Курбатов Ю.Л.
Бирюков А.Б.
Рубан Ю.Е.

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПЕЧИ

Донецк, 2016

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПЕЧИ
Курбатов Ю.Л.
Бирюков А.Б.
Рубан Ю.Е.

Светлой памяти основателя отечественной печной теплотехники Марка Алексеевича Глинкова

Ю.Л. Курбатов, А.Б.Бирюков, Ю.Е. Рубан

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПЕЧИ

Учебное пособие

Донецк
ГОУ ВПО «ДонНТУ»
2016

УДК 669.04 (075.8)
К 93

Рекомендовано к печати Ученым советом
ГОУ ВПО Донецкого национального технического университета
(протокол № от ----. .2016 г.)

Рецензенты:

Белоусов В.В., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика неравновесных процессов, метрологии и экологии» ДонНУ.

Гридин С.В., кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика» ДонНТУ

Курбатов Ю.Л.

К 93 Металлургические печи: учебное пособие / Ю.Л. Курбатов, А.Б. Бирюков, Ю.Е. Рубан. – Донецк: ГОУ ВПО «ДонНТУ», 2016. – 433 с.

В пособии изложены вопросы конструкции и тепловой работы печей по переделам металлургического производства, а также методики расчета и способы оценки эффективности работы печей. В книге приведены результаты оригинальных исследований авторов по теплотехнике металлургических печей различного назначения. Учебное пособие соответствует учебным планам курса «Металлургические печи» для студентов дневной и заочной форм обучения по направлению «Металлургия». Книга может быть полезна для специалистов металлургической промышленности.

УДК 669.04 (075.8)

© Курбатов Ю.Л., Бирюков А.Б.,
Рубан Ю.Е., 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Введение…… 6
1 Основные понятия……. 8
1.1 Определение, классификация……. 8
1.2 Схема топливной печи. Назначение отдельных элементов…… 10
2 Теплотехнические процессы в печах……... 13
2.1 Теплогенерация, получение высокотемпературного источника тепла……. 13
2.2 Внешний теплообмен…….. 14
2.3 Внутренний теплообмен. Нагрев и плавление…….. 15
2.4 Гидрогазодинамика…….. 16
2.5 Охлаждение конструкций……... 16
2.6 Внутреннее и внешнее использование вторичных энергоресурсов……... 18
3 Материалы для сооружения печей……... 19
3.1 Керамические и металлические общестроительные материалы……... 19
3.2 Огнеупорные и теплоизоляционные керамические материалы……... 23
4 Строительные элементы печей……. 42
4.1 Фундаменты…….. 42
4.2 Каркасы……. 45
4.3 Ограждения печей…… 49
5 Современные способы отопления металлургических печей и использования вторичных энергоресурсов……... 65
5.1 Базовые понятия о газогорелочных устройствах……. 65
5.2 Технологии импульсного сжигания топлива…… 66
5.3 Использование рекуператоров и регенераторов для утилизации теплоты продуктов сгорания…… 75
5.4 Технология отопления пламенных печей при помощи рекуперативных горелок……... 83
5.5 Технология отопления пламенных печей при помощи регенеративных горелок…… 92
6 Характеристика и тепловая работа по металлургическим переделам…… 104
6.1 Печи черной металлургии……... 104

6.1.1 Производство кокса…… 104
6.1.2 Обжиг извести и доломита……. 113
6.1.3 Производство чугуна…….. 119
6.1.4 Сталеплавильное производство……. 133
6.1.5 Нагревательные печи обработки металла давлением……... 155
6.1.6 Термические печи……... 203
6.1.7 Агломерация…… 234
6.1.8 Туннельные печи для обжига штучных и сыпучих огнеупорных материалов…….. 238
6.2 Топливные печи цветной металлургии…….. 240
6.2.1 Шахтные печи…… 240
6.2.2 Плавильные пламенные печи……... 249
6.2.3 Нагревательные печи……. 266
7 Теплотехнические расчеты печей…… 271
7.1 Расчет горения топлива……... 271
7.2 Расчет внешнего теплообмена…… 275
7.3 Методы расчета нестационарного внутреннего теплообмена…… 285
7.3.1 Постановка задачи. Обзор методов, краткий анализ, достоинства и недостатки…… 285
7.3.2 Приближенные инженерные методы тепловой диаграммы И.Д.Семикина……. 291
7.3.3 Метод конечных разностей (МКР)……... 311
7.3.4 Метод элементарных тепловых балансов…….. 322
7.3.5 Метод конечных элементов (МКЭ)…….. 330
7.3.6 Сопряженные и зональные модели……. 344
7.4 Определение тепловой мощности топливных печей... 361
7.5 Гидрогазодинамические расчеты, выбор тягодутьевых средств……... 373
8 Оценка эффективности работы топливных печей и направления интенсификации…….. 383
Список вопросов для самоконтроля……... 391
Список используемой литературы……..... 395
Приложение 1 Этапы проектирования печей…… 402
Приложение 2 Коэффициенты сопротивления……. 406
Приложение 3 Физические свойства сухого воздуха при В=0,103 МПа……..…….. 416

Приложение 4 Физические свойства водяного пара на линии насыщения……. 417
Приложение 5 Физические свойства продуктов сгорания (p = 0,1 МПа)……. 418
Приложение 6 Характеристика газообразного топлива…….. 419
Приложение 7 Характеристика жидких и твердых видов топлива…….. 420
Приложение 8 Теплосодержание железа и углеродистых сталей, кДж/кг……... 421
Приложение 9 Химический состав углеродистых сталей, %.. 422
Приложение 10 Коэффициент теплопроводности, углеродистых сталей различных марок в зависимости от температуры, Вт/(м·К)……. 423
Приложение 11 Средняя теплоемкость $c_{ср}$, кДж/(кг·К), углеродистых сталей различных марок в интервале температур от 50 до t°C…… 424
Приложение 12 Удельная энтальпия углеродистых сталей *i*, кДж/кг…… 425
Приложение 13 Плотность углеродистых сталей ρ, кг/м^3…… 426
Приложение 14 Теплофизические свойства огнеупорных изделий и материалов……... 427
Приложение 15 Степень черноты полного излучения различных материалов……. 428
Приложение 16 Формулы для расчета угловых коэффициентов и расчетных поверхностей…….. 431

Введение

Металлургическое производство использует большое количество разнообразных печей (коксовые батареи для получения кокса; доменные печи для получения чугуна; топливные печи с открытым подом, электродуговые печи и кислородные конверторы – для получения стали; нагревательные печи для нагрева стальных заготовок перед прокаткой; термические печи для придания металлургической продукции нужных механических свойств; печи для обжига известняка и доломита; печи для обжига огнеупоров, и др.). Не зависимо от видов печей в них происходят теплотехнические процессы: теплогенерация, тепломассообмен, движение жидких и газовых сред. Для проектирования, строительства и эксплуатации металлургических печей необходимо знать закономерности теплотехнических процессов, методики расчета, экспериментальную информацию и многое другое. Для перехода от примитивного костра металлургии древних до современных механизированных и автоматизированных печных агрегатов потребовалось создание науки о теплотехнике печей, которая является основой необходимых знаний.

В развитие теплотехники печей большой вклад внесли отечественные ученые. Известный русский металлург-теплотехник *В.Е.Грум-Гржемайло* в 1905-1906г.г. впервые сформулировал основные положения *гидравлической теории печей*. И хотя в настоящее время многие положения этой теории утратили свое значение, появление её было прогрессивным явлением, способствующим развитию печной теплотехники, как в отечественной металлургии, так и за рубежом. Отжили также положения так называемой *энергетической теории*, в соответствие с которой работа печи рассматривалась, зависящей в основном от её тепловой мощности. Последние десятилетия развитие идет по пути создания высокопроизводительных

механизированных и автоматизированных печей, интенсификация работы которых обеспечивается соответствующим развитием теплообменных процессов, протекающих в рабочем пространстве печей.

Основателем отечественной печной теплотехники является известный ученый М.А. Глинков, который в 1959г. сформулировал современные положения теории печей. В теории было показано, что в печах основными являются процессы теплообмена. Было доказано, что процессы теплогенерации, движения газов, конструктивные особенности рабочего пространства печи должны быть подобраны таким образом, чтобы достигался наивысший (или необходимый) уровень теплоотдачи к обрабатываемому материалу.

Развитие современной теории печей основываются на трудах отечественных ученых Д.В.Будрина, Н.Н.Доброхотова, Г.П.Иванцова, И.Г.Казанцева, Б.И.Китаева, Н.И.Кокарева, М.А.Кузьмина, И.С.Назарова, И.Д.Семикина, Н.Ю.Тайца, В.Н.Тимофеева, В.М.Кирпичева, А.А.Гухмана, Л.С.Эйгенсона, М.А.Михеева. Следует также отметить вклад в развитие теории печей зарубежных ученых В.Тринкса, М.Моугиннея, М.Готвальда, и др. Развитие теории печей продолжается усилиями учеников и последователей основателей печной науки.
В данной книге приведены результаты оригинальных исследований авторов по теплотехнике металлургических печей различного назначения.

Учебное пособие создано в соответствие с учебными планами направления «Металлургия» для дисциплины «Металлургические печи».

Авторы будут признательны за все замечания и предложения по улучшению книги, которые просят направлять на кафедру «Техническая теплофизика» Донецкого национального технического университета или на e-mail: *k-j-e@yandex.ru.*

1 Основные понятия

1.1 Определение, классификация

Металлургическая печь – это тепловой агрегат, в котором полученная каким-либо способом тепловая энергия используется для получения металлов и других материалов или для изменения их свойств.

Металлургические печи классифицируют по разным признакам.

1) По виду источника тепловой энергии:

- *электрические*, которые в свою очередь подразделяют по способу преобразования электрической энергии в тепловую на дуговые, индукционные, сопротивления, специальные, (диэлектрические, электроннолучевые, оптические и др.);

- *топливные*, которые в свою очередь подразделяют по виду топлива на газовые, мазутные, работающие на твердом кусковом или пылеугольном топливе.

2) По виду внешнего теплообмена

- *радиационные*, в которых преобладает передача тепла излучением от источника тепла к поверхности обрабатываемого материала. Это, как правило, высокотемпературные печи (> 700 °С), в которых имеются достаточно большие объемы излучающего теплоносителя или излучающие поверхности, не экранированные от тепловоспринимающих поверхностей. Здесь возможны варианты равномернораспределенного, прямого или косвенного радиационного теплообмена;

- *конвективные*, в которых преобладает конвективная передача тепла от теплоносителя к поверхности обрабатываемого материала, как правило, низкотемпературные печи (< 700 °С). Преобладающий конвективный теплообмен возможен в печах и с более высокой температурой, если объемы излучающего теплоносителя не велики, как например, при фильтрации теплоносителя через слой кусковых материалов;

- *радиационно-конвективные*, в которых доли конвективного и радиационного внешнего теплообмена соизмеримы.

3) По состоянию поверхности теплообмена

- *пламенные печи*, в которых сжигание топлива производится в виде пламени (факела), а поверхность теплообмена определена, т.е. может быть измерена или рассчитана. В таких печах, как правило, возможно визуальное наблюдение за процессом через загрузочно-разгрузочные отверстия или специальные отверстия («гляделки»);

- *слоевые печи* для тепловой обработки сыпучих (кусковых, зернистых, пылевидных) материалов, поверхность теплообмена которых является величиной неопределенной. Материал более или менее равномерно распределен в газовом теплоносителе. Возможны варианты слоевых печей: *с плотным фильтрующим слоем* для обработки кускового материала (10-70 мм) в вертикальных шахтных печах, когда теплоноситель поднимается вверх навстречу медленно опускающейся массе материала; *с кипящим слоем* для обработки зернистого материала, когда зерна материала (1-10 мм) под действием струй теплоносителя и силы тяжести совершают возвратно-поступательное движение, образуя «псевдожидкость» со свойствами текучести и кипящей жидкости; *со взвешенным сло*ем, когда пылевидный материал (менее 1 мм) увлекается теплоносителем. Наблюдение за процессом в слоевых печах невозможно или крайне затруднено.

4) По периодичности работы

- *периодического действия* (камерные) печи, в которых весь процесс представляет собой цикл, состоящий из загрузки исходного материала в рабочую камеру, тепловой обработки в этой камере и выгрузки готового продукта;

- *непрерывного действия* (проходные) печи, в которых исходный материал загружается в зоне загрузки, перемещается через различные технологические и температурные зоны, где

проходит тепловую обработку и выгружается в зоне выгрузки. Перемещение материала возможно на тележках, в вагонах, посредством толкания, механизмов «шагающих балок», на печном рольганге, на вращающейся подине, под действием сил тяжести, и др;

5) По назначению

- *плавильные*, в которых осуществляется получение нового материала в расплавленном виде и готовый материал выгружается в жидком виде (расплав чугуна, стали, полупродуктов, шлаков);

- *нагревательные* для нагрева металлов перед обработкой давлением (прокаткой, ковкой), в которых металл приобретает пластичность и находится в твердом состоянии в течении всего времени тепловой обработки;

- *термические* для нагрева металла в циклах термической обработки, в которых металл находится в твердом состоянии;

- *обжиговые*, в которых в результате тепловой обработки получается новый материал или изменяются свойства материала (обжиг известняка, доломита, огнеупорных материалов и др.);

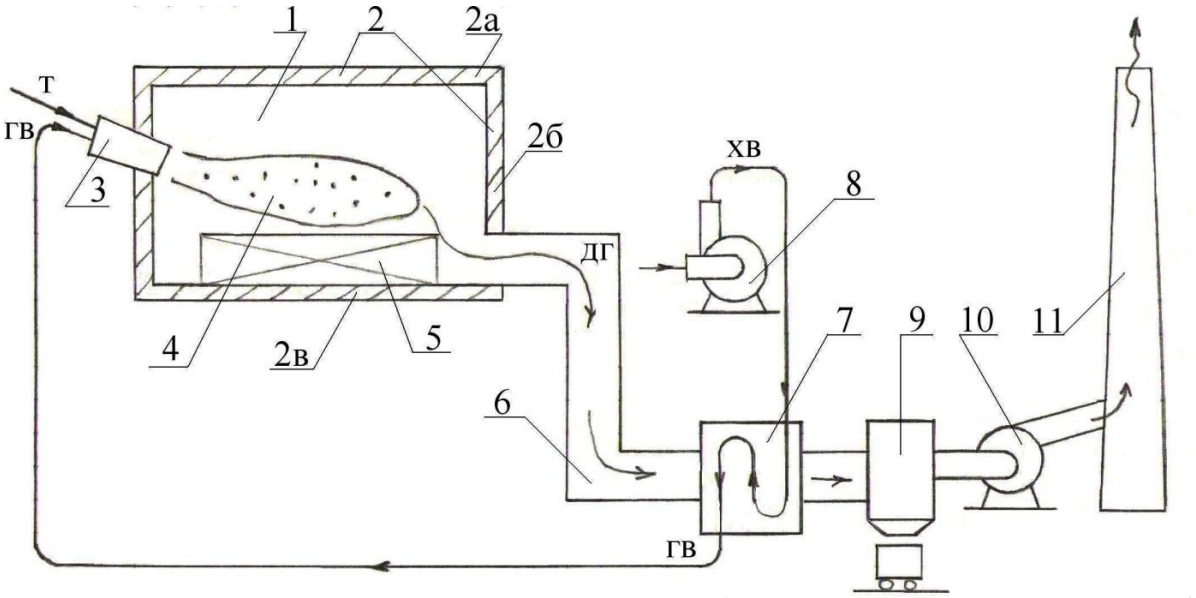
- *печи для спекания*, в которых готовый материал получается в спекшемся виде (агломерационные машины, коксовые печи).

1.2Схема топливной печи. Назначение отдельных элементов

Топливные печи наиболее сложные, т.к. должны быть оборудованы устройствами для подачи топлива и воздуха (или другого окислителя), для сжигания топлива, для удаления отработанных продуктов сгорания (дымовых газов), устройствами для утилизации и очистки, и т.д.

На рисунке 1.1 показана схема простейшей топливной печи. Главным элементом печи является *рабочая камера*, которая

является *зоной технологического процесса* (ЗТП), т.е. местом, где происходит процесс тепловой обработки металла (материала).



1 – рабочая камера; 2 – обмуровка (футеровка); 2а – свод; 2б – стены; 2в – подина; 3 – топливосжигающее устройство; т – топливо: гв – горячий воздух; хв – холодный воздух; 4 – зона генерации тепла (факел, пламя); 5 – металл (материал), подвергаемый тепловой обработке; 6 – дымоотводящие каналы; ДГ – дымовые газы; 7 – подогреватели компонентов горения (воздуха, газового топлива) – рекуператоры и регенераторы; 8 – вентилятор; 9 – газоочистка; 10 – дымосос; 11 – дымовая труба.

Рисунок 1.1 – Схема топливной печи

Получение тепловой энергии происходит в результате сжигания топлива в *зоне генерации тепла* (ЗГТ). Часто ЗГТ и ЗТП объединяют в рабочей камере, но возможно также сжигание топлива в специальных топках. Рабочая камера имеет *обмуровку (футеровку)*, отделяющую ЗГТ и ЗТП от окружающей среды, что необходимо для концентрации тепловой энергии и получения высоких температур, а также для уменьшения тепловых потерь. В рабочей камере следует выделить также части, как *подина,* на которой располагается обрабатываемый материал, *стены,* и *свод* – верхнее перекрытие рабочей камеры. Конструкция и футеровка частей рабочей камеры должны соответствовать

условиям проведения теплового процесса по температуре, механическим нагрузкам, физико-химическим воздействиям, и т.д.

Для обеспечения сжигания используются *топливосжигающие устройства* (ТСУ: горелки, форсунки). Основной функцией ТСУ является перемешивание топлива с окислителем. В качестве последнего чаще всего используют воздух, предварительно подогретый в рекуператорах (регенераторах) за счет тепла дымовых газов; для получения наиболее высоких температур в печи в качестве окислителя используют воздух, обогащенный кислородом. В результате сжигания топлива образуется *факел* (пламя), который является зоной генерации тепла. Образующиеся при сжигании топлива *дымовые газы* отдают тепло в зону технологического процесса, и постоянно удаляются из рабочей камеры через дымовой тракт в атмосферу. Уходящие дымовые газы, как правило, имеют высокие температуры и теплосодержание. Тепло дымовых газов используется как *вторичные энергоресурсы* (ВЭР), во-первых, для подогрева компонентов горения (топлива, воздуха) и возврата части тепла в печь, и во-вторых, для получения теплоносителей в виде горячей воды или пара и последующего внешнего использования вне печи.

В состав *дымового тракта* входят дымоотводящие каналы, устройства для подогрева компонентов горения, устройства для внешнего использования ВЭР (например, котлы-утилизаторы), система очистки дымовых газов от технологической пыли *(газоочистка)*. Тяга для преодоления газодинамического сопротивления дымового тракта создается *дымососом*. Очищенные и охлажденные до температуры 150-200℃ дымовые газы отводятся в атмосферу через дымовую трубу, имеющую высоту, определяемую экологическими требованиями.

Для подачи воздуха к ТСУ используют *вентилятор*. Воздух до подогревателя является холодным (ХВ), после – горячим (ГВ).

2 Теплотехнические процессы в печах

2.1 Теплогенерация, получение высокотемпературного источника тепла

Металлургические печи – это высокотемпературные печи, источником тепла в которых являются высокотемпературные продукты сгорания (дымовые газы) в топливных печах, раскаленная поверхность нагревателей в электрических печах сопротивления, и др.

Теплогенерация в топливных печах – это преобразование химической энергии топлива в тепловую в процессе горении. Горение – это бурный, самоускоряющийся процесс окисления горючих компонентов топлива с выделением большого количества тепла (подробнее см. в [49]). Процесс горения состоит из стадий:

- перемешивание топлива с воздухом, обеспечивающее контакт молекул топлива и кислорода; эта стадия наиболее медленная;
- нагрев смеси топлива с воздухом до температуры воспламенения от внешнего источника тепла (факела, раскаленных поверхностей, запальника);
- химическая реакция окисления горючих компонентов топлива, которая проходит очень быстро – практически мгновенно с образованием высокотемпературных газообразных продуктов реакции (дымовых газов);
- непрерывное удаление дымовых газов из зоны горения.

В теплогенерации присутствуют следующие теплотехнические процессы: газодинамические процессы перемешивания топлива с воздухом, как правило, при интенсивной турбулизации потоков; теплообменные процессы нагрева смеси путем излучения, а также конвекции при перемешивании с продуктами сгорания; химические реакции

окисления, обеспечение и эффективность которых определяется расчетами необходимого количества воздуха.

2.2 Внешний теплообмен

Дымовые газы, образующиеся при сжигании топлива, заполняющие объем рабочей камеры и постоянно удаляемые из печи, являются первоисточником тепловой энергии (тепла). Дымовые газы отдают тепло внутренней поверхности обмуровки (кладки) и наружной поверхности металла (материала), между кладкой и металлом также существует обмен тепловой энергией. Таким образом, во внешнем теплообмене участвуют как минимум три «партнера»: дымовые газы («Г»), кладка («К») и металл («М»). В топливных печах внешний теплообмен представлен прежде всего излучением. Каждый из «партнёров» характеризуется степенью черноты: степень черноты кладки ($\varepsilon_к$), металла ($\varepsilon_м$), газов ($\varepsilon_г$). Степень черноты первоисточника тепла $\varepsilon_г$ определяется наличием в дымовых газах трехатомных газов CO_2 и H_2O, а также наличием частиц сажистого углерода и частиц золы, и рассчитывается по методике, приведенной в [49]. Расчет теплового потока излучением на поверхность металла производится по формуле Стефана-Больцмана

$$q_м = \varepsilon_{сист} \cdot \sigma_0 \cdot (T_{ист}^4 - T_м^4) \frac{Вт}{м^2}, \qquad (2.1)$$

где $T_{ист}$ – температура источника тепла, К, в качестве которой может быть принята или температура газов $T_г$, или температура кладки $T_{кл}$, или температура печи $T_{печ}$. Последний источник тепла занимает промежуточное положение между газом и кладкой: $T_г > T_{печ} > T_{кл}$. Понятие «температура печи» используется потому, что практическое регулирование теплового

процесса в печи по температуре газов $T_г$ и $T_{кл}$ затруднено из-за проблемы измерения этих температур, в то время, как измерение $T_{печ}$ производится достаточно просто и надежно. Понятие «температура печи» формулируется следующим образом. *«Температура печи – это температура такого абсолютно черного излучателя, поверхность которого совпадает с внутренней поверхностью кладки и который дает на поверхность материала тепловой поток, равный сумме тепловых потоков от газов и кладки»*. Т.к. тепловой поток $q_м$ – объективная величина, т.е. не зависит от того, какая температура источника тепла использована в формуле (2.1), приведенная степень черноты системы $\varepsilon_{сист}$ должна зависеть от выбранной $T_{ист}$. Если обозначить степени черноты системы $\varepsilon_{гкм}$ при $T_г$, $\varepsilon_{печ.м}$ при $T_{печ}$ и $\varepsilon_{км}$ при $T_{кл}$, то соотношение между ними должно быть таким: $\varepsilon_{гкм} < \varepsilon_{печ.м} < \varepsilon_{км}$. (расчетные формулы приводятся в разделе 7.2).

Расчет конвективного теплообмена в печах с относительно низкой температурой производится по эмпирическим критериальным формулам

$$Nu = f(Re, Pr, Gr),$$

приведенным в разделе (7.2).

2.3 Внутренний теплообмен. Нагрев и плавление

Тепло, полученное на поверхность кладки и металла по внешней задаче, распространяется вглубь посредством теплопроводности. Через кладку (обмуровку) печи возможна стационарная передача теплопроводностью в печах непрерывного действия; такой вид теплопроводности приводит к тепловым потерям в окружающую среду. В печах непрерывного

действия в кладке возможна как стационарная (после выхода печи на постоянный режим) теплопроводность, так и нестационарная в периоды разогрева и остывания печи. Теплопроводность в металле является нестационарной, т.к. происходит накопление тепла, повышение температуры, и как результат – качественное изменение материала: приобретение пластичности (нагрев металла перед обработкой давлением), получение нового материала (обжиг известняка в известь), расплавление с целью получения нового материала из сырья, или с целью получения жидкого металла для последующего литья, и др. В основе расчета процессов внутреннего теплообмена теплопроводностью лежит дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье (см. раздел 7.3), которое решается в вариантах стационарного или нестационарного состояния.

2.4 Гидрогазодинамика

Работа топливной печи во многом определяется движением потоков: воздуха по холодным или горячим воздуховодам, газообразного топлива по газопроводам низкого, среднего и высокого давления, мазута по мазутопроводам, пылеугольного топлива в системах пневмотранспорта, дымовых газов по дымовому тракту. Для обеспечения движения указанных потоков требуется установить необходимые средства – вентиляторы, насосы, дымососы – на основе гидрогазодинамических расчетов сопротивления систем. Основы расчетов приведены в разделе 6.5.

2.5 Охлаждение конструкций

Высокотемпературные металлургические печи должны выдерживать значительные механические (статические и

динамические) нагрузки. Эти нагрузки воспринимаются металлическим корпусом, отдельные элементы которого работают в условиях высоких температур. Например, кожух доменной печи, подпятовые балки сталеплавильных печей, корпуса горелок и кислородных фурм, подовые трубы методических нагревательных печей, и т.д. Для обеспечения работоспособности и достаточно долгого срока службы эти элементы охлаждают, при этом тепло передается охлаждающей среде, а температура конструкций снижается и сохраняется необходимая прочность конструкций.

В качестве охлаждающей среды может использоваться:

1) *техническая вода*, содержащая соли жесткости. Для предотвращения образования *накипи* на внутренних поверхностях охлаждаемых полых конструкций требуется большой расход воды, которая может нагреваться не более, чем на $10-15℃$. В этом случае отводимое от конструкций тепло никак не используется, а вода, как правило, отводится в канализацию. Охлаждаемые элементы корродируют, засоряются и быстро выходят из строя, а в случае выпадения накипи, имеющей низкую теплопроводность и выполняющей роль внутреннего теплоизолятора, прогорают;

2) *химически очищенная* и деаэрированная вода. Расход такой охлаждающей среды значительно меньше, т.к. допускается более высокий нагрев воды. Исключается коррозия поверхностей охлаждения и накипеобразование, поэтому длительность службы конструкций увеличивается. Возможно, некоторое полезное использование тепла. В системе оборотного водоснабжения должно быть включено охлаждение воды, химводоочистка и деаэрация. Недостатком способа является высокая стоимость воды;

3) *кипящая вода*. Такой способ называется «испарительное охлаждение». В процессе охлаждения образуется водяной пар, который отводится из системы и полезно

используется, например, в системах теплоснабжения. Для охлаждения требуется в десятки раз меньше воды, чем в вариантах, описанных выше, т.к. используется внутренняя теплота парообразования. Испарительное охлаждение является наиболее прогрессивным и используется практически на всех современных печах.

