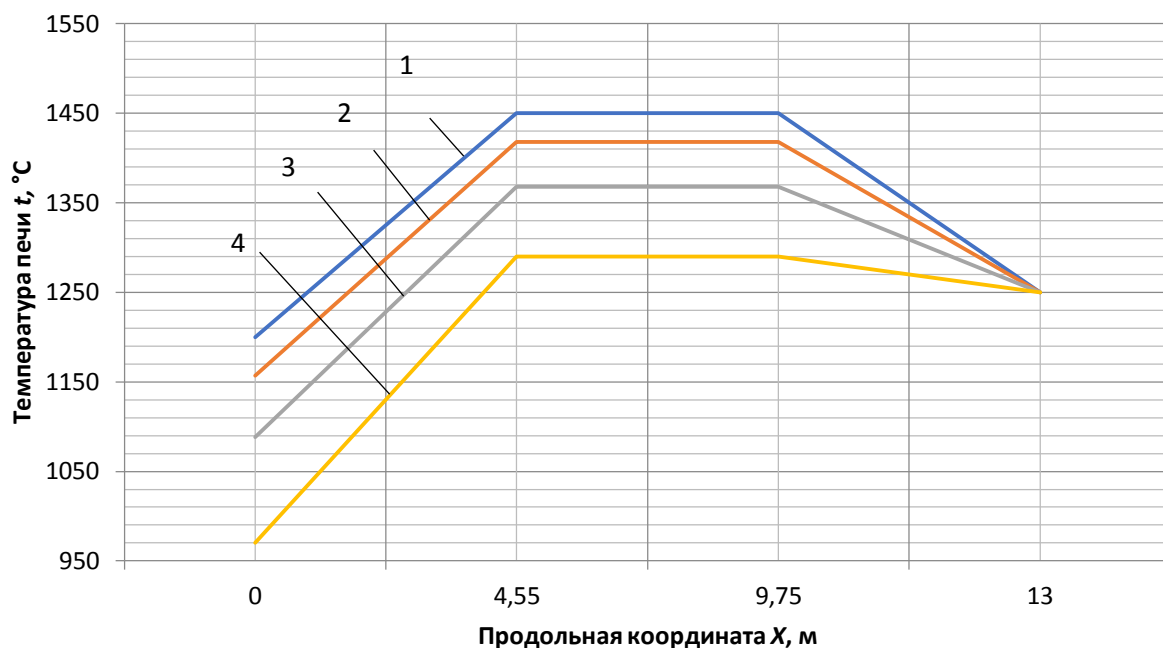
Из приведенных в таблице 3.7 результатов следует, что расхождения значений температуры уходящих газов, определенных в результате поверочного расчета и по обратному методу, а также энтальпии металла на выходе из печи, полученной в поверочном расчете и для номинального режима возрастают при понижении производительности печи.

Таблица 3.7 – Результаты расчетов режимных параметров трехзонной методической печи при различной производительности

Параметр		Режим									
		$P$	$0,9P$				$0,75P$			$0,5P$	
		номинальный режим	по обратному методу	поверочный расчет	уточненный режим	по обратному методу	поверочный расчет	уточненный режим	по обратному методу	поверочный расчет	уточненный режим
Плотность теплового потока, кВт/м <sup>2</sup> потокаго потока,	конец сварочной зоны $q_2$	122,6	105,0	105,0	100,8	79,7	79,7	68,3	41,9	42,1	41,9
	конец методической зоны $q_1$	272,4	254,7	257,7	254,4	227,0	233,7	227,6	177,2	193,6	182,7
	начало методической зоны $q_0$	146,8	127,2	134,3	132,4	99,1	115,7	111,7	56,4	86,9	80,4
Температура газов в сварочной зоне $t_{св}$ , °C		1450	1424	1424	1418	1386	1386	1368	1325	1325	1290
Температура уходящих газов $t_{ух}$ , °C		1200	1140	1161	1157	1044	1103	1088	856	996	970
Расход топлива $B_{тз}$ , кг/с		0,985		0,876	0,87		0,724	0,71		0,496	0,477
Энтальпия металла, кДж/кг	начало методической зоны $i_n$	13,5		13,5	13,5		13,5	13,5		13,5	13,5
	начало сварочной зоны $i_1$	271,5		280	276,6		296	287,7		348	326,2
	конец сварочной зоны $i_2$	475,2		485	476,6		503,5	479,3		564	490,6
	конец томильной зоны $i_k$	527,7		537,5	527,7		556	526,7		616	527,9

Для режима «0,9P» указанные расхождения не превышают 2 %, а для режима «0,5P» — около 14 %. Расхождение значений температуры газов в сварочной зоне, определенной по обратному методу и при уточняющем расчете, для режима «0,9P» составляет 0,4 %, а для режима «0,5P» — 2,7 %.

На рисунке 3.9 представлена зависимость температуры газов по длине печи для различной производительности.



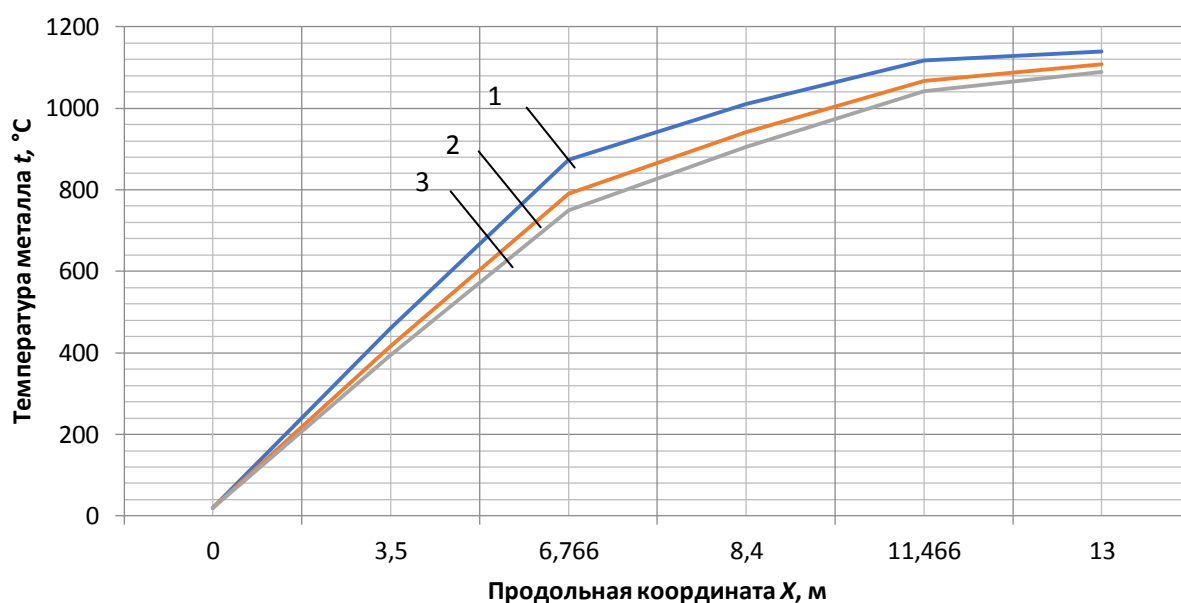
1 – номинальный режим; 2 – режим при производительности «0,9P»; 3 – режим при производительности «0,75P»; 4 – режим при производительности «0,5P»

Рисунок 3.9 – Температура по длине печи при различной производительности

При выполнении уточняющего расчета равенство энтальпии металла на выходе из печи в уточненном и номинальном режимах достигается без одновременного уравнивания энтальпий металла по зонам. С понижением производительности печи наблюдается рост вклада методической и сварочной зон и понижение вклада томильной зоны. Режим «0,5P» для рассматриваемого случая близок к предельному, поскольку температура сварочной зоны в уточненном режиме практически равна температуре в конце томильной зоны.

Таким образом, разработанная методика определения температурного профиля печи для условий пониженной производительности обеспечивает заданное теплосодержание металла в конце нагрева. Данный метод является обратным и базируется на определении температурного профиля печи из условия сохранения энтальпии металла на уровне номинального режима. Использование результатов, полученных при помощи обратного метода, как исходных данных для прямого расчета позволило установить, что для режимов, близких к номинальному, энтальпии металла по длине печи практически совпадают, а для производительности, значительно ниже номинальной, расчеты по обратному методу можно расценивать как первое приближение, требующее последующего уточнения. Применимость обратного метода ограничена по производительности печи, при которой температура газов в сварочной зоне равна температуре в тоильной зоне.

Исходя из вышеописанных методик предлагается ввести понятие квазистационарного температурного состояния металла, суть которого состоит в постоянстве среднemasсовой температуры заготовки в привязке к продольной координате печи  $T_{см}(x) = const$  (рисунок 3.10).



1 — температура поверхности металла; 2 — среднemasсовая температура металла; 3 — температура центра металла

Рисунок 3.10 — Квазистационарное температурное поле металла



### 3.6 Исследование нагрева металла в печи с шагающими балками

3.6.1 Анализ результатов определения температурного профиля проходной печи с механизированным подом при изменении шага укладки заготовок

Методика расчета представлена в подразделе 2.7.

Вычислительный эксперимент при нагреве квадратной заготовки со сторонами 0,15 м и длиной 6 м проводился для трехзонной методической печи общей длиной  $L = 13$  м (методическая зона – 4,55 м, сварочная – 5,2 м, томильная – 3,25 м).

В качестве базового принят режим при производительности печи  $P = 120$  т/ч с нулевым шагом укладки заготовок.

Модифицированные режимы выполнялись при постоянной производительности печи, равной  $P = 120$  т/ч и следующих шагов укладки заготовок: 30 мм, 80 мм и 160 мм.

Также выполнен расчет нагрева металла в печи производительностью  $P = 83$  т/ч с шагом укладки заготовок 160 мм.

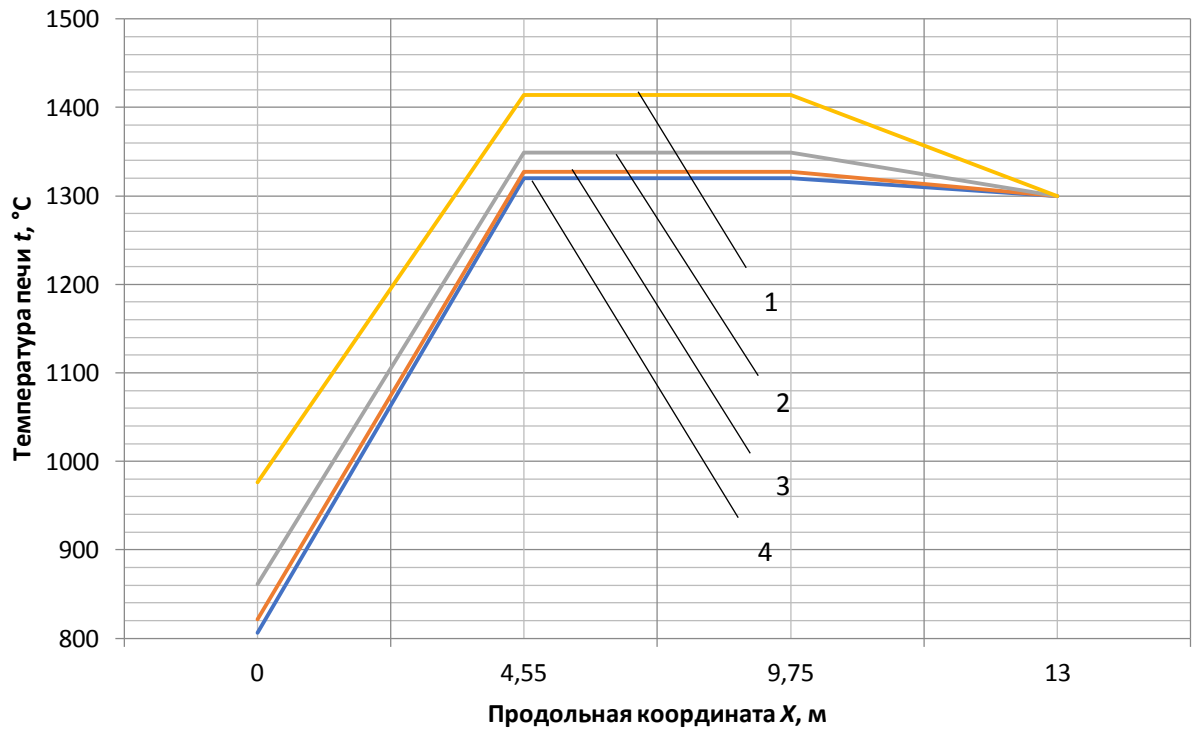
Результаты расчетов приведены в таблице 3.8 и на рисунке 3.11.

Таблица 3.8 – Результаты расчетов режимных параметров трехзонной методической печи при переменном шаге раскладки заготовок

Параметр	Номинальный режим	Модифицированный режим			
	$P=120$ т/ч				$P=83$ т/ч
	$a=0$ мм	$a=30$ мм	$a=80$ мм	$a=160$ мм	$a=160$ мм
1	2	3	4	5	6
Общее время нагрева $\tau$ , ч	1,59	1,325	1,037	0,769	0,769
Время нагрева в методической зоне $\tau_1$ , ч	0,556	0,464	0,363	0,269	0,269
Время нагрева в сварочной зоне $\tau_2$ , ч	0,636	0,53	0,415	0,308	0,308

