

На правах рукописи

Антонов Валерий Иванович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОРГАНИЗАЦИИ
НАГРЕВА СЛИТКОВ И ПОКОВОК КАК СПОСОБ ЭКОНОМИИ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ**

Специальность 05.14.04 — промышленная теплоэнергетика

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Санкт–Петербург — 2002

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном техническом университете

Научный консультант — доктор техн. наук, профессор *К.М.Арефьев*

Официальные оппоненты:

— доктор техн. наук, профессор Анастасиади Г.П.

— доктор техн. наук, профессор Барилевич В.А.

— доктор техн. наук, профессор Шарков А.В.

Ведущее предприятие — ОАО Ижорские заводы.

Защита состоится 4 июня 2002 г. в 16-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.04 в Санкт-Петербургском государственном техническом университете по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, в ауд. 411, ПГК.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Санкт-Петербургского государственного технического университета.

Автореферат разослан "29" апреля 2002 г.

Отзыв на реферат в двух экземплярах, заверенный печатью, просим направить по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Ученый секретарь
диссертационного совета

К.А. Григорьев

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОРГАНИЗАЦИИ НАГРЕВА СЛИТКОВ И ПОКОВОК КАК СПОСОБ ЭКОНОМИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современные экономические условия диктуют новые требования к организации производственных процессов. Создание конкурентно способной продукции может быть осуществлено при выполнении двух важнейших условий. Качество предлагаемой продукции должно удовлетворять общепринятым нормам и быть, как минимум, не ниже среднего. Не менее важной чертой выпускаемых изделий является их себестоимость, которая в большой степени определяется производственными затратами.

В себестоимость продукции включаются постоянные и переменные затраты. Одной из важнейших составляющих переменных затрат является энергоемкость производственного процесса. Учет реальных затрат энергоресурсов в процессе производства – это важный шаг к снижению себестоимости выпускаемых изделий.

Настоящая работа посвящена анализу энергетических процессов при нагреве изделий в камерных печах кузнечно - прессовых цехов заводов тяжелого машиностроения и родственных им предприятиях. При анализе тепловых процессов основной упор сделан на определение полей температуры в нагреваемых изделиях. Это связано с тем, что именно распределение температуры определяет характер напряжений и деформаций и условия формирования структуры по сечению обрабатываемых заготовок, что, в свою очередь, существенным образом влияет на качество поковок. Не менее важно иметь характеристику температурного поля в изделиях при их термической обработке.

Создание необходимого распределения температуры в слитках и поковках требует затрат тепловой энергии, которая выделяется в рабочем пространстве печи. Затраты энергии зависят от того, насколько близко к оптимальному процессу организован нагрев металла. Важной характеристикой этого процесса является время, затраченное на его проведение. Высокая точность в определении длительности нагрева позволяет рационально использовать печные агрегаты и, следовательно, сокращать энергоемкость производства.

Подробное изучение процессов нагрева имеет большое значение при конструировании новых печных агрегатов и создании новых технологий процессов горячей обработки металлов давлением.

Усложнение формы слитков и поковок вызывает необходимость решать задачи нагрева и охлаждения для тел различной геометрической формы.

Решение задачи оптимального функционирования группы печей, обеспечивающих бесперебойную работу кузнечного пресса, требует детального изучения проходящих в них энергетических процессов.

Нагрев и охлаждение изделий в печах – это сложные нестационарные физические процессы, при изучении которых необходимо учитывать особенности конструкции нагревательных устройств, различие в теплофизических свойствах материалов, а также технологических процессов, для осуществления которых необходим нагрев.

Детальное изучение энергетических процессов в нагревательных печах может быть выполнено в результате комплексного подхода к проблеме, что включает в себя натурные эксперименты, а также физическое и математическое моделирование.

Наиболее распространенным методом исследования высокотемпературного нагрева является математическое моделирование. При построении математических моделей подобных явлений принято разделять решение внутренней задачи теплопроводности в нагреваемом материале и ограждающих поверхностях, и задачи внешнего теплообмена, связанной с движением греющих газов и теплопередачи излучением между нагреваемыми поверхностями.

В последнее время на рынке прикладных программ появились крупные пакеты, позволяющие производить расчеты тепломассопереноса с учетом многих теплофизических особенностей. Однако это не снизило интереса к развитию методов расчетов теплообменных аппаратов, в том числе и металлургических печей. Особенный интерес представляют не только сами методы, но, в первую очередь, полученные с их помощью результаты, позволяющие сделать шаг в направлении создания оптимальных производственных циклов.

Целью диссертации является разработка новых методов расчета энергетических процессов в системе камерная печь - нагреваемые изделия, анализ тепловых полей в слитках и поковках, определение затрат энергии, которая необходима для получения требуемых тепловых состояний в металле, а также создание универсальных инструкций по нагреву и охлаждению, способствующих снижению потребления энергии.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработан новый метод расчетов нагрева изделий в камерных печах. Математическая модель позволяет определять влияние на формирование температурного поля в нагреваемых изделиях реального распределения тепловых потоков в системе печь – садка, получаемого в результате расчетов и зависящего от геометрии садки и печи и температуры нагрева. При решении задачи внутреннего теплообмена в изделиях учтены зависимость теплофизических свойств материалов от

температуры, процесс окалинообразования на поверхности и наличие скрытой теплоты фазовых переходов. Для определения энергоемкости процесса на каждом шаге по времени решается уравнение теплового баланса печи. В качестве исходных данных используются самые общие характеристики процесса: расход топлива и его теплотворная способность, температура воздуха из рекуператора, геометрические характеристики садки и печи, данные о теплофизических свойствах материалов. Модель позволяет рассматривать садки из слитков различной формы и размеров, динамические процессы переформирования садок, конструктивные особенности печей.

2. Для расчета теплообмена излучением в рабочем пространстве печи разработан метод селективных угловых коэффициентов, который дает возможность учесть селективность излучения газов на стадии определения коэффициентов матрицы системы зональных уравнений. Определено влияние параметров газовой среды на величину угловых коэффициентов, проведен сравнительный анализ точности определения лучистых тепловых потоков по различным моделям. Метод позволил существенным образом сократить объем вычислительной работы. Для решения уравнения теплопроводности в областях сложной формы предложен метод построения дискретного аналога на треугольных сетках. Определена зависимость распределения температуры по сечению слитков и поковок от их геометрической формы.

3. Проведено исследование влияния неравномерности теплового потока по поверхности нагреваемых изделий на длительность прогрева. Дана оценка погрешности проводимых вычислений в зависимости от точности определения теплофизических параметров веществ.

3. С помощью разработанной математической модели проведено детальное исследование нагрева садок различного типа в камерной печи и охлаждения их на воздухе. Результаты расчетов длительности процессов представлены в виде номограмм в обобщенных координатах. Определено влияние на качество нагрева геометрии печи и садки и скорости подъема температуры печи, зависящей от тепловой мощности.

4. Определены затраты тепловой энергии в различных режимах работы печей. Дан сравнительный анализ энергоемкости процесса нагрева при различных способах его проведения. Проведен анализ затрат энергии на аккумуляцию и потери тепла в различных режимах работы кладки печи.

5. Разработаны новые вычислительные алгоритмы и программы для ЭВМ, которые позволили существенно снизить трудоемкость проведения вычислений.

Практическая ценность работы состоит в том, что результаты проведенных исследований использованы на ряде заводов тяжелого машиностроения в качестве инструкций для проведения процессов нагрева и охлаждения металла. Полученные результаты могут быть применены для решения задач оптимизации нагрева и создания систем автоматического управления производством. Программы для ЭВМ использованы в ВНИПИ «Теплопроект» для проведения исследования работы печей и в СПбГТУ для занятий со студентами.

На защиту выносятся:

- методика определения времени нагрева сложных садок из крупных слитков в камерных печах;
- методика определения полей температуры в изделиях различной формы, в том числе шести и восьмигранной;
- методика определения аккумуляции тепла кладкой печи и затрат энергии, необходимой для проведения процесса нагрева;

- методика расчета лучистого теплообмена в рабочем пространстве нагревательной печи с учетом селективности излучения и поглощения греющих газов с помощью селективных обобщенных угловых коэффициентов;
- исследование влияния неравномерности теплового потока на время прогрева цилиндрических заготовок;
- результаты расчетов поля температуры в нагреваемых изделиях и кладке печи;
- результаты расчетов общей длительностей нагрева и выдержки при постоянной температуре печи садок из одного двух, трех и пяти слитков;
- результаты расчетов полей температуры и времени охлаждения на выдвинутой подине сложных садок из плит и цилиндров;
- результаты расчетов полей температуры в зеркале, нагреваемом в электрической печи;
- результаты расчетов затрат энергии, необходимой для проведения процесса нагрева.

Апробация работы. Основное содержание диссертационной работы докладывались автором на

1. Республиканской конференции «Печи и сушила тяжелой промышленности». Краматорск, 1975.
2. Республиканской конференции «Проблемы тепловой работы металлургических печей». Днепропетровск, 1976.
3. Республиканской конференции «Интенсификация работы металлургических печей». Свердловск, 1982.
4. Всесоюзной конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии». Иваново, 1985.
5. 11 международном форуме по тепло- и массообмену. Минск, 1992.
6. На международных семинарах 'International Faculty Development Conference': Москва, 1996; Прага, 1997, Варшава, 1998. С.-Петербург, 1999.
7. На международных конференциях «Tools For Mathematical Modelling» . С.-Петербург, 1997, 1999 и 2001 г.
8. На семинарах кафедр «Промышленная теплоэнергетика», «Компьютерные технологии и эксперимент в теплофизике», 2001 г. и «Пластическая обработка металлов» 2002 г., СПб ГТУ.

Публикации. По теме диссертации автором опубликовано 36 работ. Основные публикации приведены в конце автореферата.

Объем диссертации. Диссертационная работа содержит 189 страниц текста, 84 рисунка, 18 таблиц и состоит из введения, семи глав, заключения, приложения и списка литературы, содержащего 191 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе рассмотрены математические модели теплообмена в теплообменных аппаратах. Отмечено, что моделирование высокотемпературного нагрева изделий в печах требует детального рассмотрения трех взаимосвязанных процессов теплообмена: теплопроводности, конвекции и излучения. Для решения задачи

теплопроводности наибольшую популярность приобрел метод сеток. Моделирование турбулентных течений может быть выполнено, например, с помощью квазиламинарного приближения, основанного на концепции турбулентной вязкости. Однако такой подход требует значительных вычислительных ресурсов и в целом ряде задач конвективный теплообмен целесообразно определять через коэффициент теплоотдачи.

Для решения задач теплообмена излучением разработаны различные модификации зонального метода. Для газов, которые образуются в результате горения углеводородных топлив, необходимо учитывать селективность их спектра поглощения и излучения. В конце главы приведен вывод уравнений лучистого теплообмена, которые в дальнейшем используются для разработки численного метода селективных угловых коэффициентов.