2.6 Внутреннее и внешнее использование вторичных энергоресурсов

Дымовые газы, отводимые из рабочих камер металлургических печей, имеют температуру от 700 до 1500℃, содержат большее количество физического и химического тепла и являются *вторичными энергетическими ресурсами* (ВЭР). Использование ВЭР является крупной теплотехнической задачей.

ВЭР в печах используется, прежде всего, для подогрева компонентов горения – воздуха и газового топлива с низкой теплотой сгорания. Такое использование ВЭР называют *внутренним*, т.к. тепло с подогретым воздухом возвращается в печь, при этом снижается расход топлива, а при необходимости – повышается температура в печи. Подогрев компонентов горения производится в стационарных и нестационарных теплообменниках (рекуператорах и регенераторах).

Дымовые газы после рекуператоров и регенераторов часто имеют достаточно высокую температуру. В этом случае возможно дальнейшее использованием ВЭР с получением *товарной тепловой энергии*, которая используется вне печи. Такое использование ВЭР называют *внешним*. Примером внешнего использования ВЭР могут служить котлы-утилизаторы, в которых вырабатывается водяной пар.

3 Материалы для сооружения печей

3.1 Керамические и металлические общестроительные материалы

При сооружении печей широко используются обычные строительные материалы, металлы и сплавы.

Щебень используют в качестве крупного заполнителя бетона. Его получают путем дробления горных пород или кирпича. Для получения кислотоупорного щебня используют вулканические горные породы: андезит и диабаз.

Бутовый камень применяется в качестве заполнителя в бутобетоне и представляет собой крупные куски горных пород. Камни по своему происхождению могут быть из песчаников и известняковые. Камень из песчаников способен выдерживать температуру до 580ºС, а известняковые – только до 180 ºС. Бутовую кладку ведут на строительных растворах.

Строительные растворы применяют для скрепления штучных строительных изделий и кусковых материалов в монолит (кладочные растворы). Это смесь из мелкого заполнителя (песка), вяжущего вещества и воды, образующая при затвердевании искусственный каменный материал. В качестве вяжущего вещества используется цемент. Наиболее широко применяют портландцемент, который выпускают с различными значениями предела прочности при сжатии, приобретенного после выдержки на воздухе в течение 28 суток. Эта величина и является маркой цемента: 200, 250, 300, 400, 500, 600 (10^{-1} МПа).

При сооружении фундаментов широко применяется шлакобетон. Его получают путем добавления в цемент 30 – 50 % доменного шлака.

Гидроизоляционные материалы используют для защиты фундаментов и других элементов печного агрегата от грунтовых вод. Для этой цели применяют толь и рубероид (картон, пропитанный смолой и битумом), а также гидрозол

(асбестоцеллюлозный картон, пропитанный битумом с температурой размягчения не ниже 50ºС). Используют также асбестовое волокно, пропитанное битумом с температурой размягчения не ниже 60ºС, а затем прокатанное в полотно толщиной 3-4мм. Оно называется борулин.

Бетон – искусственный каменный материал, получаемый в результате твердения бетонной смеси, состоящей из крупного и мелкого заполнителя, вяжущего вещества, специальных добавок и воды. В качестве заполнителя используют смесь песка (крупностью 0,15-5мм) и гравия или щебня (10-70мм). Вяжущими чаще всего являются различные цементы. Бетоны классифицируются по объемной массе, виду вяжущего вещества и заполнителя, прочности, морозостойкости и назначению.

Марка бетона характеризует его прочность при сжатии в стандартных условиях и меняется от 3,5 до 80 МПа. Чем ответственней сооружение, тем выше марка используемого бетона.

Бетон хорошо работает на сжатие, а на изгиб и растяжение значительно хуже – допустимые напряжения отличаются на порядок.

Железобетон представляет собой сочетание стальной арматуры и бетона, образующих единое целое. Растягивающие и изгибающие усилия воспринимаются арматурой, а сжимающие – бетоном. Совместная работа бетона и стальной арматуры обеспечивается надежным сцеплением между ними. Для улучшения прочности железобетонных изделий стальную арматуру предварительно растягивают; при этом бетон в изделии оказывается заранее сжатым.

Металлы и сплавы, применяемые в печестроении. При строительстве печей широко применяются металлы и сплавы: сортовой прокат, цельнотянутые трубы, стальной лист, стальные и чугунные отливки и т.д.

Рядовые углеродистые стали и чугуны удовлетворительно служат при температурах не выше 400 ºС. В зонах с более высокой температурой используют легированные и высоколегированные стали и сплавы. Введение легирующих элементов в сталь позволяет повысить сопротивление окислению. Все легирующие элементы можно разделить на две группы: окисляющиеся легче железа (хром, марганец, кремний и т. д.) и окисляющиеся труднее железа (медь, никель, кобальт). Элементы первой группы, окисляясь, образуют на поверхности металла пленку, плотно прилегающую к металлу и защищающую его от дальнейшего окисления.

Наиболее широко применяют в печах *жаростойкие и жаропрочные стали*. Жаростойкими называют стали, хорошо противостоящие окислению поверхности при температуре выше 500 ºС, но работающие в ненагруженном или слабонагруженном состоянии. Жаропрочными называют стали, стойкие к окислению при высоких температурах и сохраняющие прочность в нагруженном состоянии в течение длительного времени. Значительное улучшение механических свойств при высоких температурах получают при добавлении никеля в хромистые жаростойкие стали.

Для деталей, работающих при высокой температуре под нагрузкой, применяют жаропрочные стали и сплавы, к которым относятся хромоникелевые стали. К недостаткам этих сталей относятся большой коэффициент линейного расширения и чувствительность к парам серы. Сплавы, содержащие более 15% никеля, вообще не рекомендуется применять для работы в атмосфере сернистых газов.

В таблице 3.1 приведены рекомендации по применению сталей для печных механизмов и деталей, работающих при высоких температурах.

Таблица 3.1 – Рекомендации по применению жаропрочных и жаростойких сталей в конструкциях печей

Жаростойкость,ºС	Марка стали	Применение и рабочая температура
800	Х14Г14Н3Т, Х18Н10Т, 2Х18Н9	Детали печей при нагрузке, конвейерные ленты, штанги толкателей, опорные элементы для кладки, детали печных роликов, внутренние кожуха термических печей
1050	Х25Т	Детали печей при незначительных нагрузках до 1000ºС, радиальные трубы, металлические рекуператоры, детали горелок
1100	15Х25Н19С2Л	Детали печей
1150	Х28, Х28АН	Детали печей до 1050ºС, рамы, поддоны, опоры подовых труб
1200	Х25Н20С2, 15Х25Н19С2Л	Детали печных роликов до 1150ºС

Вместо дорогостоящих сталей целесообразно применять более дешевые жароупорные чугуны. Из жаростойких чугунов широко применяется чугун, легированный кремнием (силал), марки ЖЧС-5,5. Из него отливают блочные рекуператоры. Они служат до температуры стенки 850 ºС. Применяются также хромистые чугуны марок ЖЧХ-1,5, ЖЧХ-2,5 для дроссельных клапанов, работающих в среде горячего газа и воздуха при температуре 630-700ºС.

Чугуны, легированные алюминием, с пластинчатыми или шаровым графитом марок ЖЧЮ-22, ЖЧЮШ-22 могут применяться до температур 1000-1100ºС.

3.2 Огнеупорные и теплоизоляционные керамические материалы

Огнеупоры – это строительные керамические материалы, служащие для сооружения тепловых агрегатов, способные длительное время противостоять действию высоких температур, воздействию физико-химических процессов, сохраняя при этом строительную прочность, и имеющие огнеупорность не ниже 1580ºС.

Классификация огнеупоров производится в соответствии со стандартами по следующим признакам:

1) химико-минералогическому составу,
2) огнеупорности,
3) пористости,
4) типу оксида,
5) способу формирования,
6) термической обработке,
7) форме и размерам,
8) области применения.

В классификации по химико-минералогическому составу используются следующие названия минералов, оксидов и химических комплексов:

- необожженный каолинит (огнеупорная глина)	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$
- каолинит (46% Al_2O_3)	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$
- силиманит (андалузит, кианит) (63% Al_2O_3)	$Al_2O_3 \cdot SiO_2$
- муллит (71,8% Al_2O_3)	$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$
- кварц (кремнезем)	SiO_2
- корунд	Al_2O_3
- периклаз	MgO
- магнезитоферрит	$MgO \cdot Fe_2O_3$
- форстерит	$2MgO \cdot SiO_2$
- необожженный доломит	$CaMg(CO_3)_2$
- доломит	$CaO \cdot MgO$
- монтичеллит	$CaO \cdot MgO \cdot SiO_2$
- шпинели	$MeO \cdot Al_2O_3$ (например $MgO \cdot Al_2O_3$)

- модификации кремнезема:

α – кварц,
β – кварц,
α – тридимит,
β – тридимит,
γ – тридимит,
} обладают максимальной термостойкостью
α – кристобалит,
β – кристобалит,
аморфная

По химико-минералогическому составу огнеупоры разделяют на классы:

- *кремнеземистые огнеупоры* – огнеупорная основа – кремнезем ($SiO_2 > 93\%$). Сюда относятся динасы на известковой и глинозёмистой связке ($CaO + Al_2O_3$ до 5%) и кварцевые стекла ($SiO_2 \geq 99\%$);

- *алюмосиликатные* – на основе Al_2O_3 и SiO_2. Сюда относятся полукислые (Al_2O_3 $15 \div 30\%$, $SiO_2 > 65\%$), нейтральные (шамотные) (Al_2O_3 $25 \div 40\%$), высоко-глиноземистые ($Al_2O_3 > 45\%$), корундовые ($Al_2O_3 > 75\%$);

- *магнезиальные* (основные) на основе MgO. Сюда относятся магнезитовые ($MgO > 90\%$), форстеритовые ($2MgO \cdot SiO_2$), шпинельные ($MgO \cdot Al_2O_3$), доломитовые ($MgO \cdot CaO$);

- *хромомагнезитовые* – на основе MgO и Cr_2O_3. Сюда относятся магнезитохромитовые (Cr_2O_3 $5 \div 18\%$; $MgO > 60\%$), хромомагнезитовые (Cr_2O_3 $15 \div 18\%$; MgO $40 \div 60\%$), хромитовые (Cr_2O_3 $25 \div 30\%$; $MgO < 40\%$);

- *углеродистые* на основе углерода (C). Сюда относятся графитизированные ($C \geq 98\%$), угольные ($C > 85\%$), углеродосодержащие (C $5 \div 70\%$);

- *карбидные* – на основе различных карбидов. Например, карбида кремния SiC (карбидокремниевые огнеупоры SiC $70 \div 90\%$);

- *цирконистые* – на основе ZrO_2. Например, циркониевые (ZrO_2 $18 \div 90\%$).

По огнеупорности материалы разделяют на

- огнеупорные (огнеупорность 1580-1770ºС),
- высокоогнеупорные (1770-2000ºС),
- высшей огнеупорности (более 2000ºС).

По пористости огнеупоры разделяют на

- особо плотные – кажущаяся (открытая) пористость (ОП) менее 3%,
- высокоплотные – ОП 3÷10%,
- плотные – ОП 10÷16%,
- уплотненные – ОП 16÷24%,
- легковесные – ОП 45÷85%,
- ультралегковесные – ОП более 85%.

По типу оксида, служащего огнеупорной основой огнеупоры делятся на

- кислые (SiO_2),
- нейтральные (Al_2O_3),
- основные (MgO, CaO).

По способу изготовления огнеупоры делят на естественные и искусственные. Последние делятся на

- пластично формованные,
- литые (плавленные),
- сухоформованные (трамбованные).

По термической обработке огнеупоры делят на

- обожженные (в огнеупорных печах),
- безобжиговые (высушенные при температуре 250-400ºС с последующим обжигом в металлургической печи).

По сложности формы и размерам огнеупоры делят на

- простые (нормальных размеров, прямые и клиновые разных размеров),
- фасонные специального назначения разной формы и размеров.

По области применения

- по применению в технологических агрегатах (общего назначения, для доменных печей, для мартеновских и др. печей, для кладки регенеративных и рекуперативных насадок, для кладки ковшей и т.д.).

- по применению в конструктивных элементах (сводовый кирпич, арочный кирпич, пятовый кирпич, насадочный кирпич, и т.д.).

Физические свойства огнеупоров.

Пористость подразделяют на следующие виды:

1) общую, определяемую как отношение объема всех пор к общему объему изделия;
2) кажущуюся – отношение объема открытых пор к общему объему;
3) закрытую – отношение объема закрытых пор к общему объёму.

Чем больше кажущаяся пористость, тем хуже огнеупор противостоит разъедающему действию шлаков и металла.

Газопроницаемость. Так как в огнеупорах есть сквозные поры, то при наличии разницы давлений между печным пространством и окружающей средой через них могут проходить газы. С повышением температуры газопроницаемость понижается, т.к. увеличивается вязкость газов.

Теплопроводность. Теплопроводность огнеупоров, которые выполняют функцию обмуровки (футеровки) печи должна быть низкой; в тех случаях, когда тепло передается в зону технологического процесса через огнеупоры (муфели, рекуператоры), повышение теплопроводности желательно. Теплопроводность зависит от природы материала, пористости и температуры. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры имеет вид

$$\lambda_t = \lambda_0 + в\mathrm{t}, \mathrm{Вт}/(\mathrm{м} \cdot \mathrm{К}),$$

λ_0 – при нормальных физических условиях;

$в > 0$ для большинства огнеупоров, кроме форстерита и магнезита.

Электропроводность. Большинство огнеупоров при низких температурах являются диэлектриками. С ростом температуры и появлением жидкой фазы внутри огнеупоров электропроводность последних начинает возрастать. Так, шамотные и динасовые огнеупорные изделия при температуре выше 1200 ºС становятся электропроводными. Электрическое сопротивление определяют по справочникам. На электросопротивление влияет состав огнеупоров. Увеличение содержания оксидов железа и титана приводит к уменьшению сопротивления, что необходимо учитывать при выборе огнеупоров для электросталеплавильных печей.

Теплоемкость. Теплоемкость огнеупоров имеет существенное значение при выборе материалов для регенераторов и обмуровки печей периодического действия. Величина удельной теплоемкости огнеупоров колеблется от 0,4 до 1,7 Дж/(кг · К) и с повышением температуры возрастает. Теплоемкость определяется калориметрическим способом и находится по справочникам.

Свойства огнеупоров, наиболее широко используемых в металлургических печах, приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Свойства огнеупоров, наиболее широко используемых в печах

Тип огнеупоров	Группа огнеупоров	$t_{огн}$, °С	$t_{н.р.}$, °С	$t_{max.раб}$, °С	ρ, кг/м^3	λ, Вт/(м·К)	c, кДж/(кг·К)	ТС, т.с.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Кремнеземистые	Динасовые	1690-1720	1640-1660	1650-1700	1840-1970	$1,23+70\cdot10^{-5}T$	$0,837+25\cdot10^{-5}T$	1-2
Алюмосиликатные	Шамотные	1580-1750	1300-1400	1200-1400	1830-1950	$0,84+58\cdot10^{-5}T$	$0,88+23\cdot10^{-5}T$	30
	Муллитовые (высокоглино-земистые)	1800-2000	1510-1600	1600-1650	2340-2520	$1,12+44,4\cdot10^{-5}T$	$0,84+25,1\cdot10^{-5}T$	160
Глиноземистые	Корундовые	1950-2000	1750-1800	16560-1800	2890-3120	$2,1+1,9\cdot10^{-5}T$	$0,79+42\cdot10^{-5}T$	
Магнезиальные	Периклазовые	2200-2400	1500-1700	1650-1700	2600-2800	$4,7-180\cdot10^{-5}T$	$1,05+29\cdot10^{-5}T$	
Магнезиально-известковые	Смолодомитовые безобжиговые	1800-1900	1410-1450	1300-1400	2680-2800	$3,5-108\cdot10^{-5}T$	$0,68+28,2\cdot10^{-5}T$ (1000-1900ºС)	
Магнезиально-шпинелидные	Периклазо-хромитовые	200	1500-1690	1650-1700	2950-3040	$2,58-70\cdot10^{-5}T$	$0,67+4,8\cdot10^{-4}T+2,83\cdot10^{3}T^{-2}$	
	Хромито-периклазовые	1920-2000	1450-1530	1700	2900-3150	$2,04-38,4\cdot10^{-5}T$	1,08-1,15 (20-1000ºС)	
	Хромитовые	1850-2050	1400-1600	1650-1700	3000-3200	$1,28+41\cdot10^{-5}T$	$0,84+29\cdot10^{-5}T$	
Магнезиально-силикатные	Форстеритовые	1830-1920	1550-1680	1450-1570	2620-2820	$3,5-1860\cdot10^{-5}T$	$0,89+41,9\cdot10^{-5}T$	
Хромистые	Хромокислые	2000	1750-1780	1600-1800	4400-4500	$4,07-71,5\cdot10^{-5}T$ (≥500ºС)	0,78 (25º)	

Продолжение таблицы 3.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Цирконистые	Бадделитовые	2500	1650-1700	2000-2300	5100-5630	$1,3+64\cdot10^{-5}T$	$0,54+13\cdot10^{-5}T$	
	Бакор-353	1810	1740	1750	3400-3500	$1,63+2,91\cdot10^{-5}T$	$0,65+23,3\cdot10^{-5}T$	
	Бакор-41	1830	1750	1800	3600-3800	2,2-4,2	$0,64+22,5\cdot10^{-5}T$	
	Цирконовые	2000-2300	1500-1650	1900-2000	3480-3830	$1,3+64\cdot10^{-5}T$	$0,63+13\cdot10^{-5}T$	
Углеродистые	Графитовые	2000	1900	1450-1570	1600-1650	$162,8-4070\cdot10^{-5}T$	$0,89+41,9\cdot10^{-5}T$	
	Коксовые	2500	1900	1950-2000	1350-1600	$23,2+3500\cdot10^{-5}T$ (<1000ºС)	$1,42+19\cdot10^{-5}T$ (≥400ºС)	
Карбидкремниевые	Карбидкремниевые	2000	1700-1800	1800-2000	2350-2540	$32,6-13,9\cdot10^{-5}T$ (≤1300ºС)	$0,963+14,6\cdot10^{-5}T$	

$t_{огн}$ – огнеупорность; $t_{н.р}$ – температура начала размягчения под нагрузкой 0,2 МПа; $t_{max.раб}$ – максимальная рабочая температура применения; ρ – плотность; λ – теплопроводность; с – удельная теплоемкость; ТС, т.с. – термостойкость, число теплосмен.

*Рабочие свойства огнеуп*оров.

Огнеупорность – это свойство материалов сохранять механическую прочность при высоких температурах без нагрузки. Огнеупорность определяют стандартным методом. Для этого из испытываемого материала выполняют усеченные трехгранные пирамидки (пироскопы) и устанавливают их в криптовую печь. В огнеупорных изделиях при нагреве появляется жидкая фаза, содержание которой увеличивается с ростом температуры и временем выдержки, и пироскопы под действием собственного веса начинают деформироваться. Зафиксированная в момент касания вершины пироскопа основания температура называется *огнеупорностью*. Огнеупоры разрушаются обычно при температурах ниже их огнеупорности вследствие недостаточной термостойкости, в результате химических реакций со шлаками и пылью, и др.

Механическая прочность характеризуется способностью огнеупора при службе в печах противостоять сжатию и механическому истиранию. Механическая прочность огнеупора определяется *температурой начала размягчения* ($t_{н.р.}$) *(деформации) при нагрузке 0,2 МПа.* Именно эта характеристика является показателем применимости огнеупора. Например, если огнеупорность шамота 1700ºС, а температура начала размягчения $t_{н.р.} = 1350°С$, то применять его можно в печах с температурой не больше $1350°С$.

Термостойкость – это способность огнеупоров выдерживать без разрушения резкие колебания температур. Термостойкость характеризуется числом теплосмен, т.е. нагревов и последующих резких охлаждений в воде или воздухе. Стандартный метод определения термостойкости включает нагрев огнеупора до $850°С$ и охлаждение в проточной воде (одна теплосмена). Испытание заканчивают после потери более 20% массы вследствие скалывания от температурных напряжений.

Шлакоустойчивость – это способность огнеупоров противостоять разъедающему действию шлаков. Это свойство зависит от химического состава огнеупора и шлака, пористости и температуры. Шлак, попавший на огнеупор, реагирует не только не только с его поверхностью, но и проникает по трещинам и порам внутрь материала. Поэтому для кладки элементов плавильных печей требуются огнеупоры с низкой пористостью.
Основные огнеупоры (магнезитовые, хромомагнезитовые, доломитовые и др.) хорошо устойчивы против разъедания основными шлаками, а кислые огнеупоры (динасовые, полукислые) – против разъедающего действия кислых шлаков. Чем ближе химический состав шлака к химическому составу огнеупора, тем меньше шлакоразъедание огнеупора. С повышением температуры жидкоподвижность шлаков увеличивается, и разрушение огнеупоров возрастает. Наличие плавней в огнеупорах снижает их шлакоустойчивость. Устойчивы к действию шлаков огнеупоры, поверхность которых не смачивается жидким шлаком, как например углеродистых изделий. Шлакоустойчивость определяют по степени разъедания огнеупора шлаком в течение 3-4 ч. При температуре 1500°С.

Правильность формы и размеров огнеупорных изделий. Огнеупоры изготовляют в виде нормального кирпича и фасонных изделий. Формы и размеры всех изделий стандартизированы. В процессе производства (сушки, обжига) изделия могут деформироваться. Отклонения от стандартных размеров усложняют кладку, которая становится менее плотной, а также могут быть причиной концентрации механических напряжений и это становится причиной разрушения изделий. Поэтому стандартами и техническими условиями ограничены отклонения от заданных размеров. Например, на периклазошпинелидные изделия допускают отклонения по длине и ширине ±2,5%, а по толщине ±3%. Кривизна по большой плоскости для изделий до 300 мм допускается для I сорта 2 мм, для II сорта 3 мм.

Постоянство объема огнеупорных материалов. Сохранение постоянства объема является положительным свойством огнеупоров, т.к. в этом случае в кладке не возникает дополнительных напряжений и ослаблений, которые могут привести к нарушению строительной прочности, особенно сводов и арок. Многие огнеупоры во время службы в печах изменяют свой объем в результате термического расширения, усадки, деформации при нагрузке. Дополнительный рост или усадку огнеупоров вычисляют по формуле

$$\Delta V = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \cdot 100\%,$$

где V_0 – первоначальный объем, V_1 – объем после нагрева.

В некоторых огнеупорах (магнезитовых и хромомагнезитовых) процессы изменения объема обратимы, т.е. после охлаждения нагретых изделий их объем остается таким же, как до нагревания. В динасовых и шамотных огнеупорах наряду с обратимыми процессами идут и необратимые, в результате чего динас после службы в печах увеличивается в объеме, а шамот уменьшается.

Краткая характеристика некоторых штучных видов огнеупоров (таблица 3.2).

Динасовые – кислые огнеупоры, содержащие $93 - 96\%\ SiO_2$. Огнеупорность $1710 - 1720°C$; температура начала деформации (размягчения) под нагрузкой $t_{н.р.} = 1650°C$. Динасовые изделия обладают крайне низкой термостойкостью (1-2 теплосмены). Применяются на участках металлургических печей с высокой температурой, со стабильным температурным режимом, в кислых средах. Стоимость динаса низкая.

Шамотные – нейтральные алюмосиликатные огнеупоры, содержащие $Al_2O_3 > 30\%$; огнеупорность $1580 - 1780°C$;

$t_{н.р.} \cong 1350°C$. обладают высокой термостойкостью до 30 теплосмен. Стоимость низкая.

Высокоглиноземистые – алюмосиликатные огнеупоры, содержащие $Al_2O_3 > 45\%$; огнеупорность $1800 - 1840°C$; $t_{н.р.} = 1540 - 1580°C$. Обладает весьма высокой термостойкостью – до 160 теплосмен.

Магнезитовые – основные огнеупоры, содержащие $MgO > 91\%$, $CaO{\sim}3\%$; огнеупорность $2180°C$; $t_{н.р.} = 1650°C$; термостойкость низкая (~ 4 теплосмены). Устойчивы против основных шлаков; неустойчивы против контакта с водой. Применяют для кладки подин в высокотемпературных плавильных печах.

Доломитовые – основные огнеупоры на основе ($MgO \cdot CaO$). По свойствам близки к магнезитовым. Неустойчивы на воздухе, т.к. CaO соединяется с H_2O и CO_2 воздуха, что сопровождается увеличением объема. В качестве стабилизатора в шихту для производства огнеупора добавляют 4-11% смолы. Такие огнеупоры называют смолодоломитовые, они хорошо выдерживают воздействие основных шлаков, их применяют для футеровки кислородных конверторов и подин электросталеплавильных печей. Смолодоломитовые огнеупоры изготовляют на месте, смолодоломитовые цехи обычно располагают рядом с конверторными.

Углеродистые огнеупоры содержат до 90% C. Сырьем для их производства служат кокс, термоантрацит и графит. В качестве связующего используют обезвоженную каменноугольную смолу, огнеупорную глину или органические клеящие добавки. Огнеупорность и температура начала деформации высокие, они хорошо устойчивы против воздействия любых шлаков, термостойки. Однако их серьезным недостатком является окисление (горение) при температуре выше $600°C$. Поэтому применение углеродистых огнеупоров целесообразно в

условиях восстановительной или нейтральной среды. Углеродистые огнеупоры нужно и применяют главным образом для кладки лещади и стен горна доменных печей, причем рабочую футеровку стен выполняют из коксовых изделий, а наружную, обращенную к холодильникам, и лещадь – из графитовых, теплопроводность которых выше.

Огнеупорные бетоны, растворы и обмазки.