Продолжение таблицы 3.8

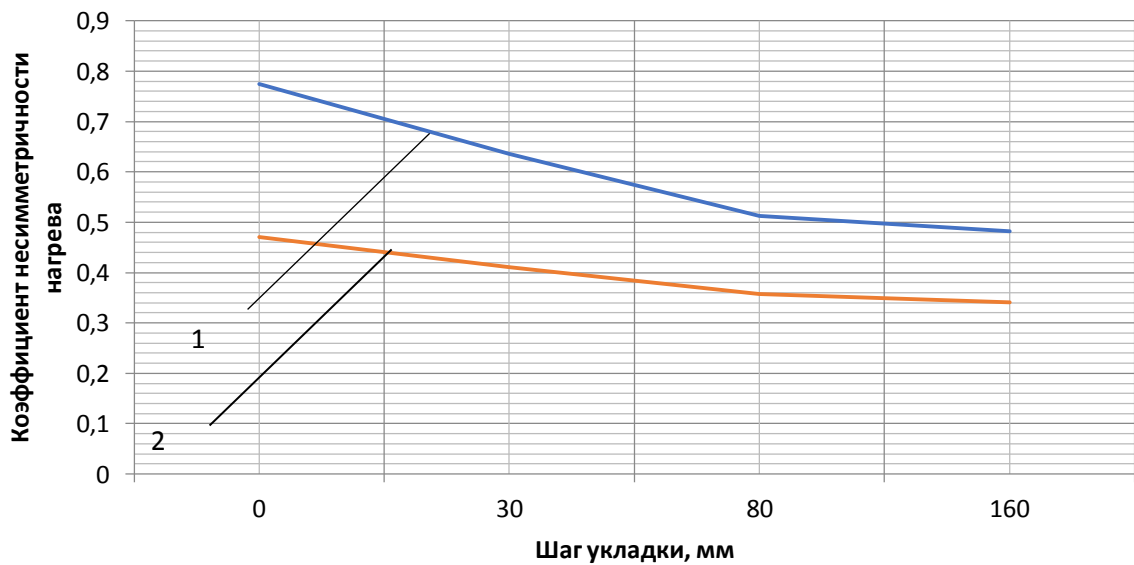
1	2	3	4	5	6
Время нагрева в томильной зоне $\tau_3$ , ч	0,397	0,331	0,259	0,192	0,192
Коэффициент несимметричности при одностороннем нагреве $\mu_k$	0,774	0,636	0,512	0,482	0,482
Коэффициент несимметричности при двустороннем нагреве $\mu_1$	0,471	0,411	0,357	0,341	0,341
Температура газов в сварочной зоне $t_{св}$ , °С	1320	1327	1349	1414	1320
Температура уходящих газов $t_{yx}$ , °С	806	821	861	976	834
Температура поверхности металла в конце методической зоны $t_{пов}$ , °С	731	711	697	711	699
Среднемассовая температура заготовки в конце методической зоны $t_{ср.мас}$ , °С	575	574	572	571	588
Плотность теплового потока в конце сварочной зоны $q_2$ , Вт/м <sup>2</sup>	35870	39640	51420	89230	35870
Плотность теплового потока в конце методической зоны $q_1$ , Вт/м <sup>2</sup>	183200	190100	202600	235400	188400
Плотность теплового потока в начале методической зоны $q_0$ , Вт/м <sup>2</sup>	44040	46400	52930	74870	48400
Энтальпия металла в начале методической зоны $i_n$ , кДж/кг	13,53	13,53	13,53	13,53	13,53
Энтальпия металла в конце методической зоны $i_1$ , кДж/кг	338	337	336	334	347
Энтальпия металла в конце сварочной зоны $i_2$ , кДж/кг	789	789	787	783	795
Энтальпия металла в конце печи $i_k$ , кДж/кг	820	820	820	819	824
Расход топлива $B$ , м <sup>3</sup> /ч	1,245	1,258	1,295	1,418	0,932
Удельный расход топлива $b_{уд}$ , МДж/кг	1,295	1,309	1,347	1,475	1,402
Условный расход топлива $b_{усл}$ , кг у.т/т	44,194	44,664	45,986	50,339	47,845



1 – 160 мм; 2 – 80 мм; 3 – 30 мм; 4 – 0 мм

Рисунок 3.11 – Температурный профиль печи при переменном шаге укладки заготовок

На рисунке 3.12 представлена зависимость коэффициента несимметричности от шага укладки.



1 – при одностороннем нагреве; 2 – при двустороннем нагреве

Рисунок 3.12 – Зависимость несимметричности нагрева от шага укладки

Из приведенных данных видно, что заданная величина энтальпии металла после печи (820 кДж/кг), обеспечивается с высокой точностью (менее 1 %) для всех рассматриваемых случаев.

При увеличении шага укладки заготовок от 0 до 160 мм при постоянной производительности печи, равной  $P = 120$  т/ч наблюдается рост температуры газа в сварочной зоне от 1320 °С до 1414 °С.

Также наблюдается понижение производительности печи с 120 т/ч до 83 т/ч с ростом шага укладки от 0 до 160 мм при температуре в сварочной зоне 1320 °С.

Таким образом, рассмотренная методика для определения температурного профиля проходной печи с механизированным подом, работающей в условиях переменной производительности, позволяет определить рациональные параметры нагрева для переменного шага укладки заготовок. В результате чего обеспечивается заданное теплосодержание металла после печи.

Изменение в реальных пределах (от 0 до 160 мм) шага раскладки приводит к значительным изменениям требуемой температуры в сварочной зоне (до 100 °С) и производительности печи (до 31%).

В результате комбинирования рационального температурного профиля печи и шага укладки заготовок можно достичь значительного расширения диапазона регулирования.

3.6.2 Анализ результатов определения оптимального с точки зрения удельного расхода топлива шага укладки заготовок в печи с механизированным подом, работающей в условиях переменной производительности

Методика определения оптимального шага укладки заготовок в печи с механизированным подом, работающей в условиях переменной производительности, представлена в подразделе 2.7.

Применение разработанной методики проиллюстрировано для трехзонной методической печи с шагающими балками общей длиной 13 м. Расчеты нагрева

квадратной заготовки общей длиной 6 м и шириной 0,15 м проводились для двух производительностей печи: 110 и 80 т/ч. В качестве опорных были приняты следующие режимы нагрева: при производительности  $P = 110$  т/ч с температурой газов в сварочной зоне  $1400^\circ\text{C}$  и шагом укладки заготовок  $a=100$  мм, а при производительности  $P = 80$  т/ч –  $1400^\circ\text{C}$  и  $a=250$  мм, соответственно.

При производительности печи  $P=110$  т/ч расчеты проводились с интервалом 5 мм для шагов укладки заготовок, начиная от  $a=100$  мм и до  $a=0$  мм. При производительности  $P=80$  т/ч интервал составлял 10 мм для шагов укладки заготовок, начиная от  $a=250$  мм и до  $a=0$  мм.

Далее для рассматриваемых случаев был идентифицирован одинаковый диапазон, локализирующий оптимум (от  $a=40$  мм до  $a=35$  мм) для обеих производительностей, который был «просканирован» с шагом 1 мм.

В таблице 3.9 представлены основные результаты расчетов.

Таблица 3.9 – Результаты расчетов режимных параметров трехзонной методической печи с механизированным подом с различным шагом укладки заготовок

Параметр	Ном. режим	50 мм	40 мм	39 мм	38 мм	37 мм	36 мм	35 мм	30 мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Продолжительность нагрева заготовки при $P=110$ т/ч $\tau$ , ч	1,04	1,301	1,369	1,376	1,384	1,391	1,398	1,406	1,445
Продолжительность нагрева заготовки при $P=80$ т/ч $\tau$ , ч	0,894	1,788	1,882	1,892	1,902	1,913	1,923	1,933	1,987
Коэффициент несимметричности при одностороннем нагреве при $P=110$ т/ч $\mu_k$	0,507	0,58	0,604	0,606	0,609	0,615	0,626	0,636	0,688
Коэффициент несимметричности при одностороннем нагреве при $P=80$ т/ч $\mu_k$	0,413	0,58	0,604	0,606	0,609	0,615	0,626	0,636	0,688

Продолжение таблицы 3.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Коэффициент несимметричности при двустороннем нагреве при $P=110$ т/ч $\mu_1$	0,353	0,387	0,397	0,398	0,399	0,402	0,406	0,41	0,43
Коэффициент несимметричности при двустороннем нагреве при $P=80$ т/ч $\mu_1$	0,313	0,387	0,397	0,398	0,399	0,402	0,406	0,41	0,43
Температура газов в сварочной зоне при $P=110$ т/ч $t_{св}$ , °C	1400	1373	1369	1368	1368	1368	1369	1370	1375
Температура газов в сварочной зоне при $P=80$ т/ч $t_{св}$ , °C	1400	1317	1314	1314	1313	1313	1314	1315	1318
Температура уходящих газов при $P=110$ т/ч $t_{yx}$ , °C	792	738	728	727	726	727	729	731	741
Температура уходящих газов при $P=80$ т/ч $t_{yx}$ , °C	826	634	626	625	624	625	626	628	637
Температура поверхности металла на выходе из методической зоны при $P=110$ т/ч $t_{пов}$ , °C	803	806	810	810	810	811	813	815	825
Температура поверхности металла на выходе из методической зоны при $P=80$ т/ч $t_{пов}$ , °C	802	805	807	807	809	810	810	811	820
Среднемассовая температура заготовки на выходе из методической зоны при $P=110$ т/ч $t_{ср.мас}$ , °C	658	658	659	659	659	659	659	659	659

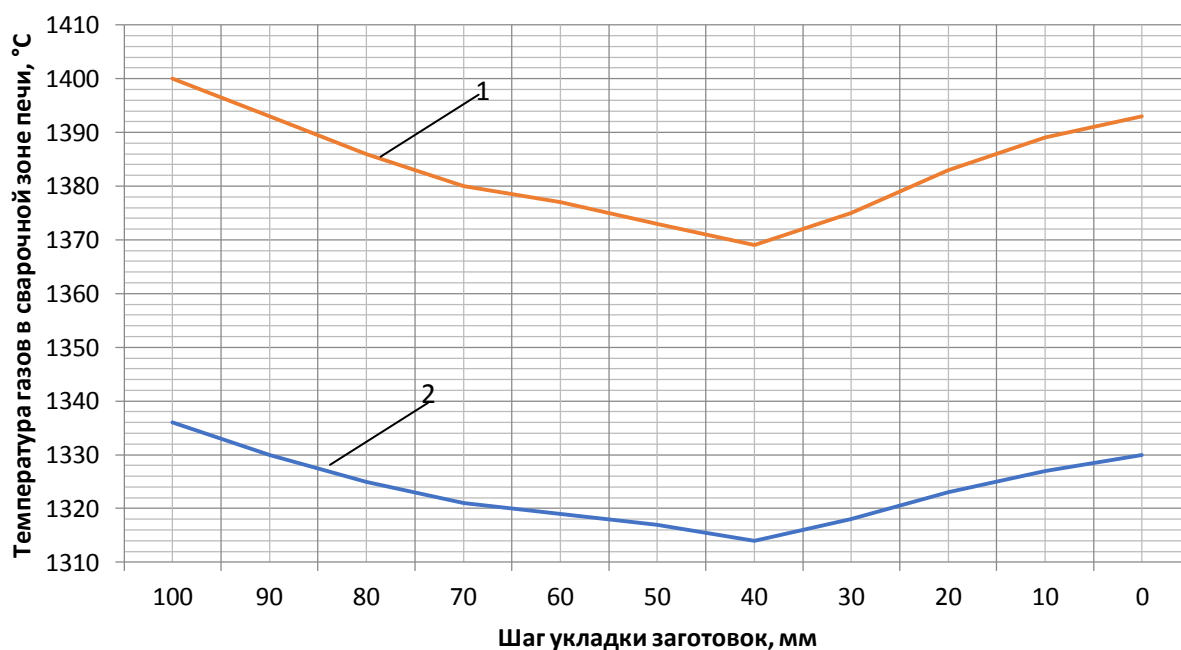
Продолжение таблицы 3.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Среднемассовая температура заготовки на выходе из методической зоны при $P=80$ т/ч $t_{\text{ср.мас}}$ , °С	673	678	678	678	679	679	678	678	678
Энтальпия металла после методической зоны при $P=110$ т/ч $i_1$ , кДж/кг	402	402	402	402	402	402	402	402	402
Энтальпия металла после методической зоны при $P=80$ т/ч $i_1$ , кДж/кг	413	417	417	417	418	418	417	417	417
Энтальпия металла на выходе из сварочной зоны при $P=110$ т/ч $i_2$ , кДж/кг	767	768	768	768	768	768	768	768	768
Энтальпия металла на выходе из сварочной зоны при $P=80$ т/ч $i_2$ , кДж/кг	768	772	773	773	773	773	773	773	772
Энтальпия металла в конце нагрева при $P=110$ т/ч $i_k$ , кДж/кг	812	812	812	812	812	812	812	812	812
Энтальпия металла в конце нагрева при $P=80$ т/ч $i_k$ , кДж/кг	812	812	812	812	812	812	812	812	812
Расход топлива при $P=110$ т/ч $B$ , м <sup>3</sup> /с	1,155	1,112	1,105	1,104	1,104	1,104	1,106	1,107	1,115
Расход топлива при $P=80$ т/ч $B$ , м <sup>3</sup> /с	0,911	0,792	0,788	0,788	0,787	0,788	0,788	0,789	0,794
Удельный расход тепла при $P=110$ т/ч $b_{\text{уд}}$ , МДж/кг	1,311	1,262	1,254	1,253	1,253	1,253	1,255	1,257	1,266

Продолжение таблицы 3.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Удельный расход тепла при $P=80$ т/ч $b_{уд}$ , МДж/кг	1,422	1,236	1,23	1,229	1,229	1,229	1,23	1,232	1,24
Условный расход топлива при $P=110$ т/ч $b_{усл}$ , кг у.т/т	44,752	43,071	42,805	42,775	42,751	42,769	42,829	42,891	43,194
Условный расход топлива при $P=80$ т/ч $b_{усл}$ , кг у.т/т	48,541	42,199	41,973	41,947	41,928	41,947	41,994	42,047	42,312

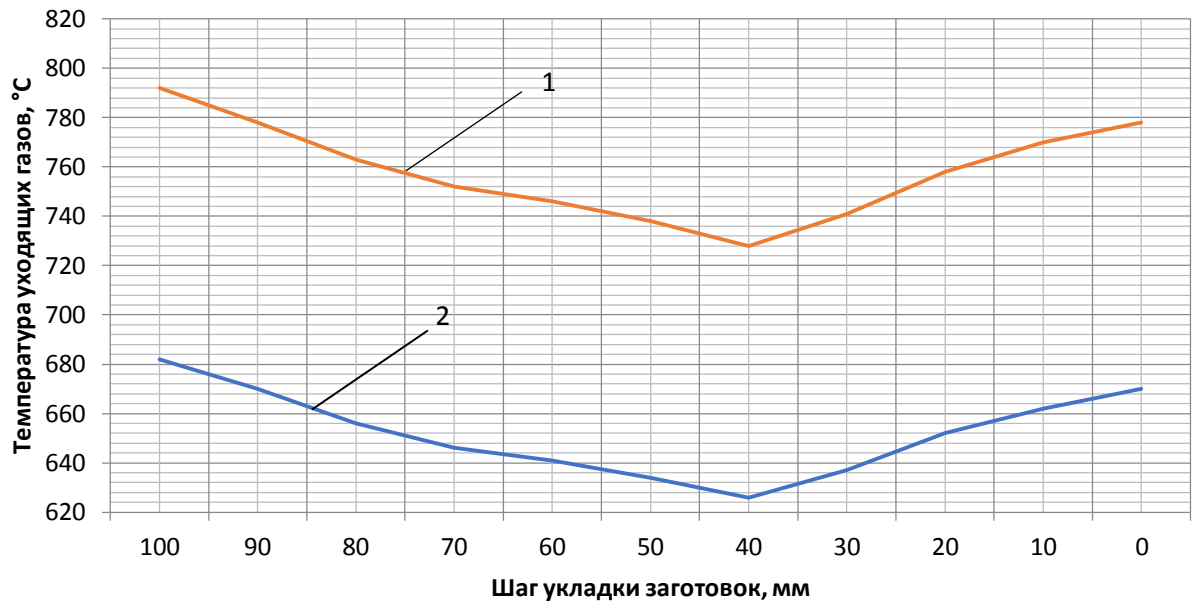
На рисунках 3.13, 3.14 представлены зависимости температуры газов в сварочной зоне и температуры уходящих из печи газов от шага укладки заготовок, соответственно.