Рассмотренные в первой главе методы решения задач кондуктивного, конвективного и лучистого теплообмена позволяют проводить исследование указанных процессов с различной степенью детализации. Для решения задач теплообмена в твердых телах чаще всего применяют метод сеток. Для областей классической формы возможны различные способы построения дискретного аналога и выбора метода решения полученной системы алгебраических уравнений. В случае областей сложной геометрической формы возникает проблема аппроксимации граничных условий. Решение задач конвективного теплообмена на основе моделирования турбулентного течения газов приводит к увеличению в несколько раз объема вычислительной работы, в связи с чем остается целесообразным учет конвекции путем введения коэффициента теплоотдачи. Задачу теплообмена излучением можно решать зональными методами, при этом следует учитывать селективность излучения и поглощения газовой среды.

Во второй главе проведен анализ технологии и организации нагрева металла для последующей обработки давлением. Целью исследования стало определение возможности оптимизации процесса по двум критериям: качеству нагрева, которое предполагает создание необходимого температурного поля в металле за определенное время, и расходу тепловой энергии, выделяемой в рабочем пространстве печи. Сделан вывод о том, что процессы перераспределения тепловой энергии в камерных печах и нагреваемых изделиях не являются полностью изученными, поэтому более детальное рассмотрение энергетических особенностей явления будет способствовать улучшению качества продукции и снижению её себестоимости. Однако для решения задачи оптимизации нагрева в указанной постановке и полном объеме требуется создание моделей более высокого уровня сложности и, как следствие, существенное увеличение длительности и стоимости проводимых исследований.

Разумным выходом из создавшейся ситуации является поэтапное моделирование технологических процессов, а также создание на основе проведенных исследований универсальных инструкций для персонала в качестве систем поддержки принятия оперативных решений.

Анализ термических циклов производства поковок выявил следующие температурные превращения, совершаемые изделием: охлаждение слитка после разлива и в процессе транспортировки в кузнечно-прессовый цех; горячая консервация и подогрев холодных слитков в печах-накопителях; нагрев перед ковкой; охлаждение нагретого слитка при транспортировке к прессу и при ковке (штамповке, прокатке); промежуточные нагревы; консервация поковок в термических печах и проведение в них различных режимов предварительной термической обработки.

Следует заметить, что связь кузнечно-прессового со сталеплавильным цехом зачастую является нестабильной. Данное обстоятельство делает входной поток слитков трудно управляемым, что приводит к необходимости создавать определенное количество резервных разогретых, а иногда и холодных слитков, необходимое для бесперебойной работы прессового оборудования. Несмотря на это, требование максимизации температуры поступающих слитков следует рассматривать как одну из возможностей более экономного использования топлива.

Основная цель процесса горячей консервации в печах-накопителях – ослабление влияния неупорядоченности входного потока слитков, поступающих из сталеплавильного цеха. Процесс характеризуется высокой нестабильностью по продолжительности. Весь расход энергии направлен на поддержание постоянной температуры слитков на уровне 600–800 °С.

Аналогичным образом можно охарактеризовать процесс консервации поковок в термических печах при формировании садок.

Нагрев является основной операцией при подготовке слитка к горячей обработке давлением. Тепловое воздействие на металл приводит к значительной потере им упругих свойств, к уменьшению (в десятки раз) его сопротивления деформации и к повышению (на десятки процентов) пластичности. Конечное тепловое состояние слитка определяется последующими технологическими операциями горячей обработки давлением и является основой проведения процесса нагрева.

Кроме полезных, процесс нагрева слитков обладает и целым рядом вредных явлений.

К числу наиболее вредных явлений, вызываемых нагревом, относятся окалинообразование, порча поверхности металла, приводящие к неисправимым дефектам. Неправильное ведение процесса приводит к пережогу стали и образованию трещин вследствие тепловых напряжений.

Оптимальный термический режим горячей обработки давлением должен способствовать успешному проведению этого процесса, причем вредное влияние теплоты должно быть по возможности ограничено и обеспечено высокое качество поковок.

При выборе оптимальной скорости нагрева, непосредственно связанной с затратами топлива, необходимо учитывать то обстоятельство,

что обычно работу одного пресса обеспечивает группа печей. Поэтому процесс нагрева надо проводить так, чтобы минимальным было суммарное потребление топлива. Таким образом, необходимо решать задачу оптимизации работы всего оборудования кузнечно-прессового цеха с учетом потребления топлива всеми нагревательными устройствами.

Рассмотренные в главе особенности нагрева слитков под ковку позволили сделать следующие выводы. Процессы перераспределения тепловой энергии в камерных печах и нагреваемых изделиях полностью не изучены. Более детальное рассмотрение энергетических особенностей явления будет способствовать улучшению качества выпускаемой продукции и снижению её себестоимости. Наиболее рациональным инструментом исследования является математическое моделирование. Модель должна с достаточной степенью корректности описывать как отдельные процессы, так и взаимосвязи между ними. Однако слишком высокая детализация может привести к неоправданному увеличению длительности и стоимости расчетных исследований.

В третьей главе описана математическая модель нагрева слитков и поковок в камерных печах. В процессе создания модели приняты во внимание следующие особенности тепловых процессов при нагреве слитков под ковку: нестационарность и неоднородность температурного поля греющих газов в рабочем пространстве печи, нестационарный режим работы кладки, существенная несимметричность нагрева и образование окисла на поверхности нагреваемых изделий, многообразие видов садок и начального теплового состояния слитков.

Нагрев крупных слитков в пламенных камерных печах для последующей обработки давлением состоит из двух периодов: подъема температуры печи от 800 – 1000 °С до 1200 – 1300 °С и последующей изотермической выдержкой при постоянной температуре печи около 1220 °С. Темп подъема определяется тепловой мощностью печи и массой нагреваемой садки. Он ограничивается тепловыми напряжениями в металле при температурах, меньших 400 °С (при больших температурах сталь переходит в пластическое состояние) а также возможными локальными перегревами в зоне факелов горелочных устройств, где может произойти плавление металла.

Нагрев происходит за счет выделения энергии в результате горения топлива и физической теплоты, вносимой горючим и окислителем. Выделенная и внесенная теплота идут на нагрев металла, аккумуляцию и потери тепла через кладку и заднюю крышку печи, а также частично уходят с отходящими газами. Теплообмен в рабочем пространстве печи характеризуются преобладанием лучистой составляющей над конвективной. Температура греющих газов изменяется в процессе нагрева в зависимости от времени и пространственных координат.

При моделировании внутреннего теплообмена в металле учтено различие теплофизических свойств у сталей разных марок, наличие скрытой теплоты структурных превращений, широкий диапазон

начальных температур слитков, а также процесс окисления металла на поверхности. Внутренний теплообмен в цилиндрических слитках описывается системой из двух нестационарных уравнений теплопроводности с условиями однозначности для металла и оксида. Для металла

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial \varphi} \right) = c_1 \rho_1 \frac{\partial T}{\partial t}, \quad c \rho = \frac{a}{\lambda}, \quad (1)$$

$$0 < r \leq R_1, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi,$$

для оксида

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial \varphi} \right) = c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t}, \quad (2)$$

$$R_1 \leq r \leq R_2, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi.$$

Граничные условия на поверхности оксида

$$\lambda \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = q_p + Q_M \frac{dM}{dt}. \quad (3)$$

Здесь q_p - результирующий тепловой поток на поверхность слитка, Вт/м²;

Q_M - теплота окисления 1 кг металла, Дж/кг.

Условия периодичности

$$T_i \Big|_{\varphi=0} = T_i \Big|_{\varphi=2\pi}; \quad \lambda_{i0} \frac{\partial T_i}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=0} = \lambda_{i2\pi} \frac{\partial T_i}{\partial \varphi}, \quad i = 1, 2. \quad (4)$$

На границе раздела металла и оксида

$$T_1 \Big|_{r=R_1} = T_2 \Big|_{r=R_1}; \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=R_1}, \quad (5)$$

начальные условия

$$T \Big|_{t=0} = T(r, \varphi). \quad (6)$$

В ряде случаев можно предположить, что к началу нагрева в слитках устанавливается распределение температуры параболическое по радиусу и

постоянное по углу $T(r) = \frac{T_B - T_C}{R^2} r^2 + T_B$, что и принято в расчетах.

Учитывая тот факт, что граница раздела металла и оксида движется со временем вследствие перехода металла в окалину, при составлении разностных уравнений, аппроксимирующих систему (1) – (6) применен метод движущихся узлов. При этом скорость движения границы определяется кинетикой образования окалины и соотношением толщины окалины и массы перешедшего в окалину металла.

Толщина слоя оксида связана с массой металла M , перешедшего в окалину с 1 м² поверхности соотношением $\delta = (R_2 - R_1) = 1,33M / \rho_2$.

Скорость образования окалины выражается уравнением

$$\frac{dM}{dt} = \left(\frac{K_0}{2} \exp(-B/\bar{T}_2) \right) / M, \quad (7)$$

где K_0, B - постоянные, \bar{T}_2 - средняя по толщине температура оксида. Учитывая предыдущее соотношение, получаем

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{K_0 \cdot 1,33^2}{2\rho_2^2 \delta} \exp(-B/\bar{T}_2), \quad (8)$$

а скорость движения границы металла и оксида

$$\frac{dR_1}{dt} = -\frac{1}{\rho_1} \frac{dM}{dt} = -\frac{1,33 K_0}{2\rho_1 \rho_2 \delta} \exp(-B/\bar{T}_2). \quad (9)$$

Координаты каждого узла сетки являются функциями времени и определяются из следующих соотношений:

Для металла

$$r_i(t) = \frac{i}{m} R_1(t), \quad i = 0, \dots, m, \quad (10)$$

где $R_1(t)$ - координаты границы металла и оксида в момент времени t .

Для окалины

$$r_j(t) = R_1(t) + \frac{j}{n} \delta(t), \quad j = 0, \dots, n. \quad (11)$$

Таким образом, температура становится сложной функцией от времени $T = T(r(t), t)$, а её производная выражается как

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial r} \frac{dr}{dt}. \quad (12)$$

Последнее выражение нужно подставить в уравнения (1) и (2).

Поглощение теплоты в интервале температур, при которых происходят структурные превращения в металле, учитывается путем включения теплоты структурных превращений в эффективную теплоемкость

$$c_{эф} = c + q_{cn}, \quad q_{cn} = \frac{dq}{dt}, \quad q = \int_{T_1}^{T_2} q_{cn} dT, \quad q_{cn} - \text{спектральная по температуре}$$

теплота внутренних превращений, T_1 и T_2 - температуры начала и окончания процесса.