Огнеупорные бетоны – это смесь цемента (связующего вещества), воды и заполнителя, которая после отвердения приобретает камнеподобное состояние. Огнеупорные бетоны всё чаще используют для сооружения печей наряду со штучными огнеупорами, т.к. это существенно ускоряет и удешевляет строительство. При сооружении металлургических печей из бетона следует соблюдать большую осторожность во время разогрева, т.к. бетон не обожжен. В качестве связующих веществ используют:

- портландцемент, стабилизированный тонко измельченным диатомитом, шамотом, глиной. Бетоны на стабилизированном цементе с хромомагнезитовым заполнителем применяют при температурах до $1700°C$, с шамотным заполнителем до $1400°C$;

- глиноземистый и высокоглиноземистый цементы (на основе Al_2O_3) используют в бетонах с шамотным, хромомагнезитовым или хромистым заполнителями. Такие бетоны служат при температурах $1150 - 1700°C$;

- периклазовый цемент (на основе MgO) используют для приготовления бетонов с хромомагнезитовым и магнезитовым заполнителями.

Огнеупорные растворы и обмазки – это пластические огнеупорные массы, служащие для заполнения швов между кирпичами и скрепления кладки, в качестве тепловой защиты, для уплотнения и теплоизоляции. Огнеупорность и химический состав растворов должен соответствовать огнеупорности и химическому составу применяемого штучного огнеупора.

Растворы изготавливают из мертеля (сухого порошка соответствующего состава) и воды. Жидкие растворы получают путем затворения водой в пропорции 600кг воды на 1м^3 сухой массы, полугустые 500кг:1м^3 , густые 400:1м^3 . Размер зерна сухой массы должен быть как минимум в 2 раза меньше толщины шва кладки. Самый мелкий порошок применяют в жидких растворах для особо тщательной кладки.

Защитные обмазки наносятся на внутреннюю поверхность кладки, как правило, путем торкретирования (аэродинамический способ нанесения огнеупорного раствора). *Уплотнительные обмазки* наносят снаружи кладки с целью повышения газоплотности. *Теплоизоляционные обмазки* наносятся также снаружи, причем в состав входит жидкое стекло.

Теплоизоляционные материалы – это керамические материалы с низким коэффициентом теплопроводности ($\lambda = 0{,}08 \div 0{,}6$ Вт/(м$^2 \cdot$ К)) . используются для наружной теплоизоляции и для футеровки низкотемпературных печей.

Искусственные легковесные огнеупоры. Существуют три способа получения легковесных огнеупоров: выгорающих добавок, пенообразующий и химический. Этими способами можно получить легковесные изделия из многих огнеупоров. При производстве легковеса способом выгорающих добавок в массу вводят 30-35% (по массе) древесных опилок, древесного угля или коксика. Сушат и обжигают легковесные изделия по такому же режиму, что и для обычных огнеупоров данного вида. Объемная плотность легковесов, полученных способом выгорающих добавок, составляет 1000–1300 кг/м^3, коэффициент теплопроводности менее 0,5 Вт/(м$^2 \cdot$ К) при средней температуре 570° С.

Более высокими теплоизоляционными свойствами характеризуются изделия, полученные химическим или пенообразующим способами. Объемная плотность изделий составляет при этом 300-1500 кг/м^3. Массу при данных способах производства готовят в виде шликера. В качестве

пенообразующего материала применяют канифольное мыло, дающее устойчивую пену. При химическом способе в массу вводят газообразующие материалы. Разлитую по формам массу сушат и затем обжигают.

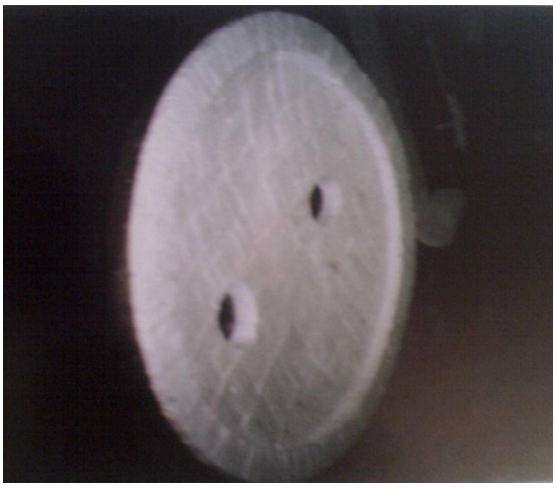
Вследствие значительного коробления изделий в процессе обжига их подвергают механической обработке для доведения до необходимых размеров. Механическая прочность легковесных огнеупоров небольшая, их термостойкость и шлакоустойчивость низкие. Предельная температура использования шамотного легковеса составляет 1250°С, динасового 1550°С.

Естественные теплоизоляционные материалы. Наибольшее распространение из этой группы получили асбест, диатомит, минеральная вата, зонолит и др. *Асбест* употребляют в виде картона, бумаги, ваты, шнура, он является составной частью многих теплоизоляционных обмазок. Предельная рабочая температура его 500°С. Выше этой температуры асбест дегидратируется и превращается в порошок. *Диатомит (трепел)* применяют в сыром и обожженном состоянии в виде засыпки и готовых изделий. Он выдерживает температуру до 900°С. Изделия выпускаются трех марок (по объемной плотности): 500, 600 и 700 с коэффициентом теплопроводности соответственно 0,18; 0,21 и 0,27 $Вт/(м^2 \cdot К)$ Механическая прочность таких изделий низкая. Предел прочности при сжатии колеблется от 60 до 150 $Н/см^2$. *Зонолит и минеральную вату* чаще применяют для засыпки. Предельная рабочая температура их составляет около 900°С. Свойства теплоизоляционных материалов приведены в таблице 3.3.

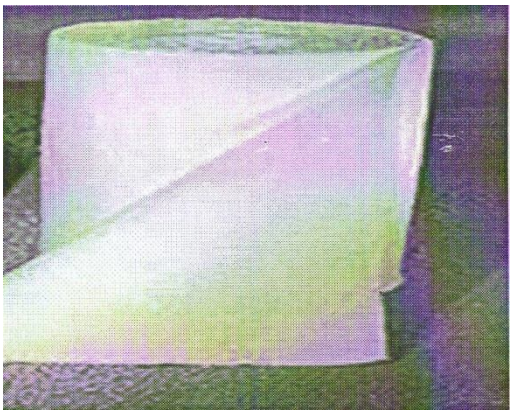
Таблица 3.3 – Свойства теплоизоляционных материалов и изделий

Наименование и марка	Плотность ρ, кг/м^3	Теплопроводность, λ, Вт/(м^2 · К)	Теплоемкость c, кДж/(кг · К)	$t_{раб}^{max}$, °С
Асбест хризолитовый распущенный	150	$0{,}039+12{,}4\cdot10^{-5}\,t$	0,82-0,85	630
	400-450	$0{,}106+12{,}4\cdot10^{-5}\,t$	0,82-0,85	630
Вата стеклянная в набивке	130-170	$0{,}04+21\cdot10^{-5}\,t$	1,48	480
Маты из штапельного стекловолокна МРТ-50	80	$0{,}042+21{,}9\cdot10^{-5}\,t$	0,84	530
Маты прошивные из минеральной ваты ВФ-75	150-200	$0{,}049+13{,}3\cdot10^{-5}\,t$	0,92	630
Пенодиатомитовые изделия ПД-400	365-420	$0{,}078+16{,}5\cdot10^{-5}\,t$	0,84	930
Перлит вспученный	150	$0{,}054+13{,}9\cdot10^{-5}\,t$	-	930
Перлитокерамические изделия марки 250	250	$0{,}061+13{,}5\cdot10^{-5}\,t$	-	930
Перлитофосфогелиевые изделия марок:				
200	200	$0{,}064+10{,}9\cdot10^{-5}\,t$	-	630
300	300	$0{,}087+10{,}9\cdot10^{-5}\,t$	-	630
Полуцилиндры минераловатные на синтетическом связующем	150	$0{,}052+11{,}3\cdot10^{-5}\,t$	0,92	430
Войлок технический грубошерстный	170	$0{,}047+4{,}95\cdot10^{-5}\,t$	1,88	150
Торфяные плиты	150	$0{,}045+3{,}5\cdot10^{-5}\,t$	2,1	150

Волокнистые огнеупорные материалы – это керамические материалы, получаемые из различного огнеупорного сырья после его расплавления в виде нитей толщиной от 2 мкм до 2,0 мм или затвердевшей пены, из которых получают слегка спрессованные слои (плиты, блоки, фетр, маты), огнеупорную ткань, бумагу, шнуры, и т.п. (рисунок 3.1). Эти высокопористые материалы имеют плотность 100-300 кг/м^3 и низкую теплопроводность (особенно при низких температурах). Изделия из огнеупорных волокон сочетают в себе свойства огнеупоров и теплоизоляции. Волокнистые материалы позволяют создавать новые конструкции футеровок, обеспечивают сокращения удельного расхода энергоносителей до 30%, в 10-20 раз снижают массу и теплоемкость футеровки. При применении волокнистых материалов создаются новые легкие конструкции перекрытий печей (плоских, арочных), при этом свод является одновременно изолирующим перекрытием и теплоотражающим экраном. Волокнистые материалы не обладают какой-либо достаточной прочностью, поэтому их можно применять в печах, в которых отсутствует контакт между нагреваемым материалом и поверхностью футеровки. Особенно эффективно применение этих материалов в печах периодического действия (нагревательных, термических) с выкатным или выдвижным подом, так как футеровка малой массы и теплоемкости практически безинерционна (быстро нагревается и быстро остывает) и требуется значительно меньший расход тепла на разогрев. Достоинством волокнистых материалов являются так же небольшие затраты времени и труда на сооружение футеровки: маты или плиты монтируются с помощью крепежа или специального высокотемпературного клея. В таблице 3.4 приведены свойства некоторых волокнистых материалов, в таблице 3.5 – сравнительные показатели применения футеровок из традиционных и волокнистых материалов.



а)



б)



в)



г)



д)

а – полосные модули из алюмосиликата; б – алюмосиликатное волокно; в – фетр маты; г – фетр модульные блоки; д – шнур.

Рисунок 3.1 – Виды изделий из волокнистых огнеупорных материалов

Таблица 3.4 – Некоторые виды волокнистых огнеупорных материалов и их основные свойства

Наименование и марка материала или изделия	Температура применения, °С	Объемная масса, кг/м^3	Теплопроводность при средней температуре, Вт/(м·К)					
			200	400	600	800	1000	1200
Вата МКРВ	1150	100	0,08	0,12	0,17	0,29	0,47	0,79
Рулонный материал МКРР-130	1150	130	0,14	0,17	0,22	0,31	0,50	0,79
Плиты на органической связке МКРП-340	1150	340	0,15	0,19	0,23	0,29	0,40	0,53
Войлок МКРП-200	1150	200	0,09	0,12	0,14	0,20	0,33	0,58
Плиты на основе ваты и глинистой связки ШВП-350	1200	350	0,15	0,17	0,19	0,23	0,29	0,43
Fiberfrax (США)	1320	100	$0,08+0,15\cdot10^{-3}\,t_{ср}$					
Kaowool (GB)	1280	160	$0,06+0,3\cdot10^{-3}\,t_{ср}$					
Sibral (Чехия)	1260	150	$0,06+0,25\cdot10^{-3}\,t_{ср}$					
Kerlane (Франция)	1260	160	$0,08+0,2\cdot10^{-3}\,t_{ср}$					

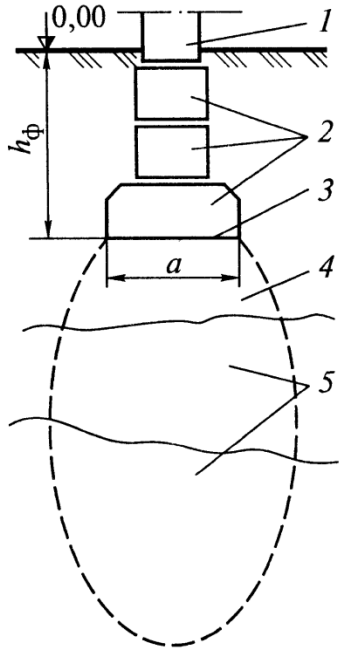
Таблица 3.5 – Сравнительные показатели применения футеровок

Показатель	Традиционное решение	Футеровка из волокнистых огнеупоров
Температура эксплуатации, °С	1200	1200
Толщина футеровки, м	0,7	0,2
Масса 1 $м^2$, кг	500-1200	50
Трудозатраты на изготовление, чел.	13,7	2,6
Расход металла на каркас 1 $м^2$, кг	150	90-100
Годовой расход топлива на компенсацию тепловых потерь через футеровку 1 $м^2$, т.усл.топлива	1	0,7
Годовой расход газа на нагрев 1 $м^2$, т.усл.топлива	12	0,05

4 Строительные элементы печей

4.1 Фундаменты

Фундаментом называют подземную часть сооружения, которая воспринимает нагрузку от надземной части и передает её на основание. *Основание* – это массив естественного грунта, на который опирается фундамент. Бывают также искусственные основания. На рисунке 4.1 представлена схема основания и фундамента, даны их конструктивные части.



1 – колонна сооружения; 2 – фундаменты; 3 – подошва фундамента; 4 – несущий слой основания; 5 – подстилающие слои основания

Рисунок 4.1 – Схема естественного основания и фундамента

Фундаменты располагают на прочном, устойчивом основании. Прочность основания обусловлена прочностью несущего и подстилающего слоев грунта. Наиболее прочные и устойчивые грунты скальные и крупнообломочные. Слабые, неустойчивые естественные грунты требуют усиления, т.е. создания искусственных оснований. В этом случае широко

используют свайные фундаменты, которые незаменимы в сложных грунтовых условиях.

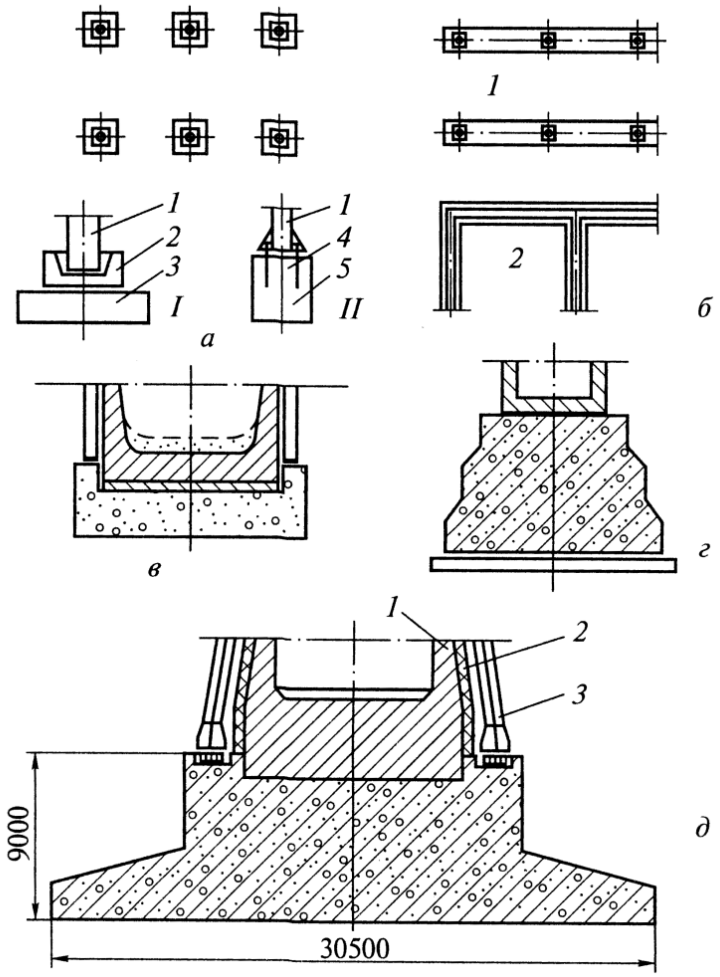
При сооружении фундаментов придерживаются следующих общих правил: давление на грунт должно быть равномерным по подошве фундамента; каждая установка или крупный ее элемент должны иметь самостоятельный фундамент, не связанный с фундаментом цеха; непосредственно примыкающие друг к другу фундаменты должны иметь одинаковую глубину заложения. Выделяют фундаменты мелкого ($h_ф$<0,5a, где a – ширина подошвы фундамента), среднего ($h_ф$=0,5÷2a) и глубокого ($h_ф$>2a) заложений. Глубина заложения фундамента во всех случаях желательна выше уровня грунтовых вод, а для объектов вне отапливаемого помещения она должна быть больше глубины промерзания почвы.

Для сооружения жестких монолитных фундаментов используется строительный кирпич, бутовый камень и бетон, а для фундаментов на упругом основании – железобетон. Последний является наиболее перспективным современным материалом для сооружения фундаментов.

По форме конструкции фундаменты делят на столбовые, ленточные, сплошные и массивные (рис. 4.2).

Столбовые фундаменты представляют собой отдельно стоящие столбы с развитой опорной частью, передающие на грунт умеренные сосредоточенные нагрузки от колонн сооружения, например мартеновской печи.

Ленточные – выполняются под вытянутые конструкции (протяженные печи); они могут быть параллельными и перекрещивающимися. Усилия на них передаются колоннами или непосредственно стенами сооружений. Ленточные и столбовые фундаменты сооружают для печей, у которых желательно иметь холодный под, подвергающийся периодическим осмотрам.



а – столбовой с фундаментными опорами под железобетонные I и стальные II колонны; 1 – колонна; 2 – железобетонный стакан; 3 – фундаментная плита; 4 – анкерные болты; 5 – элемент фундамента; б – ленточный параллельный 1 и перекрещивающийся 2; в – сплошной под отражательную печь; г – массивный под дымовую трубу; *д* - массивный под доменную печь объемом 1700 м^3: 1 - огнеупорная кладка; 2 – тепловая изоляция и стальная обшивка; 3 – колонна каркаса.

Рисунок 4.2 – Примеры конструкций фундаментов разных типов

Сплошные фундаменты образуют единое основание под всю печь с теплым подом (например, отражательную печь), у которой не требуется доступа к нему в процессе эксплуатации.

Температура бетона, примыкающего к поверхности ограждения печи, не должна превышать 80°С. Для обеспечения этого требования между горячей поверхностью и фундаментом

подкладывают слой тепловой изоляции, оставляют воздушный зазор или выполняют вентиляционные каналы – шанцы (рис. 4.3).

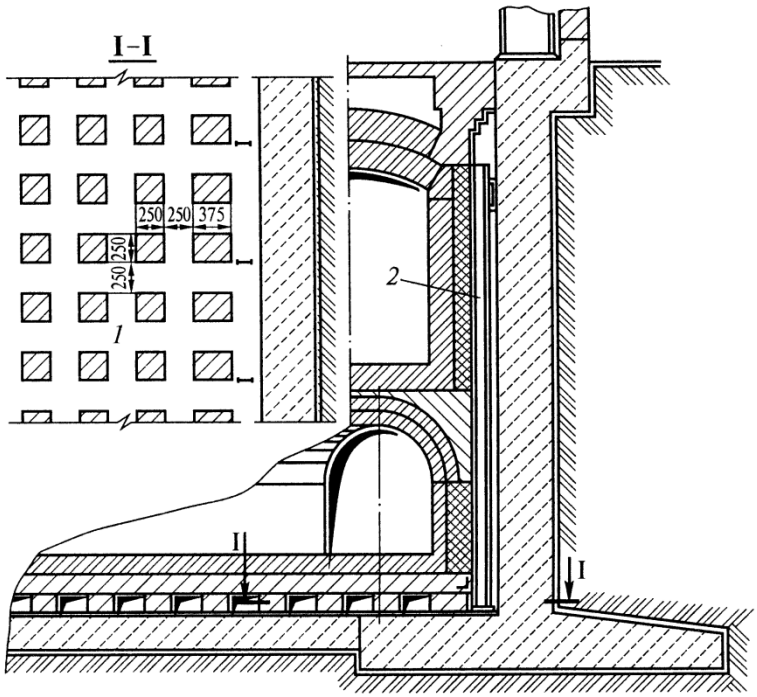


Рисунок 4.3 – Пример конструкции шанцев (1) и воздушного зазора (2) между кладкой и фундаментом

Массивные фундаменты применяются для сооружений большой массы и при сосредоточенной нагрузке, например для доменной печи, дымовых труб. Массы такого фундамента и сооружения соизмеримы.

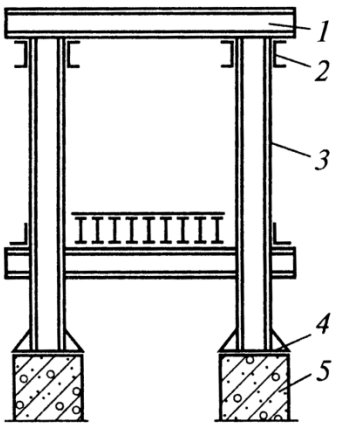
4.2 Каркасы

Каркасы печей представляют собой пространственные металлические конструкции, которые выполняют две функции:

- воспринимают и передают на фундамент вес сооружения или отдельных его частей;
- воспринимают усилия со стороны футеровки, возникающие при ее тепловом расширении.

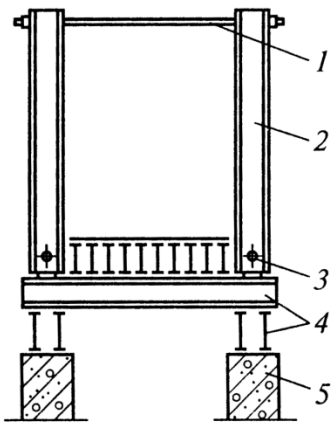
Таким образом, каркас является одновременно несущей конструкцией и обвязкой футеровки печи. Каркас возводят на фундаменте, а затем ведут монтаж оборудования, частей и узлов печи. Каркасы, воспринимающие усилия от футеровки, делят на жесткие и регулируемые и выполняют в виде рамных и листовых конструкций. Жесткий удерживающий каркас при расширении футеровки не смещается, а направляет ее деформацию к температурным швам.

Рамный жесткий каркас (рис. 4.4) изготавливается цельносварным из сортового проката: стойки и прогоны – из двутавров и швеллеров №16-30 и выше, часто используются стальное литье и слябы, некоторые части каркаса в зоне высоких температур выполняются принудительно охлаждаемыми, например рамы завалочных окон и пятовые банки мартеновских печей. Шаг стоек 1000 – 1500 мм. Нижний конец стоек с опорной плитой крепят анкерными болтами к железобетонной колонне, опирающейся на фундамент, или сваркой к стальной подовой раме. Поперечные продольные связи каркаса жесткие.



1 – поперечная связка; 2 – продольная связка (прогон); 3 – стойка; 4 – башмак стойки с опорной плитой; 5 – колонна.

Рисунок 4.4 – Рамный жесткий каркас



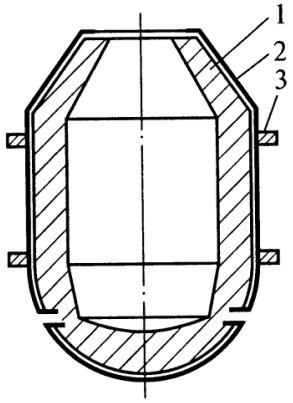
1 – верхняя регулируемая связь; 2 – стойка; 3 – шарнирное или жесткое крепление; 4 – сварная рама; 5 – колонна.

Рисунок 4.5 – Рамный регулируемый каркас

Рамный регулируемый каркас (рис. 4.5) может не препятствовать тепловому расширению футеровки. Он представляет собой ряд пар параллельных стоек, закрепленных внизу на сварной подовой раме и соединенных попарно между собой поперечными регулируемыми связями; верхние продольные связи отсутствуют.

При разогреве распорного свода внутренняя часть огнеупорных кирпичей расширяется больше, чем наружная. Это вызывает раскрытие швов, увеличение механических напряжений в своде, его выпучивание. Регулируемый каркас позволяет отпустить (удлинить) поперечные связи, увеличить расстояние между стойками и раздвинуть пяты свода; при этом свод садится, что снимает излишние напряжения. При охлаждении свода связи подтягиваются. Такое регулирование существенно улучшает службу распорных сводов большого пролета.

Листовые или сплошные каркасы (рис. 4.6) всегда жесткие, их выполняют цельносварными из толстого стального листа (8-10 мм) с ребрами жесткости в виде колец из слябов или сортового проката. Их обычно используют для печей цилиндрической формы, например кислородного конвертера, доменных воздухоподогревателей и др. Листовой каркас одновременно выполняет функции герметизирующей обшивки.

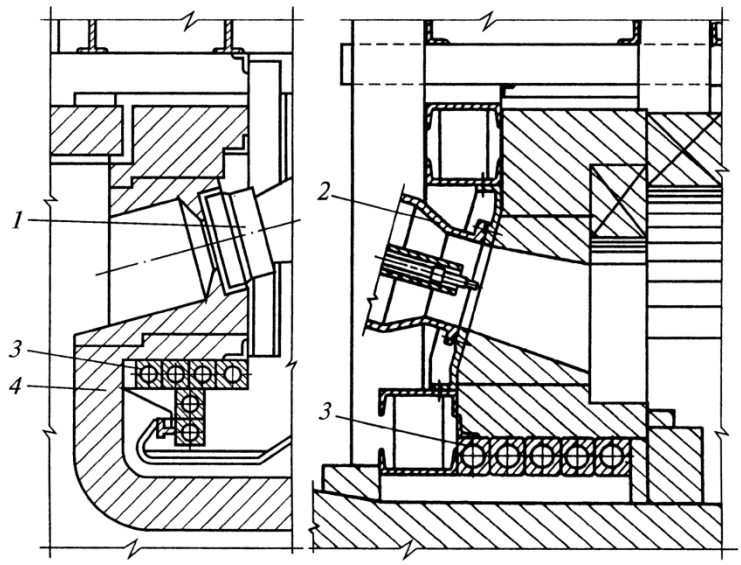


1 – футеровка; 2 – стальной лист; 3 – ребра жесткости

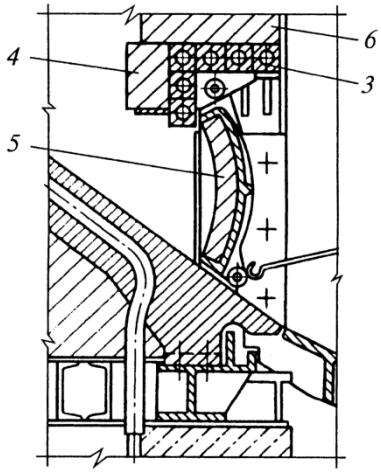
Рисунок 4.6 – Листовой сплошной каркас кислородного конвертера

Повышение температуры каркаса выше 300-400°С нежелательно, в частности, во избежание окисления и снижения прочности стали. Поэтому каркас выносят из зоны высоких температур, между футеровкой и каркасом помещают тепловую изоляцию или предусматривают вентиляционные зазоры.