1 – 110 т/ч; 2 – 80 т/ч

Рисунок 3.13 – Зависимость температуры газов в сварочной зоне от шага укладки заготовок для различной производительности печи

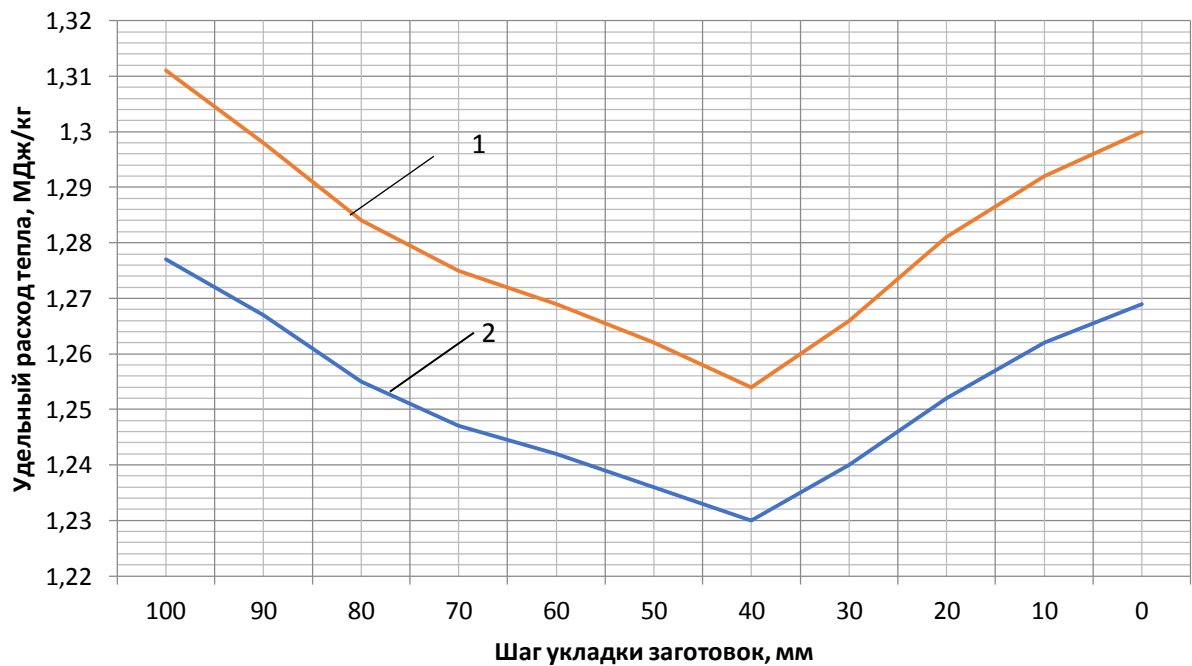




1 – 110 т/ч; 2 – 80 т/ч

Рисунок 3.14 – Зависимость температуры уходящих газов от шага укладки заготовок для различной производительности печи

На рисунке 3.15 представлена зависимость удельного расхода тепла от шага укладки заготовок при производительности печи 110 т/ч и 80 т/ч, соответственно.



1 – 110 т/ч; 2 – 80 т/ч

Рисунок 3.15 – Зависимость удельного расхода тепла от шага укладки заготовок для различной производительности печи

Таким образом, для производительностей печи  $P=110$  т/ч и  $P=80$  т/ч определен оптимальный шаг укладки заготовок, который составляет  $a=38$  мм. При этом температуры газов в отопляемых зонах печи равны: при производительности  $P=110$  т/ч температура в сварочной зоне составляет  $1368$  °С, температура уходящих из печи газов –  $726$  °С; а для производительности  $P=80$  т/ч  $1313$  °С и  $624$  °С, соответственно. Данный результат соответствует исключительно всему набору принятых исходных данных, а главное использованной эмпирической аппроксимации зависимости коэффициента несимметричности нагрева от шага укладки заготовок [110, с. 61].

Выявлено, что при переходе на оптимальный шаг укладки заготовок по сравнению с опорным режимом возможно достижение экономии расхода теплоты (и соответственно топлива) 5% при производительности  $P=110$  т/ч и 15% – при производительности  $P=80$  т/ч.

### 3.6.3 Анализ результатов определения рационального шага укладки заготовок в условиях переменной производительности и зафиксированного температурного профиля печи

Определение рациональных режимных параметров проходной печи с механизированным подом, работающей в условиях переменной производительности, производилось в соответствии с методикой, представленной в подразделе 2.7.

При этом нагрев квадратной заготовки общей длиной 6 м и шириной 0,15 м осуществляется в трехзонной методической печи общей длиной 13 м.

В качестве номинального принят режим нагрева при производительности  $P=120$  т/ч и шаге укладки заготовок  $a=91$  мм. Температуры в отопляемых зонах печи составляют  $1400$  °С в сварочной зоне и  $1300$  °С – в томильной.

Вычислительный эксперимент проводился для производительностей печи 90 т/ч, 95 т/ч, 100 т/ч, 105 т/ч, 110 т/ч, 115 т/ч, 125 т/ч, 130 т/ч и 135 т/ч.

В таблице 3.10 приведены основные результаты расчетов.

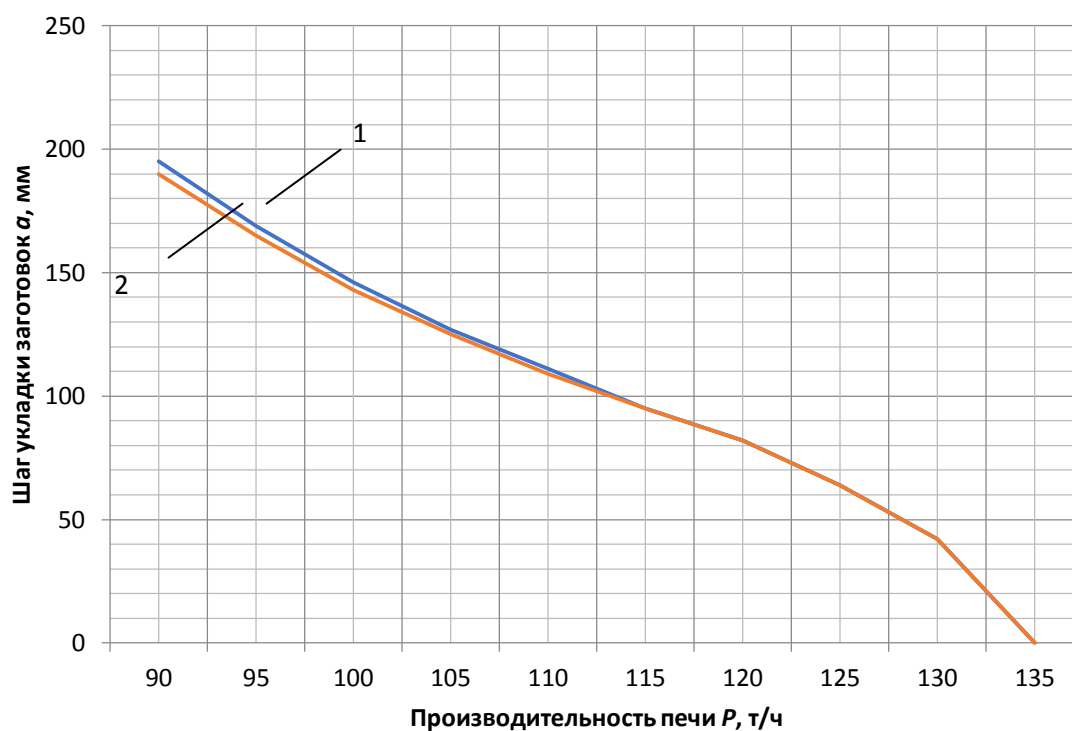
Таблица 3.10 – Результаты расчетов рациональных режимных параметров трехзонной методической печи, работающей в условиях изменяющейся производительности

Параметр	90 т/ч	95 т/ч	100 т/ч	105 т/ч	110 т/ч	115 т/ч	120 т/ч	125 т/ч	130 т/ч	135 т/ч
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Шаг укладки заготовок $a$ , мм	190	165	143	125	109	95	82	64	42	0
Уточненный шаг укладки заготовок $a$ , мм	195	169	146	127	111	95	82	64	42	0
Продолжительность нагрева заготовки $t$ , ч	0,934	0,957	0,976	0,991	1,005	1,016	1,028	1,071	1,148	1,413
Уточненная продолжительность нагрева заготовки $t$ , ч	0,922	0,946	0,967	0,984	1	1,016	1,028	1,071	1,148	1,413
Коэффициент несимметричности при одностороннем нагреве $\mu_k$	0,453	0,47	0,484	0,493	0,502	0,509	0,518	0,546	0,599	1
Уточненный коэффициент несимметричности при одностороннем нагреве $\mu_k$	0,45	0,468	0,482	0,492	0,501	0,509	0,518	0,546	0,599	1
Коэффициент несимметричности при двустороннем нагреве $\mu_1$	0,329	0,336	0,342	0,347	0,351	0,355	0,358	0,372	0,395	0,55
Уточненный коэффициент несимметричности при двустороннем нагреве $\mu_1$	0,328	0,335	0,341	0,346	0,351	0,355	0,358	0,372	0,395	0,55
Энтальпия металла после методической зоны $i_1$ , кДж/кг	401	399	397	396	394	392	391	390	388	369
Уточненная энтальпия металла после методической зоны $i_1$ , кДж/кг	399	398	396	395	393	392	391	390	388	369
Энтальпия металла на выходе из сварочной зоны $i_2$ , кДж/кг	775	774	773	772	771	770	769	769	769	700
Уточненная энтальпия металла на выходе из сварочной зоны $i_2$ , кДж/кг	770	770	770	770	769	770	769	769	769	700
Энтальпия металла в конце нагрева $i_k$ , кДж/кг	818	817	816	816	815	813	813	813	813	738

Продолжение таблицы 3.10

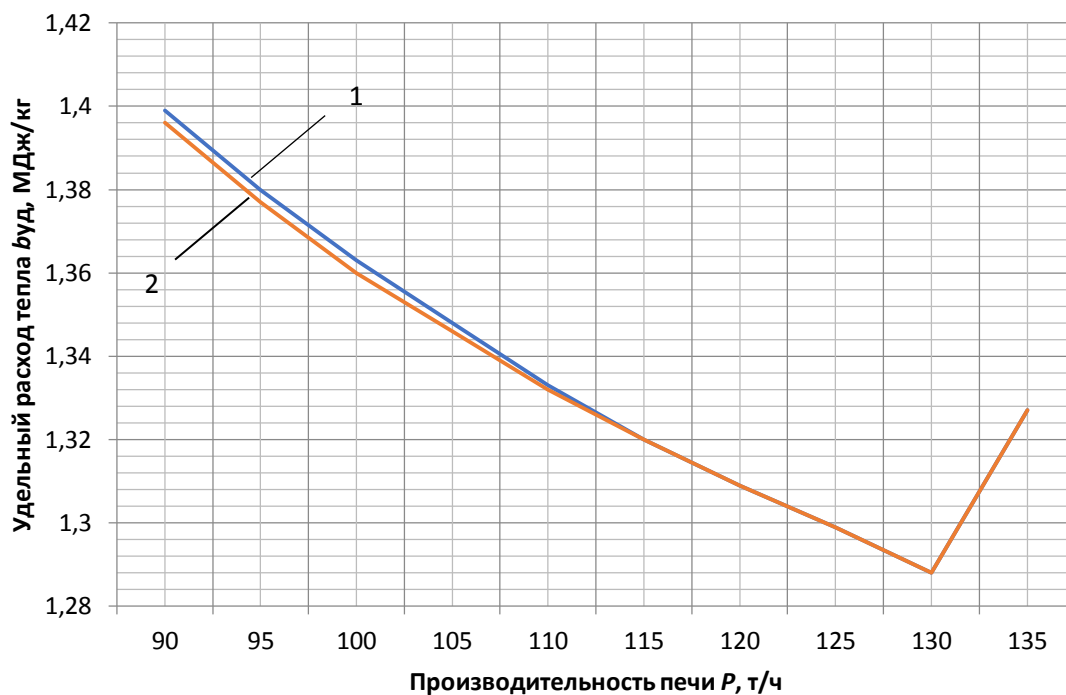
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Уточненная энтальпия металла в конце нагрева $i_k$ , кДж/кг	813	813	813	813	813	813	813	813	813	738
Удельный расход тепла $b_{уд}$ , МДж/кг	1,396	1,377	1,36	1,346	1,332	1,32	1,309	1,3	1,341	1,435
Уточненный удельный расход тепла $b_{уд}$ , МДж/кг	1,399	1,38	1,363	1,348	1,333	1,32	1,309	1,3	1,341	1,435

На рисунках 3.16 и 3.17, соответственно, представлены зависимости шага укладки заготовок и удельного расхода тепла от производительности.



1 – шаг укладки заготовок согласно предложенной методики; 2 – уточненный шаг укладки заготовок

Рисунок 3.16 – Зависимость шага укладки заготовок от производительности



1 – удельный расход тепла согласно предложенной методики; 2 – уточненный удельный расход тепла

Рисунок 3.17 – Зависимость удельного расхода тепла от производительности

Расчеты показали, что постоянство энтальпии металла в конце нагрева не достигается однозначно, однако, максимальная разница не превышает 1%.

При внесении некоторого уточнения, связанного с определением величины средних тепловых потоков для каждой итерации, возможно поддержание постоянства энтальпии металла в конце нагрева.

При производительности печи 135 т/ч и выше при накладываемых условиях наблюдается недогрев металла и дальнейшее регулирование шагом является нецелесообразным.

Таким образом, предложенный расчетный метод определения рациональных режимных параметров проходной печи с механизированным подом, работающей в условиях переменной производительности, за счет изменения шага укладки заготовок позволяет получить заданное конечное теплосодержание металла.

### 3.7 Исследование «рваного» режима нагрева

В реальных условиях прокатных цехов проходные нагревательные печи не всегда работают в номинальном режиме. Во время нагрева заготовок возможна смена производительности печи, в результате чего необходимо оперативное установление соответствующего рационального температурного профиля печи. В противном случае возможен ряд негативных последствий, а именно недогрев или перегрев металла, повышенное образование окалины, недостаточное выравнивание температуры по сечению заготовки и прочее.

Ниже проведены численные эксперименты по изучению температурного поля металла при условии, что для каждой новой производительности печи, возникающей по ходу работы, устанавливается температурный профиль печи, определенный при помощи методики, предложенной в подразделе 2.6 и апробированной в подразделе 3.5.

То есть речь идет о исследовании температурного поля металла в так называемом «рваном» режиме.

В качестве примера рассмотрим нагрев прямоугольной заготовки 150x150 мм в пятизонной методической комбинированной нагревательной печи с шагающими водоохлождающими балками стана 390 Макеевского металлургического завода. Общая длина печи 13 м.

Принимаем, что во время нагрева одной партии заготовок производительность печи менялась три раза (120 т/ч, 60 т/ч и 90 т/ч) через равные промежутки времени. Каждый режим держался 0,326 ч.

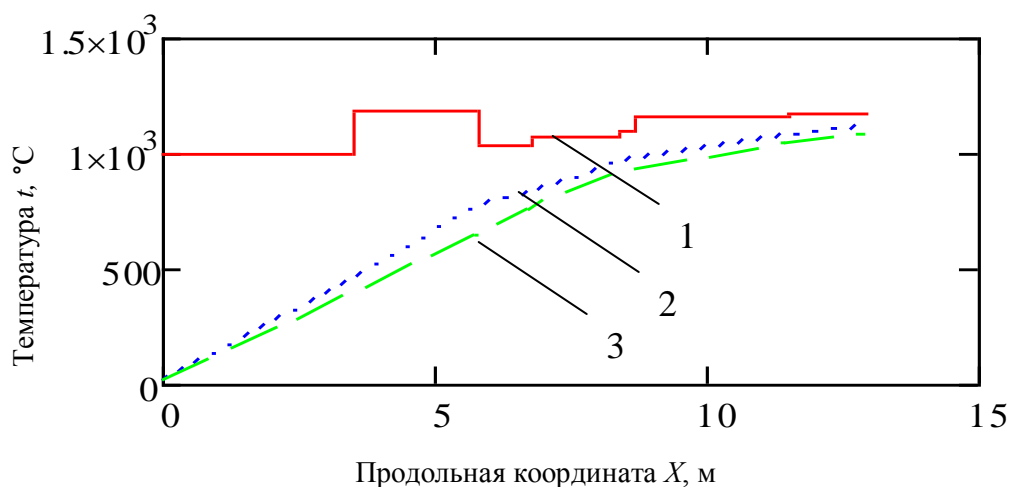
Температурный профиль для измененных производительностей определялся с помощью разработанных и представленных в разделе 2 методик определения температуры металла и температурного профиля печи, работающей в режиме переменной производительности.