При моделировании теплообмена в кладке печи учитывается, что она состоит из двух слоев (щамот и легковесный щамот). Для каждой области решают задачу теплопроводности

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) = \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial t}, \quad i = 1, 2; \quad (13c)$$

граничными условиями на внутренней границе $-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_p$;

на границе слоев $T_1|_{x=x_0} = T_2|_{x=x_0}$, $\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x}|_{x=x_0} = \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x}|_{x=x_0}$; на внешней границе $-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}|_{x=l} = \alpha(T - T_E)$. (14)

Коэффициент теплоотдачи α равен сумме конвективного и лучистого.

Для определения результирующих тепловых потоков на металл и кладку на каждом шаге по времени решается совместно уравнение теплового баланса печи и система зональных уравнений. Принято, что в каждый момент времени температура задней стенки и крышки равна средней температуре боковых стенок печи, а температуры торцевых поверхностей слитков равны средним температурам соответствующих боковых поверхностей. С учетом сделанных предположений уравнение теплового баланса приобретает вид

$$B(Q_H^P + q_T + q_B) - B(c_g \rho_g T_g + q_3 + q_4) = \sum_{k=1}^{n_1} q_{pk}^M S_k^M + \sum_{k=n_1}^n q_{pk}^K S_k^K + \Delta q^{M+K}. \quad (15)$$

Система зональных уравнений, записанная для серого приближения:

$$-\frac{q_{pi}}{a_i} + \sum_{k=1}^n \frac{r_k}{a_k} \psi(i, k) q_{pk} = -\sum_{q=1}^m \psi_{s-v}(i, q) \sigma_0 T_q^4 - \sum_{k=1}^n \psi(i, k) \sigma_0 T_k^4 + \sigma_0 T_i^4, \quad (16)$$

Для замыкания системы уравнений принято следующее соотношение между температурами греющих и уходящих газов: $T_s = T_g + 30$, К.

Распределение температуры между изотермическими газовыми зонами принято таким, что её среднее значение равно температуре, определяемой из последнего уравнения, т.е. $\sum_{q=1}^m T_q V_q = T_g V_g$, где V - объем свободного пространства печи, $V_q - q$ -ой изотермической зоны. Если ввести в рассмотрение величину неравномерности температуры по объему

$$\Delta T_q(t) = T_g(t) + \Delta T_q(t), \text{ то получаем следующее: } \sum_{q=1}^m \Delta T_q V_q = 0. \text{ Для решения}$$

полученной нелинейной системы уравнений применен метод, аналогичный методу половинного деления для трансцендентных уравнений.

Переход от режима подъема температуры печи к режиму выдержки осуществляется после достижения заданной температуры печной термопарой, которая рассматривается как небольшой шар. Её температура T_n определяется из уравнения, учитывающего однократное отражение лучистых потоков

$$a_n T_n = a_K \psi_1 T_K^4 + a_M \psi_2 T_M^4 + \varepsilon_g T_g^4. \quad (17)$$

В период выдержки из уравнения (8) находят температуру греющих газов из условия $T_n = Const$, а из уравнения теплового баланса определяют необходимый расход газа.

Для исследования процессов нагрева в электрических печах и охлаждения изделий на воздухе разработаны аналогичные модели.

Для областей сложной геометрической формы в работе представлен метод решения задач теплопроводности, основанный на законах Фурье и сохранения энергии. Разобьем область на треугольники малых размеров (рис.1). Граница области аппроксимируется ломаной линией. При малых размерах треугольников температура в них меняется по линейному закону $T(x,y,t)=A_0+A_1x+A_2y$. Внутренняя энергия k -го элемента в фиксированный момент времени может быть вычислена как

$$\Theta_k = l \iint_{S_k} c \rho T(x, y) dx dy = c \rho T_k S_k l = \frac{\lambda}{a} T_k S_k l, \quad (18)$$

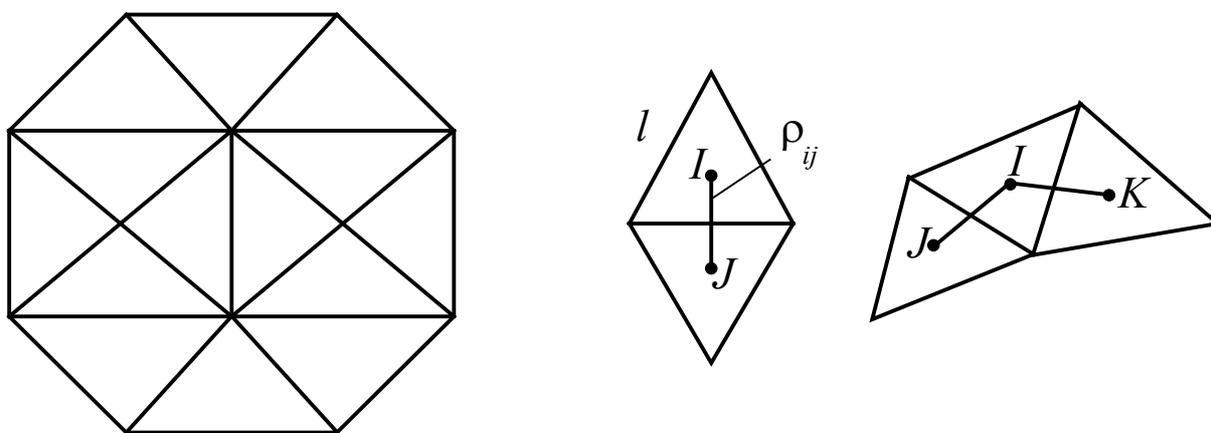


Рис.1. Разбиение области на элементы

Поток через ребро, разделяющее два элемента, линейно выражается через их внутренние энергии:

$$q_{ij} = -\lambda \text{grad} T_{r_{ij}} = \lambda \frac{T_i - T_j}{r_{ij}} = \frac{\lambda}{r_{ij}} \left(\frac{a}{\lambda} \left(\frac{\Theta_i}{S_i} - \frac{\Theta_j}{S_j} \right) \right), \quad \frac{Bm}{m^2}. \quad (19)$$

Количество теплоты, проходящее через ребро в единицу времени

$$Q_{ij} = q_{ij} L_{ij} l = a \left(\frac{\Theta_i}{S_i} - \frac{\Theta_j}{S_j} \right) \alpha_{ij} l, \quad Bm. \quad (20)$$

. Рассмотрим переменную внутренних энергий $\{\Theta\} = \{\theta_1, \dots, \theta_m\} \in \mathfrak{R}_m$; переменную тепловых потоков $\{Q^{(n)}\} = \{q_1^{(n)}, \dots, q_n^{(n)}\} \in \mathfrak{R}_n$, где m – количество элементов, n – ребер. Тогда $\{Q^{(n)}\} = B \{\Theta\}$. Затем находим изменение внутренних энергий $\Delta\Theta = \Delta\tau(Q_\alpha^n + Q_\beta^n + Q_\gamma^n)$, и получаем постоянную матрицу A для определения изменения величины Θ . Последние формулы дают явную вычислительную схему

$$\{\Theta^{k+1}\} = \{\Theta^k\} + AB \{\Theta^k\} = (E + AB) \{\Theta^k\}, \quad \{\Theta^0\} = \{\Theta_0\}. \quad (21)$$

Разработанная математическая модель позволяет рассчитывать основные закономерности процесса, задавая наиболее общие параметры: теплофизические характеристики топлива, нагреваемых изделий и кладки печи, геометрии печи и садки. Учитывается процесс окалинообразования и теплота структурных превращений в металле. Лучистый теплообмен рассчитывается зональным методом. Конвективная составляющая теплового потока определяется через коэффициент теплоотдачи. Модель позволяет находить распределение температуры в изделиях и кладке в любой момент времени. Для оценки энергоемкости производства на каждом шаге по времени определяют необходимый расход топлива. Учитывается расположение изделий на поде печи, а также процесс переформирования садок при последовательной выдаче слитков на ковку. Модель охлаждения изделий аналогична модели нагрева.

В четвертой главе дан анализ математической модели и определены погрешности расчетов. Для проверки адекватности модели проведено сравнение результатов расчетов с данными, полученными рядом авторов при экспериментальном исследовании нагрева садок в пламенных камерных печах и охлаждения на воздухе. Идентификация проводилась по характерным точкам – наибольшей и наименьшей температуре поверхности, а также температуре центра слитков.

На рис.2 представлены зависимости от времени указанных температур верхнего цилиндра садки из трех слитков, полученные при экспериментальном изучении режима горячего посада в печь Ижорского завода и расчетным путем. Печь мазутная, форсунки расположены в два ряда по высоте печи (по восемь штук на каждой боковой стенке).

Наибольшая относительная погрешность при определении температуры поверхности составила 14% для одной и 6% для двух газовых зон. Неравномерность по поверхности в обоих случаях также близка к экспериментальной. Относительная погрешность в определении температуры центра к моменту выдержки составила 2%.

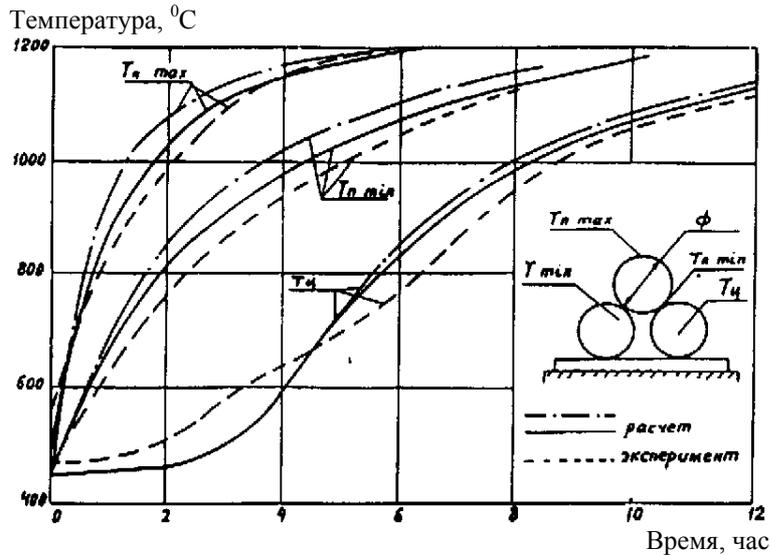


Рис.2. Изменение расчетных и экспериментальных значений температуры в опытном слитке массой 51 т. Эксперимент (.....); расчет: (-----) две объемные зоны, (---) одна.