Если отдельные элементы каркаса нельзя изолировать от воздействия высоких температур, то они выполняются охлаждаемыми (рис. 4.7).



а) б)



в)

а и б – узлы установки горелочных устройств при торцевом отоплении; в – узел крепления кладки при торцевой выдаче металла;
1 – горелка; 2 – форсунка; 3 – квадоратные водоохлаждаемые трубы; 4 – огнеупорные блоки;
5 – заслонка окна торцевой выдачи металла;
6 – огнеупорная кладка

Рисунок 4.7 – Конструкции водоохлаждаемых элементов каркаса нагревательных печей, выполненных из квадратных труб

4.3 Ограждения печей

К ограждениям печи (стенам, своду, поду) предъявляются следующие общие требования:

- обеспечение надежной работы в течение межремонтной кампании;
- умеренное рассеяние теплоты в окружающую среду;
- высокая газоплотность;
- возможно меньшая стоимость.

Простейшим ограждением является однослойная огнеупорная конструкция, которую называют *футеровкой* (от немецкого слова Futter – подкладка, защитный слой). Как правило, ограждение выполняют многослойным с дифференциацией функций каждого слоя – противодействие агрессивному воздействию рабочего пространства, ограничение тепловых потерь, обеспечение строительной прочности и газоплотности.

Все ограждения по способу изготовления и специфике конструкции могут быть разделены на три типа (рис. 4.8). Рассмотрим их особенности.

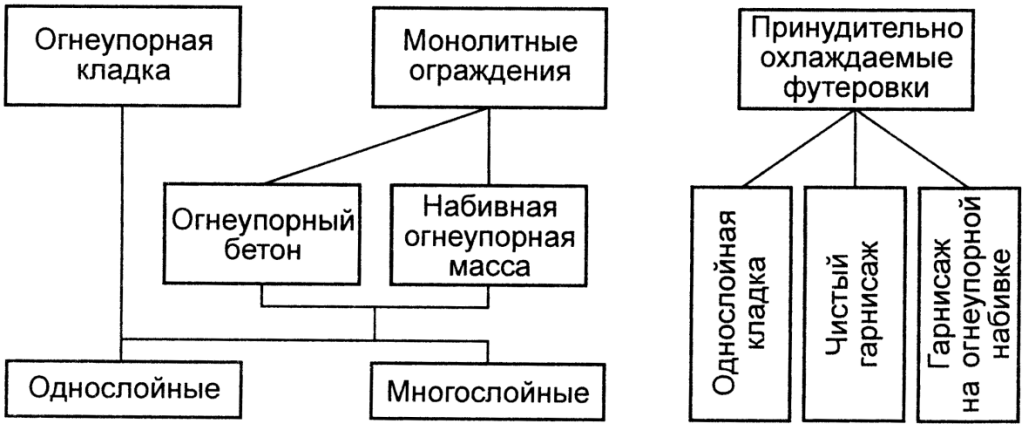


Рисунок 4.8 – Классификация ограждений печей

Однослойная огнеупорная кладка (рис. 4.9) наиболее проста конструктивно. Она выполняется из однородных штучных огнеупорных изделий. Для нее характерны большая толщина и повышенные термические напряжения, высокая теплоаккумулирующая способность и высокая плотность теплового потока в окружающую среду, большой вес конструкции и значительные напряжения сжатия.

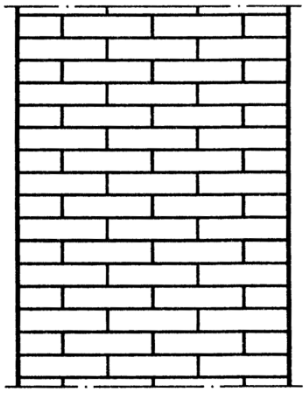
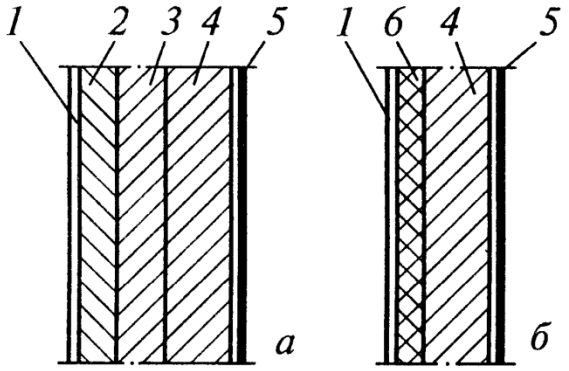


Рисунок 4.9 – Однослойная огнеупорная кладка, выполненная в перевязку

В многослойной кирпичной кладке (рис. 4.10) функции слоев разделены: огнеупор противостоит разрушающим воздействиям при высокой температуре, огнеупорное защитное покрытие увеличивает стойкость огнеупора, легковес и теплоизоляция снижают тепловой поток через ограждение, уплотняющий слой его герметизирует.

Многослойная кладка по сравнению с однослойной имеет ряд преимуществ. Она менее массивна. В результате ее выполнения уменьшается расход огнеупорного материала, снижаются теплоаккумулирующая способность и потери тепла, градиент температуры и термические напряжения в слое огнеупора.



1 – металлическая обшивка (уплотняющий слой); 2 – эффективная тепловая изоляция; 3 – легковес; 4 – огнеупор; 5 – защитный слой; 6 – волокнистый огнеупорный материал.

Рисунок 4.10 – Схема современного многослойного ограждения с использованием обычной тепловой изоляции (а) и волокнистого огнеупорного материала (б)

Качество кладки определяется толщиной швов между огнеупорными изделиями, поскольку по швам происходят разрушение футеровки и газообмен с окружающей средой. Чем ответственней огнеупорная кладка, тем тоньше швы и тем ближе свойства материала швов к свойствам огнеупорного изделия. Ниже представлена связь качества кладки с толщиной швов.

Категория кладки	I	II	III	IV
Качество кладки	Особо тщательная	Тщательная	Обыкновенная	Простая
Толщина швов, мм	<1	1-2	2-3	3-4

Кладка всухую наиболее трудоемкая, требует высокой квалификации каменщиков и точности формы огнеупорных изделий, но обеспечивает минимальную толщину швов (I категория) и высокую плотность конструкции. Для заполнения неплотностей между изделиями раствор не применяется, а используется тонкий сухой порошок того же состава, что и огнеупор.

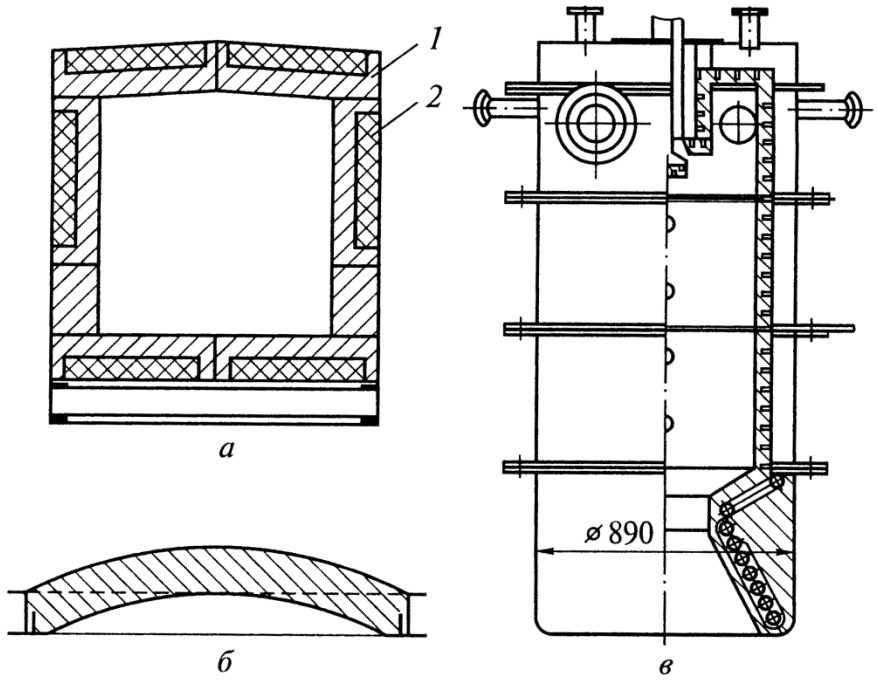
Кладка на мертельных растворах применяется наиболее часто. Чем тоньше требуется шов, тем более жидким должен быть мертельный раствор, составляемый из тонкого огнеупорного порошка (мертеля), пластифицирующего компонента, связующей добавки и воды. Для I и II категорий кладки используют жидкий, для III – полугустой, для IV – густой мертельный раствор.

Основные огнеупоры (периклазовые, периклазохромитовые, хромитопериклазовые) в сводах и стенах часто скрепляют путем прокладки между ними тонких (до 1 мм) железных пластин. При высокой температуре железо окисляется и, пропитывая прилегающие изделия, прочно скрепляет их между собой.

Монолитные ограждения выполняются из огнеупорных блоков или набивных масс (рис. 4.11). По сравнению с огнеупорной кладкой монолитные ограждения имеют преимущества. Их применение позволяет индустриализировать изготовление ограждения, сократить трудозатраты в 3-4, сроки строительства – в 2-4 и стоимость конструкции в 1,5-2 раза. Блоки и набивные массы дают возможность выполнять ограждения любых размеров и формы, хорошо сочетаются с принудительно охлаждаемыми металлическими поверхностями, облегчают проведение горячих ремонтов. Одновременно повышается стойкость футеровки. Например, кампания набивного пода электросталеплавильной печи возросла до 345 суток против 90 – срок работы пода из периклазового кирпича, простои на ремонт сократились с 7 до 4% календарного времени.

Огнеупорный бетон укладывается на стройплощадке в опалубку и приобретает строительную прочность в холодном состоянии. Более целесообразно на месте строительства вести монтаж крупных бетонных блоков, изготовленных заранее на специализированном участке. Размеры блоков ограничены 1-1,5м во избежание возникновения чрезмерных термических напряжений.

Набивная огнеупорная масса закладывается в конструкцию ограждения и послойно утрамбовывается. Она приобретает рабочие свойства при высоких температурах после вывода печи на режим, образуя монолит без швов.



а – кладка туннельной печи из монолитных панелей: 1 – огнеупорный бетон; 2 – легкий теплоизоляционный бетон; б – купольный свод рабочего пространства из огнеупорной набивной массы; в – огнеупорная набивка охлаждаемых стен вихревой плавильной камеры.

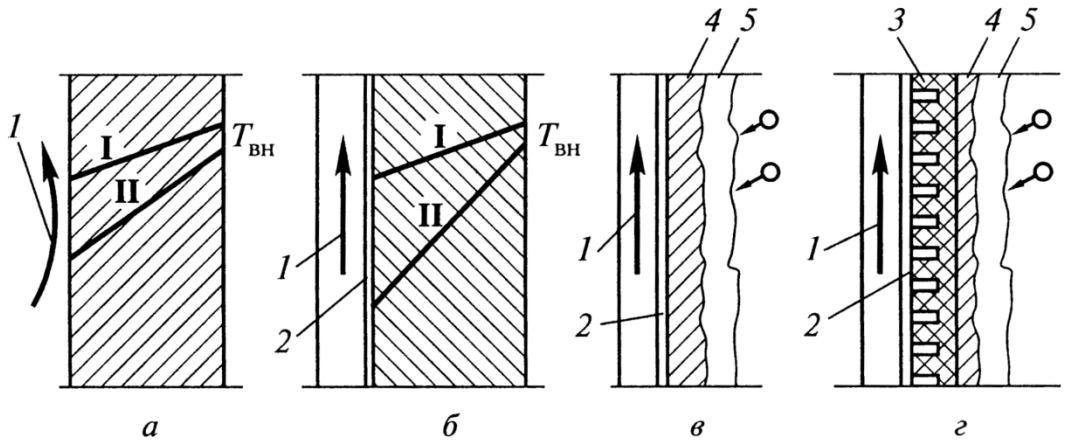
Рисунок 4.11 – Примеры монолитных ограждений

В принудительно охлаждаемых футеровках отсутствует тепловая изоляция и организовано принудительное охлаждение определенной интенсивности. Это делается для замедления износа и увеличения срока службы футеровки при одновременной форсировке технологического процесса. Наружное охлаждение производится струями вентиляторного воздуха, сжатым воздухом, водой или пароводяной смесью (испарительное охлаждение).

При использовании принудительно охлаждаемых футеровок плотность теплового потока через ограждения возрастает от

значения меньшего 1 до 4-20 кВт/м^2, но в высокофорсированных печах доля потерь тепла оказывается приемлемой – до 10-15% в тепловом балансе рабочего пространства.

Принудительное охлаждение однослойной кладки (рис. 4.12) приводит к снижению температуры огнеупора с горячей стороны, позволяет замедлить его износ и продлить межремонтную кампанию. Такая футеровка применяется при умеренной форсировке технологического процесса. Охлаждение производится струями вентиляторного воздуха (стены ванных печей), сжатым воздухом (лещадь доменных печей) или водой в металлических кессонах (крышки завалочных окон мартеновских печей).



а, б – однослойная кирпичная кладка, охлаждаемая соответственно вентиляторным воздухом и с помощью металлического кессона: I – градиент температуры в кладке без охлаждения; II – то же, при охлаждении; в – чисто гарнисажная; г – гарнисажная на огнеупорной набивке: 1 – поток охлаждающей среды; 2 – охлаждаемая металлическая стенка; 3 – огнеупорная набивка по шипам; 4 – слой застывшего расплава (гарнисаж); 5 – слой движущегося расплава.

Рисунок 4.12 – Схемы принудительного охлаждения футеровки

Охлаждение воздухом сравнительно просто выполнить, но оно требует значительного расхода электроэнергии. Охлаждение с помощью металлических кессонов более экономично, но

появление малейшего зазора между кессоном и огнеупорной кладкой резко увеличивает тепловое сопротивление и снижает эффективность охлаждения. В целом принудительное охлаждение кладки дает определенный эффект, но это решение не является радикальным, так как на поверхности рабочего огнеупора не образуется защитного слоя застывшего расплава и футеровка зачастую изнашивается полностью, хотя и замедленно.

Чисто гарнисажная футеровка образуется при застывании непосредственно на охлаждаемой металлической поверхности расплавленного технологического материала. При этом возникают два слоя (рис. 4.12 в) – застывшего расплава или гарнисажа 4 и движущегося расплава 5. Ограждение выполняется в виде сварной конструкции – кессонов или трубчатых элементов с водяным или испарительным охлаждением.

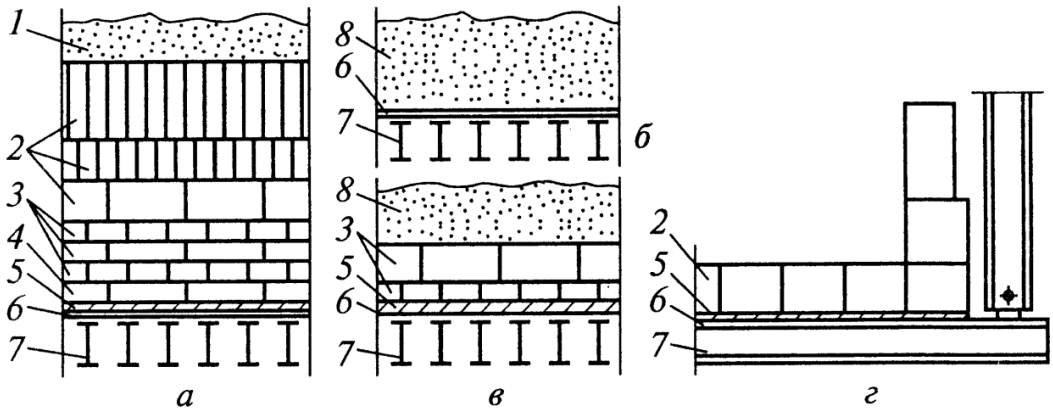
Такая футеровка абсолютно шлакоустойчива, так как отсутствует физико-химическое взаимодействие между подвижным и застывшим слоями расплава. Однако не всегда возникает прочное сцепление застывшего расплава с холодной металлической стенкой. Это приводит к периодическому отслоению отдельных участков и их выплавлению. В эти периоды локальная плотность теплового потока на оголенном участке резко возрастает до 0,5-1 МВт/м^2, возникает локальный тепловой удар, а затем происходит постепенное нарастание нового застывшего слоя. Чисто гарнисажная футеровка применяется в шахтных плавильных печах с абразивным кусковым технологическим материалом, например в чугуноплавильных вагранках.

Гарнисажная футеровка на огнеупорной набивке (рис. 4.12 г) образуется на тонком слое (не более 30 мм) набивки, нанесенной на охлаждаемую стальную стенку с приваренными к ней шипами. Шипы выполняют роль арматуры, а также повышают теплопроводность слоя набивки. Огнеупорная набивка обеспечивает хороший механический и тепловой контакт с

охлаждаемой металлической стенкой. Эта футеровка наиболее эффективна для современных высокофорсированных плавильных печей. Она обладает малой тепловой инерцией, дешева и надежна.

К основным конструктивным частям ограждений относятся поды, стены и своды.

Поды печей для переработки твердого кускового технологического материала должны обладать эрозионной стойкостью, а в плавильных печах – шлакоустойчивостью. Под чаще всего выполняется многослойным (рис. 4.13 а). На стальной лист, лежащий на балках каркаса, укладываются асбестовые листы, а на них последовательно слои тепловой изоляции, шамотного и рабочего огнеупора. Кладка ведется в ряд или в елочку, вертикальные швы выполняются вразбежку, ряды между собой не перевязываются. Такой под имеет большую толщину (800÷1500мм) и значительную тепловую инерцию.



а – многослойный; б – набивной; в – набивной в комбинации с кладкой; г – однослойный из бруса без тепловой изоляции; 1 – слой огнеупорного порошка; 2 – рабочий огнеупор; 3 – шамотный огнеупор; 4 – шамотный легковес; 5 – выстилка из асбестового картона; 6 – стальной лист; 7 – балки каркаса; 8 – набивная огнеупорная масса.

Рисунок 4.13 – Конструктивные схемы пода

Плотность пода обеспечивается тщательностью кладки (всухую) верхних слоев огнеупоров, перекрытием вертикальных швов и наличием плотного слоя огнеупорной наварки или

набивки поверх огнеупоров. Температурные швы выполняются мелкими и вразбежку по всему поду или один крупный (40-80 мм) на периферии рабочего пространства печи.

Разработаны и все шире используются монолитные набивные или набивные в комбинации с кладкой поды ванных печей (рис. 4.13 б, в), обладающие повышенной стойкостью при меньшем расходе огнеупорных материалов. Набивка толщиной 100÷400мм ведется послойно с уплотнением полусухой массы пневматическими молотками или виброметодом.

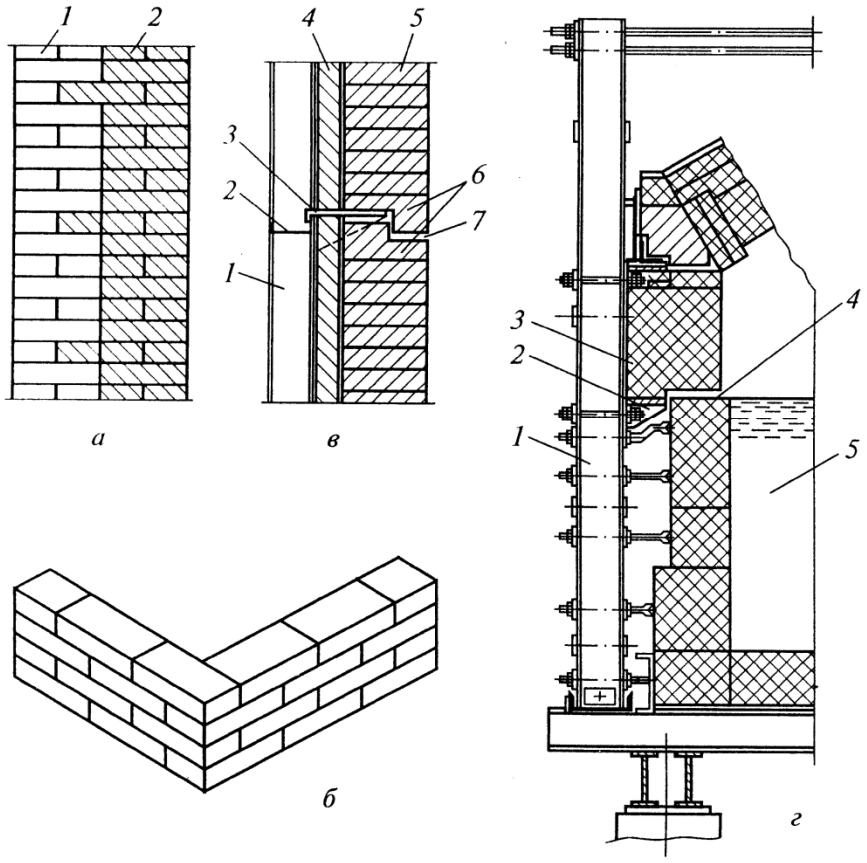
Тепловая изоляция пода не заводится под стену. Чрезмерная тепловая изоляция приводит к уменьшению стойкости футеровки.

Стены сооружаются в виде огнеупорной кладки, монолитными блоками и принудительно охлаждаемой футеровки.

При выполнении многослойной кладки отдельные слои по толщине стены перевязываются между собой для повышения устойчивости конструкции, причем огнеупорный кирпич выпускается в слой легковеса, а последний – в слой теплоизоляции (рис. 4.14 а). Для повышения прочности и газоплотности стены вертикальные швы выполняются вразбежку – смещены на 1/4–1/2 кирпича (см. рис. 4.9). Боковые и торцевые стены при сопряжении в углах перевязываются (рис. 4.14 б).

Высота стен $h_{ст}$ ограничена деформацией огнеупора под нагрузкой при высоких температурах. Если $h_{ст}$=2,5÷4 м, то стену утолщают книзу на 50 мм на каждый метр высоты. При $h_{ст}$>4 м через каждые 2,5÷4 м по высоте выполняют разгрузочные пояса или анкерные крепления с передачей веса выше лежащего участка стены на каркас (рис. 4.14 в, г). Под разгрузочным поясом оставляют горизонтальный температурный шов для компенсации теплового расширения нижележащего участка стены.

При умеренных температурах достаточно высокие стены могут быть выполнены без разгрузочного пояса со ступенчатым утолщением нижней части. Механическая прочность и устойчивость стены обеспечиваются, если $h_{ст}/d_{ст} \leq 20$.

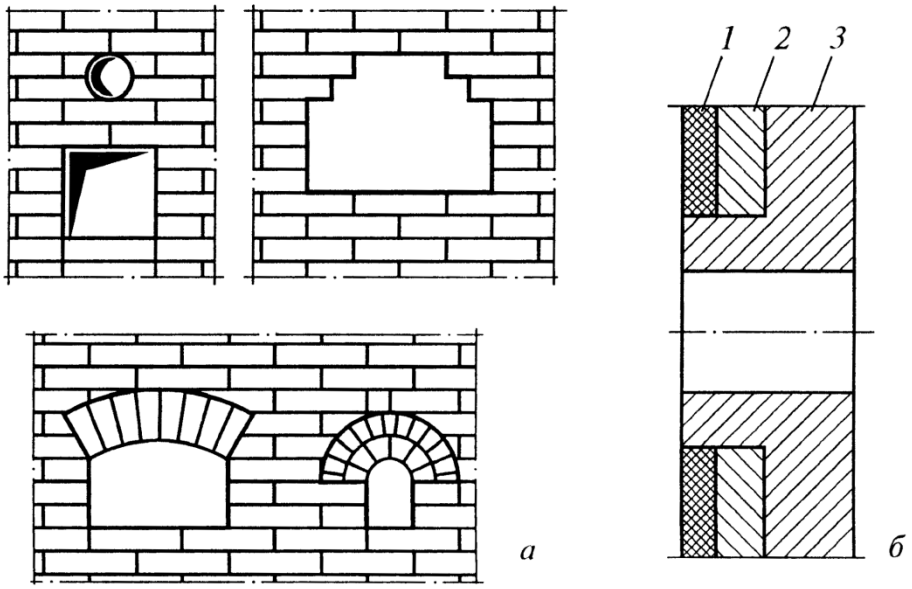


а – двухслойная стенка с перевязкой слоев: 1,2 – теплоизоляционный и огнеупорный кирпич; б – перевязка вертикальных швов при кладке прямых стен и углов; в – схема разгрузочного пояса в высокой стене: 1 – стойка; 2 – прогон; 3 – кронштейн; 4 – теплоизоляционная плита; 5 – огнеупорная кладка; 6 – фасонные огнеупорные изделия; 7 – горизонтальный температурный шов; г – кладка ванной печи и её крепление на каркас: 1 – стойка; 2 – кронштейн; 3 – огнеупорный брус; 4 – температурный шов; 5 – ванна расплава.

Рисунок 4.14 – Примеры кладки стен

Отверстия и проемы в стенах (рис. 4.15 а) перекрываются при ширине менее 300мм натесом, 300-450 мм – напуском, более 450 мм – аркой. Особо ответственные отверстия (например, для выпуска расплава) перекрываются полуциркульной аркой в два-

три оката, которые между собой не перевязываются. Слой теплоизоляции не доводят до проемов, которые на всю толщину стены выполняются из огнеупора (рис. 4.15 б).