В подогревательной зоне заготовки нагревались при температуре 996°C при производительности печи 120 т/ч. В первой сварочной зоне нагрев сначала осуществлялся при производительности 120 т/ч и температуре 1190 °C, а затем

при 60 т/ч и 1035 °С. Во второй сварочной зоне заготовка нагревается при производительности 60 т/ч с температурой печи 1081 °С. В первой томильной нагрев осуществляется сначала при 60 т/ч и 1100 °С, затем при 90 т/ч с температурой 1161 °С. Во второй томильной зоне происходит выравнивание температурного поля заготовки при производительности 90 т/ч с температурой печи 1180 °С.

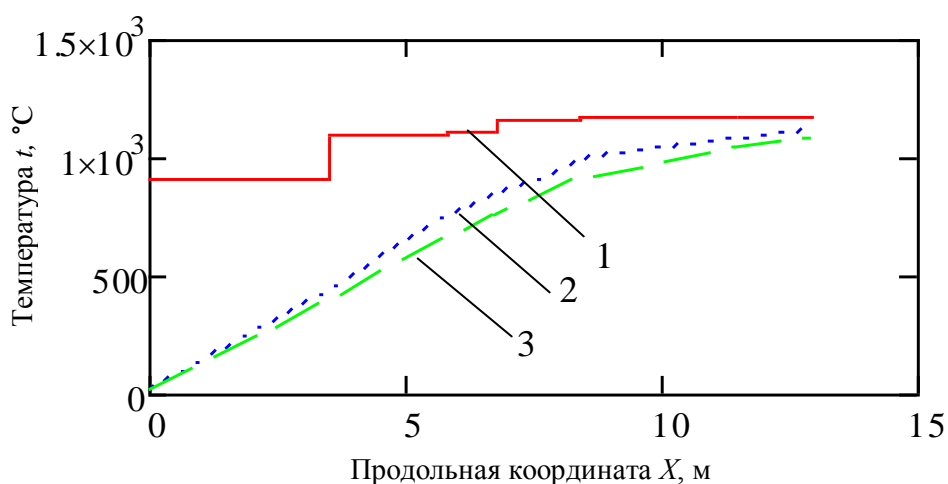
На рисунках 3.18, 3.19 представлены температурные диаграммы процесса нагрева по длине печи для «рваного» и номинального режима, соответственно.

В результате расчета достигается заданная температура металла с равномерным прогревом. Температура поверхности металла в конце нагрева достигает 1103 °С, перепад температур между поверхностью и центром не превышает 38 °С. При этом для номинального режима данные температуры составляют 1104 °С и 35 °С, соответственно. Погрешность составляет 0,1 %.



1 – температура печи; 2 – температура поверхности металла; 3 – температура центра металла

Рисунок 3.18 – Температурная диаграмма процесса нагрева металла по длине печи для «рваного» режима



1 – температура печи; 2 – температура поверхности металла; 3 – температура центра металла

Рисунок 3.19 – Температурная диаграмма процесса нагрева металла по длине печи для номинального режима

Данное исследование показало, что для любого сортамента при переменной производительности печи возможно получение металла надлежащего качества при оперативном установлении температурного профиля, соответствующего текущей производительности.

### 3.8 Выводы по разделу 3

В данном разделе представлены результаты исследования температурного состояния металла при его нагреве в проходной печи, полученные экспериментально, при помощи математического моделирования и расчетных методик. Также представлены результаты определения рациональных технологических параметров проходных печей.

1. С использованием конечно-разностной модели нагрева металла и по методу Фурье для одинаковых исходных данных выполнено определение температуры центра и поверхности бесконечной пластины. Расхождение значений температур не превышает 1,5%, что свидетельствует о возможности



использования явной конечно-разностной схемы для подтверждения адекватности предложенных ранее методик расчета.

2. Представлено подтверждение адекватности метода определения температурного состояния металла при его нагреве. Для толкательных печей подтверждение проводилось с помощью численного метода разностной аппроксимации в виде явной конечно-разностной схемы. Для печей с механизированным подом – с помощью прямых измерений. Измерения температуры поверхности металла проводились 10 раз инфракрасным пирометром testo 835 (с доверительной вероятностью 0,95 температура поверхности металла составила  $1140 \pm 9^\circ\text{C}$ ) на выходе из методической комбинированной нагревательной печи с шагающими водоохлождающими балками стана 390 Макеевского металлургического завода.

3. Результаты идентификации среднемассовой температуры сортовых заготовок, полученной при их нагреве в печи с шагающими балками на основании анализа текущих энергосиловых параметров первой клетки прокатного стана доказали правомерность использования методики.

Расхождение между расчетным значением температуры и температуры, полученной по результатам оперативных измерений не превышает 2%.

4. Приведены результаты определения температуры уходящих из печи газов. Получена возможность уточнения температурного состояния металла, а также температуры уходящих из печи газов непосредственно на стадии расчета нагрева металла в методической зоне, что позволяет использовать данный метод для АСУ ТП.

Для сокращения вычислительных операций введены коэффициенты релаксации. При этом сходимость исследуемых величин достигается с достаточной степенью точности. Для среднемассовой температуры заготовки при всех исследуемых коэффициентах – на 13 итерации. Для температуры поверхности металла в конце методической зоны при  $k = 0,35$  и  $k = 0,5$  – на 14 итерации. Температура уходящих газов быстрее всего достигается при  $k = 0,35$  и  $k = 0,65$  на 9 итерации.

5. Проведено исследование температурного профиля печи при переменной производительности.

Получены рекомендации для определения рациональных технологических параметров для проходных толкательных печей в условиях изменяющейся производительности. Зависимость температурного профиля трехзонной печи от производительности представлена в графическом виде.

Использование результатов, полученных при помощи обратного метода, как исходных данных для прямого расчета позволило установить, что для режимов, близких к номинальному, энтальпии металла по длине печи практически совпадают, а для производительности, значительно ниже номинальной, расчеты по обратному методу можно расценивать как первое приближение, требующее последующего уточнения. Применимость обратного метода ограничена по производительности печи, при которой температура газов в сварочной зоне равна температуре в томильной зоне.

6. Введено понятие квазистационарного температурного состояния металла, суть которого состоит в постоянстве среднemasсовой температуры заготовки в привязке к продольной координате  $T_{cm}(x) = const$ .

7. Приведены результаты исследований при нагреве металла в печи с шагающими балками.

В результате комбинирования рационального температурного профиля печи и шага укладки заготовок можно достичь значительного расширения диапазона регулирования.

Для печей, работающих в условиях переменной производительности определен оптимальный шаг укладки заготовок, который составляет 0,26 поперечного размера сортовой заготовки.

Выявлено, что при переходе на оптимальный шаг укладки заготовок по сравнению с опорным режимом возможно достижение экономии расхода теплоты (и соответственно топлива) 5% при производительности  $P=110$  т/ч и 15% – при производительности  $P=80$  т/ч.

Предложенный расчетный метод определения рациональных режимных параметров проходной печи с механизированным подом, работающей в условиях переменной производительности, за счет изменения шага укладки заготовок позволяет получить заданное конечное теплосодержание металла.

Однако, поддержание постоянства энтальпии металла в конце нагрева возможно только при внесении некоторого уточнения, связанного с определением величины средних тепловых потоков для каждой итерации.

8. На примере нагрева прямоугольной заготовки 150x150 мм в пятizonной методической комбинированной нагревательной печи с шагающими водоохлождающими балками стана 390 Макеевского металлургического завода с переменной производительностью проведено исследование «рваного» режима.

Выявлено, что при работе печи в условиях переменной производительности для любого сортамента возможно найти рациональные параметры нагрева и получить заданное температурное состояние металла.

## РАЗДЕЛ 4

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 4.1 Рекомендации по применению результатов исследований в условиях Филиала №3 ООО «ЮГМК» «Макеевский металлургический завод»

В результате теоретических и экспериментальных исследований решена задача определения рациональных технологических параметров работы проходных печей, представленные в виде графиков и таблиц, характеризующих выбираемые температурный профиль печи и шаг укладки заготовок. Практически реализация полученных рекомендаций выражается в модификации алгоритмов управления процессом, осуществляемого АСУ ТП.

Современные тепловые агрегаты, в т. ч. и проходные нагревательные печи, управляются микропроцессорными контроллерами, содержащими в своей памяти программные средства, позволяющие оператору устанавливать тепловой режим по заранее составленной программе.

Автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) позволяют: получить информацию о тепловом состоянии заготовки в любой момент времени; рассчитать оптимальный температурный режим нагрева; вносить корректировки по регулированию температуры в зонах печи и прочее.

Для большого числа проходных нагревательных печей разработаны и успешно эксплуатируются разноуровневые АСУ ТП, осуществляющие, помимо контроля, прогноз процесса нагрева и его оптимизацию, исходя из сложившегося теплового состояния зон.

За рубежом основными компаниями по разработке программного обеспечения для АСУ ТП являются SSAB (Швеция), General Electric (США) и USIVOR (Франция). Все они имеют различные уровни систем автоматического управления тепловым режимом печей и позволяют получить прогноз температуры заготовки исходя из решения уравнения теплопроводности. В

период простоев прокатного стана также предусмотрено управление тепловым режимом и при возобновлении прокатки автоматически устанавливается первоначальный режим. Предложенные модели позволяют снизить окалинообразование и энергопотребление [114].

В НИТУ «МИСиС» диагностирование тепловой работы нагревательных печей происходит с применением программно-методического комплекса, позволяющего снизить удельный расход топлива на 15-20 % за счет снижения температурного допуска на прокатку [115]. Регулирование осуществляется опираясь на результаты замеров температуры торца заготовки и отслеживания температуры поверхности металла по длине раската.

Несмотря на большое количество разработанных программ, постоянно присутствует объективная необходимость их совершенствования по мере возникновения новых задач в реальном производстве.

На рисунке 4.1 представлен алгоритм работы АСУ ТП.

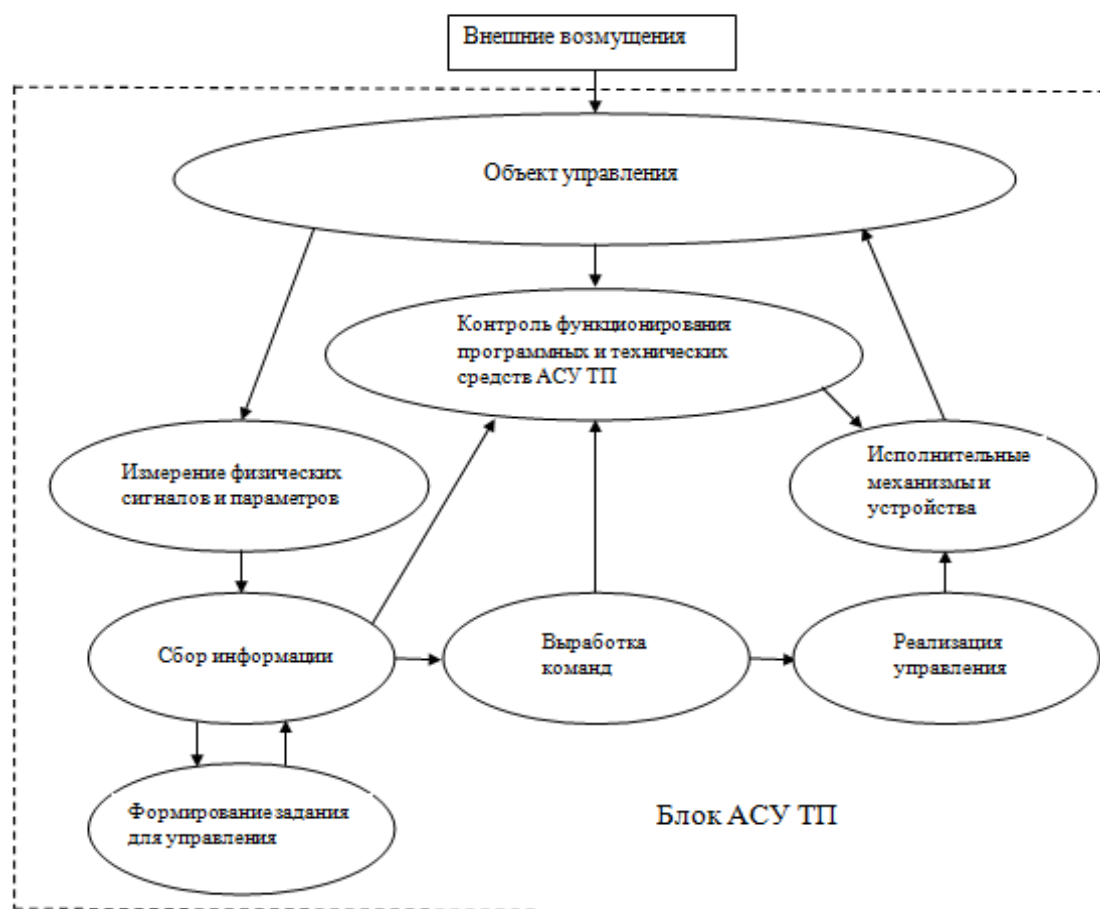


Рисунок 4.1 – Алгоритм работы АСУ ТП

Поскольку программные алгоритмы доступны только разработчикам, которые в современных условиях не всегда доступны, актуальной задачей остается разработка достаточно простого и общедоступного программного алгоритма для АСУ ТП нагрева металла в проходных нагревательных печах.

#### 4.1.1 Формирование уравнений регрессии для управления температурой зон печи

На металлургических предприятиях осуществляется нагрев заготовок различного сортамента, с переменными теплофизическими и геометрическими характеристиками. Особый интерес вызывает работа печи в условиях переменной производительности.

При разработке программного алгоритма для АСУ ТП в качестве примера были произведены расчеты нагрева металла в пятизонной комбинированной нагревательной печи с шагающими водоохлаждающими балками стана 390 Макеевского металлургического завода, работающей в режиме переменной производительности.

Разработанная в подразделе 2.6 методика определения температурного профиля печи для условий пониженной производительности позволяет обеспечивать заданное теплосодержание металла при его нагреве.