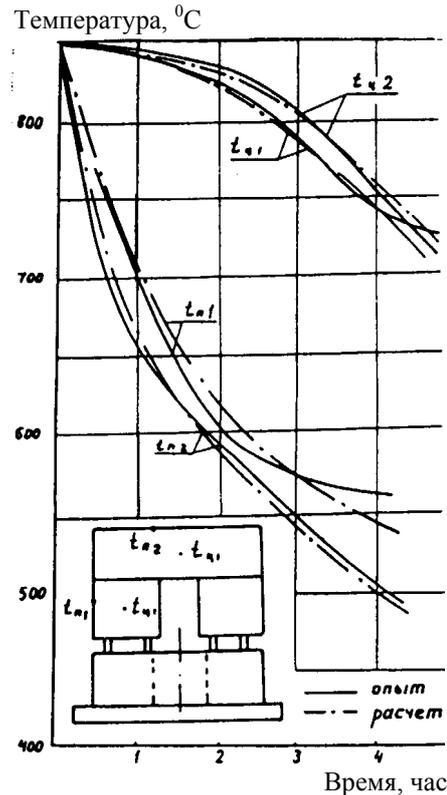


Рис.3. Изменение расчетных и экспериментальных значений температуры при охлаждении садки на выдвинутой подине

На рис.3 представлены расчетные и экспериментальные зависимости температуры поверхности и центра при исследовании процесса охлаждения сложной садки на выдвинутой подине. Относительная погрешность в определении температуры поверхности не превосходит 6%, а температуры центра 2%.

При численно-аналитическом исследовании модели погрешности разбиты на две категории. К первой отнесены ошибки в определении тепловых потоков в системе печь – нагреваемые изделия, к другой – в расчетах поля температуры, связанные с погрешностями аппроксимации и неточностью в задании теплофизических свойств веществ. Погрешности аппроксимации, связанные с выбором численного метода, определяли путем сравнения точного решения уравнения теплопроводности, полученного в виде $T = (\delta t + \alpha x + \beta y + \gamma)^n$ и приближенного, которое находили методом сеток. Получено, что расхождения, связанные с выбором численного метода, можно устранить выбором оптимального соотношения шагов по координатам и времени. В то же время погрешности в определении теплофизических характеристик веществ оказывают существенное влияние на точность расчетов.

Исследование влияния неравномерности теплового потока по поверхности нагреваемых изделий на время прогрева показало, что большая часть тепловой энергии уходит на уменьшение этой

неравномерности, в связи с чем возникает задача рационального размещения слитков на поде печи.

Проведено исследование зависимости погрешности в определении температуры в изделиях от ошибок в задании теплофизических свойств материалов. Получено, что эта зависимость близка к линейной.

С помощью метода балансов определено влияние формы изделий, а также теплопередачи на торцах слитков на точность определения длительности прогрева. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения максимального перепада температуры, ($^{\circ}\text{C}$), по поверхности и сечению нагреваемых изделий различной формы

Форма слитка	$\Delta q = 0$		$\Delta q = 0,66 \cdot 10^4$		$\Delta q = 1,33 \cdot 10^4$		$\Delta q = 1,98 \cdot 10^4$	
	$\Delta T_{\text{пов}}$	$\Delta T_{\text{сеч}}$	$\Delta T_{\text{пов}}$	$\Delta T_{\text{сеч}}$	$\Delta T_{\text{пов}}$	$\Delta T_{\text{сеч}}$	$\Delta T_{\text{пов}}$	$\Delta T_{\text{сеч}}$
Цилиндрическая	0	162	110	227	215	295	320	387
Шестигранная	0	170	104	235	203	281	307	364
Восьмигранная	0	167	106	232	210	289	312	379

Проведен анализ влияния окалинообразования на процессы нагрева. Принято во внимание, что степень черноты поверхности оксида меняется в зависимости от длительности пребывания слитка в печи.

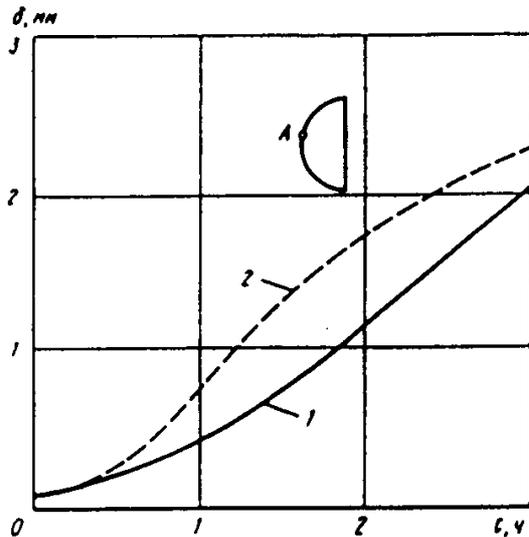


Рис.4. Зависимость толщины слоя окалины от времени в точке А:

1 – $W=20 \text{ м}^3 / \text{м}^2$, 2 – $W=40 \text{ м}^3 / \text{м}^2$

Результаты расчетов при различных значениях расхода топлива W на квадратный метр пода печи представлены на рис.4.

Сравнение экспериментальных данных и результатов расчетов по модели выявили следующее. Модель правильно отражает основные черты энергетических процессов при нагреве, такие как геометрию печи и садки, вид топлива, свойства нагреваемых материалов, а также позволяет имитировать различные режимы нагрева. Важной отличительной чертой модели является возможность

определять затраты энергии, необходимые для проведения процессов нагрева. Оценка относительных погрешностей в определении неравномерности температуры по поверхности изделий и центра составляют 10 и 2% соответственно.

Проведенные численные эксперименты показали, что модель адекватно реагирует на изменение входных данных. В то же время

дальнейшая детализация в рассмотрении отдельных процессов, сопутствующих перераспределению энергии в системе печь – нагреваемые изделия приведет к значительному росту объема вычислений.

В пятой главе представлен специально разработанный для данного класса задач метод расчета теплообмена излучением, позволяющий учитывать селективность излучения газов на стадии вычисления обобщенных угловых коэффициентов. При выводе основных соотношений метода использовали определение углового коэффициента $\psi_{i,k}$

$$\psi_{i,k} = \frac{1}{\pi \sigma_0 T_i^4 S_i} \iint_{S_i, S_k} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_k}{\rho^2} \int_0^{\infty} E_{0\lambda}^i \exp(-K_\lambda \rho) d\lambda dS_i dS_k. \quad (22)$$

В случае серого газа ($K_\lambda = K$) формулы для определения обобщенных угловых коэффициентов для цилиндрических поверхностей приобретают вид

$$\psi_{di,k} = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \exp(-K\rho) \cos \beta \cos^2 \theta d\beta d\theta. \quad (23)$$

Для серой поверхности и селективно поглощающего газа

$$\psi_{di,k} = \frac{C_1}{\pi \sigma_0 T^4} \int_{0,75 \cdot 10^{-6}}^{40 \cdot 10^{-6}} \frac{\lambda^{-5}}{\exp(C_2 / \lambda T) - 1} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \exp(-K_\lambda \rho) \cos \beta \cos^2 \theta d\beta d\theta d\lambda. \quad (24)$$

Для аппроксимации зависимости коэффициента поглощения среды от длины волны использованы двухпараметрические модели [Шака], Пеннера и трехпараметрическая модель Эдвардса, а также проведены расчеты по серой модели с использованием формулы В.В. Митора и А.М. Гурвича. Суммарный коэффициент поглощения среды вычисляли по формуле

$$K_\lambda = K_{CO_2} p_{CO_2} + K_{H_2O} p_{H_2O}. \quad (25)$$

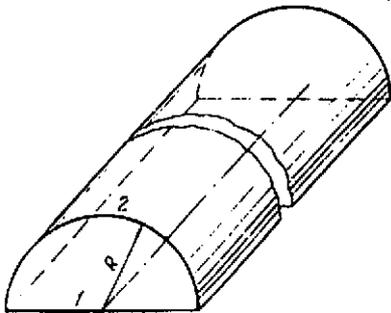


Рис.5. Излучающие поверхности

Проведен анализ точности серой, селективно серой и модели селективно серых коэффициентов. Рассмотрена система, состоящая из двух поверхностей с различными (a_1, a_2) поглощательными способностями и одного газового объема, приведенная на рис.5.

Расчеты проведены при следующих значениях: $R=0,5; 2,0; 4,0$ м; $a_1=0,9; a_2=0,7;$

$p_{CO_2}=0,1; p_{H_2O}=0,2, H / м^2$ и различных

значениях (T_1, T_2) температуры поверхностей. Серые и селективно

серые угловые коэффициенты определяли по методике, описанной ранее. Интегралы вычисляли по методу Симпсона с автоматическим выбором шага. При расчетах по селективно серой модели весь спектр излучения разбивали на 10 полос.

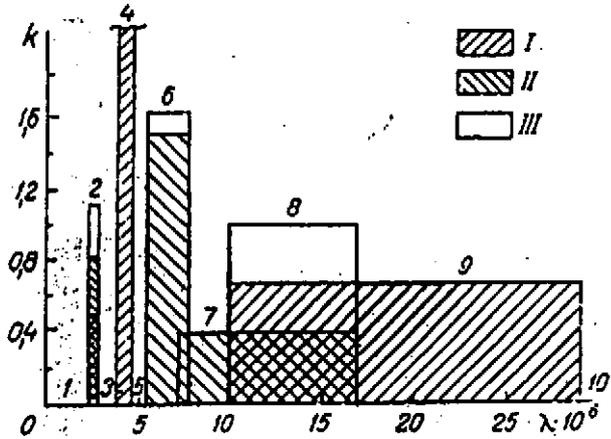


Рис.6. Спектральные диапазоны излучающего газа:
 $\lambda \cdot 10^6$, м; K , m^{-1}

На рис.7 представлены зависимости результирующих тепловых потоков на поверхности 1, QR_1 , и 2, QR_2 (см. рис.6) от температуры газа для различных значений радиуса R и начальных температур поверхностей $T_1=500$ °С и $T_2=1000$ °С. Расчеты при других температурах аналогичны.

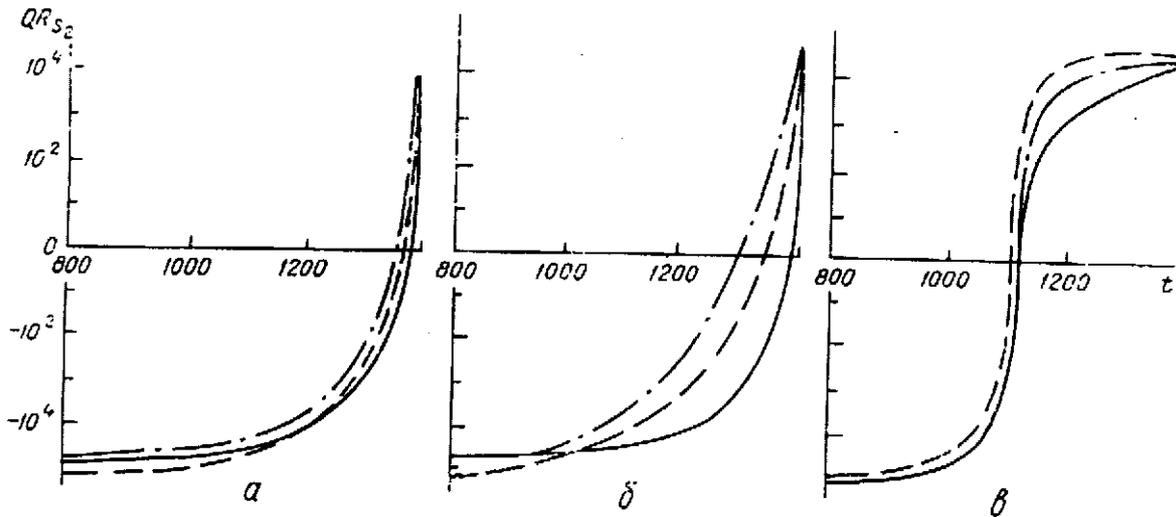


Рис.7. Зависимость теплового потока на поверхность 2 от T_g (а,б,в – $R=0,5; 2,0$ и $4,0$ м): 1 – селективно-серое приближение; 2–селективно–серые угловые коэффициенты; 3–серое приближение. $T, ^\circ C$; $QR, Вт/м^2$

Из рисунков следует, что все три модели одинаково отражают основные свойства результирующих тепловых потоков в излучающей системе. В то же время абсолютные значения тепловых потоков могут отличаться на 20 – 25%, что может служить оценкой точности расчетов по серой модели.