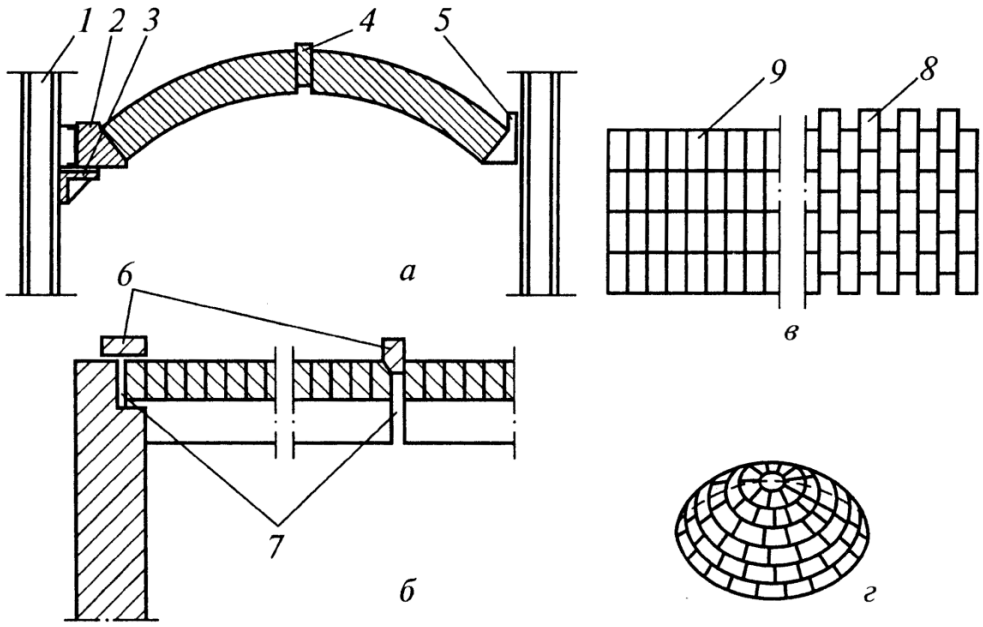


а – различная конструкция проемов и отверстий в зависимости от их ширины; б – обрамление отверстий по толщине многослойной стены: 1 – тепловая изоляция; 2 – легковес; 3 – огнеупор.

Рисунок 4.15 – Проемы и отверстия в стенах

Своды рабочего пространства печей классифицируются по форме на цилиндрические, купольные и плоские; по способу крепления – на распорные, распорно-подвесные и подвесные. Распорные своды (рис. 4.16) наиболее просты и дешевы, кладутся из клинового кирпича кольцами или вперевязку. Они изменяют от одного до пяти замковых кирпичей в кольце, которые забиваются перед уборкой опалубки после выкладки свода. Кладка вперевязку прочнее, но её труднее ремонтировать участками в горячем состоянии. Своды боровов всегда кладут распорными вперевязку на мертельном растворе. Распорные своды выполняются цилиндрическими или купольными. Купольные своды наиболее устойчивы, поэтому в них без нарушения прочности можно выполнять 3-4 крупных отверстия, например для электродов электропечей. При деформации

кирпичей в распорных сводах неплотности не возникают: при усадке кирпича свод садится, при росте – поднимается. Распорный свод никогда не упирается на стены, а крепится непосредственно к каркасу.



а – поперечный разрез; б – продольный разрез; в – вид сверху цилиндрического свода; г – купольный свод; 1 – стойка; 2 – пятовый кирпич; 3 – подпятовая балка; 4 – замковый кирпич (забит не до конца); 5 – пятовая охлаждаемая балка; 6 – уплотняющие огнеупорные изделия; 7 – температурные швы; 8, 9 – кладка свода в перевязку и кольцами соответственно.

Рисунок 4.16 – Конструкция распорных сводов

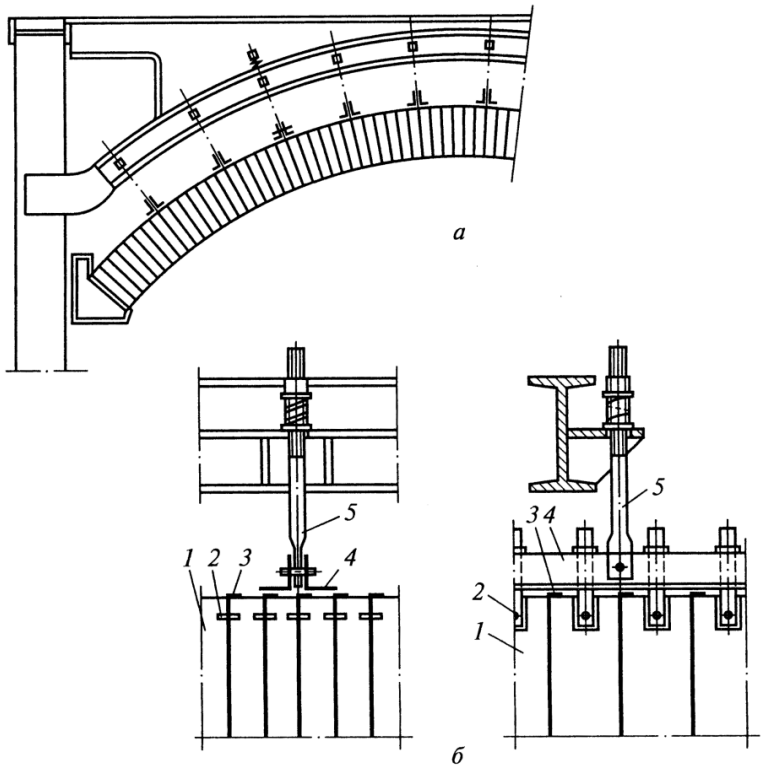
При центральном угле $\alpha = 60 \div 90°$ своды называются лучковыми, при $\alpha = 120 \div 180°$ – полуциркульными.

Пролет распорных сводов ограничен допустимыми напряжениями и температурой начала деформации под нагрузкой. Для большинства огнеупоров он не превышает 3м. Лучшим материалом для распорных сводов является динасовый кирпич. Из него кладут своды с пролетом до 7-9 м, а из специального – до 11-12 м.

Необходимость замены динасовых огнеупоров периклазохромитовыми в сводах мартеновских печей при

использовании кислорода и повышении рабочих температур с 1650 до 1750°С вызвала появление распорно-подвесных сводов.

В распорно-подвесных сводах часть веса свода передается через подвески на каркас (рис. 4.17) и напряжения в своде снижаются до допустимых значений. В каждом кольце арки подвеска на каркас осуществляется через каждые шесть кирпичей с помощью утолщенных пластин из жароупорного листа. Скрепление кирпичей между собой производится с помощью тонких железных пластин, которые закладываются между кирпичами по всем четырем граням и, окисляясь при высоких температурах, обеспечивают высокую прочность и плотность свода.



а – поперечный разрез; б – узел крепления:
1 – периклазохромитовый сводовый кирпич; 2 – стальной штырь; 3 – железная пластина; 4 – уголок; 5 – подвеска.

Рисунок 4.17 – Конструкция распорно-подвесного свода

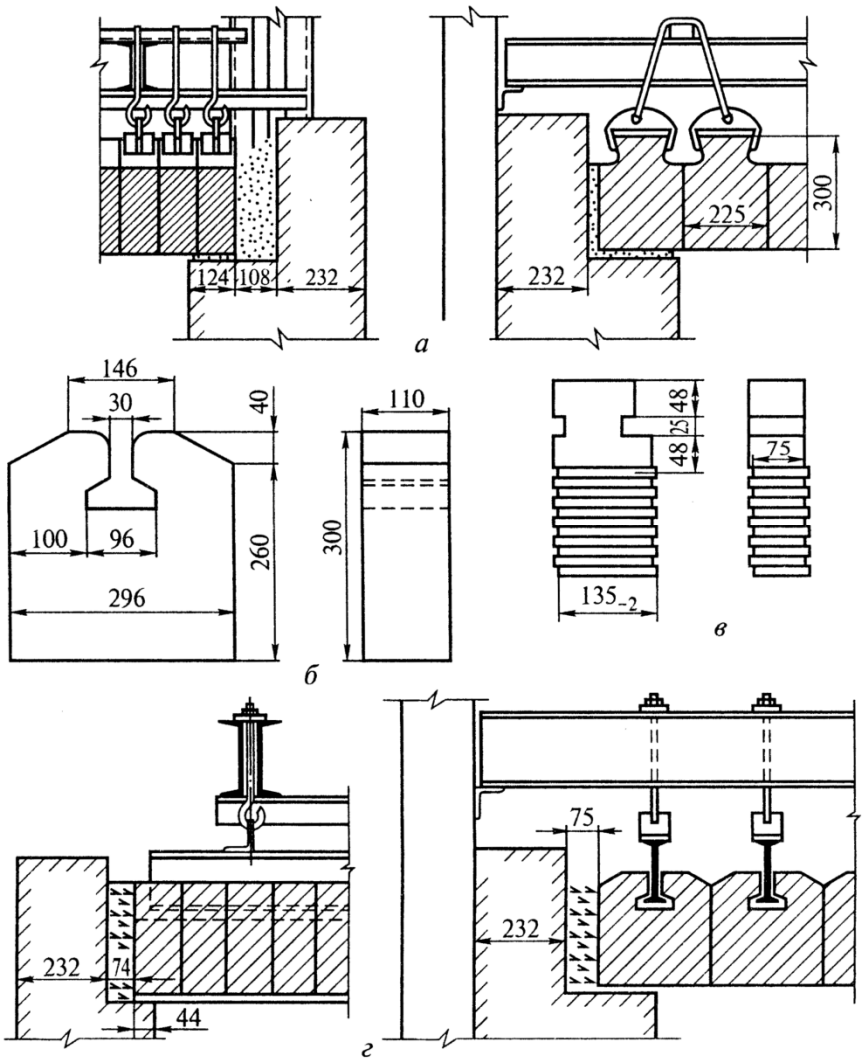
Распорно-подвесные своды конструктивно сложнее и в 2-3 раза дороже распорных. Из-за большей теплопроводности такого свода плотность теплового потока через него (теплопотери) возрастает примерно в 2 раза по сравнению с распорным динасовым. Во избежание перегрева металлических элементов подвески исключается теплоизоляция, более того, наружная поверхность сводов сталеплавильных печей периодически обдувается сжатым воздухом от пыли (главным образом, низкотеплопроводной графитовой).

Вес распорного или часть веса распорно-подвесного свода передается на пяты, которые выполняются из фасонного кирпича или охлаждаемых балок (рис. 4.16 а). Пяты крепят на каркас неподвижно или с возможностью перемещения при разогреве свода.

Температурные швы в распорных купольных сводах не оставляют. В цилиндрических распорных и распорно-подвесных сводах температурные швы закладываются только по длине через каждые 3-4 м (рис. 4.16 б), причем швы уплотняют.

Плоские подвесные своды полностью передают вес на каркас с помощью индивидуальной (рис. 4.18 а, б, в) или групповой (рис. 4.18 г) подвески штучных изделий или крупных бетонных блоков.

Предпочтительна блочная, а не индивидуальная подвеска кирпичей. Подвесные своды могут выполняться неограниченных размеров, произвольной формы и из любых огнеупоров; они просты при сооружении и ремонте. Стоимость подвесных сводов наибольшая, а газоплотность – наименьшая. Для увеличения плотности подвесных сводов используют различные фасонные огнеупорные изделия с четырьмя ребристыми сторонами, при этом выступы одного изделия входят во впадины другого. Кроме того, подвесной свод уплотняется поверху слоем засыпки или обмазки.

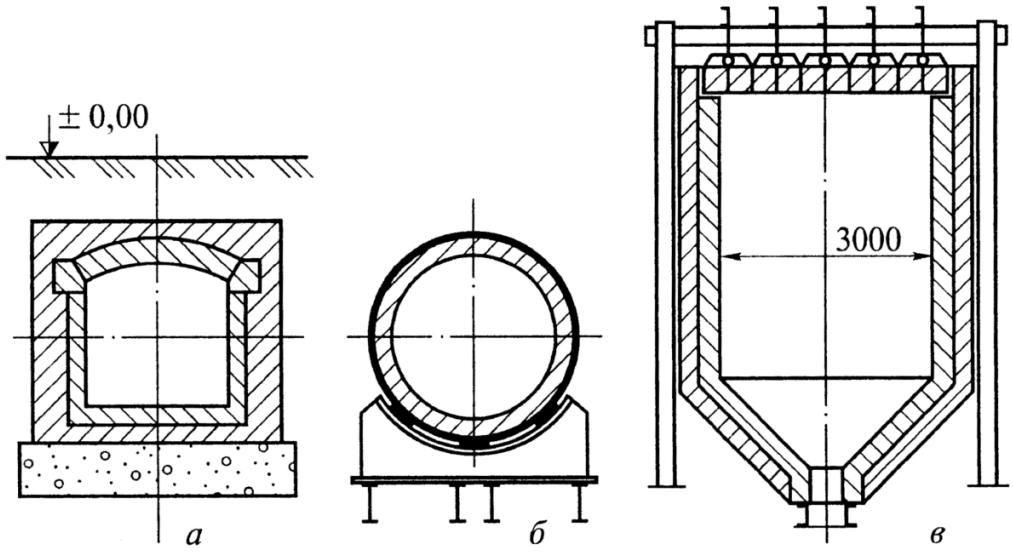


а – фрагмент свода с индивидуальной подвеской огнеупорных изделий; б, в – фасонные огнеупорные изделия с гладкими и волнистыми боковыми гранями для подвесного свода; г – фрагмент свода с групповой подвеской огнеупорных изделий

Рисунок 4.18 – Конструкция плоских подвесных сводов

Газоходы связывают между собой по дымовому тракту отдельные элементы печного агрегата. По температурному уровню отходящих газов газоходы можно разделить на высокотемпературные ($t_{о.г} \geq t_{т.м}^{пл}$, где $t_{т.м}^{пл}$ – температура плавления технологического материала), среднетемпературные ($t_{о.г} = 800$ °С), умеренной температуры ($t_{о.г} = 400 \div 800$ °С) и низкотемпературные ($t_{о.г} < 400$ °С). Если газоход соединяет зоны

рабочего пространства печи, то его ограждения не отличаются от ограждений печи. В этом случае газоходы выполняются многослойными, монолитными или принудительно охлаждаемыми. Для газоходов умеренной и низкой температур, расположенных ниже уровня земли (боровов), применяют дешевые шамотный и полукислый огнеупоры, а там, где это допустимо – красный строительный кирпич. Для уменьшения нагрузки на конструкцию снаружи борова располагают несущую железобетонную конструкцию. Поскольку бетон при нагреве теряет прочность, между горячей наружной стенкой газохода и бетоном оставляют воздушные промежутки – продухи, а под газохода размещают на шанцах – столбиках из красного кирпича. Своды газоходов обычно выполняют в перевязку. Для низкотемпературных газоходов в ряде случаев удобно использовать стальной трубопровод требуемого сечения с наружной тепловой изоляцией. На рисунке 4.19 представлены примеры конструкций газоходов.



а – газоход с лучковым сводом, заглубленный ниже уровня земли (боров); б – газоход круглого сечения с обмуровкой внутри стальной трубы; в – газоход отражательной медеплавильной печи, расположенный над поверхностью земли на колоннах.

Рисунок 4.19 – Примеры конструкций газоходов

5 Современные способы отопления металлургических печей и использования вторичных энергоресурсов

5.1 Базовые понятия о газогорелочных устройствах

Источником энергии для реализации процессов тепловой обработки металла в пламенных печах является сжигание органического топлива, как правило, газообразного (в ряде случаев жидкого топлива). В качестве газообразного топлива могут использоваться природный газ, искусственные газы (кокосовый, доменный, генераторный) либо их смеси. В качестве жидкого топлива для печей может использоваться мазут, либо жидкие отходы, подлежащие утилизации.

Сжигание топлива производится при помощи топливосжигающих устройств (ТСУ). Согласно классическому определению горелка представляет собой устройство, обеспечивающее устойчивое сгорание топлива и возможность регулирования процесса горения. Решение этой задачи достигается за счет подвода необходимых количеств топлива и окислителя, организации их смешивания, зажигания за счет контактирования с горячими продуктами сгорания, формирования факела и распределения пламени. ТСУ для сжигания газообразного и пылеугольного топлива называют горелками. ТСУ для сжигания жидкого топлива называют форсунками. В случае жидкого топлива необходимо обеспечить его распыл на мелкие капли и испарение капель.

По способу смешивания топлива и окислителя горелки подразделяются на горелки полного внутреннего (предварительного) смесеобразования, горелки внешнего смесеобразования, горелки с частичным предварительным смесеобразованием. Большинство используемых для отопления современных пламенных печей горелок работают по принципу частичного предварительного смесеобразования, то есть реализуют двухступенчатое сжигание.

Детально физико-химические процессы, протекающие при использовании названных горелок, их конструктивные схемы и сравнительный анализ рассмотрены в соответствующей литературе по теории горения топлива и топливосжигающим устройствам.

5.2 Технологии импульсного сжигания топлива

До 70-х годов XX столетия единственным способом управления тепловой мощностью горелочных устройств было так называемое пропорционально сжигание. Его сущность заключается в том, что для изменения тепловой мощности подводимой в печь за счет сжигания топлива по ходу тепловой обработки металла в печах изменялся расход топлива, а пропорционально ему изменялся расход воздуха (для поддержания необходимого значения коэффициента расхода воздуха). В связи с этим такой способ управления получил еще одно название – *амплитудно-модулированное* сжигание.

При таком способе управления горелки могут работать в диапазоне между «большим» и «малым» горением. Обычно некоторое количество горелок, которые жестко привязаны друг к другу, разжигаются и контролируются как группа в этой системе. При этом сложно гарантировать одинаковый уровень эффективности работы во всем диапазоне изменения мощности горелки.

Альтернативным способом управления процессом горения является технология *импульсного* сжигания топлива. Технологии импульсного отопления печных агрегатов начали свое развитие в начале 70-х гг. XX века. Первым объектом, для которого эта технология была предложена, являются печи периодического действия с несимметричным факелом. В те годы технология импульсного сжигания топлива не получила широкого распространения из-за несовершенства систем автоматического

управления, прежде всего режима давления, что приводило к загазованности окружающей среды из-за попадания монооксида углерода в атмосферу при выбивании печных газов из печи.

Всплеск технологий импульсного отопления печей имел место в конце XX века. Фирма «Kromshroeder» была пионером в области импульсного сжигания и развивала идею горелок для индивидуального импульсного сжигания на промышленном рынке. Концепция импульсных горелок и необходимые технические средства были тщательно разработаны, проверены и испытаны фирмой «Kromshroeder» в различных отраслях промышленности.

При импульсном горении подвод тепла регулируется изменением частоты включения в работу горелки или горелок. Горелки работают в режиме «большого» горения в течение контролируемого промежутка времени и затем циклически переключаются в режим «малого» горения или полностью выключаются. Этот цикл повторяется довольно часто и промежуток времени, когда горелка работает в режиме «большого» горения, затем в режиме «малого» горения или отключена, управляется процессорным контроллером. Таким образом, импульсное горение может быть названо *частотно-модулированным* горением. Каждая горелка управляется независимо от других горелок, что увеличивает гибкость и точность управления. На рисунке 5.1 показаны схемы, иллюстрирующее отличие амплитудно-модулированного и частотно-модулированного режимов горения.

На рисунке видно, что в первом случае для уменьшения по ходу нагрева величины тепловой мощности, выделяемой в агрегате, плавно уменьшается расход газа, а во втором случае расход газа в периоды большого и малого горения остается неизменным, а меняется продолжительность периодов большого и малого горения.

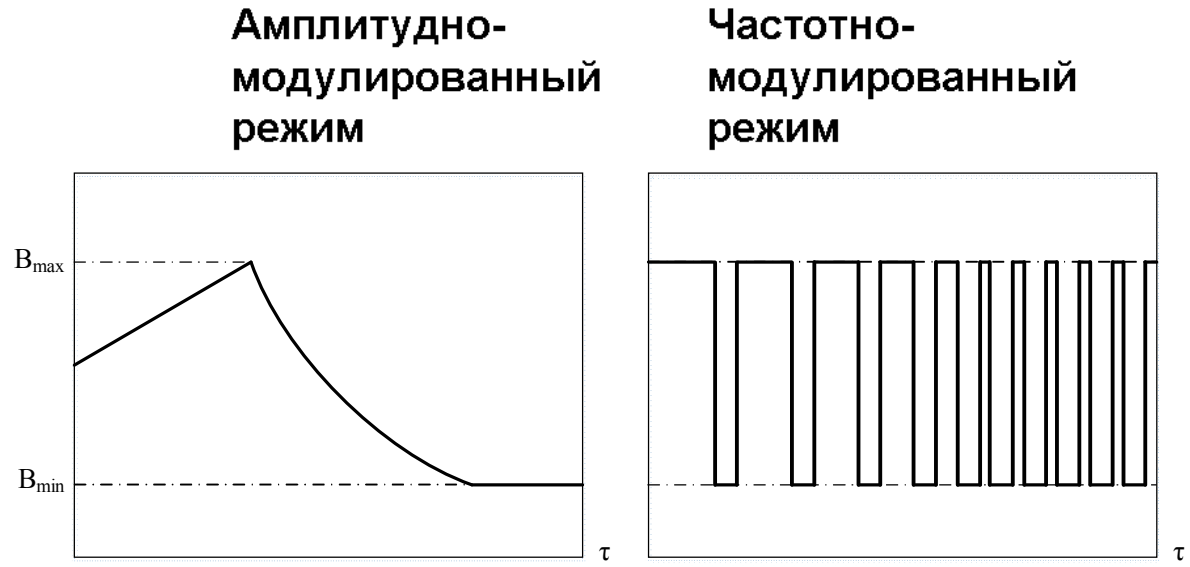


Рисунок 5.1 – Схемы, иллюстрирующие сущность технологий амплитудно- и частотно-модулированного режимов сжигания топлива

Применение таких систем управления рекомендуется для процессов, требующих глубокого регулирования мощности и одновременно интенсивной циркуляции атмосферы в печи с целью получения равномерного температурного поля. Например, в металлургии и машиностроении для термообработки проката, заготовок и изделий в печах периодического действия.

Рядом предприятий на пост-советском пространстве также достигнуты значительные успехи в реализации технологий отопления термических печей периодического действия с помощью импульсных горелок. Так, на вертикальных термических печах и печах с выкатным подом ПАО «НКМЗ» (Украина) благодаря использованию импульсных горелок достигнута точность поддержания заданного уровня температуры во всем газовом пространстве печи ±5°С и существенная экономия топлива по сравнению с безымпульсным режимом.

В настоящее время есть сведения об успешном использовании импульсных горелок для отопления печей непрерывного действия. Например, на современной проходной

печи с шагающими балками фирмы Stein Heurtey (ММК «Азовсталь», Украина), предназначенной для нагрева слябов под прокатку, в боковых стенах печи по длине отапливаемых зон установлены импульсные горелки. С их использованием достигается высокая равномерность тепловых потоков, подводимых к поверхности металла по ширине печи.

Для управления технологий отопления печи с помощью импульсных горелок, могут быть использованы программные ПИД-регуляторы производства фирмы Kromshroeder (например, IFD 244, PFU 780) или других ведущих иностранных производителей, либо производителей пост-советского пространства, например ОВЕН ТРМ251 с использованием измерителя ОВЕН ТРМ200 и модуля сбора данных ОВЕН МСД200 (ООО «Волгатерм», Россия).

Результаты сравнительного анализа основных показателей отопления печей при помощи классических безымпульсных пропорциональных систем и с использованием импульсных горелок представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Обоснование преимущества отопления печей с помощью импульсных горелок

№ п/п	Наименование преимущества	Состояние вопроса в безымпульсных пропорциональных системах	Сущность преимущества при отоплении печей с помощью импульсных горелок
1	2	3	4
1	Более точное поддержание соотношения газ/воздух	В процессе работы тепловая мощность горелки принимает все значения в пределах регулирования. Наиболее точно соотношение газ/воздух	Каждая горелка в течение работы работает только в двух устойчивых состояниях: «большое» горение – «малое» горение либо

Продолжение таблицы 5.1

1	2	3	4
		поддерживается только для крайних значений предела регулирования. Так как количество необходимого тепла на входе, в основном, находится между максимальным и минимальным значением, то для пропорциональной системы вероятным является формирование смеси газ/воздух с соотношением, отличающимся от заданного технологом	«большое» –горение «отключено», для которых с высокой точностью поддерживается заданное соотношение газ/воздух
2	Возможность более точного регулировани я подводимой в печь тепловой мощности	Для значительного количества горелок диапазон регулирования составляет 6:1, то есть подвод тепла при «малом» горении не может быть меньше, чем одна шестая часть подвода тепла при «большом» горении. Такая ситуация делает проблематичной точную регулировку температуры нагрева металла в печах периодического действия. Кроме того при пропорциональном регулировании зачастую один пневмоклапан и	Импульсное сжигание позволяет непосредственно управлять каждой горелкой. Каждая горелка имеет свой собственный пневмоклапан и газовый регулятор. Когда индивидуальная горелка не находится в импульсном режиме при «большом», она или остается работать в предварительно настроенном и регулируемом режиме «малого» горения, или полностью

Продолжение таблицы 5.1

1	2	3	4
		газовый регулятор обслуживают несколько горелок. При этом из-за различной длины пути сред до горелки, разного количества колен, и т.д. потоки воздуха и газа на каждую горелку могут несколько отличаться.	отключается. Если использовать метод «малого» горения, то можно получить суммарное соотношение диапазона изменения параметра двадцать к одному. Если цикл горелки остановлен и затем она перезапущена под управлением, то можно достичь соотношения диапазона изменения параметра близкого к бесконечности.
3	Повышение равномерности нагрева металла в объеме садки	Для печей периодического действия неравномерность температур в различных зонах газового объема в ряде случаев достигает 150-200°С, лучистые характеристики факела (факелов) неравномерны по их длине, могут иметь место застойные зоны в газовом объеме, что приводит к различной плотности тепловых потоков на поверхность нагреваемого металла на разных участках печи	Наличие пульсирующего факела способствует снижению неравномерности распределения температуры газовой среды в зонах печи, а, следовательно, увеличению равномерности распределения тепловых потоков на поверхности нагреваемого металла. Применение импульсного отопления позволяет повысить температуру в

Продолжение таблицы 5.1

1	2	3	4
			последних по ходу истечения факела объемных зонах, что, несмотря на увеличение потерь теплоты с отходящими продуктами сгорания, способствует увеличению теплосодержания металла.
4	Снижение вероятности появления дефектов нагрева таких как пережог и т.д.	В печах с несимметричным факелом возможна ситуация когда часть поверхности металла получает избыточное количество тепла и перегревается, особенно это может быть ощутимо при затягивании операции с целью достижения заданного теплосодержания металлом, находящимся в зоне ослабленного подвода тепла	Из-за периодического изменения длины факела, повышения степени рециркуляции продуктов сгорания металл нагревается в достаточной степени равномерно, что позволяет устранить пересиживание и превышение температур заготовки над заданными и допустимыми значениями
5	Снижение расхода топлива	Пересиживание металла, вероятность вариации соотношения газ-воздух приводят к повышенному расходу топлива	При прочих равных условиях отсутствие пересиживания, высокая стабильность поддержания соотношения газ-воздух, некоторое усиление

Продолжение таблицы 5.1

1	2	3	4
			конвективного теплообмена за счет усиления явлений рециркуляции позволяют достичь сокращения расхода топлива, которое может достигать 15-20%.
6	Уменьшение потерь металла с окалиной	Удлинение операций нагрева при необходимости пересиживания, превышение коэффициентом расхода воздуха рациональных значений, перегрев некоторых участков металла способствуют повышению потерь металла с окалиной	Отсутствие пересиживание, высокая стабильность поддержания соотношения газ-воздух позволяют достичь сокращения потерь металла с окалиной
7	Возможность получения более низких концентраций NO_x в продуктах сгорания	Выход оксидов азота в наибольшей степени зависит от максимальных значений температуры в зоне горения и концентрации избыточного кислорода. В классических системах максимальный уровень температур в значительной мере предопределен геометрией печи, параметрами садки и газогорелочного	Благодаря высокой точности поддержания соотношения газ/воздух имеется возможность работать с значениями коэффициента расхода воздуха, позволяющими минимизировать образование NO_x. Также имеется возможность за счет выбора параметров коммутации горелок обеспечить снижение

Продолжение таблицы 5.1

1	2	3	4
		оборудования. Кроме того в ряде случаев устанавливаются завышенные значения коэффициента расхода воздуха для гарантии полноты сгорания топлива.	максимальных температур в факеле.
8	Возможность использования более дешевых детекторов пламени*	При работе горелок с минимальной тепловой нагрузкой чувствительность простейших электродов контроля пламени может оказаться недостаточной и для обеспечения безопасности зачастую используются более дорогие ультрафиолетовые детекторы.	Поскольку пламя в импульсных горелках очень устойчиво достаточным оказывается использование простейших электродов контроля пламени.