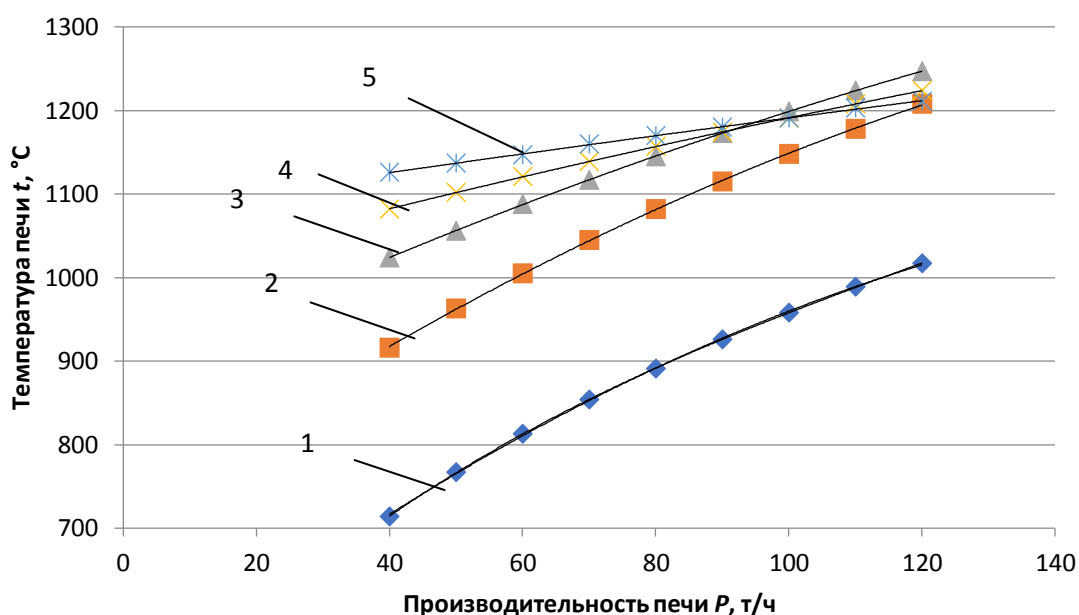
В качестве номинального был принят режим нагрева заготовок 150x150 мм в пятизонной печи с шагающими водоохлаждающими балками стана 390 Макеевского металлургического завода при производительности печи 120 т/ч. На основе, полученного в номинальном режиме, теплового состояния металла устанавливаем т.н. квазистационарное температурное состояние металла, суть которого состоит в постоянстве среднemasсовой температуры заготовки в привязке к продольной координате  $T_{cm}(x) = const$ .

С учетом квазистационарного температурного состояния металла выполнялись расчеты модифицированных режимов для заготовок следующих

типоразмеров: 100x100 мм, 120x120 мм и 125x125 мм. Производительность печи варьировалась от 120 т/ч до 40 т/ч с шагом 10 т/ч.

Для обработки результатов использовался регрессионный анализ с применением метода наименьших квадратов, представленный в подразделе 2.8.

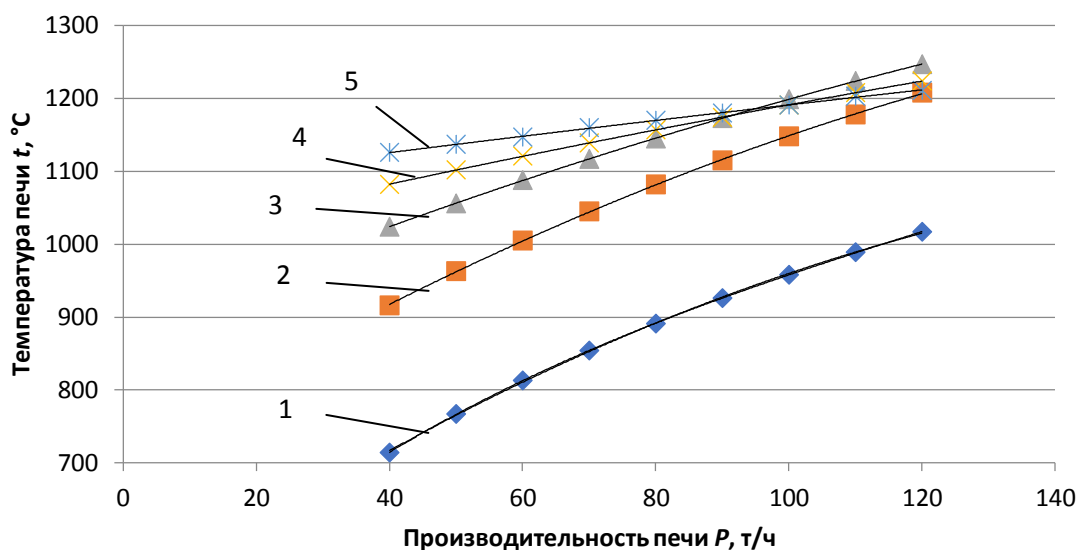
На рисунках 4.2, 4.3 и 4.4 представлены графики зависимости установленных рациональных значений температуры по зонам печи от производительности при нагреве заготовок 100x100 мм, 120x120 мм и 125x125 мм, соответственно.



1 – температура в подогревательной зоне печи; 2 – температура в первой сварочной зоне; 3 – температура во второй сварочной зоне; 4 – температура в первой томильной зоне; 5 – температура во второй томильной зоне

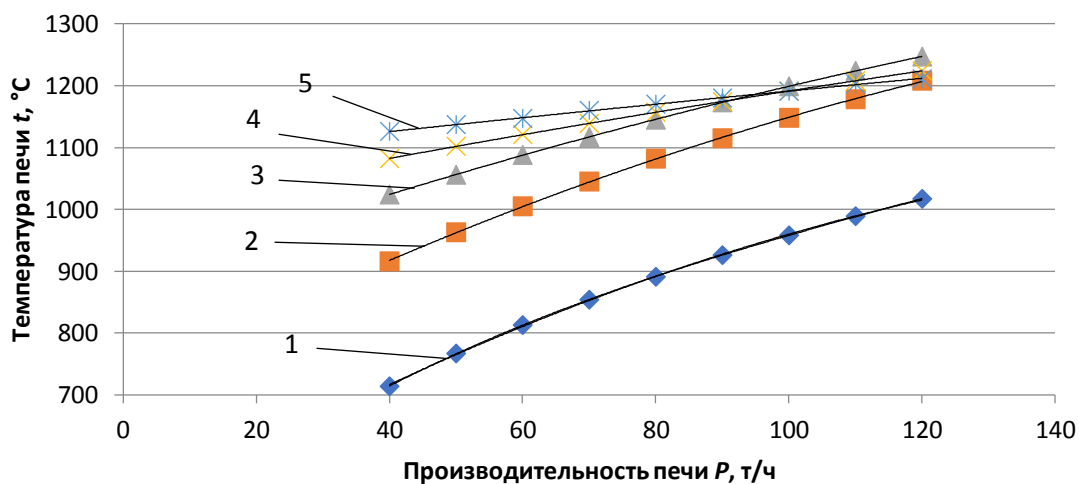
Рисунок 4.2 – Зависимость температуры по зонам печи от производительности при нагреве заготовок 100x100 мм

Зависимость температуры металла от производительности печи для различных размеров заготовок представлены в таблицах 4.1, 4.2 и 4.3, соответственно.



1 – температура в подогревательной зоне печи; 2 – температура в первой сварочной зоне; 3 – температура во второй сварочной зоне; 4 – температура в первой томильной зоне; 5 – температура во второй томильной зоне

Рисунок 4.3 – Зависимость температуры по зонам печи от производительности при нагреве заготовок 120x120 мм



1 – температура в подогревательной зоне печи; 2 – температура в первой сварочной зоне; 3 – температура во второй сварочной зоне; 4 – температура в первой томильной зоне; 5 – температура во второй томильной зоне

Рисунок 4.4 – Зависимость температуры по зонам печи от производительности при нагреве заготовок 125x125 мм



Таблица 4.1 – Зависимость температуры металла от производительности печи для заготовок 100x100 мм

[illegible]

Продолжение таблицы 4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Температура центра металла в конце подогревательной зоны $t_{цп}$ , °С	401	403	404	405	407	409	410	411	412
Температура центра металла в конце первой сварочной зоны $t_{цсв1}$ , °С	761	764	767	770	773	777	778	782	783
Температура центра металла в конце второй сварочной зоны $t_{цсв2}$ , °С	915	919	921	923	925	928	931	934	936
Температура центра металла в конце первой томильной зоны $t_{цт1}$ , °С	1048	1050	1051	1054	1056	1057	1060	1062	1065
Температура центра металла в конце второй томильной зоны $t_{цт2}$ , °С	1094	1096	1097	1097	1099	1101	1103	1103	1104

Таблица 4.2 – Зависимость температуры металла от производительности печи для заготовок 120x120 мм

Параметр	Производительность $P$ , т/ч								
	120	110	100	90	80	70	60	50	40
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Температура поверхности металла в начале нагрева $t_{пн}$ , °С	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Температура поверхности металла в конце подогревательной зоны $t_{пп}$ , °С	453	449	446	443	440	437	434	431	428

Продолжение таблицы 4.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Температура поверхности металла в конце первой сварочной зоны $t_{\text{псв1}}, ^\circ\text{C}$	858	851	845	838	831	824	818	812	805
Температура поверхности металла в конце второй сварочной зоны $t_{\text{псв2}}, ^\circ\text{C}$	1000	994	988	983	977	972	966	960	955
Температура поверхности металла в конце первой томильной зоны $t_{\text{тт1}}, ^\circ\text{C}$	1108	1103	1098	1094	1089	1085	1080	1075	1071
Температура поверхности металла в конце второй томильной зоны $t_{\text{тт2}}, ^\circ\text{C}$	1134	1131	1128	1126	1123	1120	1117	1114	1112
Температура центра металла в начале нагрева $t_{\text{цн}}, ^\circ\text{C}$	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Температура центра металла в конце подогревательной зоны $t_{\text{цп}}, ^\circ\text{C}$	399	400	402	404	405	407	409	411	412
Температура центра металла в конце первой сварочной зоны $t_{\text{цсв1}}, ^\circ\text{C}$	758	760	765	768	771	774	777	781	784
Температура центра металла в конце второй сварочной зоны $t_{\text{цсв2}}, ^\circ\text{C}$	913	916	918	922	924	928	930	933	936

Продолжение таблицы 4.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Температура центра металла в конце первой томильной зоны $t_{цт1}, ^\circ\text{C}$	1046	1049	1050	1053	1055	1058	1060	1062	1066
Температура центра металла в конце второй томильной зоны $t_{цт2}, ^\circ\text{C}$	1093	1093	1096	1098	1099	1100	1102	1103	1105

Таблица 4.3 – Зависимость температуры металла от производительности печи для заготовок 125x125 мм

Параметр	Производительность $P$ , т/ч								
	120	110	100	90	80	70	60	50	40
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Температура поверхности металла в начале нагрева $t_{пн}, ^\circ\text{C}$	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Температура поверхности металла в конце подогревательной зоны $t_{пп}, ^\circ\text{C}$	454	451	447	444	440	437	434	431	428
Температура поверхности металла в конце первой сварочной зоны $t_{псв1}, ^\circ\text{C}$	859	852	845	838	832	825	818	812	805
Температура поверхности металла в конце второй сварочной зоны $t_{псв2}, ^\circ\text{C}$	1001	995	990	984	978	972	966	960	955

Продолжение таблицы 4.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Температура поверхности металла в конце первой томильной зоны $t_{пт1}, ^\circ\text{C}$	1108	1104	1098	1094	1090	1085	1080	1076	1071
Температура поверхности металла в конце второй томильной зоны $t_{пт2}, ^\circ\text{C}$	1134	1132	1129	1126	1123	1121	1117	1115	1112
Температура центра металла в начале нагрева $t_{цн}, ^\circ\text{C}$	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Температура центра металла в конце подогревательной зоны $t_{цп}, ^\circ\text{C}$	399	401	402	404	405	406	408	410	412
Температура центра металла в конце первой сварочной зоны $t_{цсв1}, ^\circ\text{C}$	756	760	763	767	770	774	777	781	784
Температура центра металла в конце второй сварочной зоны $t_{цсв2}, ^\circ\text{C}$	912	914	918	921	924	927	929	932	936
Температура центра металла в конце первой томильной зоны $t_{цт1}, ^\circ\text{C}$	1045	1048	1049	1052	1056	1058	1060	1063	1066
Температура центра металла в конце второй томильной зоны $t_{цт2}, ^\circ\text{C}$	1093	1094	1096	1098	1099	1101	1102	1104	1105

Из приведенных таблиц видно, что при понижении производительности печи наблюдается повышение однородности прогрева металла.

В таблице 4.4 приведены регрессионные уравнения зависимости температуры по зонам печи от производительности и коэффициенты детерминации для различных типов заготовок.

Таблица 4.4 – Регрессионные уравнения зависимости температуры по зонам печи от производительности и коэффициенты детерминации для различных типов заготовок

Зона печи	Тип заготовки	Регрессионное уравнение	Коэффициент детерминации $R^2$
Подогревательная	100x100	$t = -0,0167P^2 + 6,5135P + 501,52$	0,9997
	120x120	$t = -0,0164P^2 + 6,3682P + 491,52$	0,9998
	125x125	$t = -0,0161P^2 + 6,31P + 490$	0,9997
Первая сварочная	100x100	$t = -0,0125P^2 + 5,7481P + 722,63$	0,9999
	120x120	$t = -0,012P^2 + 5,5652P + 716,82$	0,9999
	125x125	$t = -0,0122P^2 + 5,5631P + 714,33$	0,9999
Вторая сварочная	100x100	$t = -0,0066P^2 + 3,926P + 886,93$	1
	120x120	$t = -0,0063P^2 + 3,8076P + 883,34$	0,9999
	125x125	$t = -0,0063P^2 + 3,7909P + 882,38$	1
Первая томильная	100x100	$t = -0,0024P^2 + 2,2212P + 1003,2$	0,9998
	120x120	$t = -0,0023P^2 + 2,154P + 1000,9$	1
	125x125	$t = -0,0024P^2 + 2,1476P + 1000,3$	1
Вторая томильная	100x100	$t = -0,0019P^2 + 1,3978P + 1074,9$	0,9995
	120x120	$t = -0,0011P^2 + 1,2666P + 1076,5$	0,9991
	125x125	$t = -0,0007P^2 + 1,1944P + 1079,1$	0,9992

Значения коэффициентов детерминации близки либо равны 1, что свидетельствует о высоком качестве и значимости построенных уравнений.

#### 4.1.2 Рекомендации по использованию уравнений регрессии для совершенствования управления процессом

Полученные регрессионные уравнения могут послужить исходными данными при разработке программного алгоритма для АСУ ТП нагрева металла в проходных печах в Филиале №3 ООО «ЮГМК» «Макеевский металлургический завод» при освоении нагрева новых типоразмеров заготовок.

При этом управление тепловой работой нагревательной печи с шагающими балками стана 390 Макеевского металлургического завода будет происходить с применением программного комплекса, позволяющего при переменной производительности печи определить температурный профиль печи при нагреве новых планируемых к освоению типоразмеров заготовок: 100x100 мм, 120x120 мм и 125x125 мм по предложенным выше регрессионным уравнениям.

Регулирование осуществляется, опираясь на сигналы от датчиков температуры печи, расхода топлива, расхода воздуха, а также датчиков производительности печи.

Схема АСУ ТП для реализации регулирования представлена на рисунке 4.5.

Таким образом, решена задача определения рациональных технологических параметров проходных печей за счет разработки алгоритмов, реализующих контроль и управление процессом нагрева.