В таблице 2 приведены значения результирующих тепловых потоков в различных полосах излучения. Видно, что основной вклад в суммарный теплообмен вносят полосы 1 – 8. В остальных полосах излучается и

поглощается около одного процента всей лучистой энергии, поэтому в расчетах ими можно пренебречь.

Таблица 2 Тепловые потоки на поверхности в различных полосах излучения ($R=2,0$)

Температура газов, °С	Границы полос тепловые потоки		Полоса, номер									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1000	Границы, мкм	Нижняя	0,2	0,25	0,290	0,387	0,485	0,528	0,781	1,01	1,71	2,92
		Верхняя	0,25	0,290	0,387	0,485	0,528	0,781	1,01	1,71	2,92	4,0
	Потоки, Вт/м ²	1	2,2	2,3	2,7	2,2	0,48	1,8	0,53	0,42	0,09	0,01
2		-2,3	-6,5	-2,9	0	-0,51	-0,03	-0,16	-0,03	-0,02	-0,01	
1200	Границы, мкм	Нижняя	0,2	0,25	0,296	0,386	0,487	0,52	0,791	0,985	1,81	3,13
		Верхняя	0,25	0,296	0,386	0,487	0,52	0,791	0,985	1,81	3,13	4,0
	Потоки, Вт/м ²	1	2,2	4,3	2,6	3,5	0,44	2,9	0,59	0,67	0,11	0,01
2		-2,3	2,3	-2,8	1,7	-0,46	1,1	0,00	0,18	0,01	-0,01	
1400	Границы, мкм	Нижняя	0,2	0,25	0,29	0,38	0,489	0,519	0,803	0,986	1,91	3,38
		Верхняя	0,25	0,29	0,38	0,489	0,519	0,803	0,986	1,91	3,38	4,0
	Потоки, Вт/м ²	1	2,2	5,9	2,8	5,2	0,34	4,0	0,58	0,94	0,11	0,00
2		-2,3	4,6	-2,9	3,7	-0,36	2,5	0,01	0,41	0,03	-0,00	

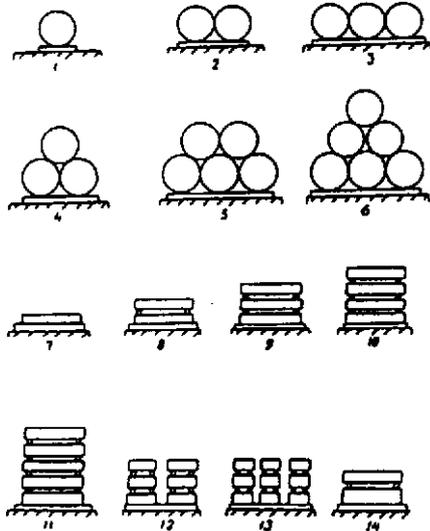


Рис.8. Характерные садки

Выводы. Специально проведенный анализ точности решения задачи лучистого теплообмена между поверхностями, разделенными селективно поглощающей средой, дал оценку погрешности в определении тепловых потоков на поверхности в 20 – 25%. Однако расчет по более точной селективно серой модели приводит к значительному увеличению количества вычислительной работы. Для теплообмена в камерных печах, где температуры поверхностей и объемов лежат в пределах 400 – 2000 °С, разработан метод селективно серых угловых коэффициентов, который позволяет учесть селективность излучения на стадии определения коэффициентов системы зональных уравнений. Дальнейшие вычисления проводят по тем же формулам, что и в случае серого приближения. Применение селективных угловых коэффициентов позволило снизить погрешность в определении тепловых потоков до 10 – 15%.

В шестой главе приведены результаты расчетов длительности нагрева изделий в камерных печах и охлаждения их на воздухе.

Размещение слитков и поковок на поде печи представлено на рис.8. Основная часть расчетов выполнена для слитков из среднелегированной стали, обладающей наименьшими значениями тепло- и температуропроводности.

Основные расчеты проведены для печей кузнечно-прессовых цехов Уральского завода тяжелого машиностроения, Ижорского и Обуховского заводов. Рассчитан следующий режим нагрева садок: подъем температуры по мощности печи от начальной (650 – 850 °С) до 1220 °С и выдержка при постоянной температуре печи. Расчеты заканчиваются, если минимальная температура металла в садке достигает 1170 °С, а неравномерность температуры по поверхности станет меньше 30 °С.

Таблица 3. Начальное тепловое состояние слитков

Категория слитка	Начальная температура	Диаметр, мм						
		900	1116	1300	1500	2000	2150	2300
«Теплые»	$T_{ц}$	700	850	900	920	770	750	730
	$T_{г}$	500	520	520	520	520	500	500
«Горячие после термоса»	$T_{ц}$	900	1050	1100	1050	950	925	900
	$T_{п}$	700	650	650	650	650	650	650
«Горячие послековки»	$T_{ц}$	850	950	1010	1030	1070	1050	1050
	$T_{п}$	750	750	770	810	870	950	970

Предполагалось, что садка занимает большую часть пода. Данные о начальном распределении температуры представлены в таблице 3.

Принято, что в процессе транспортировки в слитках устанавливается регулярный режим охлаждения, по этому начальное распределение температуры является параболическим. Температуры поверхности ($T_{п}$ °С) и центра ($T_{ц}$ °С) соответствуют границе областей «теплые» и «горячие».

Проведено сравнение результатов расчетов по математической модели и по номограммам $В_i - F_0$ при изменяющейся температуре среды для садок из одного, трех и пяти слитков. Получено, что длительность выдержки по номограммам меньше расчетной на 10 – 17% вследствие того, что в первом случае не учитывается неравномерность температуры по поверхности.

Для решения уравнения теплового баланса печи приняты следующие значения параметров:

$$Q_H^P = 34000 \text{ кДж/м}^3, \text{ природный газ; } q_3 + q_4 = 0,02Q_H^P, \text{ кДж/м}^3;$$

$$q_B = c_B \rho_B T_B 1,2L_0, \text{ кДж/м}^3; \quad q_g = c_g \rho_g T_g (1,2L_0 + 1), \text{ кДж/м}^3.$$

$L_0 = 9,81 \text{ м}^3/\text{м}^2$ – количество воздуха на единицу топлива; $\rho_B = 1,2 \text{ кг / м}^3$ – плотность воздуха; $c_B = 1,04 \text{ кДж / (кг К)}$ – теплоемкость воздуха; $\rho_g = 1,23 \text{ кг / м}^3$ – плотность газов; $c_g = 1,31 \text{ кДж / (кг К)}$ – теплоемкость газов.

По результатам расчетов построены номограммы в обобщенных координатах $\Theta = f(F_0)$, где $\Theta = T/T_0$ есть отношение температуры в

наименее прогретой точке слитка к начальной среднемассовой температуре слитка при тепловой мощности печи $W_0=200$ кВт/м², что соответствует расходу топлива $B_0=20$ м³/м² ч (рис.9,10,11,12). Коэффициент теплопроводности, входящий в критерий Fo , определяли как средний во всем интервале изменения температур. Результаты расчетов обработаны таким образом, что определяется наибольшее время нагрева для всей группы печей, т.е. номограммы дают длительность прогрева для большинства печей с небольшим запасом. На этих номограммах цифрами 1,2,3, и 4 отмечены садки, обозначенные цифрами 1,2,4,5 на рис.8. С помощью этих номограмм можно определить общее время прогрева, а также время выдержки садков из «теплых» и «горячих» слитков.

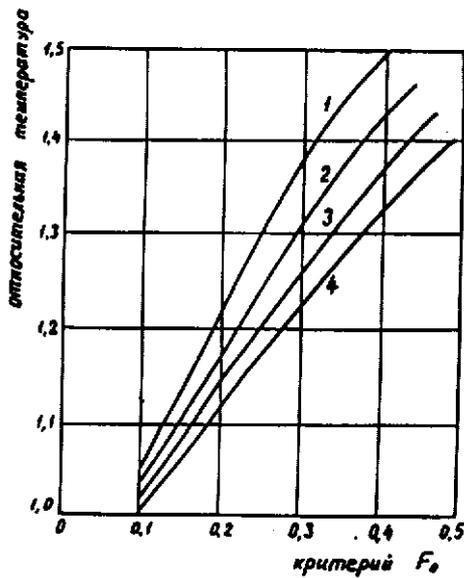


Рис.9. Длительность нагрева «горячих» слитков

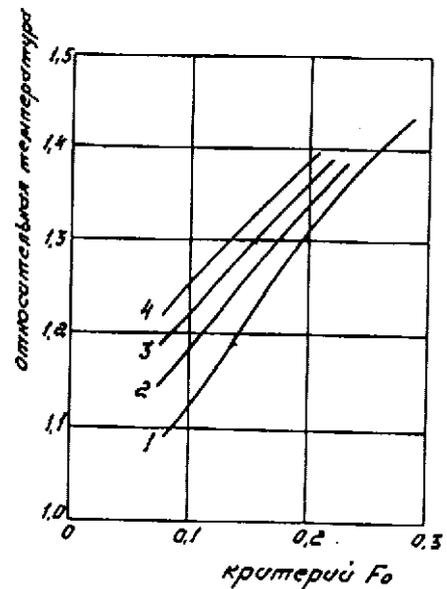


Рис.10. Длительность выдержки «горячих» слитков

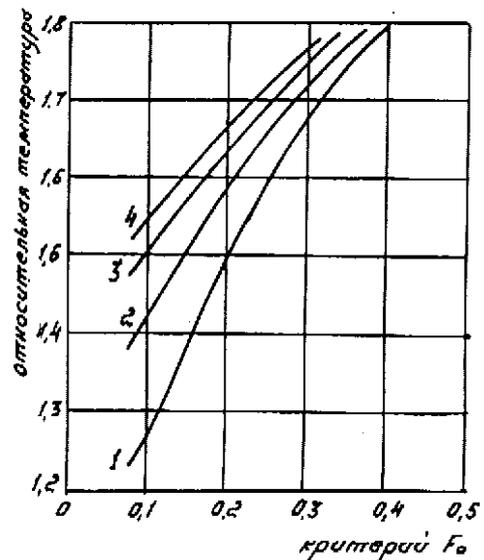
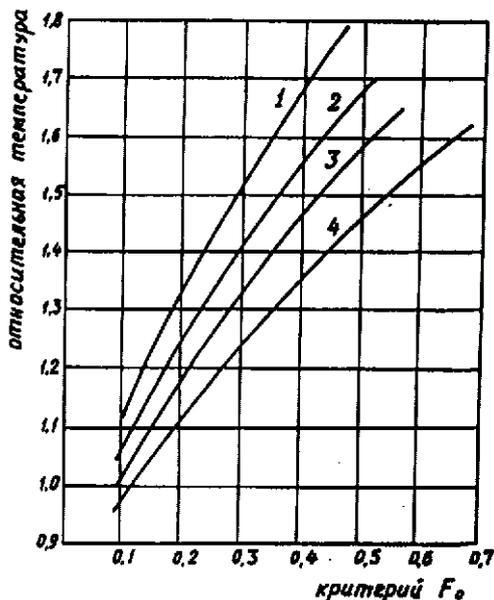