* – детектор пламени – устройство, предназначенное для контроля горения и выдающее сигнал в случае погасания факела.

К недостаткам технологии отопления печей с использованием импульсных горелок следует отнести более высокую стоимость оборудования и программного комплекса к нему по сравнению с классической пропорциональной технологией. На рисунке 5.2 представлены некоторые современные горелки для импульсного сжигания природного газа.

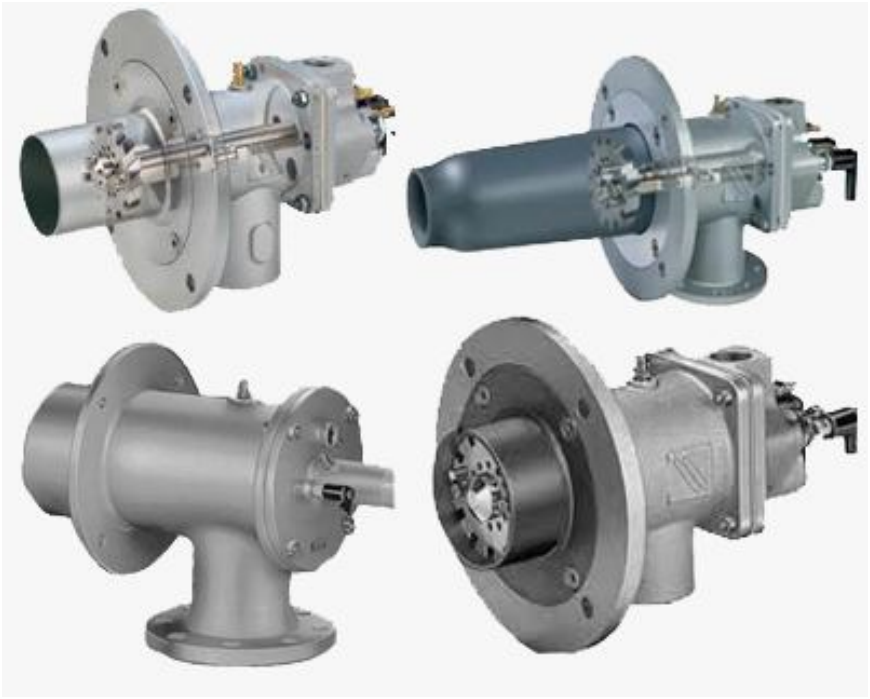


Рисунок 5.2 – Горелки для импульсного сжигания природного газа

Таким образом, можно утверждать, что в настоящее время технология отопления с использованием импульсных горелок приобретает все большее распространение и в ближайшем будущем, вероятно, станет стандартной для отопления печей периодического действия в металлургии и машиностроении. Наметилась тенденция, когда импульсные горелки устанавливают также на печах непрерывного действия, работающих в квазистационарном режиме, для снижения неравномерности нагрева металла по ширине печи.

5.3 Использование рекуператоров и регенераторов для утилизации теплоты продуктов сгорания

К современным печным агрегатам предъявляются требования достижения заданного уровня качества тепловой

обработки материалов, с одной стороны, и экономии энергоресурсов (прежде всего топлива) с другой стороны.

При этом вопросы, связанные с экономией топлива, с каждым годом начинают играть все большую роль. Причиной такой закономерности является то, что, несмотря на некоторые колебания цен на природный газ (основное топливо для большинства пламенных печей), в целом имеет место тенденция его постоянного удорожания.

Уровень энергоэффективности печного агрегата определяется не только выбором рациональных технологических параметров, но и в значительной мере зависит от используемых конструктивных решений.

Для анализа эффективности тепловой работы нагревательных печей принято использовать величины *коэффициента полезного действия*, который представляет собой долю энергии топлива, поступившей в агрегат извне, усвоенной нагреваемым материалом, и *коэффициента использования топлива*, соответствующего доле энергии, оставленной в рабочей камере (эта энергия идет на нагрев материала и покрытие теплопотерь рабочей камеры). Чаще используют величину коэффициента использования топлива.

Текущие значения коэффициента использования топлива определяются следующим образом:

$$\eta = \frac{Q_н^р + Q_ф^в + Q_ф^т - V_{ух} \cdot c^{t_{ух}} \cdot t_{ух}}{Q_н^р},$$

где $Q_н^р$ – теплота сгорания топлива, Дж/м^3;

$Q_ф^в$ – физическое тепло воздуха, поступающего для горения в рабочую камеру печи, отнесенное к единице топлива (эта величина состоит в общем случае из трех слагаемых: исходное

тепло атмосферного воздуха, тепло сообщенное воздуху при подогреве вне печи, тепло сообщенное воздуху при подогреве в рекуператоре уходящими продуктами сгорания), Дж/м^3;

$Q_ф^т$ – физическое тепло топлива, отнесенное к единице топлива (также, как и в случае физического тепла воздуха, может в общем случае состоять из трех слагаемых), Дж/м^3;

$V_{ух}$ – количество продуктов сгорания, покидающих рабочую камеру печи и приходящееся на единицу топлива (при отсутствии присосов численно равно выходу продуктов сгорания от горения 1 м^3 топлива при заданном значении коэффициента расхода воздуха), м^3/м^3;

$c^{tух}$ – средняя теплоемкость продуктов сгорания, покидающих рабочую камеру, при их температуре, Дж/(м^3·К);

$t_{ух}$ – температура продуктов сгорания, покидающих рабочую камеру, °С;

Поскольку тепло атмосферного воздуха представляет собой незначительную величину в общем тепловом балансе, а внешний подогрев воздуха, как правило, не применяется, для случая поступления в агрегат холодного газа вычисление текущего значения коэффициента использования топлива можно провести по следующей зависимости:

$$\eta = \frac{Q_н^р - V_{ух} \cdot c^{t_{ух}} \cdot t_{ух} \cdot (1 - k_г)}{Q_н^р},$$

где $k_г$ – коэффициент рекуперации (доля теплоты уходящих из рабочей камеры продуктов сгорания, возвращаемая в нее с подогретым в рекуператоре воздухом, идущим на сгорание топлива, и в ряде случаев с топливом).

Продукты сгорания, покидающие камеру печи, уносят значительную часть энергии топлива. Для повышения

эффективности печей традиционно используют теплообменные устройства (рекуператоры или регенераторы), позволяющие использовать часть тепла уходящих продуктов сгорания для нагрева воздуха, идущего на сжигание топлива, а также газообразного топлива (в случае использования низкокалорийных искусственных газов).

В принципе возможны несколько вариантов решения вопроса об использовании физической теплоты уходящих продуктов сгорания:

– без нагрева воздуха (в настоящее время практически не применяется, по причине крайне низкой энергетической эффективности);

– внешняя рекуперация (системы с центральным рекуператором);

– использование центральных регенераторов

– использование рекуперативных горелок;

– использование регенеративных горелок.

Использование внешней рекуперации позволяет уменьшить расход топлива до 25% по сравнению со случаем без нагрева воздуха; регенераторов – до 45%; рекуперативные горелки – до 40%; регенеративные горелки – до 60%.

Рекуператоры металлургических печей представляют собой теплообменные аппараты, в которых газообразные среды (продукты сгорания и нагреваемый воздух или топливо) непрерывно обмениваются теплотой через разделительные стенки.

В качестве материалов для изготовления рекуператоров могут использоваться металлы (углеродистые стали, чугун, жаропрочные стали, керамические материалы).

Поскольку основным показателем эффективности работы систем, предназначенных для рекуперации тепла продуктов сгорания в печах, является температура подогрева воздуха, то

ниже различные варианты реализации систем с центральным рекуператором рассмотрены с этой точки зрения (таблица 5.2).

Таблица 5.2 – Предельные температурные уровни, характеризующие работу рекуператоров, изготовленных из различных материалов

Материал стенок рекуператора	Максимально допустимая температура продуктов сгорания перед рекуператором, °С	Максимально допустимая температура стенок, °С	Максимально достижимая температура нагрева воздуха, °С
Углеродистая сталь	700-750	400-450	250-300
Чугун	700-750	500-550	300-350
Жаропрочная сталь	1200-1300	750-800	до 600
Керамические материалы	до 1400	1200-1250	850-1000

При выборе вида и конструктивного исполнения рекуператора для проектирования или реконструкции конкретной печи необходимо учитывать такие факторы как максимальный температурный уровень в печи, максимальная температура уходящих продуктов сгорания, максимальный расход продуктов сгорания и т.д. Для реконструкции печи важными исходными данными также являются геометрические характеристики дымоотводящего тракта, в котором планируется установка нового рекуператора. Характеристики температурного режима наиболее распространенных видов пламенных печей представлены в таблице 5.3.

По преобладающему механизму теплообмена со стороны дымовых газов рекуператоры разделяют на радиационные,

конвективные, радиационно-конвективные, конвективно-радиационные.

Таблица 5.3 – Характеристики температурного режима наиболее распространенных пламенных печей

Тип печи	Максимальная температура в рабочем пространстве, °С	Средняя температура уходящих дымовых газов, °С	Доля энергии, покидающей печную камеру в виде физической теплоты продуктов сгорания, %
Методические нагревательные печи	1300-1450	700-1100	30-45
Кузнечные камерные печи	1300-1450	1100-1200	55-65
Термические камерные печи	850-1100	800-950	35-50
Термические методические печи	850-1000	500-700	25-35

В радиационных рекуператорах каналы для прохода продуктов сгорания должны иметь как можно больший размер для увеличения лучистого теплового потока. В рекуператорах конвективного типа стремятся интенсифицировать теплообмен за счет увеличения скоростей движения газообразных сред. Однако это приводит к росту аэродинамического сопротивления рекуператора и на практике повышение скорости сред имеет в каждом конкретном случае определенные пределы.

Для нагревательных печей применяют трубчатые, игольчатые, радиационные и радиационно-конвективные рекуператоры. Для термических печей применяют трубчатые, струйные, панельные, кожухотрубные и другие рекуператоры.

Типовые конструкции некоторых характерных рекуператоров представлены на рисунке 5.3.

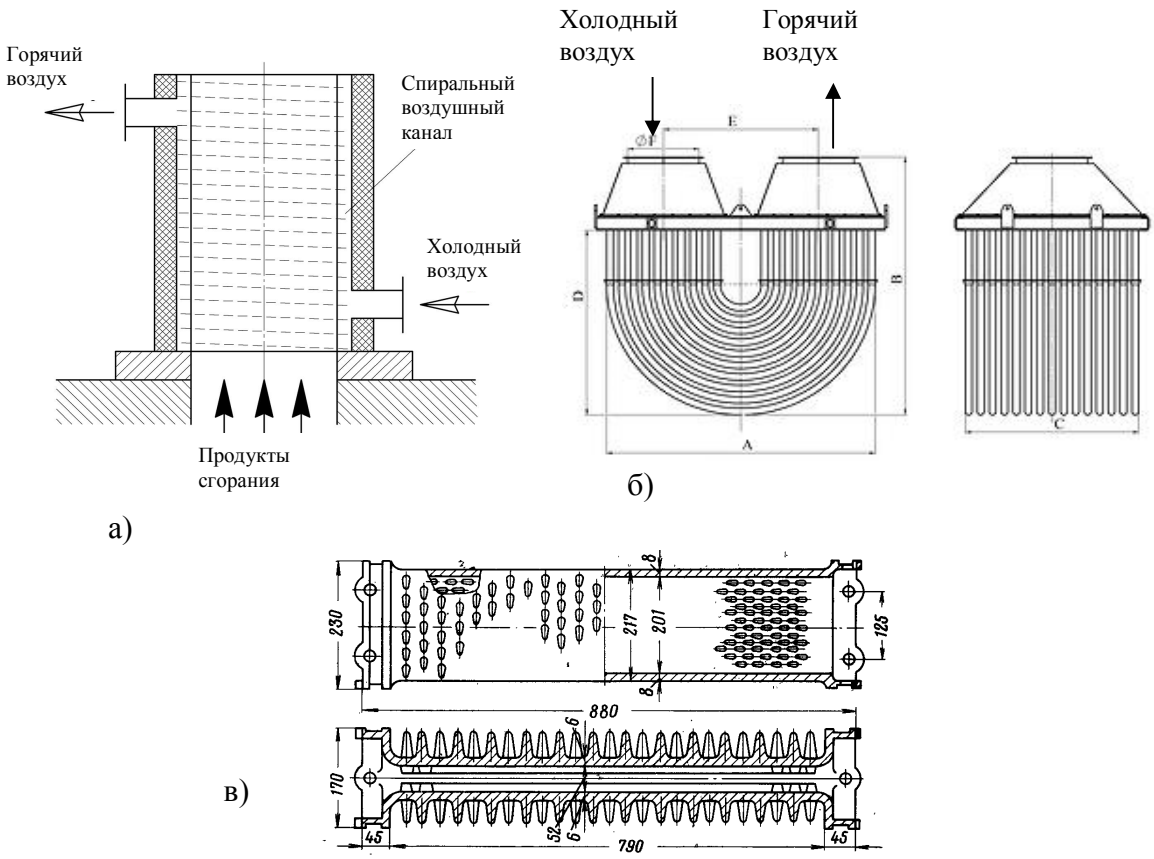


Рисунок 5.3 – Схемы некоторых рекуператоров, используемых в нагревательных и термических печах (а – радиационный щелевой; б – петлевой; в – элемент игольчатого рекуператора)

Ведущие производители рекуператоров зачастую используют простейшие, известные несколько десятилетий технические решения, и не всегда спешат пускать в серию оборудование, при создании которого использованы инновационные достижения. Компании производители печей также обычно достаточно консервативны в выборе рекуператоров и стараются по возможности не менять фирмы производители рекуператоров и проверенные модели рекуператоров.

Несмотря на технические возможности по повышению температуры нагрева воздуха, многие производители печей сознательно выбирают типы и модели рекуператоров, для которых температуры нагрева воздуха не превышает 400°С, что позволяет применять горелки без водоохлаждаемых элементов.

Современные тенденции в рекуператоростроении заключаются в преодолении противоречия между повышением коэффициента теплопередачи и уменьшением массогабаритных показателей, с одной стороны, и ростом аэродинамического сопротивления с другой стороны. В качестве технических решений используются совершенствование формы турбулизующих вставок, размещение вторичных излучателей в дымовой и воздушной полостях, создание пластинчатых аппаратов, исполнение рекуператоров в радиационно-конвективном исполнении.

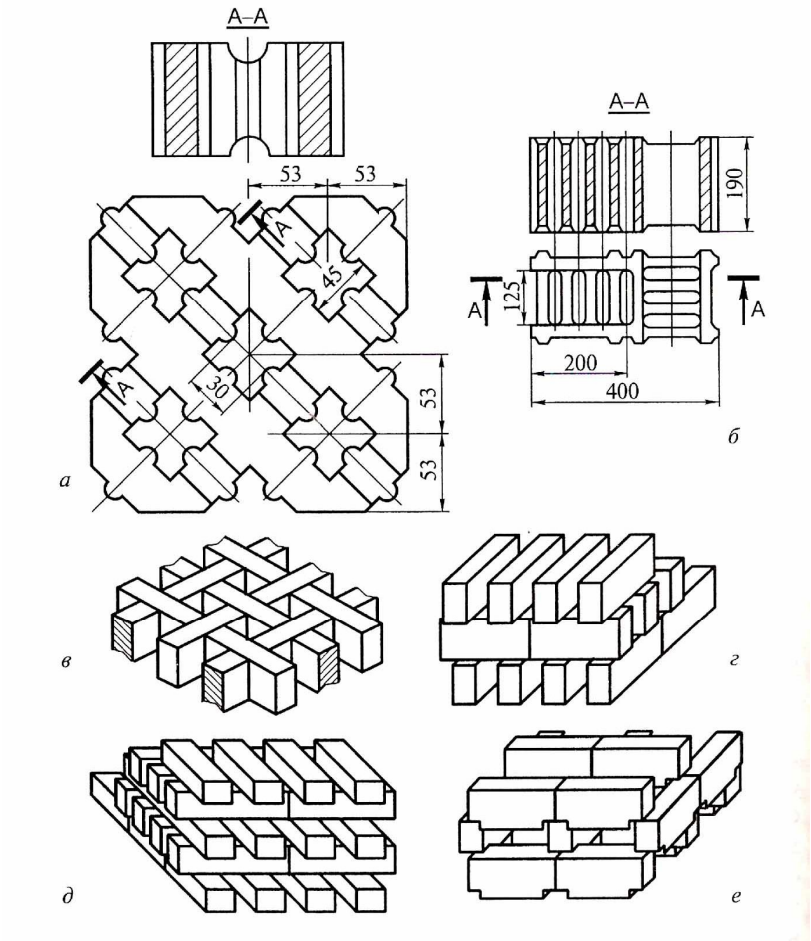
Регенераторы металлургических печей – это теплообменные аппараты периодического действия, в которых массивная регенеративная насадка поочередно подвергается воздействию продуктов сгорания и нагреваемых газообразных сред. Несколько вариантов возможного исполнения насадок регенераторов показаны на рисунке 5.4.

В качестве материала насадок используются обычные и фасонные кирпичи чаще всего из шамотных и высокоглиноземистых огнеупоров. В последнее время получают распространение насадки из тел шарообразной формы.

Достоинством регенераторов по сравнению с рекуператорами является возможность нагрева компонентов горения до более высоких температур (1100-1200°С). Также достоинствами регенераторов являются отсутствие проблем с обеспечением герметичности и большой срок службы насадок.

Недостатками регенераторов являются непостоянство температуры компонентов горения, необходимость наличия системы клапанов для организации реверса сред, запыление

насадки по ходу эксплуатации и необходимость ее прочистки, потеря части компонентов горения при перекидке клапанов.



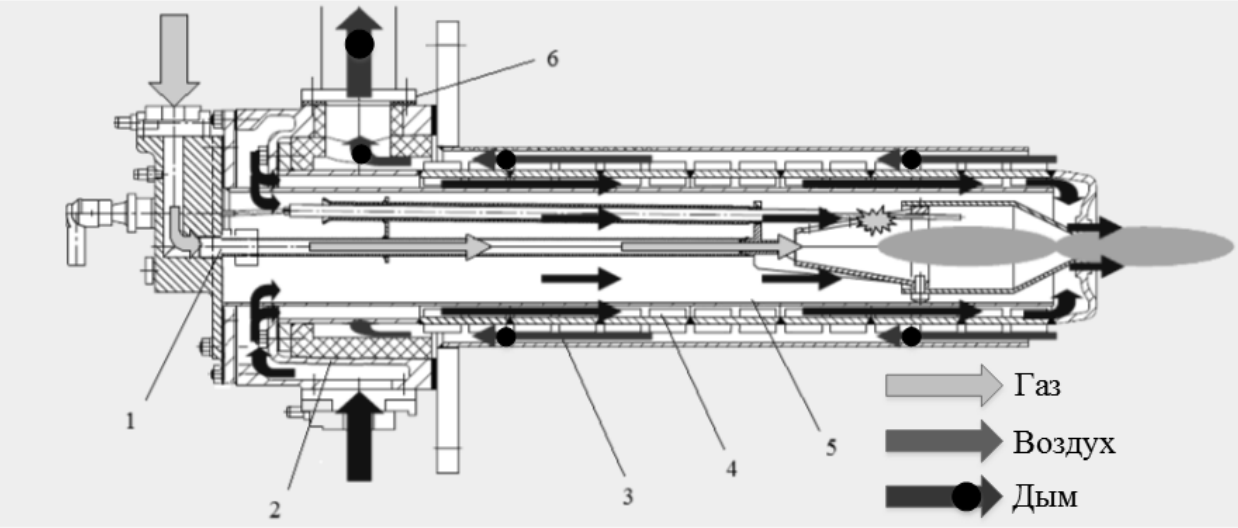
а, б - блочная для доменнных воздухонагревателей, в-Каупера или насадка сплошными каналами, г-Сименса, д-брусковая, е-Петерсона

Рисунок 5.4 – Виды регенеративных насадок

5.4 Технология отопления пламенных печей при помощи рекуперативных горелок

В стандартном исполнении любая рекуперативная горелка состоит из: литого жаропрочного стального или керамического рекуператора; керамической камеры сгорания; термоизолированного металлического корпуса; газовой головки с газовым коллектором и смесителем. Также в комплект поставки могут входить дымоотводящая труба, эжектор для дымоудаления

(эдуктор), электрод розжига и ультрафиолетовый датчик пламени, система охлаждения. Конструкция горелки в общем виде представлена на рисунке 5.5.



1 – подвод газа, 2 –корпус горелки, 3 – канал для продуктов сгорания, 4 – рекуператор, 5 – воздушная направляющая труба, 6 – эдуктор для удаления продуктов сгорания

Рисунок 5.5 – Схема рекуперативной горелки

Рекуперативные горелки могут использоваться в печах прямого нагрева или в составе радиационных труб. В зависимости от температуры в печи горелки могут комплектоваться металлическим рекуператором (применяются до температуры печи 1150° С) и керамическим рекуператором (до температуры печи 1300° С). Одними из наиболее распространенных брендов на рынке газогорелочных устройств среди рекуперативных горелок являются серии горелок ECOMAX (фирма «Elster LBE», Германия) и RECUMAT «WS Warmeprozesstechnick», Германия).

Принцип действия рекуперативных горелок. Воздух на горение проходит через измерительную диафрагму в воздушную полость корпуса, затем в стальной или керамический рекуператор, где нагревается, используя тепло уходящих газов. Часть подогретого воздуха подается в смеситель, где

смешивается с газом и воспламеняется в керамической камере сгорания. Продукты сгорания с высокой скоростью (150-200 м/с) выбрасываются в топку из сопла камеры сгорания. Оставшийся подогретый воздух выходит в кольцевую щель, образованную отверстием в рекуператоре и соплом камеры сгорания и подсасывается в струю горящего газа, дожигая несгоревший в камере газ и снижая температуру факела, тем самым, уменьшая уровень образования NO_x в продуктах сгорания. Природный газ подается через газовую головку и по центрально расположенному газовому коллектору попадает в смеситель. На входе в газовую головку имеется измерительная диафрагма, предназначенная для контроля расхода газа. Все элементы, установленные на газовой головке и корпусе, охлаждаются поступающим в горелку холодным воздухом.

В виду своего принципа действия рекуперативные горелки имеют достаточно большую установочную длину. Так, при номинальной мощности рекуперативной горелки 80 кВт установочная длина составляет порядка 0,5м.

При температуре в печи выше 900°С необходимо предусмотреть постоянное охлаждение электрода розжига

Если горелка укомплектована эжектором для эвакуации продуктов сгорания (эдуктором), то проектом должно быть предусмотрено необходимое количество воздуха, участвующего в удалении продуктов сгорания. Продукты сгорания удаляются из внутреннего пространства печи через встроенные рекуператоры горелок за счет эжекции холодным воздухом. Снижение температуры уходящих газов происходит при прохождении их через рекуператор и последующем разбавлении холодным воздухом в эжекторе. При прохождении через встроенные рекуператоры горелок дутьевой воздух подогревается до температуры порядка 700°С.

Рекуперативные горелки каждого из производителей образуют серии, состоящие из разных типоразмеров. При

помощи рекуперативных горелок можно сжигать природный, сжиженный, коксовый и низкокалорийные газы.

Согласно своему принципу действия рекуперативные горелки могут использоваться как в амплитудно-модулированном (традиционном безымпульсном), так и в частотно-модулированном (импульсном) режимах работы. В настоящее время при изменении подходов к управлению тепловой работой пламенных печей в большинстве случаев предпочтение отдается импульсным системам отопления. Поэтому все современные рекуперативные горелки, как правило, способны поддерживать работу в импульсном режиме и эксплуатируются в нем.

При этом, как и для обычных горелок, работающих в импульсном режиме, соотношение газ-воздух должно быть отрегулировано так, чтобы обеспечить минимальное образование вредных выбросов. При включении горелки открываются клапаны газа и воздуха. Розжиг горелки производится с помощью искры от высоковольтного трансформатора. Управление клапанами происходит через автомат управления горелкой. Работа автомата управления горелкой контролируется системой регулирования температуры в печи.