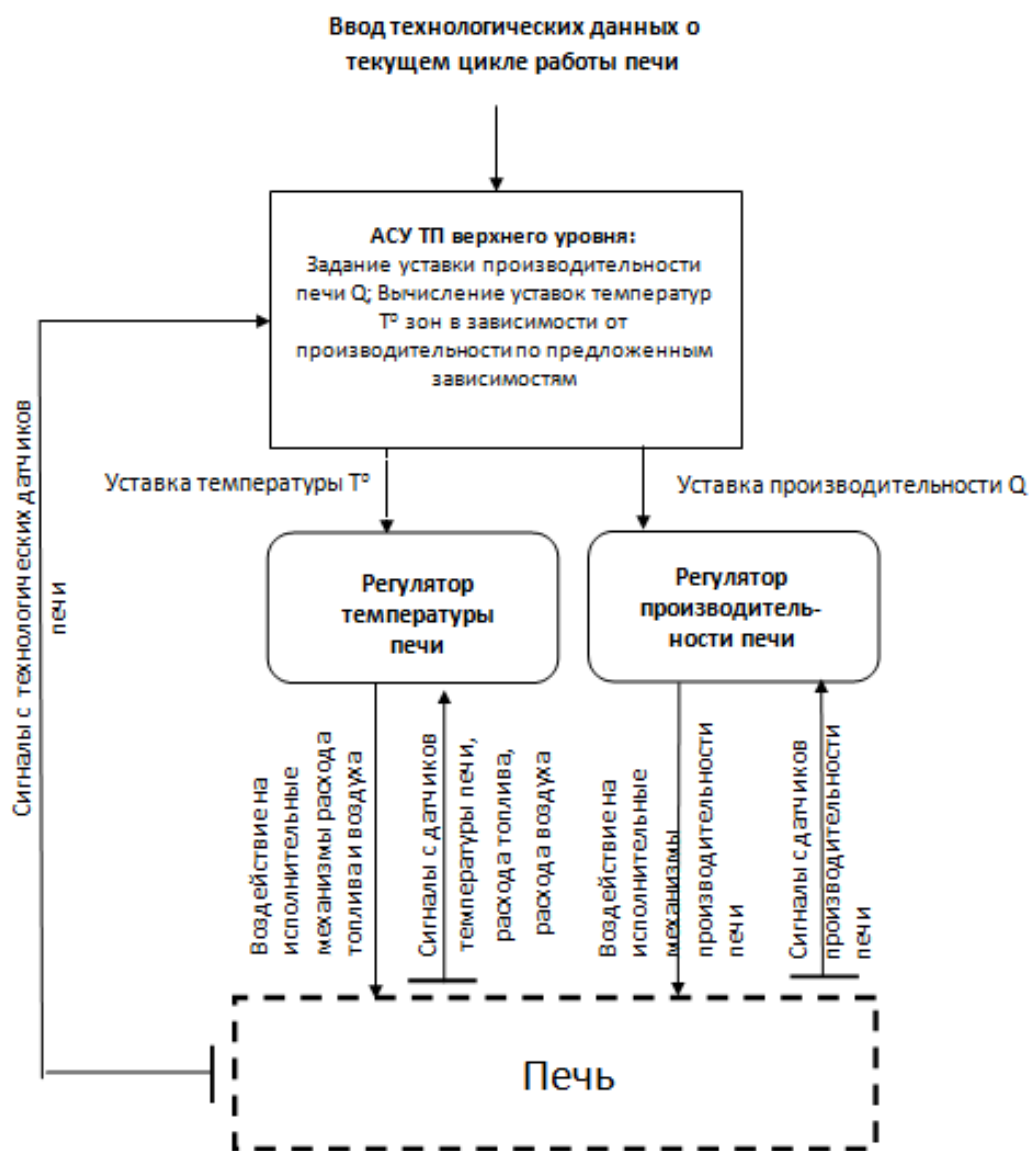


Рисунок 4.5 – Схема АСУ ТП для нагревательной печи с шагающими балками стана 390 Макеевского металлургического завода

#### 4.2 Оценка экономического эффекта от снижения брака

При нагреве в печи средне и высокоуглеродистых марок стали, склонных к трещинообразованию при работе в «рваном режиме» возможно образование трещин на поверхности заготовок, что приводит к необходимости их удаления из технологического цикла и с последующей утилизации как металлолома.

Оценив опыт работы предприятий, использующих печи с шагающими балками и работающих с марками стали, склонными к трещинообразованию,



сделан вывод о том, что для печи производительность 120 т/ч по причине резкого изменения производительности, вызванного различными технологическими ситуациями, брак металла составляет 150-160 заготовок в год.

Управление температурным режимом печи на основании уравнений регрессии, установленных при помощи разработанных в данной диссертации методик, позволяет с учетом некоторой погрешности установить квазистационарное температурное состояние металла в печи, соответствующее номинальному режиму работы. В этом случае появляется возможность избежать образования трещин на заготовках в процессе их нагрева в печи.

Тогда экономический эффект от снижения брака может быть оценен следующим образом:

$$\Delta \mathcal{E} = \frac{n \cdot a^2 \cdot l \cdot \rho \cdot (\mathcal{C}_3 - \mathcal{C}_m)}{1000}, \quad (4.1)$$

где  $\Delta \mathcal{E}$  – экономический эффект от снижения брака, млн. руб./год;  $n$  – снижение брака заготовок, шт;  $a$  – размер заготовки, м;  $l$  – длина заготовки, м;  $\rho$  – плотность металла, кг/м<sup>3</sup>;  $\mathcal{C}_3$  – цена заготовки, руб./т;  $\mathcal{C}_m$  – цена металлолома, руб./т.

Тогда, для заготовок сечением 125x125 мм длиной 11 м, при цене заготовки 60 тыс. руб./т и при цене лома 23,5 тыс. руб./т оценочный годовой экономический эффект от снижения брака на 155-ти заготовок составит:

$$\Delta \mathcal{E} = 55 \cdot 0,125^2 \cdot 11 \cdot 7800 \cdot \frac{60 - 23,5}{1000} = 7.585 \text{ млн. руб./год}$$

#### 4.3 Выводы по разделу 4

1. Рассмотрены программные алгоритмы для АСУ ТП нагрева металла в проходных нагревательных печах.

2. Выполнены расчеты режимов нагрева металла в пятизонной комбинированной нагревательной печи с шагающими водоохлождающими балками стана 390 Макеевского металлургического завода, работающей в

условиях переменной производительности, для заготовок следующих типоразмеров: 100х100 мм, 120х120 мм и 125х125 мм. Производительность печи варьировалась от 120 т/ч до 40 т/ч с шагом 10 т/ч.

3. С помощью регрессионного анализа получены полиномиальные уравнения регрессии второго порядка для определения температуры по зонам печи в зависимости от производительности для различных типов заготовок.

Результаты расчетов нагрева металла могут послужить исходными данными при разработке простого и общедоступного программного алгоритма для АСУ ТП.

4. Рассчитан возможный экономический эффект от снижения брака металла при нагреве средне и высокоуглеродистых марок стали, склонных к трещинообразованию, за счет установления рационального температурного профиля печи при переменной производительности, который составляет 7,585 млн. руб./год для одной печи с номинальной производительностью 120 т/ч.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой решена актуальная научно-техническая задача, имеющая важное значение для прокатного производства, заключающаяся в обосновании рациональных технологических параметров, обеспечивающих повышение эффективности работы проходных печей в условиях изменяющейся производительности.

Основные научные результаты работы можно сформулировать следующим образом.

1. Выполнен анализ информации о рациональных технологических параметрах проходных печей, работающих в условиях изменяющейся производительности, а именно рационального значения температур зон печи (а для печей с механизированным подом и шага раскладки заготовок), при установлении которых для заданной производительности печи достигается температурное состояние заготовки, соответствующее номинальному режиму. Определены основные проблемы, связанные с определением данных параметров, что позволило сформулировать цель и задачи исследования.

2. Разработана математическая модель для исследования процесса нагрева металла в проходных методических печах. Математическая модель базируется на решении дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности с учетом зависимости теплофизических характеристик металла от температуры. Адекватность математической модели подтверждена путем сопоставления результатов решения специальной тестовой задачи, полученных с ее помощью, с точным аналитическим решением задачи. Расхождение результатов не превышает 2%.

3. Научно обосновано, что температура металла по зонам проходной нагревательной печи и в конце нагрева может быть определена для известного температурного профиля печи и ее производительности с использованием тепловой диаграммы И.Д. Семикина. В результате разработана

соответствующая инженерная расчетная методика, адекватность которой в конкретных условиях подтверждена путем сопоставления результатов с экспериментальными данными (с доверительной вероятностью 0,95 температура поверхности металла составила  $1140 \pm 9^\circ\text{C}$ ) и соответствующими результатами математического моделирования. Расхождение менее 1%.

4. Разработана научная методика установления температуры продуктов сгорания, покидающих неотапливаемую зону печи. Уточнение температуры уходящих газов происходит непосредственно на стадии расчета нагрева металла в методической (неотапливаемой) зоне путем решения прямых и обратных задач вычисления температуры поверхности и среднемассовой температуры заготовки в конце методической (неотапливаемой) зоны в сочетании с методом последовательных приближений.

5. Разработана методика для определения рационального температурного профиля печи, работающей в условиях переменной производительности. Введено понятие квазистационарного теплового состояния металла в привязке к продольной координате печи и доказано, что в условиях переменной производительности печи такое состояние может быть достигнуто за счет определения и установления такого температурного профиля печи, при котором при прохождении каждой зоны печи металл получит количество теплоты такое же, как в номинальном режиме работы. Во время инерционного периода наблюдается некое расхождение результатов (не более 15%). Далее по мере прогрева металла и до самой его выдачи из печи отличие результатов не превышает 1%. Проведено исследование «рваного» режима, что позволяет для любого сортамента металла при переменной производительности печи найти рациональные параметры нагрева и получить заданное температурное состояние металла.

6. Исследовано взаимное влияние таких параметров как производительность печи, температурный профиль и шаг раскладки заготовок при решении задачи достижения заданного теплосодержания металла в процессе нагрева при работе печи с механизированным подом в условиях

изменяющейся производительности. При этом разработаны методики, позволяющие:

- для заданной производительности печи и шага раскладки заготовок определить температурный профиль печи, гарантирующий получение заданного теплосодержания;

- для заданной производительности определить, оптимальный с точки зрения расхода топлива, шаг раскладки. Для рассмотренной конструкции печи стана 390 Макеевского металлургического завода величина оптимального шага раскладки составила 0,26 поперечного размера сортовой заготовки;

- для заданной производительности и температурного профиля печи определить шаг раскладки, позволяющий получить заданное теплосодержание металла в результате нагрева.

7. Разработан метод идентификации среднемассовой температуры сортовых заготовок на выдаче из печи на основании анализа текущих энергосиловых параметров первой клетки прокатного стана. Адекватность метода подтверждена путем сопоставления результатов косвенной идентификации значения среднемассовой температуры металла с расчетным значением, полученным для скоростного и температурного режимов печи, соответствующих моменту эксплуатации производственной линии, для которой были сняты значения тока главного двигателя (с доверительной вероятностью 0,95 и класса точности амперметра 1,5). Расхождения не превышает 2%.

8. Получены полиномиальные уравнения регрессии второго порядка, устанавливающие зависимость значений температур зон печи с шагающими балками стана 390 Макеевского металлургического завода от производительности печи для новых планируемых к освоению типоразмеров заготовок: 100x100 мм, 120x120 мм и 125x125 мм и диапазона производительности печи 40 – 120 т/ч.

9. Рассчитан возможный экономический эффект от снижения брака металла при нагреве средне и высокоуглеродистых марок стали, склонных к трещинообразованию, за счет установления рационального температурного

профиля печи при переменной производительности, который составляет 7,585 млн. руб./год для одной печи с номинальной производительностью 120 т/ч.

10. Результаты диссертационной работы являются частью исследований, проведенных в рамках госбюджетной темы «Совершенствование тепломассообменных процессов и режимов работы оборудования для тепловой обработки материалов» № Н-2022-13; приняты Филиалом №3 ООО «ЮГМК» «Макеевский металлургический завод» в качестве научно-методической основы для освоения нагрева заготовок сечением 100x100 мм, 120x120 мм и 125x125 мм; материалы исследования внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «ДонНТУ».

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Парамонов, А. М. Повышение тепловой эффективности и экономичности работы нагревательных печей / А. М. Парамонов, В. В. Крайнов. – Москва: Спутник +, 2006. – 225 с.
2. Панферов, В. И. Об экономичном управлении нагревом металла в промышленных печах / В. И. Панферов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2018. – № 2. Т.18. – С. 71–80.
3. Парсункин, Б. Н. Система автоматического энергосберегающего управления на основе математической модели газодинамического режима нагревательной методической печи / Б.Н. Парсункин, И.Г. Самарина // ЭСиК. – 2017. – №2 (35). – С. 55–60.
4. Глишков, М. А. Система оптимального управления нагревом металла в методической печи прокатного цеха / М. А. Глишков [и др.] // Сталь. – 1975. – № 2. – С. 176–179.
5. Андреев, С. М. Теоретические основы и практическая реализация энергосберегающего оптимального управления нагревом непрерывнолитых заготовок в печах проходного типа: дис. ... докт. техн. наук: 05.13.06 / Андреев Сергей Михайлович. – Москва: ЧГУ, 2019. – 310 с. – Библиогр.: с. 299–304.
6. Андреев, С. М. Метод определения начального значения сопряженных переменных в задачах оптимального управления нагревом металла / С. М. Андреев, М. В. Галкин, А. А. Лосев // Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии. – 2012. – №. 4. – С. 25–35.
7. Осипова, В. А. Автоматизация металлургических производств / А. В. Осипова, Т.В. Астахова. – Красноярск: ИПК СФУ. – 2008. – 81 с.
8. Козлов, С. М. Основные методы оптимизации режимов нагрева металла / С. М. Козлов [и др.] // Литье и металлургия. – 2000. – №. 3. – С. 68–71.
9. Парсункин, Б. Н. Определение заданий зонным регуляторам температуры при реализации энергосберегающего управления нагревом металла / Б. Н.

Парсункин [и др.] // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2015. – №. 1. – С. 16–19.

**10.** Парсункин, Б. Н. Энергосберегающий режим нагрева металла в нагревательных печах / Б. Н. Парсункин, М. В. Бушманова, С. М. Андреев // Автоматизированный печной агрегат – основа энергосберегающих технологий XXI века. – 2000. – С. 243–244.

**11.** Дружинин, Г. М. Опыт комплексной реконструкции нагревательных печей Омутнинского металлургического завода / Г. М. Дружинин [и др.] // Сталь. – 2010. – № 3. – С. 69–71.

**12.** Губинский, В. И. Нагревательные печи металлургии – сегодня и завтра / В. И. Губинский // Теория и практика металлургии. – 2004. – Т. 6. – С. 56–60.

**13.** Бирюков, А. Б. Определение температурного профиля проходной печи при нагреве металла в условиях переменной производительности / А. Б. Бирюков, Ю. О. Турулина // Промышленная энергетика. – 2024. – №. 5. – С. 28–34.

**14.** Гинкул, С. И. Исследование температурного режима нагревательных печей прокатных станов при изменении сортамента нагреваемого металла / С. И. Гинкул, А. Н. Лебедев, Ю. В. Подобед, Ю. М. Сапронова // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия «Металлургия». Вып. 12 (177) – Донецк, ООО «Цифровая типография». – 2010. – С. 201–206.