Рис.11. Длительность нагрева «теплых» слитков

Рис.12. Длительность выдержки «теплых» слитков

Приведены зависимости от относительной тепловой мощности печи поправочного коэффициента $K_t=t/t_0$, равного отношению времени прогрева для произвольной тепловой мощности ко времени прогрева для базовой, равной 200 кВт/м^2 . Для определения общего времени нагрева необходимо величину, определенную по номограммам, умножить на соответствующий поправочный коэффициент.

Следует заметить, что увеличение тепловой мощности печи влияет на неравномерность нагрева, особенно для плотных садок. Так, для садки из трех слитков диаметром $1,572 \text{ м}$ при достижении поверхности и центра ковочной температуры неравномерность по поверхности составляет $65 \text{ }^\circ\text{C}$, поэтому необходимо проводить выдержку в течение $1,2 \text{ ч}$ для уменьшения этой неравномерности до $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Данное обстоятельство необходимо учитывать при конструировании печей и создании новых технологических процессов.

С целью изучения возможности оптимизации работы печного оборудования в едином технологическом процессе кузнечно-прессового цеха проведены расчеты нагрева садок из трех слитков, когда наверху расположен слиток меньшего диаметра, с учетом последовательности выдачи слитков на ковку. Алгоритм расчета: на первом этапе моделируется нагрев садки до ковочной температуры в верхнем слитке, затем – охлаждение на выдвинутом поде в течение 5 мин. для снятия верхнего слитка. За время охлаждения температура печи уменьшается до $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ [84]. На втором этапе проводится расчет нагрева оставшейся садки с учетом изменения геометрии рабочего пространства печи. Результаты расчетов для садки из слитков диаметром $1,572 - 1,100 \text{ м}$ представлены на рис.13. На нем пунктирными линиями нанесены значения температуры в слитке меньшего диаметра. Аналогичные расчеты проведены для садок из пяти слитков. Получено, что если соотношение между диаметрами меньшего и большего слитков лежит в пределах $d_1/d_2 = 0,7 - 0,8$, время нагрева, полученное из номограмм для садки диаметром d_1 нужно умножить на поправочный коэффициент $K_d=1,05$.

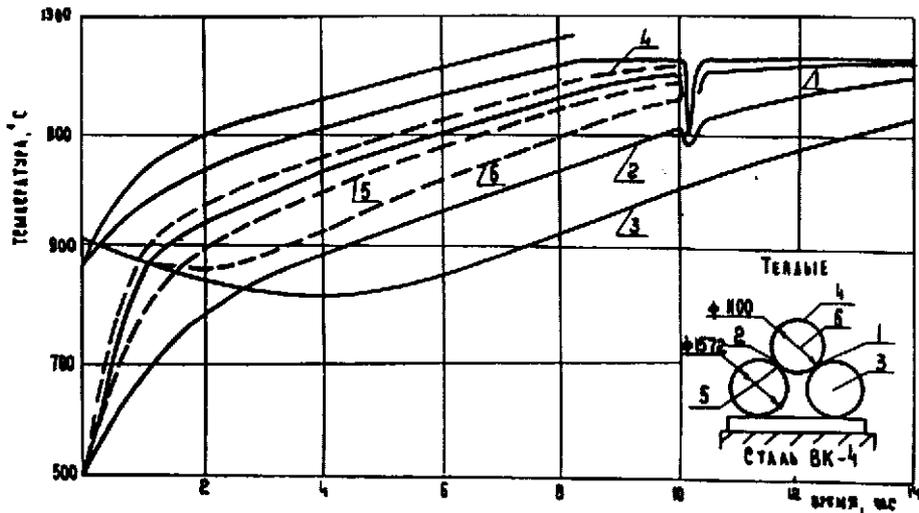


Рис.13. Изменение расчетных значений температуры в садке из трех слитков.
 (-----) верхний слиток; (-----) нижний слиток

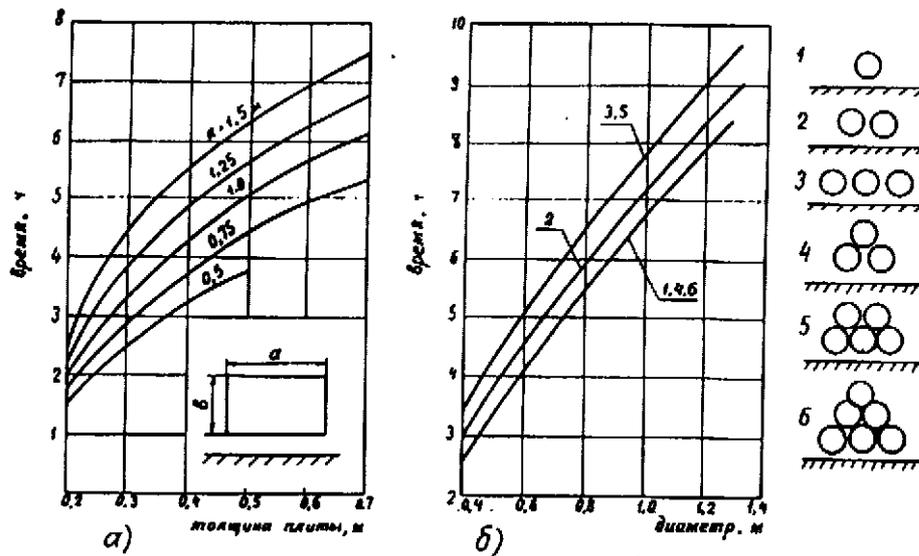


Рис.14. Номограммы для определения времени охлаждения садок из поковок типа плит (а) и цилиндров (б) от 850 °С до температуры поверхности 400 °С

Проведено исследование процесса охлаждения садок из плит и цилиндров с помощью математической модели, описанной в главе 4. По результатам расчетов построены номограммы (рис.14) для определения длительности охлаждения садок из среднелегированных сталей от температуры 860 °С до 400 ° (минимальной по поверхности). С целью определения длительности охлаждения поковок из углеродистых и высоколегированных сталей, а также при начальных температурах 920 °С и 810 °С проведена серия численных экспериментов.

Влияние теплофизических характеристик стали на время охлаждения изучено на поковке диаметром 1 м. Расчеты показали, что длительность охлаждения поковок из углеродистых и среднелегированных сталей

практически одинаковая и на 10% больше, чем из высоколегированных. Отметим, что полученные результаты справедливы и для других садок, поскольку геометрия садки оказывает слабое влияние на время охлаждения поверхности поковок.

На том же примере исследовано влияние на время охлаждения садки её начального теплового состояния и определено, что длительность снижения температуры поковок от 860 °С на 3% меньше, чем от 920 °С и на 5% больше, чем от 810 °С. Общую продолжительность процесса можно выразить формулой

$$t = t_0 \cdot K_1 \cdot K_2, \quad \text{где}$$

t_0 - время охлаждения, определенное по рис.13, ч; $K_1 = 1,05$ при охлаждении от температуры 920 °С; $K_1 = 0,93$ при охлаждении от температуры 810 °С; $K_2 = 0,90$ для высоколегированных сталей.

С помощью модели работы электрической печи проведена серия расчетов, целью которых было выяснение характера неравномерности распределения температур в зеркале в зависимости от формы печи и способа нагревания. Картина изотерм для момента наибольшей неравномерности температуры, представлена на рис.15. Изотермы проведены через 1 °С. Таблица 4. показывает зависимость максимального перепада температуры (°С) в теле за время процесса нагревания от внутренних размеров печи при условии, что её поверхность нагревается равномерно со скоростью 30 °С в час. При этом радиус тела равен 0,55 м, высота 0,15 м, тело расположено на высоте 0,1 м над дном печи.

Таблица 4. Перепад температур

Высота, м	Радиус, м		
	0.65	0.75	0.85
0.35	17.0	17.1	17.1
0.55	16.6	16.7	16.7
0.75	16.4	16.6	16.6

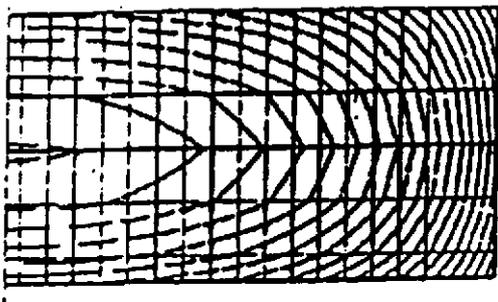


Рис. 15. Изотермы в зеркале

Математическая модель, описание которой дано в предыдущих главах, позволила провести расчеты длительности процессов нагрева различных садок в пламенных камерных печах различных заводов тяжелого машиностроения. По результатам расчетов построены номограммы в обобщенных координатах, позволяющие определять длительности нагрева и изотермической выдержки слитков с различным начальным тепловым состоянием. Определены поправочные коэффициенты, дающие возможность учесть зависимость времени нагрева от мощности печи. По тем же номограммам можно найти длительность

нагрева в случае изменения садки за счет последовательной выдачи слитков на ковку.

По результатам расчетов охлаждения садок из плит и цилиндров на выдвинутой подине также построены номограммы, позволяющие находить длительность процесса.

Расчеты нагрева зеркала в печи позволили выбрать рациональное размещение изделия на поде и скорость нагрева.

В седьмой главе определены энергетические характеристики процесса нагрева слитков и поковок: поглощение тепловой энергии кладкой печи, затраты топлива на горячую консервацию и нагрев под ковку.