Наиболее подверженными износу деталями рекуперативных горелок (как и для обычных современных горелок) являются уплотнительные прокладки, запальный электрод и УФ-датчик. В процессе эксплуатации рекуперативных горелок возможно возникновение неисправностей, связанных с загрязнением функционально значимых элементов (электродов, сопел, отверстий) или их повреждением и износом (керамические детали).

Сравнительный анализ использования рекуперативных горелок и традиционных систем с центральным рекуператором. Обоснование преимуществ, которыми характеризуется работа отопительных систем на основе рекуперативных горелок с

традиционными системами с центральным рекуператором приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Обоснование преимуществ отопления печей с помощью рекуперативных горелок

№ п/п	Наименование преимущества	Состояние вопроса в системах с центральным рекуператором	Сущность преимущества при использовании рекуперативных горелок
1	2	3	4
1	Более высокая температура подогрева воздуха, идущего на горение	Предельные температуры подогрева воздуха для случаев использования рекуператоров из различных материалов представлены в таблице 5.2. Поскольку в подавляющем большинстве случаев центральные рекуператоры изготовлены из углеродистых марок стали реальные температуры нагрева не превышают 400 °С	В рекуперативных горелках температура подогрева воздуха находится в диапазоне 600-750°С. В технической документации на горелки различных производителей наиболее часто фигурирует величина 700 °С
2	Более высокий КИТ	Для температур подогрева воздуха порядка 400°С КИТ не превышает 0,55	При температуре подогрева воздуха 800°С величина КИТ достигает 0,75
3	Более благоприя-тные условия работы воздушных вентилей перед горелками	При работе в импульсном режиме происходит частое открытие-закрытие воздушных вентилей перед горелками при давлении в воздухопроводе порядка 1-2 кПа. При работе с центральным рекуператором рабочие	В рекуперативную горелку вентилятором нагнетается холодный воздух извне. Поэтому воздушные вентили работают при температуре окружающей среды.

Продолжение таблицы 5.4

1	2	3	4
		органы вентиля принимают температуру подогретого воздуха и, таким образом, условия их работы не являются вполне благоприятными.	
4	Отсутствие изолированного дымового тракта	После выхода из пламенного окна горячие продукты сгорания попадают в изолированный дымовой тракт, в котором расположен центральный рекуператор.	Печная камера не имеет окон для удаления продуктов сгорания, так как последние удаляется через специальные полости в рекуперативных горелках при помощи струйных насосов (эдукторов), движущей средой в которых является холодный воздух
5	Отсутствие тепловой изоляции на воздухопроводах, подключенных к горелкам	На каждую горелку поступает воздух, нагретый в центральном рекуператоре, поэтому во избежание потерь теплоты в окружающую среду и устранения возможности получения обслуживающим персоналом ожогов, воздухопроводы должны иметь качественную тепловую изоляцию	На горелки подается холодный вентиляторный воздух, поэтому нет необходимости в изоляции подводящих воздухопроводов.

Однако при сравнении отопительных систем на основе рекуперативных горелок с традиционными системами с центральным рекуператором можно выделить ряд недостатков первых:

– ограниченная единичная тепловая мощность (для большинства горелок в качестве предела указывается порог 250 кВт, в ряде случаях фигурирует величина 500 кВт), что сдерживает их применение для печей со значительной тепловой мощностью;

– более высокая стоимость оборудования для создания отопительной системы на основе рекуперативных горелок.

Также в качестве особенности в использовании рекуперативных горелок можно выделить более сложную компоновку наружных трубопроводов. В системе с центральным рекуператором к горелке подходит два трубопровода (один для подвода газа и один изолированный для подвода горячего воздуха). В случае с рекуперативными горелками каждая из них скоммутирована с тремя трубопроводами: один подводит газ, второй – холодный вентиляторный воздух, третий – предназначен для отвода смеси продуктов сгорания и воздуха, используемого в качестве ведущей среды в струйном насосе.

Во многих работах указывается, что реконструкция печи с переходом на рекуперативные горелки позволяет повысить тепловую мощность агрегата. В качестве обоснования этого эффекта приводятся соображения, связанные с высокой скоростью истечения продуктов сгорания, интенсивным перемешиванием продуктов сгорания в печной камере. Однако надо отметить, что эти особенности связаны, прежде всего, с использованием рекуперативных горелок в импульсном режиме.

Поэтому эффект повышения производительности несомненно будет иметь место при замене устаревшего газогорелочного оборудования на рекуперативные горелки и является достаточно дискуссионным для случая, когда сравнивается работа рекуперативных горелок с современными импульсными горелками, работающими с центральным рекуператором.

Экологически аспекты эксплуатации. В общем случае некоторым ограничением на пути применения систем глубокой регенерации тепла является противоречие между требованиями энергоэффективности и сокращения выбросов. Объемы образования NO_x при использовании топлива, не содержащего азота, зависят, главным образом, от температуры сжигания, концентрации кислорода, а также времени пребывания газов в зоне горения. При сжигании в традиционном пламени результатом подогрева воздуха до значительных температур является высокая пиковая температура пламени, которая, в сочетании со значительным временем пребывания, приводит к существенному увеличению интенсивности образования NO_x.

Найдены решения (рециркуляция, двухступенчатое сжигание), позволяющие в значительной степени уменьшить образование NO_x при использовании рекуперативных горелок. Суть всех этих решений сводится к организации таких условий горения, при которых будет понижено значение максимальной температуры, развиваемой в факеле. Также некоторое снижение концентрации NO_x достигается за счет использования рекуперативных горелок в частотно-модулированном (импульсном) режиме, что позволяет более точно установить значения температур по зонам печи и достичь более высокую температурную однородность.

Так даже при нагреве воздуха идущего на горение до 700°С при помощи рекуперативных горелок массовое содержание оксидов азота в продуктах сгорания меньше действующего норматива для горелок с холодным воздухом 0,025% (250 ppm). Естественно, применение таких же подходов для сжигания газа на обычных горелках в холодном воздухе позволило бы получить намного меньшие концентрации оксидов азота.

Решение вопроса о целесообразности использования рекуперативных горелок. С теплотехнической точки зрения, очевидно, что использование рекуперативных горелок в общем

случае позволяет достичь более высокие значения КИТ и КПД, а значит, уменьшить расход топлива на реализацию тепловой обработки даже по сравнению с наиболее эффективными системами, использующими центральные рекуператоры.

Однако в настоящее время решение задачи о выборе того или иного оборудования (технологии) производится на основании рассмотрения комплексной технико-экономической задачи. В упрощенном виде задача для решения вопроса о целесообразности выбора системы с центральным рекуператором или рекуперативных горелок сводится к определению срока окупаемости дополнительных средств, вложенных в рекуперативные горелки как более экономичную в плане расхода топлива отопительную систему, с одной стороны, но требующую значительно более дорогостоящего оборудования, с другой стороны.

Выполнение универсальных количественных оценок технико-экономической эффективности такого рода проектов достаточно затруднительно по следующим причинам:

– реальная цена закупаемого оборудования существенно зависит от отношений подрядчика и фирмы-производителя оборудования;

– цены на энергоносители (прежде всего природный газ) отличаются в различных странах.

Анализ состояния печного парка на пост-советском пространстве и в западных странах показывает, что в настоящее время по своему количеству отопительные системы на основе рекуперативных горелок не занимают доминирующих позиций. Многие компании, являющиеся лидерами в области печестроения, например, ЗАО «Термосталь» в РФ, в настоящее время продолжают создавать свое оборудование на основе систем нагрева воздуха с центральным рекуператором. При этом неотъемлемыми характеристиками современной печи являются использование волокнистой футеровки из современных

материалов, импульсных горелок скоростного нагрева, как можно более высоких температур подогрева воздуха в центральном рекуператоре.

Основные причины того, что рекуперативные горелки, несмотря на объективные теплотехнические преимущества, пока не получили всеобщего распространения, лежат в экономической плоскости и связаны с длительным сроком окупаемости дополнительных средств, вкладываемых в приобретение рекуперативных горелок.

Вероятно, что в будущем ситуация будет постепенно изменяться в пользу использования рекуперативных горелок. Основными факторами, которые способствовали бы этому, являются снижение цен на рекуперативные горелки, дополнительное оборудование и системы управления (такие трансформации неизбежно будут происходить при увеличении числа производителей), а также подорожание энергоносителей.

Таким образом, рекуперативные горелки позволяют при тепловой обработке материалов в печах работать с более высокими значениями КИТ и КПД, а значит получать экономию топлива до 25-30% по сравнению с системами с центральным рекуператором.

5.5 Технология отопления пламенных печей при помощи регенеративных горелок

Принцип действия. При реализации отопления печи при помощи регенеративных горелок, как правило, используются две совместно работающие горелки, либо четное число горелок, скомпонованных парами. Каждая из горелок связана (имеет в своем составе) с регенеративным фильтрационным слоем. Фильтрационный слой состоит из огнеупорных частиц, или насадок организованной формы из жаропрочного материала, которые могут воспринимать теплоту от газа, проходящего через

него, или же сообщать тепло газу в зависимости от относительных температур газа и фильтрационного слоя в данный момент. В каждый момент времени одна из горелок, работающих в паре, подводит газ и воздух, который нагревается, проходя через ранее нагретый фильтрационный слой; в печной камере происходит выгорание топлива с выделением теплоты и образованием продуктов сгорания, удаляемых через вторую горелку пары (рисунок 5.6).

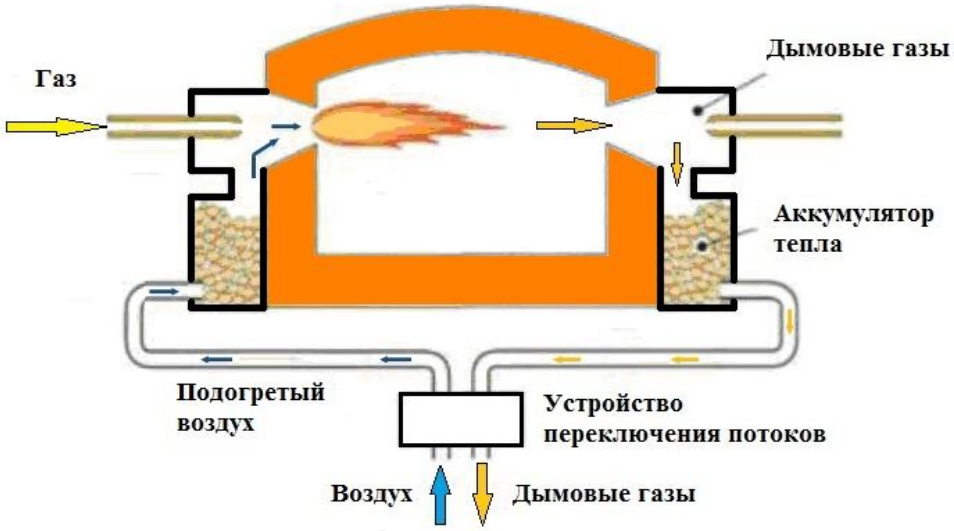


Рисунок 5.6 – Схема отопления печи при помощи регенеративных горелок

В это время подача топлива на вторую горелку отключена, а удаляемые через нее продукты сгорания передают большую часть своего запаса теплоты фильтрационному слою. По истечении некоторого промежутка времени (периода переключения) температура насадки первой горелки, через которую подавался воздух, понижается, а второй, которая находилась на нагреве, увеличивается и происходит переключение горелок – на следующий период времени они меняются местами и далее процесс чередования функций горелок продолжается.

Рациональное значение периода переключения зависит от конструктивных параметров горелок (прежде всего их производительности и характеристик фильтрационных слоев) и технологических параметров тепловой обработки (закон изменения температуры печи во времени). Для широкого диапазона изменения названных параметров период переключения находится в пределах от 20 секунд до трех минут.

Благодаря использованию такой схемы циркуляции продуктов сгорания их теплота в значительной степени улавливается и перенаправляется обратно печь с тем, чтобы повысить эффективность ее эксплуатации. При использовании регенеративных горелок воздух подогревается до наиболее высокой температуры, приближенной к температуре печи.

Устройство регенеративных горелок. Регенеративные горелки могут быть предназначены для прямого горения или поставляться в комплекте с излучающими трубами. При отоплении излучающих труб регенеративные горелки подключаются к концам трубы. Для организации прямого горения регенеративные горелки, работающие в паре, обычно устанавливаются на противоположных стенах. Хотя в принципе возможна их установка и на одной стене, а в пределе пара горелок может быть заключена в один блок и представляться как одно газогорелочное устройство. При этом удается получить более компактное решение. Обычно в этом случае комбинированное устройство дополняется скоростной стартовой горелкой. Такое конструктивное решение применено при создании серии регенеративных горелок REGEMAT.

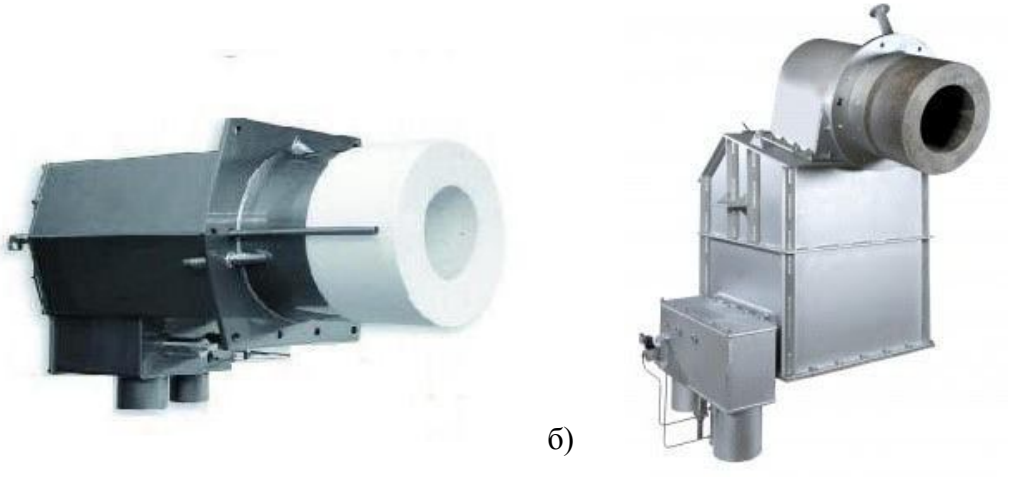
В ряде случаев предусматривается возможность эвакуации части продуктов сгорания (до 15%) через специальное отводящее отверстие в ограждающей конструкции, минуя горелки, выполняющие в текущий момент времени газоотводящую функцию. При этом целью такого технического решения является избежание перегрева насадок регенераторов.

В значительной мере эффективность работы регенеративной горелки определяется параметрами фильтрационного слоя. В работе экспериментальным способом изучены и сопоставлены гидравлические и конструктивные параметры различных фильтрационных слоев при условии достижения равной температуры подогрева воздуха 850°С. Средняя температура дыма на выходе из насадки во всех случаях составляла порядка 260°С.

Сравнению подвергались насадка из корундовых шариков, трубчатая насадка из жаропрочной стали, пластинчатая насадка из жаропрочной стали и сотовая кордиеритовая насадка. Согласно исследованиям, наилучшими показателями по компактности, материалоемкости и аэродинамическому сопротивлению обладает сотовая насадка. Наихудшие показатели у шариковой насадки, а пластинчатая и трубчатая насадки занимают промежуточное положение. Так, шариковая насадка по сравнению с сотовой при достижении равной температуры подогрева воздуха имеет в 2 раза больший объем, в 3,8 раза большую массу и в 18 раз большее аэродинамическое сопротивление (диапазон полученных аэродинамических сопротивлений для изучаемых насадок составил 180-3300 Па). Однако в значительном количестве случаев предпочтение отдается шариковым насадкам в виду их меньшей стоимости.

Среди лидеров на рынке регенеративных горелок можно выделить немецкие фирмы WS и IBS с соответствующими сериями горелок REGEMAT и REGFIRE. При единичных мощностях горелки до 1500 кВт полость для насадки интегрирована в общий корпус горелки, а при высоких мощностях до 6000 кВт насадка с фильтрационным слоем размещается в отдельном выносном блоке (рисунок 5.7). При использовании современных регенеративных горелок температуру уходящих продуктов сгорания удается снизить до

200°С и ниже при этом величина КИТ может достигать значений более 0,9.



а) б)

Рисунок 5.7 – Общий вид горелок REGFIRE при малой (средней) тепловой мощности (а) и при большой тепловой мощности (б).

Особенности применения регенеративных горелок (помимо более высоких значений коэффициента использования топлива) заключаются в следующих положительных результатах:

– повышается равномерность распределения температур за счет создания рециркуляции продуктов сгорания в камере печи при постоянном изменении направления движения газообразных сред;

– в общем случае возможно значительное сокращение потерь металла с окалиной за счет работы с низкими значениями коэффициента расхода воздуха, также имеется возможность создания в печи восстановительной атмосферы и дожигания топлива в фильтрационном слое.

Экологические аспекты использования регенеративных горелок. При проектировании и эксплуатации регенеративных горелок имеют место те же вопросы экологической безопасности, что и при использовании рекуперативных горелок – приходится разрешать противоречие между требованиями энергоэффективности и сокращения выбросов. Так как с одной

стороны повышение температуры воздуха, идущего на горение, определяет сокращение расхода топлива, а с другой стороны, приводит к повышению температуры в зоне активного горения и может приводить к повышенному образованию NO_x.

Решение этой проблемы достигается благодаря стадийному сжиганию топлива: часть воздуха предварительно смешивается с топливом и поступает в камеру сгорания или непосредственно печное пространство, недостающее количество воздуха подводится по периферийным каналам. Дополнительное понижение температуры в зоне активного горения достигается благодаря рециркуляции продуктов сгорания, имеющей место при переключении горелок.

Благодаря научному поиску сотрудников фирмы WS, направленному на возможность использования регенеративных горелок с высокой температурой подогрева воздуха при удовлетворительных показателях по уровню образования NO_x, была предложена, опробована и доказала свою работоспособность технология беспламенного горения FLOX (Flammlose Oxidation). Ее суть заключается в том, что топливо и воздух подаются непосредственно в камеру печи таким образом, что перед смешением и горением они разбавляются продуктами сгорания. При этом горение протекает при меньших значениях температуры без видимого пламени и шума горения. Возле горелки отсутствует турбулентный фронт пламени, и горение происходит равномерно во всем объеме печной камеры. Благодаря однородному распределению температуры в печи удается избежать появления областей значительного образования NO_x. Кроме того режим FLOX гарантирует равномерный подвод теплоты к телам, подвергающимся тепловой обработке. Режим работы без пламени допустим только при температурах более 850°С, когда гарантируется полное протекание горения без риска взрыва.

Сравнение с отопительными системами на базе центрального рекуператора или рекуперативных горелок. Использование регенеративных горелок гарантирует достижение более высоких температур подогрева воздуха, чем при использовании отопительных систем с центральным рекуператором или даже рекуперативных горелок. При переходе на использование регенеративных горелок экономия топлива может составлять 20-50%.

В ряде литературных источников указывается, что переход на использование регенеративных горелок является средством существенного повышения равномерности распределения температур в объеме печной камеры. Это утверждение, несомненно, справедливо, поскольку реверс направления теплоносителей приводит к существенному развитию рециркуляционных явлений. Однако следует иметь в виду, что при использовании других современных средств отопления, например, скоростных горелок, работающих в импульсном режиме, или рекуперативных горелок также достигается значительная степень рециркуляции продуктов сгорания и устанавливается равномерность распределения температур для термических печей на очень высоком уровне в диапазоне от ±2 до ±5°С. Поэтому существенное повышение равномерности распределения температур в объеме печи при использовании для реконструкции регенеративных горелок будет достигаться только в случае, если замене подлежат устаревшие газогорелочные устройства, использовавшиеся в амплитудно-модулированном режиме.

В качестве особенностей конструкции и условий эксплуатации печей, отапливаемых при помощи регенеративных горелок, необходимо выделить отсутствие необходимости в создании дымоотводящего тракта, выполненного из огнеупорных материалов. Сборный канал для удаления продуктов сгорания

может быть представлен трубой из углеродистой стали, покрытой снаружи слоем тепловой изоляции;

В качестве факторов, связанных с проблемами на пути принятия решения об использовании и при эксплуатации регенеративных горелок, необходимо выделить следующее:

– возрастают габаритные размеры печи, что иногда является препятствием для реконструкции нагревательных и термических печей в условиях действующих цехов;

– имеется большое количество запорных клапанов, работающих с высокой частотой переключения;

– в большинстве случаев необходимо использование дымососа для эвакуации продуктов сгорания, в то время как при использовании других отопительных систем обычно хватает разрежения, создаваемого дымовой трубой;

– загрязнение насадки фильтрационного слоя и, как следствие, повышение его аэродинамического сопротивления;

– существенно более сложная, как в аппаратном, так и в программном отношении САУ;

– более высокая стартовая стоимость и более высокие затраты на обслуживание и эксплуатацию такой отопительной системы.

Особенности восстановления аэродинамических параметров фильтрационного слоя. При эксплуатации регенеративных горелок в большей или меньшей мере имеет место засорение насадки, приводящее, прежде всего, к повышению аэродинамического сопротивления фильтрационного слоя. Характер загрязняющих веществ в основном зависит от материала, подвергающегося тепловой обработке в печи. Например, в случае использования печи для переплавки алюминиевого скрапа загрязнителями могут являться соляные флюсы. Загрязнение принимает форму отложений твердых веществ, или в некоторых случаях жидкостей, которые накапливаются в слое и, в конечном счете, уменьшают поток газа через слой. Обычно в горячих отработанных газах эти

загрязнители находятся в газообразном или жидком состоянии, однако, по мере остывания газа в регенеративном фильтрационном слое, они конденсируются. В некоторых других случаях загрязняющие вещества могут быть в виде пыли или других твердых веществ, присутствующих в отработанных газах и улавливаемых в фильтрующей среде слоя. Со временем загрязняющие вещества образуют засорение, которое трудно удалить.

Существует вариант, основанный на быстрой замене фильтрационного слоя по ходу процесса. Другое техническое решение относится к случаю использования регенеративных горелок на печах для плавления алюминия, для которых имеет место загрязнение фильтрационного слоя солями, и предполагает при помощи специальных устройств нагрев слоя до высокой температуры с расплавлением солей и их удалением в жидком состоянии. Еще один способ предлагает наличие в ящике с фильтрационной насадкой двух отверстий: в верхней части для добавки новых шариков и в нижней для удаления загрязненных шариков. Также в одном из патентов Великобритании предложено при эксплуатации регенеративных горелок для отопления стекловаренных печей использовать промежуточную ступень охлаждения в разрыве между двумя фильтрационными слоями, чтобы загрязняющие вещества могли конденсироваться на участке воздуховода, который легко чистить. Изобретение, предложенное в, предусматривает использование быстрого потока газа, который действуют в течение короткого периода времени, для удаления загрязняющих веществ из регенеративного фильтрационного слоя, используемого с регенеративными горелками (в особенности теми, которые применяют для переплавки алюминия и алюминиевых сплавов).

Факторы, влияющие на решение технико-экономической задачи о целесообразности выбора регенеративных горелок. В данном случае факторы, влияющие на решение технико-

экономической задачи, во многом подобны тем, что были рассмотрены в работе при анализе вопроса о целесообразности использования рекуперативных горелок для создания новых печных агрегатов или реконструкции существующих. Противоречие ситуации в данном случае усугубляется тем, что, с одной стороны, с теплотехнической точки зрения регенеративные горелки, при прочих равных условиях, даже более эффективны и потребляют меньше топлива, чем рекуперативные горелки, а с другой стороны, регенеративные горелки являются еще более дорогим оборудованием в плане стоимости и эксплуатационных затрат на обслуживание.

То есть технико-экономическая задача о целесообразности выбора системы на основе регенеративных горелок взамен другой отопительной системы, как и в случае рекуперативных горелок, сводится к определению срока окупаемости дополнительных средств (по сравнению с общепринятым современными отопительными системами, например, на базе центрального рекуператора и скоростных горелок), вложенных в регенеративные горелки как более экономичную в плане расхода топлива отопительную систему, но требующую значительно более дорогостоящего оборудования и алгоритмов управления, а также более высоких эксплуатационных затрат.

Выполнение универсальных количественных оценок технико-экономической эффективности такого рода проектов достаточно затруднительно в связи с тем, что реальная цена закупаемого оборудования существенно зависит от отношений подрядчика и фирмы-производителя оборудования (объем закупки, система скидок), а цены на энергоносители (прежде всего природный газ) отличаются в различных странах.

Анализ состояния печного парка в странах, лидирующих в плане металлургии и машиностроения, показывает, что в настоящее время по своему количеству отопительные системы на основе регенеративных горелок только начинаются появляться и

пока не занимают значительных позиций. Как указывалось в работах, многие компании, являющиеся лидерами в области печестроения, например, ЗАО «Термосталь» в РФ, в настоящее время продолжают создавать свое оборудование на основе систем нагрева воздуха с центральным рекуператором, делая упор на стандартные в современной металлургической теплотехнике подходы: использование волокнистой футеровка из современных материалов, импульсных горелок скоростного нагрева, как можно более высоких температур подогрева воздуха в центральном рекуператоре.

Основные причины того, что регенеративные горелки, несмотря на объективные теплотехнические преимущества, пока не получили всеобщего распространения, лежат в экономической плоскости и связаны с длительным сроком окупаемости дополнительных средств, вкладываемых в приобретение и эксплуатацию таких горелок.

Снижение цен на регенеративные горелки, дополнительное оборудование и системы управления (такие трансформации неизбежно будут происходить при увеличении числа производителей такого рода оборудования), а также подорожание энергоносителей являются факторами, которые могут способствовать изменению в будущем ситуации в пользу использования регенеративных горелок.

Таким образом, отопительные системы на основе регенеративных горелок позволяют достичь наибольших значений температуры подогрева воздуха по сравнению со всеми другими отопительными системами и потому, с теплотехнической точки зрения, их работа характеризуется наиболее высокими значениями КИТ и КПД и соответственно наименьшими при прочих равных условиях расходами топлива.

Срок окупаемости дополнительных средств, вкладываемых в отопительные системы на базе регенеративных горелок, определяет целесообразность применения этой технологии в

каждом конкретном случае. В значительном ряде случаев названный срок окупаемости получается крайне длительным и в настоящее время значительная часть в полном смысле современного печного оборудования создается на базе отопительных систем с центральным рекуператором.