**15.** Гинкул, С. И. Математическое моделирование температурного режима нагревательных печей прокатных станов при одновременном нагреве металла различного сортамента / С. И. Гинкул, А. И. Туяхов, Ю. С. Сибирцева // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Металургія. – 2012. — № 1 – 2. — С. 178 – 185.

**16.** Кибардин, А. Н. Модели и алгоритмы обработки информации в системе оценки технологических параметров производства слябов на линии «МНЛЗ – нагревательная печь»: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Кибардин Антон Николаевич. – Череповецкий государственный университет, 2017. – 166 с. – Библиогр.: с. 153–166.



17. Лукин, С. В. Инженерная методика расчета нагрева и термостатирования сляба в нагревательной печи при горячем посаде / С. В. Лукин, А. А. Збродов, К. Ю. Левашев // *Металлург*. – 2020. – № 5. – С. 70–76.
18. Парсункин, Б. Н. Оптимальные топливосберегающие режимы нагрева непрерывнолитых заготовок в методических печах / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, Д. Ю. Жадинский, А. У. Ахметова // *Вестник МГТУ им. Г. И. Носова*. – 2015. – С. 89–96.
19. Панферов, В. И. К решению задачи контроля температуры металла в АСУ ТП методических печей / В. И. Панферов, С. В. Панферов // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Metallurgy*. – 2021. – №4. – С. 63–75.
20. Панферов, В. И. Оценка температуры массивного тела по измеряемым величинам процесса теплообмена / В. И. Панферов, Н. А. Тренин, С. В. Панферов // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*. – 2018. – №1. – С. 133–139.
21. Тайц, Н. Ю. Исследование процесса нагрева слябов в методических печах / Н. Ю. Тайц [и др.] // *Сталь*. – 1974. – № 7. – С. 653–655.
22. Антонов, В. В. Исследование нагрева металла в пятизонных методических печах / В. В. Антонов // *Сталь*. – 1970. – № 1. – С. 81–84.
23. Казанцев, Е. И. Применение ЭВМ для расчета нагрева металла в методических печах / Е. И. Казанцев, С. И. Гинкул, В. В. Антонов, Н. В. Гончаров // *Сталь*. – 1973. – № 1 – С. 77–79.
24. Беленький, А. М. Совершенствование тепловой работы нагревательных печей станов горячей прокатки / А. М. Беленький, А. Н. Бурсин, А. А. Улановский, С. И. Чибизова // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. – 2015. – № 2 – С. 62–69.
25. Улановский, А. А. Контроль высокотемпературной термообработки стального проката / А. А. Улановский, М. Тааке // *Сталь*. – 2008. – № 11. – С. 114–118.

- 26.** Денисов, М. А. Автоматизированное проектирование в ANSYS и КОМПАС-3D: учебное пособие / М. А. Денисов – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. – 2015. – 264 с.
- 27.** Панферов, В. И. О расчетно-инструментальном контроле качества нагрева и термообработки металла в печах / В. И. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Metallurgy. – 2020. – №4. – С. 56–66.
- 28.** Обухова, Т. Г. Определение теплового состояния заготовок на выходе из печи / Т. Г. Обухова // Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии. – 2012. – №. 4. – С. 192–197.
- 29.** Денисов, М. А. Разработка и применение методов теплофизического исследования резервов ресурсосбережения в процессах нагрева металла: дис. ... докт. техн. наук: 05.16.02 / Денисов Михаил Александрович. – Уральский государственный университет: УПИ. – 2005. – 369 с.
- 30.** Парсункин, Б. Н. Определение качества нагрева металла в нагревательных печах / Б. Н. Парсункин [и др.] // Сталь. – 1989. – № 11. – С. 104–107.
- 31.** Парсункин, Б. Н. Самонастраивающаяся система для управления тепловым режимом методических печей / Б. Н. Парсункин [и др.] // Бюлл. ЦНИИЧМ. – 1970. – № 4. – С. 39–41.
- 32.** Епишин, А. В. Измерение температуры металла в печах станов горячей прокатки / А. В. Епишин, В. В. Кузнецов, Р. С. Бегинин // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов I Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (ТИМ'2012) с международным участием, 29–30 марта 2012 г. – Екатеринбург: [УрФУ]. – 2012. – С. 46–50.
- 33.** Вырк, А. Х. Управление нагревом заготовок в методической печи / А. Х. Вырк // Бюлл. ЦНИИЧМ. – 1970. – № 24. – С. 3–9.
- 34.** Белевич, А. В. Моделирование и исследование технологических процессов обработки металлов давлением: монография / А. В. Белевич [и др.]; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования "Владимирский гос. ун-т

им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых". – Владимир: ВлГУ. – 2012. – 180 с.

**35.** Громов, Н. П. Теория обработки металлов давлением / Н. П. Громов – Издательство: Москва: Металлургия. – 1967. – 340 с.

**36.** Ахметов, Т. У. Совершенствование системы управления несимметричным нагревом непрерывнолитых заготовок в методических печах: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Ахметов Тимур Уралович. – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова: Оренбург. – 2017. – 140 с.

**37.** Ткаченко, В.Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов: монография / В.Н. Ткаченко. – Киев: Наукова думка. – 2008. – 243 с.

**38.** Гусовский, В. Л. Методики расчета нагревательных и термических печей: Учебно-справочное издание. / В. Л. Гусовский, А. Е. Лифшиц – Москва: Теплотехник. – 2004. – 400 с.

**39.** Семикин, И. Д. Теоретические основы расчета нагревательных печей и колодцев // Сталь. – 1937. – №. 12. – С. 29–42.

**40.** Семикин, И. Д. Нагрев массивных тел излучением / И. Д. Семикин, Ю. И. Розенгарт, Э. М. Гольдфарб // Сталь. – 1956. – №. 3. – С. 252–256.

**41.** Дождиков, В. И. Особенности проектирования и реализации технологии нагрева металла перед горячей прокаткой / В. И. Дождиков [и др.] // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2011. – №. 4. – С. 42–47.

**42.** Андреев, С. М. Экспериментальное исследование эффективности энергосберегающих оптимальных режимов нагрева металла / С. М. Андреев, Б. Н. Парсункин // Автоматизированные технологии и производства. – 2014. – №. 6. – С. 134–143.

**43.** Ginkul S. I., Biryukov A. B., Gnitiev P. A., Ivanova A. A. Predictive mathematical model of the process of metal heating in walking-beam furnaces // Metallurgist. 2018. Vol. 62, no 1–2. pp. 15-21. DOI: 10.1007/s11015-018-0619-9

44. Андреев, С. М. Прогнозирование времени нагрева заготовок в условиях нестационарного режима работы методических печей / С. М. Андреев // ЭСиК. – 2017. – №3 (36). – С. 35–40.
45. Кухтик, М. П. Методика учета воздействия простоев на процесс нагрева слабов в методической печи / М. П. Кухтик, Ю. П. Сердобинцев, А. М. Макаров // Известия ВолгГТУ. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении. – 2014. – №. 12. – С. 80–82.
46. Курносов, В. В. Математическое моделирование нагрева заготовок с переменными теплофизическими характеристиками и теплового режима, соответствующего заданному графику нагрева / В. В. Курносов, И. А. Левицкий // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. – 2015. – Т. 55. – №. 7. – С. 19–22.
47. Кухтик, М. П. Математическое моделирование процесса нагрева слабов в методической печи / М. П. Кухтик, Ю. П. Сердобинцев // Известия ВолгГТУ. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении. – 2011. – №. 7. – С. 80–83.
48. Бирюков, А. Б. Математическое моделирование процесса тепловой обработки металла в печах / А. Б. Бирюков, А. И. Волошин, Т. Г. Олешкевич // Сталь. – 2016. – №. 1. – С. 71–75.
49. Беззуб, А.А. Численное моделирование физических процессов в агрегате ковш-печь / А.А. Беззуб, Ф.В. Недопёкин, В.И. Бондаренко, В.В. Бодряга // В сборнике: Донецкие чтения 2020: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности. Материалы V Международной научной конференции. Под общей редакцией С.В. Беспаловой. – 2020. – С. 5–7.
50. Bazdyreva J., Bilousov V., Nedopekin F., Bondarenko V., Bodriaha V., Kukharev A. Mathematical modeling of the supercooled steel ingot formation. Problem statement // The European Physical Journal. Special Topics. . 2020. T. 229. № 2–3. С. 495–500.

- 51.** Панферов, В. И. Об экспоненциальной модели нагрева слябов в методических печах / В. И. Панферов, С. В. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Metallurgy. – 2020. – №4. – С. 67–75.
- 52.** Жуков, П. И. О возможности внедрения datamining моделей с целью повышения энергоэффективности технологического объекта / П. И. Жуков, А. И. Глущенко // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство. XVII всероссийская научно-практическая конференция. – Старый Оскол, 2021. – С. 274–279.
- 53.** Фомин, А. В. Применение регрессионного анализа в задаче получения зависимости расхода газа в зонах печи от производительности прокатного стана / А. В. Фомин, П. И. Жуков // Управление большими системами. Труды XVIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Южно-Уральский государственный университет, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук. – 2022. – С. 223–228.
- 54.** Фомин, А. В. Математическая модель зависимости расхода газа в зонах печи от производительности прокатного стана / А. В. Фомин // Metallurg. – 2023. – №2. – С. 111–116.
- 55.** Фомин, А. В. Применение регрессионного анализа в задаче построения математической модели давления в пространстве нагревательной печи / А. В. Фомин, П. И. Жуков // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство. Материалы восемнадцатой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Старый Оскол, 2021. – С. 635–642.
- 56.** Фомин, А. В. Построение математической модели давления в рабочем пространстве многозонной печи / А. В. Фомин, П. И. Жуков // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2022. – №1 – С. 19–25.
- 57.** Fomin A., Glushchenko A. Advanced control of pressure inside continuous bloom heating furnace to improve disturbances attenuation by temperature control

loop // Proceedings - 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2022. – pp. 539–544.

**58.** Жуков, П. И. Построение зависимости температуры непрерывно литой заготовки от ретроспекции её нагрева / П. И. Жуков, А. И. Глущенко, А. В. Фомин // Системы управления и информационные технологии. – 2019. – №. 4. – С. 73–78.

**59.** Беленький, А. М. К вопросу о математическом моделировании нагрева металла в печах с шагающими балками / А. М. Беленький, М. Ж. Богатова, С. И. Чибизова // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве (ТИМ'2022). — Екатеринбург, 2022. – С. 25–31.

**60.** Жуков, П. И. Адаптация значений коэффициентов теплопереноса для сеточной модели нестационарного нагрева стали / П. И. Жуков, А. И. Глущенко, А. В. Фомин // Управление большими системами. Труды XVII Всероссийской школы-конференции молодых ученых. — Москва, 2021. – С. 521–532.

**61.** Тимошпольский, В. И. Технология нагрева заготовок в печи стана 150 РУП «Белорусский металлургический завод» при минимально возможном расходе топлива / В. И. Тимошпольский, и др. // Литье и металлургия. – 2004. – № 1 (29). – С. 16 – 21.

**62.** Бирюков, А. Б. Диагностика температурного состояния металла при его тепловой обработке в печах непрерывного действия / А. Б. Бирюков, А. А. Иванова // Металлург. – 2018. – № 4. – С. 33–37.

**63.** Biryukov A. B., Ivanova A. A. Control of metal heat treatment process in a furnace using a diagnostic system based on batch heat capacity // Metallurgist. 2019. Vol. 63, no 7-8. pp. 829-835. DOI: 10.1007/s11015-019-00896-7

**64.** Biryukov A. B., Ivanova A. A. Diagnosis of temperature conditions in metals when heated in continuous furnaces // Metallurgist. 2018. Vol. 62, no 3-4. pp. 331-336. DOI: 10.1007/s11015-018-0665-3

**65.** Рябчиков, М. Ю. Управление нагревом металла в методических печах с учетом распределения внешних тепловых потерь по длине печи / М. Ю.

Рябчиков, Д. С. Барков, Е. С. Рябчикова // Металлообработка. – 2016. – №6 (96). – С. 38–47.

**66.** Парсункин, Б. Н. Снижение удельного расхода топлива при управлении тепловым режимом по температуре поверхности нагреваемого металла / Б. Н. Парсункин [и др.] // Автоматизированные технологии и производства. – 2013. – №. 5. – С. 302–309.

**67.** Парсункин, Б. Н. Энергосберегающее управление тепловым режимом при переменной производительности методических печей / Б. Н. Парсункин [и др.] // Автоматизированные технологии и производства. – 2014. – №. 6. – С. 128–133.

**68.** Белан, Ю. М. Автоматизация нагрева заготовок для толстолистого стана / Ю. М. Белан, В. А. Хлыстов, В. Е. Туренко, А. Ф. Кравцов // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1979. – № 3. – С.28–29.

**69.** Егоров, В. С. Автоматическое управление температурным режимом методической печи четырехниточного проволочного стана / В. С. Егоров, К. Е. Медведев, С. З. Новицкий // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1992. – № 3. – С.71–72.

**70.** Педь, В. В. Автоматическая коррекция тепловой нагрузки нагревательной печи по темпу прокатки / В. В. Педь, В. П. Свириденко, А. И. Голиков // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1975. – № 2. – С.71–72.

**71.** Асцатуров, В. Н. Автоматическое управление нагревом металла в методической печи / В. Н. Асцатуров [и др.] // Бюлл. ЦНИИЧМ. – 1970. – № 19. – С.48–49.

**72.** Парсункин, Б. Н. Автоматическое управление тепловым режимом методических печей при изменяющейся производительности стана / Б. Н. Парсункин, Н. И. Иванов, В. А. Обрезков // Сталь. – 1970. – № 7. – С. 657–659.

**73.** Парсункин, Б. Н. Совершенствование управления режимом нагрева металла в методической печи за счет использования модели процесса / Б. Н. Парсункин [и др.] // Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии. – 2009. – №. 3. – С. 131–149.

- 74.** Андреев, С. М. Исследование работы системы автоматической оптимизации управления технологическими параметрами в нагревательных печах листопрокатных станов / С. М. Андреев, Б. Н. Парсункин // Актуальные проблемы автоматизации и управления: труды научно-практической конференции. – 2013. – С. 187–190.
- 75.** Андреев, С. М. Система оптимального управления тепловым режимом промышленных печей / С. М. Андреев, Б. Н. Парсункин // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – Т. 1. – №. 2. – С. 18–29.
- 76.** Сайров, А. М. Оптимизация управления тепловым режимом в рабочем пространстве нагревательной печи / А. М. Сайров // Автоматизированные технологии и производства. – 2013. – №. 5. – С. 296–301.
- 77.** Изотов, Б. В. Исследование оптимального числа зон тепло-вого регулирования методической печи / Б. В. Изотов [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2009. – №. 11. – С. 65–69.
- 78.** Парсункин, Б. Н. Нечеткое управление тепловым режимом промышленной печи / Б. Н. Парсункин, Е. С. Рябчикова, Т. Г. Обухова // Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии. – 2009. – №. 3. – С. 149–159.
- 79.** Фомин, А. В. Применение инверсного регулятора в задаче предиктивного управления контуром регулирования давления в печи нагрева металла / А. В. Фомин, Н. В. Савостин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2022. – № 11. – С. 3–8.
- 80.** Каримов, И. Разработка нечеткого предитиктивного регулятора для компенсации межзонного взаимодействия контуров печи нагрева металла / И. Каримов, Н. В. Савостин // Образование. Наука. Производство. Материалы XIV Международного молодежного форума. – Белгород, 2022. – С. 51–56.
- 81.** Савостин, Н. В. Анализ существующих систем управления печами нагрева с целью экономии топлива и соблюдением технологического режима / Н. В. Савостин // Современные проблемы горно-металлургического комплекса.