Поглощение теплоты кладкой печи. Процессы нагрева под ковку и термической обработки изделий являются нестационарными, что связано с необходимостью проведения последовательных подъёмов температуры печи, изотермических выдержек и охлаждения изделий. Это обстоятельство влечет за собой и не стационарность режима работы кладки нагревательных и термических печей. Кладка аккумулирует часть тепловой энергии, подаваемой в печь, а часть энергии отдает нагреваемому металлу и в окружающее пространство.

Учитывая тот факт, что теплотери через кладку и связанный с ними расход топлива существенно зависят от режима её работы, проведены расчеты нагрева кладки нагревательных и термических печей из холодного состояния до установления в ней стационарного распределения температуры при различных температурах внутри печи (показаниях печной термопары).

С помощью описанной процедуры рассчитали нагрев кладки печей от холодного состояния ($T_0 = 20$ °С) до температуры выдержки (показания печной термопары) 200, 400, 600, 800 и 1100 °С. Расчеты проведены для нагревательных и термических печей Ижорского и Обуховского заводов. Критерием окончания расчетов считали момент времени, когда в кладке установится линейное стационарное распределение температуры. На режиме подъёма температуры печи расход топлива ***V*** задавали. В режиме выдержки расход топлива определяли путем совместного решения системы зональных уравнений и уравнения теплового баланса печи.

Алгоритм расчетов следующий. На режиме подъёма температуры печи на каждом шаге по времени лучистые тепловые потоки на кладку определяли из решения задачи внешнего теплообмена. К полученным значениям теплового потока добавляли конвективную составляющую. Затем численно интегрировали уравнение теплопроводности для каждой из областей в кладке, определяли новые температуры поверхности и т.д. На режиме выдержки при постоянной температуре печи температуру газов находили из уравнения баланса печной термопары, а из системы уравнений определяли тепловые потоки и расход топлива. Критерием окончания

расчетов служило условие $\max (1 - T_i^n / T_i^{n+1}) < \varepsilon$, ($\varepsilon = 0,05 - 0,1$ °C), где i -номер пространственного, а n - временного узла сетки.

Ниже приведены результаты расчетов для печи Обуховского завода. Расчеты для печей другого типа дают аналогичные результаты.

Таблица 5

Расход топлива при нагреве кладки до стационарного состояния

	Температура выдержки, °C						
	200	200	400	600	800	1000	1000
Расход топлива на подъёме, ($\text{м}^3/(\text{ч м}^2)$)	2,5	5	5	5	5	5	10
тепловая мощность печи, кВт/ м^2	25	50	50	50	50	50	100
Время нагрева, ч	29,5	29,5	33,0	41,0	45,0	52,0	50,0
Суммарный расход топлива, ($\text{м}^3/\text{м}^2$)	4,2	4,3	25	58	117	216	238
Энергоемкость, (мВт ч)/ м^2	142,8	146,2	850	1972	3978	7344	8092

Затраты топлива рассчитывались на 1м^2 пода печи, поэтому суммарный расход топлива B_{Σ} имеет размерность $\text{м}^3/\text{м}^2$ пода. Энергоемкость процесса определяли как произведение калорийности топлива на расход: $B_{\Sigma} \cdot Q_H^P$.

Как следует из приведенных данных, достижение кладкой более высокого температурного уровня со стационарным распределением температуры требует значительных дополнительных расходов топлива и увеличивает длительность нагрева. Так, при температуре выдержки 1000 °C для прогрева кладки требуется в 1,85 раза больше топлива, чем для прогрева до 800 °C.

Таблица 6. Расход топлива при прогреве кладки до нестационарного состояния

	Температура выдержки, °C						
	200	200	400	600	800	1000	1000
Расход топлива на подъёме, ($\text{м}^3/(\text{ч м}^2)$)	2,5	5	5	5	5	5	10
Время нагрева, ч	10,5	10,5	11,5	12,0	12,5	13,5	12,0
Суммарный расход топлива, ($\text{м}^3/\text{м}^2$)	2,3	2,3	11	28	50,5	80,5	94
Энергоемкость, (мВт ч)/ м^2	78,2	78,2	374	952	1717	2737	3196

Результаты расчетов прогрева кладки той же печи до момента времени, когда температура внутренней поверхности кладки становится равной температуре печи, а внутренние слои ещё не прогрелись до стационарного состояния, приведены в таблице 6.

Зависимость расхода топлива от температуры в этом случае аналогична предыдущему. В то же время суммарный расход топлива для достижения необходимой температуры печи во втором случае значительно меньше, чем

в первом. Особенно сильно это различие проявляется при высоких температурах. Так, при $T_{\text{в}}=1000$ °С во втором случае топлива требуется ~40 %, при $T_{\text{в}}=800$ °С ~43 %, при $T_{\text{в}}=600$ °С ~45 % от количества топлива, необходимого для прогрева кладки до стационарного состояния. Большая часть из оставшихся 50 – 60 % энергии затрачивается на аккумуляцию тепла кладкой печи.

Расход топлива при горячей консервации. Бесперебойное и эффективное функционирование кузнечно-прессового оборудования в значительной мере зависит от стабильности поступления слитков из сталеплавильного цеха. Для уменьшения влияния неупорядоченности входного потока слитков на производительность прессового оборудования используется операция горячей консервации. При этом структура входного потока упорядочивается путем преимущественной обработки одних слитков за счет задержки на консервации других. Однако в этом случае могут возникать простои печей в ожидании выработки садки, что приводит к дополнительному расходу топлива на поддержание температуры слитков на уровне 500-700 °С.

Важной характеристикой процесса горячей консервации является расход топлива и энергоемкость. При создании оптимального (с точки зрения потребления топлива) процесса нагрева слитков под ковку необходим не только качественный, но и количественный анализ затрат энергии. В настоящей работе сравнительный количественный анализ энергоемкости процесса горячей консервации проведен с помощью описанной ранее математической модели.

Основные расчеты проведены для печей Ижорского и Обуховского заводов. Кладка печей - двухслойная, площадь пода составляет 15-25 м². Садка состоит из двух-пяти слитков различного диаметра. Начальная температура слитков принята постоянной и равной среднемассовой. Начальное тепловое состояние кладки печи выбирали в соответствии с ранее проведенными расчетами.

Для определения влияния массы садки на суммарный расход топлива выполнены расчеты горячей консервации садок из двух – пяти слитков при температуре консервации 680 °С и различной весовой нагрузке на 1 м² пода печи. Установлено, что суммарный расход топлива слабо зависит от числа слитков в садке, причем эта зависимость сказывается в основном при нагреве холодных слитков. С увеличением массы садки относительный расход топлива на консервацию существенно уменьшается (при весовой нагрузке на под печи 0,6, 1,75 и 3,5 т/м² относительный расход топлива составляет 1, 0,55 и 0,43). Это необходимо учитывать при формировании садок в печах – накопителях.

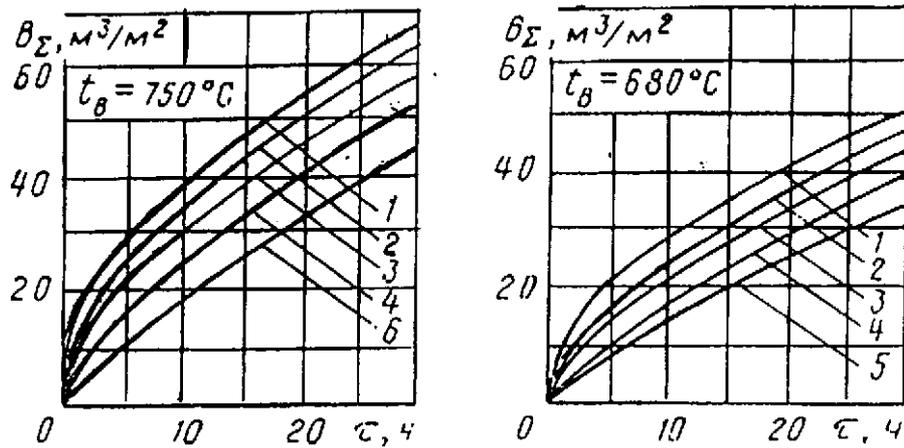


Рис.16. Зависимость расхода топлива от длительности выдержки при различных температурах выдержки

На рис.16 приведены зависимости суммарного расхода топлива на 1 м^2 пода печи от времени при различных температурах выдержки $T_{\text{в}}$, начальных температурах изделий $T_{\text{м}}=20, 200, 400, 600, 680, 750^{\circ}\text{C}$ (кривые 1-6) и весовой нагрузке на под $P=0,6 \text{ т}/\text{м}^2$. Зависимости построены по средним значениям для всей группы исследованных печей. Осреднение выполнено по методу наименьших квадратов. Из рисунка следует, что суммарный расход топлива существенно зависит от температуры выдержки.

Увеличение расхода топлива при нагреве более холодных слитков особенно велико на начальной стадии нагрева, когда изделия ещё не прогреты до температуры выдержки. В дальнейшем расход топлива стабилизируется и зависит только от суммарных тепловых потерь в печи. Независимость расхода топлива в процессе выдержки подтверждается одинаковым наклоном кривых на каждом графике.

На рис.17 приведена зависимость суммарного расхода топлива на 1 м^2 пода от времени при различных начальных тепловых состояниях кладки. С помощью этого графика можно определить дополнительные расходы топлива при переходе на другой режим консервации.

Затраты топлива при нагреве под ковку.

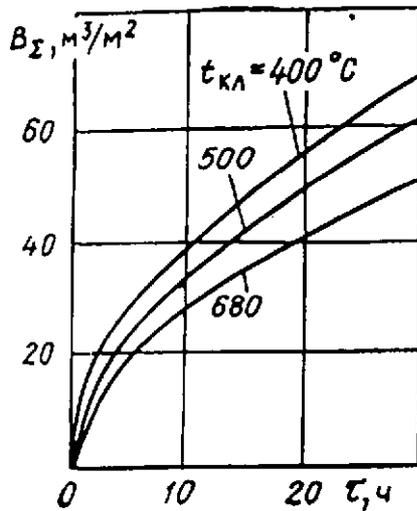


Рис.17. Зависимость расхода топлива от длительности выдержки

Задача сокращения расхода топлива на нагрев непосредственно связана с оптимизацией работы печных агрегатов во всём цикле производства поковок, включая взаимосвязь работы печей и кузнечного пресса. Как правило, при ковке крупных изделий требуется осуществить несколько операций нагрева. Так, после поступления из литейного цеха слитки зачастую помещают в печи – накопители, затем нагревают их до ковочной температуры в нагревательных печах или непосредственно в печах – накопителях, производят ковку, дополнительные подогревы и др. Заканчивается процесс производства поковок их термической обработкой.