Наука и производство. Материалы девятнадцатой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Старый Оскол, 2023. – С. 501–504.

**82.** Толстова, Ю. С. Обзор систем управления температурой в методических печах / Ю. С. Толстова, В. А. Газизова, Е. Ю. Мухина // Автоматизированные технологии и производства. – 2019. – №. 1. – С. 29–31.

**83.** Панферов, В. И. К проблеме анализа и синтеза регуляторов в системах автоматизации металлургических печей / В. И. Панферов, С. В. Панферов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2022. – Т. 22. – №. 3. – С. 93–108.

**84.** Андреев, С. М. Автоматизированная система управления топливосберегающим несимметричным нагревом непрерывнолитых заготовок перед прокаткой / С. М. Андреев [и др.] // Электротехнические системы и комплексы. – 2016. – №. 3 (32). – С. 60–65.

**85.** Панферов, В. И. Управление температурным режимом нижних зон методических печей / В. И. Панферов, С. В. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Металлургия. – 2022. – №2. – С. 93–102.

**86.** Бирюков, А.Б. Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах: Монография. – Донецк: Ноулидж (донецкое отделение), 2012.– 247 с.

**87.** Казанцев Е.И. Промышленные печи / Е. И. Казанцев. – Москва: Металлургия. – 1975. – 368 с.

**88.** Маковский, В.А. Алгоритмы управления нагревательными печами / В.А. Маковский, И.И. Лаврентик – Москва: “Металлургия”. – 1977. – 183 с.

**89.** Курбатов, Ю.Л. Металлургические печи: учебное пособие / Ю.Л. Курбатов, Ю.Е. Василенко. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2013. – 388 с.

**90.** Бирюков, А. Б. Инженерная методика определения температурного состояния металла при его нагреве / А. Б. Бирюков, Ю. О. Турулина // Вестник ИГЭУ. – 2024. – №. 2. – С. 24–31.

- 91.** Бирюков, А.Б. Повышение точности определения теплового состояния металла в методической зоне проходной печи при использовании инженерных методов / А.Б. Бирюков, А.Н. Лебедев, Ю.О. Турулина, С.А. Онищенко // Вестник Института гражданской защиты Донбасса: научный журнал. – Донецк: ДонНТУ. – 2017. – Вып. 1(9). – С. 5–10.
- 92.** Бухмиров, В. В. Зональные методы расчета радиационного и сложного теплообмена / В. В. Бухмиров, Ю. С. Солнышкова // Учебное пособие. – Иваново, 2012. – 96 с.
- 93.** Ищанов, Т. Р. Численные методы в математическом моделировании: векторная аппроксимация и метод конечных элементов / Т. Р. Ищанов, А. Ш. Джабраилов, А. П. Николаев, А. С. Андреев // В сборнике: Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса. Сборник трудов Международной научно-практической конференции. Волгоград, 2023. – С. 24–30.
- 94.** Пирумов, У. Г. Численные методы: Учебное пособие. / У. Г. Пирумов. – Москва: Изд-во МАИ. – 1988. – 188 с.
- 95.** Кухтик, М. П. Модели и алгоритмы системы управления нагревом слябов в методической печи : дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Кухтик Михаил Петрович. – Волгоградский государственный технический университет: Пенза. – 2013. – 166 с.
- 96.** Бирюков, А.Б. Совершенствование теплотехнических параметров систем производства непрерывнолитой заготовки и ее тепловой обработки: Монография. – Донецк: Ноулидж (донецкое отделение), 2013.– 472 с.
- 97.** Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов: Пер. с англ. / Л. Сегерлинд. – Москва: Мир. – 1979. – 392 с.
- 98.** Самарский, А. А. Теория разностных схем: Учебн. Пособие. / А. А. Самарский. – Москва: Наука. – 1983. – 616 с.
- 99.** Иванова, А. А. Математическое моделирование тепловых процессов непрерывной разливки металлов: монография / А. А. Иванова, А. Б. Бирюков. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия. – 2022. – 284 с.: ил., табл.

- 100.** Исаченко, В. П. Теплопередача: Учебник для вузов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – Москва: Энергоиздат. – 1981. – 416 с.
- 101.** Цветков, Ф. Ф. Задачник по тепломассообмену / Ф. Ф. Цветков, Р. В. Керимов, В. И. Величко. – Москва: Изд-во МЭИ. – 1997. – 136 с.
- 102.** Бровкин, Л. А. Температурные поля тел при нагреве и плавлении в промышленных печах / Л. А. Бровкин // Иван. энерг. ин-т им. В.И. Ленина – Иваново, 1973. – 364 с.
- 103.** Бухмиров, В.В. Тепломассообмен: Учебник в 2-х т. Т. I / ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2023. – 364 с.
- 104.** Турулина, Ю.О. Косвенное определение температуры металла на основании анализа энергосиловых параметров черновой клетки прокатного стана / Ю.О. Турулина, А.Б. Бирюков, В.А. Сидоров // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. 2024. – № 3. – С. 162–167.
- 105.** Бирюков, А. Б. Методика определения температурного профиля методической печи, работающей в условиях пониженной производительности / А. Б. Бирюков, А. Н. Лебедев, Ю. О. Турулина // Сталь. – 2017. – № 10. – с. 74–77.
- 106.** Недопёкин, Ф. В. Теоретические и прикладные аспекты теплопереноса / Ф. В. Недопёкин, С. И. Гинкул, Е. В. Новикова. — Донецк: ДонНУ. – 2013. — 321 с.
- 107.** Бирюков, А. Б. Совершенствование расчетного метода определения температурного профиля проходной печи с механизированным подом путем изменения шага раскладки заготовок / А. Б. Бирюков, Ю. О. Турулина // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2022. – № 2. – С. 78–83.
- 108.** Бирюков, А. Б. Определение оптимального шага укладки заготовок в печи с механизированным подом, работающей в условиях переменной производительности / А. Б. Бирюков, Ю. О. Турулина // Вестник Донецкого

национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 1. – С. 57–63.

**109.** Бирюков, А. Б. Совершенствование расчетного метода определения рациональных режимных параметров проходной печи с механизированным подом, работающей в условиях переменной производительности / А. Б. Бирюков, Ю. О. Турулина // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2022. – № 3. – С. 52–56.

**110.** Мастрюков, Б. С. Теория, конструкции и расчёты металлургических печей / Б. С. Мастрюков – Москва: “Металлургия”. – 1977. – Т.2. – 272 с.

**111.** Легейда, Е. П. Особенности использования метода наименьших квадратов в статистических задачах / Е. П. Легейда // Информационная безопасность: сборник материалов 59-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 17–21 апреля 2023 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2023. – С. 111–113.

**112.** Тихонов, Н. А. Основы математического моделирования / Н. А. Тихонов, М. Г. Токмачев // Учебное пособие – Москва: Физический факультет МГУ. – 2012. – 91 с.

**113.** Целиков, А.И. Машины и агрегаты металлургических заводов. Машины и агрегаты для производства и отделки проката. Том 3 / А.И. Целиков, П.И. Полухин, В.М. Гребеник и др. – Москва: Металлургия. – 1988. – 680 с.

**114.** Ким, А. А. Совершенствование АСУ ТП нагрева металла в методических печах / А. А. Ким, К. С. Шатохин // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве (ТИМ'2022). —Екатеринбург, 2022. – С. 90–94.

**115.** Бердышев, В. Ф. Программное обеспечение теплотехнических исследований методической печи / В. Ф. Бердышев [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2001. – №3. – С. 61–65.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение А

## Технические характеристики прибора testo 835

Характеристика	Значения
1	2
<b>Инфракрасное измерение</b>	
Оптика	50:1
Длина волны	8 – 14 мкм
Тип лазера	4 – точечный лазер
Выходная мощность/длина волны	< 1 мВт/8 – 14 μм
Класс/стандарт	2/EN 60825 – 1:2007
Диапазон измерений	<b>T1/H1:</b> -30 – +600 °C <b>T2:</b> -10 – +1500 °C
Разрешение	0,1 °C/°F
Погрешность (при +23 °C, ±1 цифра)	<b>T1/H1:</b> ±2,5 °C (-30,0 – -20,1 °C) ±1,5 °C (-20,0 – -0,1 °C) ±1,0 °C (0,0 – +99,9 °C) ±1% от значения измерения (ост. часть диап. изм.) <b>T2:</b> ±2,0 °C или 1% от измер. знач. (принимается наибольшее значение)
Частота измерений	0,5 с.
<b>Контактное измерение</b>	
Тип сенсора	Термопара тип К (подсоединяемая)
Диапазон измерений	<b>T1/H1:</b> -50 – +600 °C <b>T2:</b> -50 – +1000 °C
Разрешение	0,1 °C
Погрешность (±1 цифра)	±(0,5 °C + 0,5% от измеренного значения)

1	2
Частота измерений	0,5 с.
<b>Измерение влажности (только Н1)</b>	
Диапазон измерений	0 – 100% ОВ (при -20 – +50 °С)
Разрешение	0,1% ОВ (влажность) 0,1 °С (температура) 0,1 °С td (значение температуры точки росы)
Погрешность ( $\pm 1$ цифра)	$\pm 2\%$ ОВ $\pm 0,5$ °С
Частота измерений	0,5 с.
<b>Общие сведения</b>	
Рабочая температура	-20 – +50 °С
Температура хранения	-30 – +50 °С
Питание	3 х батареи типа АА или через порт USB (только при установленной программе EasyClimate)
Ресурс батареи	25 ч. (типично при 25 °С при выключенном лазере и без одсветки дисплея) 10 ч. (типично при 25 °С без подсветки дисплея)
Корпус	АБС/ПК
Размеры	193 × 166 × 63 мм/7,6 × 6,5 × 2,5”
Масса	<b>T1/T2:</b> 514 г (с батареями) <b>H2:</b> 527 г (с батареями)
Директива ЕЭС	2014/30/EU

## Приложение Б

## Справка о внедрении результатов диссертационной работы на производство



ФИЛИАЛ № 3 «ММЗ» ООО «ЮГМК ДОНЕЦК»  
286106, Донецкая Народная Республика, г.о. Макеевка,  
г. Макеевка, ул. Металлургическая д.47  
ОГРН 1229300000478  
ИНН/КПП 9308000360/931143001  
тел. +7 (856) 329-22-55,  
Email: [mmz@yugmk-dk.com](mailto:mmz@yugmk-dk.com)

## АКТ

внедрения результатов исследований диссертационной работы Турудиной Ю.О. на тему «Определение рациональных технологических параметров проходных печей в условиях изменяющейся производительности», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 02.04.06 – «Теоретическая и прикладная теплотехника».

В диссертационной работе аспирантки Турудиной Ю.О. при помощи специально разработанных методик получены регрессионные зависимости, устанавливающие связь между температурами зон печи и производительностью для нагрева сортовых заготовок сечением 100x100, 120x120 и 125x125 мм в проходной печи с шагающими балками стана 390 Филиала №3 ООО «ЮГМК» «Макеевский металлургический завод».

Данная печь при поставке была снабжена алгоритмами управления для нагрева заготовок 130x130 и 150x150 мм. В перспективе планируется освоение нагрева сортовых заготовок других типоразмеров. Результаты, полученные Турудиной Ю.О., будут использоваться при освоении нагрева заготовок сечением 100x100, 120x120 и 125x125 мм.

Управляющий филиалом  
№3 «ММЗ» ООО «ЮГМК ДОНЕЦК»



А.П. Лаверченко

Исполнитель:  
В.В. Хорошилов  
Тел. +7 (856) 329 22 23



## Приложение В

## Справка о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"  
(ФГБОУ ВО "ДОННТУ")**

Артёма ул., 58, г. Донецк, г.о. Донецкий, Донецкая Народная Республика, 283001 тел.: +7 (856) 337-17-33, 301-07-69  
e-mail: [donntu.info@mail.ru](mailto:donntu.info@mail.ru) ОКПО 95580141 ОГРН 1229300078633 ИНН/КПП 9303013012/930301001

27.09.24 № 29-4/16  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Диссертационный совет 24.2.491.02  
при ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

## СПРАВКА

О внедрении результатов исследований диссертационной работы ассистента кафедры «Техническая теплофизика» Донецкого национального технического университета Турулиной Ю.О. на тему: «Определение рациональных технологических параметров проходных печей в условиях изменяющейся производительности», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6 – Теоретическая и прикладная теплотехника в учебный процесс ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Применение методик расчета нагрева металла в проходных печах, предложенных в кандидатской диссертационной работе ассистента кафедры «Техническая теплофизика» Донецкого национального технического университета, принято к внедрению в учебный процесс для проведения практических занятий по дисциплине «Тепломассообмен» для студентов бакалавров кафедры «Техническая теплофизика» по направлению 22.03.02 – Промышленная теплотехника.

Первый проректор  
ФГБОУ ВО «ДОННТУ»,  
к.т.н., доцент

А.А. Каракозов

Начальник УМУ  
ФГБОУ ВО «ДОННТУ»,  
к.т.н., доцент

В.А. Попов

Заведующий кафедрой  
«Техническая теплофизика»  
ФГБОУ ВО «ДОННТУ»,  
д.т.н., профессор

А.Б. Бирюков

## Приложение Г

Справка о внедрении результатов диссертационной работы в научную тему



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"  
(ФГБОУ ВО "ДонНТУ")**

Артёма ул., 58, г. Донецк, г.о. Донецкий, Донецкая Народная Республика. 283001 тел.: +7 (856) 337-17-33, 301-07-69  
e-mail: [donntu.info@mail.ru](mailto:donntu.info@mail.ru) ОКПО 95580141 ОГРН 1229300078633 ИНН/КПП 9303013012/930301001

29.09.24 № 29-5/16  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Диссертационный совет 24.2.491.02  
при ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

## СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Турулиной Ю.О. на тему «Определение рациональных технологических параметров проходных печей в условиях изменяющейся производительности», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6 – Теоретическая и прикладная теплотехника.

Результаты диссертационного исследования Турулиной Ю.О., связанные с нагревом металла в проходных нагревательных печах, работающих в условиях переменной производительности использованы в рамках научно-исследовательской темы кафедры технической теплофизики «Совершенствование тепломассообменных процессов и режимов работы оборудования для тепловой обработки материалов» (шифр темы Н 2022-13, сроки выполнения темы 01.09.2022 г. – 30.06.2024 г.) для создания рациональных режимов работы оборудования для тепловой обработки материалов.

Проректор по научной работе  
ФГБОУ ВО «ДОННТУ»,  
д-р техн. наук, профессор

С.В. Борщевский

Начальник НИЧ  
ФГБОУ ВО «ДОННТУ»,  
д-р техн. наук, доцент

К.Н. Лабинский

Заведующий кафедрой  
«Техническая теплофизика»  
ФГБОУ ВО «ДОННТУ»,  
д-р техн. наук, профессор

А.Б. Бирюков