Для организации оптимального нагрева слитков важен количественный анализ затрат топлива в различных режимах. В данном разделе исследована зависимость затрат топлива на нагрев изделий от таких параметров, как начальное тепловое состояние садки, скорость нагрева, тепловая мощность печи и др.

Выполнены расчеты процесса нагрева слитков под ковку в печах Ижорского и Обуховского заводов. Кладка печей – двухслойная, площадь пода составляет 15 – 25 м². Садка состоит из двух – пяти слитков различного диаметра. Начальная температура слитков принята постоянной по сечению. Начальное тепловое состояние кладки печи соответствует режимам нагрева после горячей консервации и посада в горячую печь. В настоящем разделе приведены результаты расчетов для нагревательной печи Обуховского завода. Для остальных печей получены аналогичные результаты.

В таблице 7 указаны длительности прогрева (t), затраты топлива (V) и энергии (N), необходимые для нагрева двух слитков диаметром 1,2 м от начальной температуры до момента их выдачи под ковку. Этим моментом считается тот, когда температура поверхности слитков становится равной 1200 °С, в центре слитка – 1100 °С, а максимальная неравномерность температуры по поверхности – меньше 30 °С. Время нагрева определено по номограммам, которые представлены в предыдущих главах.

Таблица 7. Затраты топлива для нагрева слитков после горячей консервации

T ₀ , °C	W= 15 МВт	t, ч			V, м ³ /м ²			N(ГВт ч/м ²)			
		20МВт	25МВт	*	15МВт	20МВт	25МВт	*	15МВт	20МВт	25МВт
500	16,7	15,2	14,4	*	200	254	296	*	68	86	100
600	12,9	11,7	11,1	*	165	197	218	*	56	67	74
680	9,1	8,3	7,9	*	125	146	168	*	42	50	57
750	7,0	6,4	6,1	*	108	117	143	*	37	40	49

В таблице 8 указаны длительности прогрева, затраты топлива и энергии, необходимые для нагрева двух слитков диаметром 1,2 м при посадке их в горячую печь. Сравнение величин, приведенных в таблицах 7 и 8, позволяет сделать вывод о том, что при нагреве слитков в режиме горячей посадки требуется примерно на 20% меньше топлива, чем при нагреве слитков с той же начальной температурой после режима горячей консервации.

Таблица 8. Длительности прогрева и затраты энергии при посадке в горячую печь

T ₀ , °C	t, ч	V, м ³ /м ²	N, (ГВт ч)/м ²
500	14,5	207	70
700	7,8	127	43
900	4,5	90	31

ВЫВОДЫ

1. Разработанная математическая модель позволяет рассчитать температурные поля в нагреваемых изделиях и кладке печи, а также затраты энергии, необходимой для создания соответствующих тепловых состояний, исходя из самых общих характеристик явления. Основными исходными данными для проведения расчетов являются расход топлива и его теплотворная способность, температура воздуха из рекуператора, геометрические характеристики печи и садки, а также теплофизические свойства материалов. Модель также позволяет рассчитать длительность охлаждения различных садок на воздухе.

При создании модели учтены следующие закономерности энергетических процессов в камерных печах:

- температурное поле газов в рабочем пространстве печи является нестационарным и неоднородным;
- кладка аккумулирует тепловую энергию и работает в нестационарном режиме;
- распределение теплового потока по поверхности изделий носит несимметричный характер;
- нагреваемые изделия обладают различными геометрическими формами и теплофизическими свойствами;
- на поверхности металла образуется слой окисла, который влияет на теплопередачу к внутренним слоям изделия;
- излучение газов является селективным;

- садки могут иметь различную конфигурацию, которая изменяется с извлечением отдельных слитков для проведения ковки.

С помощью разработанной математической модели выполнены расчеты процессов перераспределения энергии в камерных печах.

2. Исследование влияния неравномерности распределения теплового потока по поверхности нагреваемых изделий на время прогрева показало, что без учета этой неравномерности ошибки в определении длительности нагрева могут составить 20 – 30 %.

3. Сравнение результатов расчетов по модели и экспериментальных данных, полученных на крупнейших машиностроительных заводах страны рядом авторов, позволяет оценить погрешность в определении температуры центра изделий как не превосходящую 2 %, поверхности - 10 %, неравномерности температуры по поверхности – 10 %.

4. Численно – аналитическое исследование погрешностей модели показало, что ошибки в задании теплофизических свойств существенно влияют на точность расчетов. Так, относительная погрешность в задании a и λ в 15 % приводит к 15 % ошибке в определении времени прогрева.

Для расчетов тепловых полей в слитках сложной геометрической формы предложен численный метод, который аппроксимирует задачу теплопроводности на треугольных сетках. Определена погрешность метода, показана сходимость. Метод применен для расчетов тепловых полей в изделиях шести и восьмигранной формы. Расчеты показали, что относительная погрешность в определении неравномерности температуры по поверхности при замене шестигранного слитка цилиндрическим не превышает 2 %.

5. Решение задачи внешнего теплообмена основано на применении зонального метода определения лучистых тепловых потоков. Предложен метод, позволяющий учесть селективность поглощения и излучения газовой среды, который не приводит к значительному увеличению длительности расчетов по сравнению с серой моделью. Разработана методика вычисления обобщенных угловых коэффициентов с учетом реальной геометрии печи и садки, изменения температуры и других теплофизических параметров газовой среды, которая позволила существенно сократить объем вычислительной работы по заполнению матрицы угловых коэффициентов.

6. Исследование внешнего теплообмена показало, что качество нагрева, которое определяется неравномерностью теплового потока по поверхности нагреваемых изделий, наиболее существенным образом зависит от геометрических характеристик печи и садки. Рациональное размещение изделий на поде печи приводит к сокращению длительности нагрева и расхода энергии.

7. По результатам расчетного исследования температурных полей в слитках, нагреваемых перед ковкой, построены номограммы, позволяющие определить общее время нагрева и длительность выдержки при постоянной температуре печи для различных садок, марок сталей, начального теплового состояния и тепловой мощности печи и садки. Сравнение длительностей нагрева, определенное по номограммам, с экспериментальными данными для нагревательных печей крупнейших машиностроительных заводов страны позволяет оценить точность номограмм в 5 %.

8. Разработана и протестирована модель охлаждения садок из плит и цилиндров на выдвинутой подине при предварительной термической обработке. На основе расчетных данных построены номограммы, позволяющие определить время охлаждения различных садок.

9. Проведено исследование затрат энергии, которое требуется для создания необходимых тепловых состояний в кладке печи и нагреваемых изделиях. Результаты расчетов представлены в виде графиков и таблиц зависимости расхода энергии от длительности протекания процесса, начального теплового состояния печи и садки, мощности печи. Полученные данные позволяют оценить количество топлива или электрической энергии, потребляемое печами в различных режимах.

10. Результаты расчетов, приведенные в настоящей диссертации, рекомендованы для использования на заводах тяжелого машиностроения при определении рациональных способов нагрева изделий в камерных печах. Расчетные методы исследования энергетических процессов, приведенные в работе, нашли успешное применение и в других областях знаний.

Содержание диссертации изложено в следующих основных работах: :

1. Антонов В.И. Математическая модель процесса нагрева сложных садок в пламенных камерных печах. // Изв. ВУЗ. Черная металлургия, 1979, №1, с. 131 – 137.
2. Антонов В.И., Аронов М.А. Влияние неравномерности теплового потока на время прогрева слитка. // Изв. ВУЗ. Черная металлургия. 1978, №11, с. 173 – 176.
3. Антонов В.И. Расчет продолжительности нагрева слитков перед ковкой. // Изв. ВУЗ. Черная металлургия. 1981, №9, с. 149 – 152.
4. Антонов В.И. Влияние ошибок в задании теплофизических свойств стали на определение времени прогрева слитков. // Изв. ВУЗ. Черная металлургия. 1982, №7, с. 144 – 146.
5. Антонов В.И. Применение численного метода к определению обобщенных угловых коэффициентов. // Инженерно – физический журнал, 1982, т. XLII, №4, с. 652 – 659.
6. Антонов В.И. Номограммы для расчета охлаждения садок на выдвинутой подине. // Изв. ВУЗ. Черная металлургия. 1982, №9, с. 135–137.
7. Антонов В.И., Аронов М.А. Исследование процесса охлаждения садок на выдвинутой подине. // Сб. трудов ВНИПИ Теплопроект, 1981, с. 56 – 59.
8. Антонов В.И., Здоровова Л.И. К расчету обобщенных угловых коэффициентов. // Инженерно – физический журнал, 1983, т. XLIV, №5, с. 829 – 830.

9. Антонов В.И. Расчеты поглощения тепла кладкой печи. // Изв. ВУЗ. Черная металлургия. 1985, №5, с. 139 – 143.
10. Антонов В.И. Расчет нагрева слитка в камерной печи с учетом окисления. // Изв. ВУЗ. Черная металлургия. 1990, №1, с. 88– 90.
11. Антонов В.И., Здорова Л.И. Определение обобщенных угловых коэффициентов с учетом селективности поглощения среды. // Инженерно – физический журнал, 1986, т. L, №1 с. 98 – 104.
12. Оглоблин Б.Г., Терентьев И.К., Антонов В.И. и др. Программа исследования газового тракта в обоснование проекта реактора БРИГ-300. Вести академии наук БССР. Физико-технические науки, 1986, с. 7-10.
13. Антонов В.И., Здорова Л.И. Анализ точности решения задач лучистого теплообмена в системах с селективно излучающей средой . // Инженерно – физический журнал, 1988, т. 54, с. 450 – 456.
14. Антонов В.И., Ястребов А.В. Математическое моделирование нагрева цилиндрического зеркала в печи. // Труды СПб ГТУ, Прикладная математика, 1996, с. 71 – 74.
15. Антонов В.И. Анализ расхода топлива при горячей консервации слитков в камерных печах кузнечно-прессовых цехов. // Промышленная энергетика, 1986, №10, с. 55 – 57.
16. Антонов В.И. Анализ затрат топлива при нагреве слитков под ковку. // Промышленная энергетика, 1987, №2, с. 16 – 18.
17. Antonov V., Tapies J. Fundamentos de los calculos en la tecnica. IFDP Public, Barcelona, 1995.
18. Антонов В.И. Определение обобщенных угловых коэффициентов для цилиндрических поверхностей. // Изд. СПб ГТУ. Математические исследования, т. 8, 2001, с. 201 – 207.
19. Лучаков Ю.И., Антонов В.И., Осипенко Г.С., Ястребов А.В. Математическое моделирование теплопереноса в коже теплокровных. // Средства математического моделирования. Изд. СПбГТУ. 1999, с. 199-203.
20. Антонов В.И. Численный метод тепловых балансов решения задач теплопроводности для областей сложной формы. // Дифференциальные уравнения и процессы управления. Электронный журнал, 2002, №1, с. 71-78.