Общие выводы по проблемам энергосбережения и достижения равномерного температурного поля в камерных печах:

- Для большого парка эксплуатируемых в отечественной практике печей с несимметричным подводом топлива и отводом отходящих газов (например, широко используемые нагревательные колодцы с одной верхней горелкой (ОВГ) и характерной крайней несимметричностью температурного поля) можно считать целесообразным импульсную подачу топлива с двумя уровнями расхода: B_{max} и B_{min}. Регулирование теплового режима должно вестись с использованием сопряженных и зональных моделей, как это показано в разделе 7.3.6.
- Для группы существующих печей, отапливаемых одной горелкой (например, нагревательные колодцы ОЦП – с отоплением из центра пода) получение равномерного температурного поля может быть достигнуто путем перехода от рекуперативного на регенеративный подогрев воздуха с использованием регенеративных горелок, обеспечивающих объемное сжигание топлива.
- Для группы крупных камерных печей, как правило, с выкатным подом для нагревания многотонных заготовок под обработку давлением или термообработку – равномерно распределенное температурное поле достигается отоплением большим числом малых горелок. Регулирование теплового режима осуществляется с использованием большого количества датчиков температур, управляющих работой одной или группы горелок в режиме «включено-выключено».

6 Характеристика и тепловая работа по металлургическим переделам

6.1 Печи черной металлургии

6.1.1 Производство кокса

Кокс – это искусственное твердое топливо повышенной прочности, который используется в металлургии для производства чугуна в доменных печах. В доменном процессе кокс служит восстановителем оксидов железа, топливом, а также обеспечивает газопроницаемость шихты в шахте доменной печи. Кокс имеет относительную плотность $1800 \div 1850$ кг/м^3 , кажущуюся (с учетом пор) – $800 \div 1000$ кг/м^3 , пористость около 50%, насыпную массу $400 \div 500$ кг/м^3, теплоту сгорания около 29 МДж/кг.

Для получения кокса применяются только те сорта каменного угля, которые при нагреве без доступа воздуха спекаются в достаточно прочную и плотную массу. Кокс получают из шихты, представляющей смесь коксующихся сортов угля. Так, шихта для кокса из донецких углей состоит из газового, паровично жирного, коксового и паровично-спекающихся углей. Для уменьшения балластных и вредных примесей угли перед коксованием подвергаются обогащению с целью снижения зольности до 7-8%.

Процесс коксования ведется в специальных печах. Конечная температура процесса достигает 1100°С, длительность процесса составляет 13-18 часов. Выделяющийся при коксовании коксовый газ имеет средний состав:

$$H_2 = 55 \div 60\%, CH_4 = 23 \div 27\%, C_2H_4, C_5H_{10} = 2 \div 4\%,$$

$$CO = 5 \div 8\%, CO_2 = 1{,}5 \div 3\%, N_2 = 3 \div 7\%, O_2 = 0{,}3 \div 0{,}8\%.$$

Теплота сгорания газа ($Q_н^р$) колеблется от 16,5 до 18 МДж/м^3. Температура газа на выходе составляет 600-750°С; с газом увлекаются пары воды и ряд ценных веществ (смола, бензол, аммиак и др.), которые выделяются при промывке и

охлаждении коксового газа. Конечная температура газа 30÷50°С. При коксовании 1т сухого каменного угля получают в среднем 750 кг кокса, 300 м^3 коксового газа, 35 кг смолы, 10 кг бензола и 3 кг аммиака.

Отопление и конструкции коксовых печей. Для обогрева коксовых печей могут применяться коксовый и доменный газы. Большинство коксовых печей обогреваются доменным газом, что позволяет использовать за пределами коксохимического завода большую часть высококалорийного коксового газа. Только в тех случаях, когда коксохимический завод удален от металлургического и передача доменного газов по газопроводам затруднительна, допускается обогрев печей коксовым газом.

Коксовые печи строятся в виде батарей из 60-70 печей в каждой. Каждая коксовая печь представляет собой узкую камеру коксования шириной 0,4-0,5 м, длиной 13-14 м и высотой 4,0-4,3 м. стены камеры выкладываются из динасового кирпича. Между смежными камерами размещаются отопительные простенки, в которых сжигается топливо. Под камерами коксования и простенками располагаются регенераторы для подогрева воздуха и доменного газа. Печь загружается шихтой сверху через люки из специального углезагрузочного вагона. Газообразные продукты коксования удаляются из печи через установленные на каждой печи стояки, из которых коксовый газ поступает в газосборник, проложенный вдоль батареи, а затем – на очистку. Готовый кокс (коксовый пирог) специальным устройством – коксовыталкивателем – из коксовой печи выгружается через дверь в торце в тушильный вагон.

Температура выгруженного кокса около 1000°С. При этой температуре кокс быстро выгорает. Чтобы уменьшить потери кокса на выгорание, тушильный вагон направляется в тушильную башню, где кокс орошается водой и остывает. Потушенный кокс сортируется по крупности и направляется потребителям.

В зависимости от конструкции обогревательного простенка печи бывают:

- с перекидными каналами (ПК);

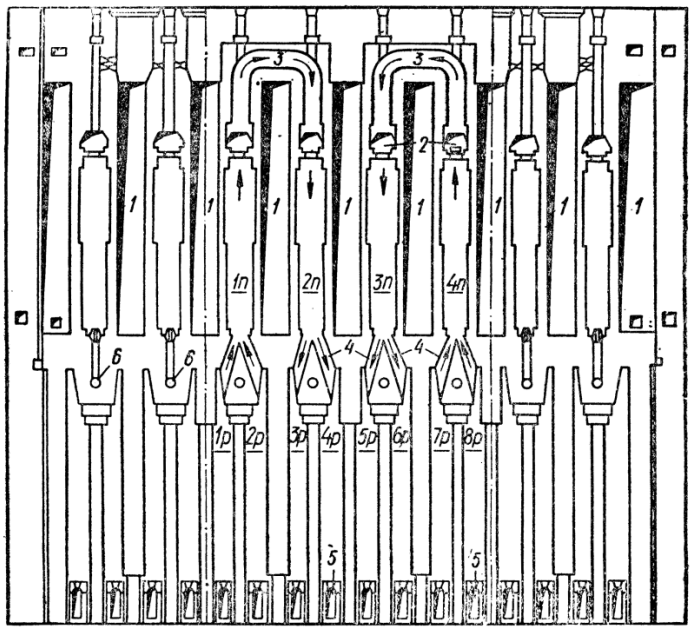
- с парными вертикалами в обогреваемых простенках и с рециркуляцией продуктов горения (ПВР).

В печах с перекидными каналами (ПК) под каждым подогреваемым простенком расположены два регенератора: один – для подогрева воздуха, другой – для подогрева доменного газа. Каждый регенератор наглухо разделен поперечной стенкой на две половины. Отопительные простенки разделены вертикальными перегородками на отдельные каналы, которые соединены в верхней части сборным коллектором. Каждая пара простенков, находящихся по обе стороны камеры для коксования, соединена несколькими *перекидными каналами*.

При данной системе отопления два обогревательных простенка и расположенные под ними четыре регенератора образуют отопительный элемент. Схема движения газов в печах с перекидными каналами показана на рисунке 6.1, а конструкция данной печи приведена на рисунке 6.2.

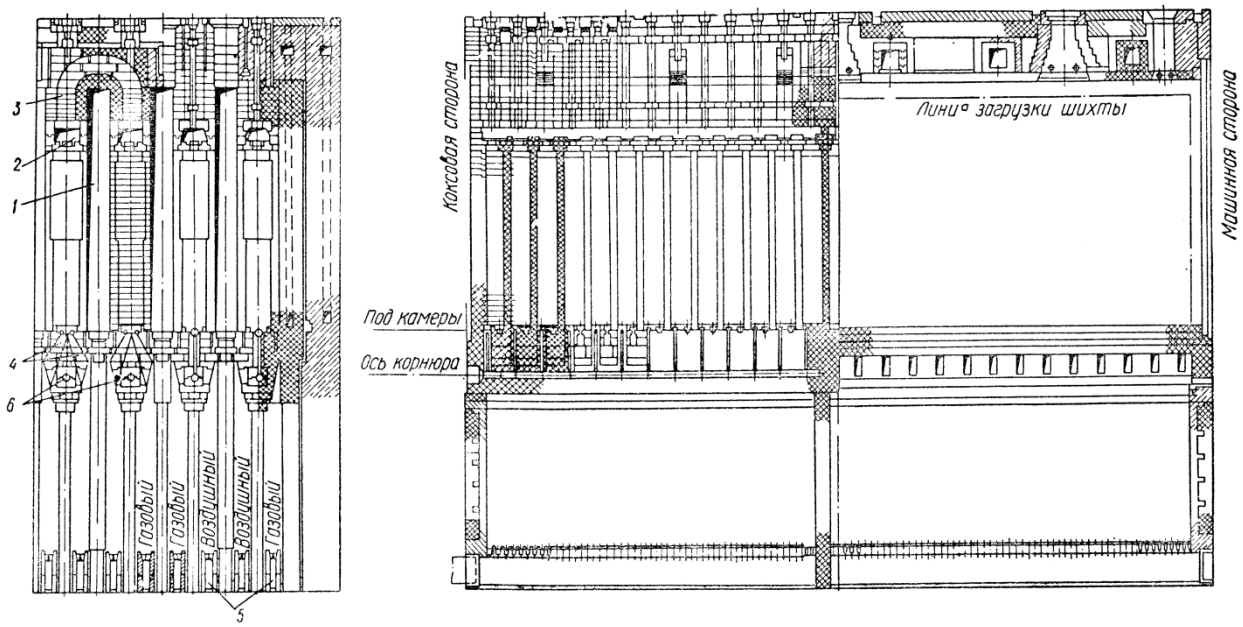
Доменный газ подается в газовые регенераторы 1р, 8р и т.д., а воздух – в воздушные регенераторы 2р, 7р и т.д. нагретые доменный газ и воздух через косые ходы 4 поступает в обогревательные каналы простенков 1п, 4п и т.д., в которых газ сгорает. Продукты сгорания через горизонтальные сборные 2 и перекидные 3 каналы направляются во все обогревательные каналы простенков 2п, 3п и т.д., из которых затем по коксовым ходам 4 попадают в регенераторы 3р, 4р, 5р, 6р и т.д., откуда по подовым каналам 5 уходят в борова, а далее – в дымовую трубу.

Через 20 мин, когда регенераторы 1р, 2р, 7р, 8р и т.д. несколько остынут, а регенераторы 3р, 4р, 5р, 6р и т.д. нагреются, изменяют направление движения газов: в регенераторы 3р, 4р, 5р, 6р и т.д. поступают для нагрева газ и воздух, а через регенераторы 1р, 2р, 7р, 8р и т.д. отводятся продукты горения.



1р, 3р, 6р, 8р и т.д. – газовые регенераторы; 2р, 4р, 5р, 7р и т.д. – воздушные регенераторы; 1п, 2п, 3п, 4п и т.д. – обогревательные простенки; 1 – камера коксования; 2 – горизонтальный сборный канал – коллектор; 3 – перекидной канал; 4 – косые ходы; 5 – подовые каналы для удаления продуктов сгорания; 6 – каналы для подачи коксового газа.

Рисунок 6.1 – Схема движения газов в коксовой печи с перекидными каналами



1 – коксовая камера печи; 2 – горизонтальный сборный канал – коллектор; 3 – перекидной канал; 4 – косые ходы; 5 – подовые каналы; 6 – отверстия для подачи коксового газа.

Рисунок 6.2 – Конструкция печи типа ПК

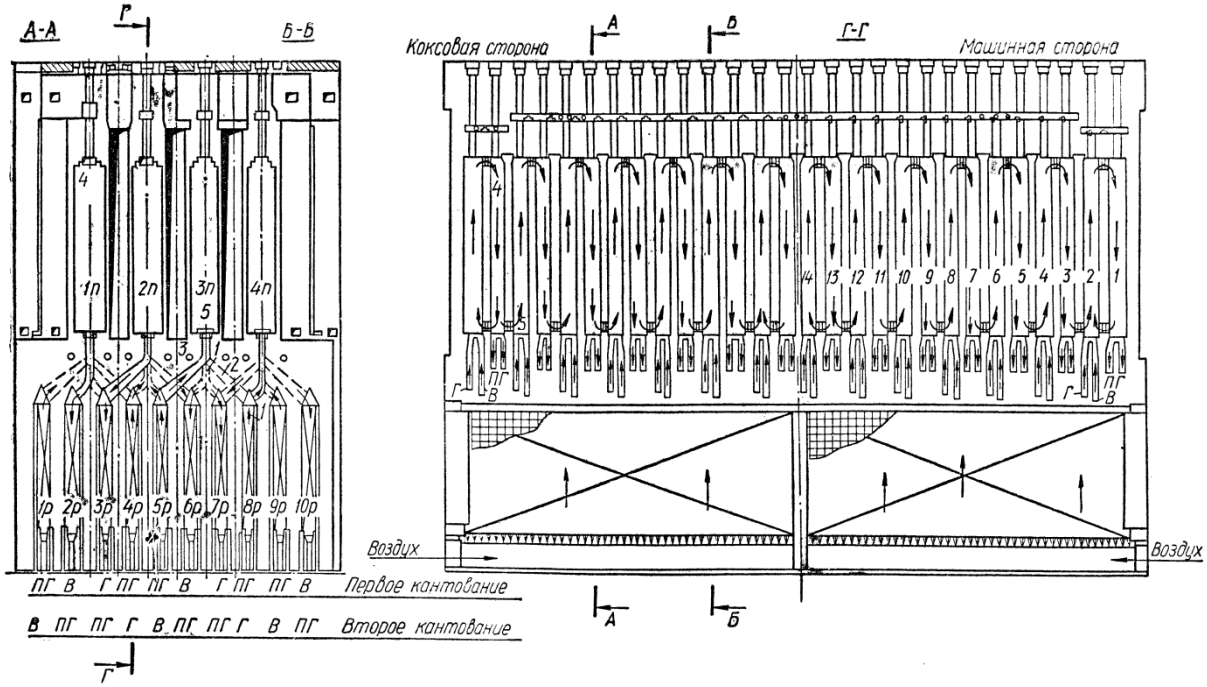
Направление газовых потоков изменяется при помощи *кантовочных устройств*, переключающих краны отопительного газа и газовоздушные каналы. При отоплении печей данной конструкции одним коксовым газом последний подается без нагрева в регенераторах через специальные отверстия 6. Газовые регенераторы при этом служат для нагрева воздуха.

Печи данной конструкции имеют ряд недостатков: неравномерность обогрева печи по высоте, большое гидравлическое сопротивление и недостаточную герметичность отопительной системы. Несколько уменьшить неравномерность обогрева можно путем утолщения стенок камеры в нижней части.

В печах с парными вертикалами и рециркуляцией продуктов сгорания топлива (ПВР) обогреваемый простенок разделяется на парные обогреваемые каналы с рециркуляцией продуктов сгорания через соединительные окна внизу разделительных стен. Схема обогрева печи этой конструкции приведена на рисунке 6.3. рециркуляция продуктов сгорания осуществляется за счет инжектирующего действия газовоздушных струй и разности удельных весов продуктов сгорания в смежных вертикальных каналах. В рециркуляции принимают участие до 40% продуктов сгорания. Благодаря рециркуляции зона горения растягивается и равномерность обогрева по высоте увеличивается.

Тепловой баланс коксовых печей. Приход тепла в печь складывается из тепла горения газа, физического тепла газа и воздуха и физического тепла шихтовых материалов.

Расход тепла складывается из тепла, уносимого продуктами коксования, продуктами сгорания и потерь через кладку в окружающее пространство. Суммарный тепловой эффект экзотермических и эндотермических реакций для коксования принимается равным нулю.



1 – короткий косой ход; 2 – длинный косой ход; 3 – газораспределительный канал; 4 – перевальное окно; 5 – рециркуляционное окно; 1р, 2р, 3р и т.д. – регенераторы; 1п, 2п, 3п и т.д. – обогревательные простенки.

Рисунок 6.3 – Схема движения газов в печах с парными вертикалами и рециркуляцией продуктов сгорания (ПВР)

В таблице 6.1 приведен примерный тепловой баланс процесса коксования в расчете на 1 кг влажной шихты (влажность 7%) и при отоплении печи доменным газом.

В современных коксовых печах коэффициент использования топлива достигает 79-85%.

Удельный расход тепла на коксование зависит от влажности шихты, конструкции печи и ее теплового режима. Удельные нормы расхода тепла на коксование 1 кг шихты влажностью 7%, приведены в таблице 6.2.

Таблица 6.1 – Примерный тепловой баланс процесса коксования

Статьи прихода	Удельный приход тепла на 1 кг влажной шихты		Статьи расхода	Удельный расход тепла на 1 кг влажной шихты	
	кДж/кг	%		кДж/кг	%
Тепло горения топлива	1350	52,5	Физическое тепло, уносимое коксом при выгрузке	960	37,2
Физическое тепло воздуха для горения топлива	650	25,3	Физическое тепло, уносимое коксовым газом и летучими продуктами коксования	855	33,4
Физическое тепло газа	545	21	Потери тепла кладкой в окружающее пространство	219	8,2
Физическое тепло шихты	29	1,2	Физическое тепло, уносимое продуктами сгорания в дымовую трубу	540	21,2
Итого	2574	100	Итого	2574	100

Таблица 6.2 – Удельные нормы расхода тепла на коксование 1 кг шихты

Конструкция отопительных простенков	Расход тепла на коксование	
	при отоплении коксовым газом, кДж/кг	при отоплении доменным газом, кДж/кг
Перекидные каналы	2380	2680
Парные каналы	2300	2640

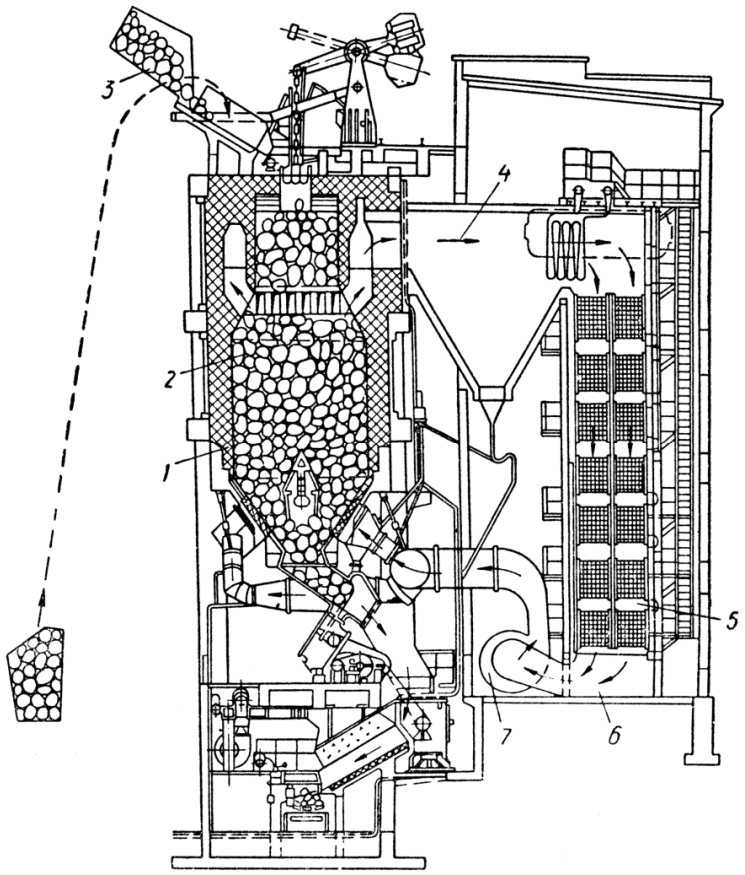
Если содержание влаги в шихте более 7%, норма расхода тепла увеличивается, менее 7% – уменьшается. При этом каждый процент повышения или понижения влажности изменяет расход тепла в следующих переделах (на 1 кг шихты): при определении коксовым газом – на 29,3кДж; при отоплении доменным газом – на 33,4 кДж.

Основным способом экономии тепла является использование *метода сухого тушения кокса.* Как уже было сказано, кокс, выгружаемый из печей, имеет температуру порядка 1000°С. С ним уносится 37-40% тепла, или 0,96-1,04 МДж на каждый килограмм кокса. При тушении кокса водой все тепло, заключенное в коксе, полностью теряется. Тепло кокса используется путем применения установок *сухого тушения кокса*.

Общий вид установки сухого тушения кокса (УСТК) показан на рисунке 6.4. Принцип ее работы заключается в следующем. Через загруженный в тушильную камеру раскаленный кокс продувается инертные газы, которые при этом нагреваются до температуры 800°С, после чего поступают в котельный агрегат, где отдавая тепло поверхностям нагрева, охлаждаются до 180-200°С. Охлажденные газы нагнетаются дымососом в нижнюю часть тушильной камеры, где снова нагреваются до 800°С за счет новых порций раскаленного кокса. Непрерывно циркулирующие инертные газы отбирают тепло раскаленного кокса и отдают его поверхностям нагрева котлоагрегата.

Инертными газами являются продукты горения кокса, состоящие из азота (N_2), оксиды углерода (CO) и углекислого газа (CO_2). При подсосе в агрегат воздуха кислород его реагирует с коксом, поэтому подсосы необходимо сводить к минимуму.

Установка рассчитана на обслуживание одной коксовой батареи из 60 печей. Котел для охлаждения инертных газов – водотрубный с принудительной циркуляцией.



1 – тушильная камера; 2 – кокс; 3 – скиповый подъемник; 4, 6 – пути движения инертных газов; 5 – котельный агрегат; 7 – дымосос циркуляции инертных газов.

Рисунок 6.4 – Установка сухого тушения кокса

Основные расчетные данные котлоагрегата:

Средняя производительность котла, т/ч…….	13
Максимальная производительность котла, т/ч……..	20
Давление пара в котле, МПа……	4,1
Температура перегретого пара, °С……..	450
Количество циркулирующих инертных газов, $м^3$/ч	63000
Температура инертных газов, °С	
перед пароперегревателем……	800
за котлоагрегатом……..	200
Средняя скорость газов в газоходе, м/сек……...	8,2
Сопротивление котлоагрегата по газовому тракту, Па...	1570
Сопротивление газового тракта всей установки, Па.....	3340
Коэффициент полезного действия котлоагрегата, %.....	74

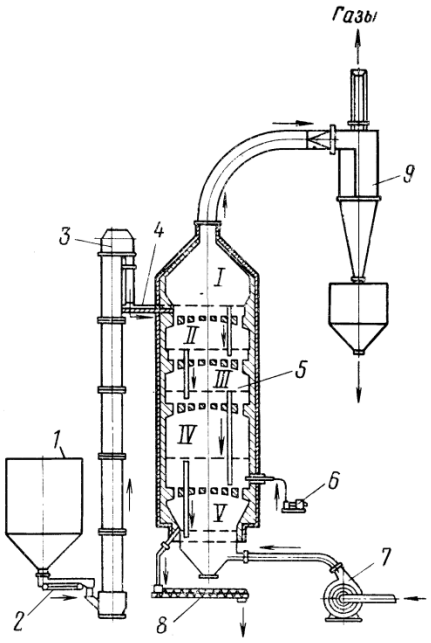
Циркуляция воды осуществляется циркуляционным насосом производительностью 140 $м^3$/ч и напором 25 кПа. Дымосос для циркуляции инертных газов имеет производительность 75000 $м^3$/ч, полный напор 12 кПа.

Установки сухого тушения кокса обеспечивают потребность в паре всего коксохимического завода. Стоимость пара этих установок составляет 60% стоимости пара котельных и окупаются за 2-2,5 года. Следует отметить, что качество кокса при сухом тушении выше, чем при мокром. Применение кокса сухого тушения дало экономию расхода его на производство чугуна на 5%.

6.1.2 Обжиг известняка и доломита

Обжиг широко применяемых в металлургии извести, доломита, магнезита и других огнеупорных материалов производится в шахтных печах с плотным фильтрующим слоем (устаревшая технология), в многозонных печах с кипящим (псевдоожиженном) слое, а также во вращающихся печах.

Схема печи для *обжига известняка в кипящем слое* представлена на рисунке 6.5. В печи производится обжиг зернистого материала. Печь имеет пять зон, разделенные решетчатыми сводами. Измельченный до размера зерен $1 \div 10$ мм сырой материал поступает в верхнюю зону I, где подогревается за счет тепла отработанных газов, затем перетекает по специальным трубам-перетокам последовательно в зоны подготовки II и III, зону обжига IV и зону охлаждения V. В нижнюю зону подается холодный воздух, который нагревается в кипящем слое за счет тепла охлаждаемой извести. Готовая известь по перетоку выгружается из печи. Отработанные газы из I зоны после очистки отводятся в атмосферу.



1 – бункер для измельченного известняка; 2 – шнек; 3 – элеватор; 4 – шнек; 5 – печь; 6 – мазутный насос; 7 – дутьевой вентилятор; 8 – шнек выгрузки; 9 – циклон; I-III – зоны подготовки; IV – зона кальцинирования; V – зона охлаждения.

Рисунок 6.5 – Печь для обжига извести в кипящем слое

Сжигание топлива (например, мазута) производится в зоне обжига IV в потоке воздуха, подогретого в зоне охлаждения извести. В зоне обжига развивается температура $\sim 1200°C$, необходимая для прохождения реакции разложения известняка

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2.$$

Кипящий (псевдоожиженный) слой – это такое аэродинамическое состояние вещества, при котором твердые частицы (зерна) совершают возвратно-поступательное движение «вверх-вниз» под динамическим воздействием потока ожижающего газа, направленного верх, и сил тяжести, направленных вниз. При этом присутствует значительное горизонтальное перемещение зерен, т.е. кипящий слой интенсивно перемешивается. Минимальная скорость газов w_{min}, при которой плотный (фильтрующий) слой

сыпучего материала переходит в псевдоожиженный, определяется из критериального выражения

$$\mathrm{Re}_{\min} = \frac{\mathrm{Ar}}{1400 - 5{,}22\sqrt{\mathrm{Ar}}}, \qquad (6.1)$$

$$\mathrm{Re}_{\min} = \frac{w_{\min} \cdot d}{\nu}, \qquad (6.2)$$

где Re – число (критерий) Рейнольдса;

d – размер зерна (куска), м;

ν – кинематический коэффициент вязкости газа, $м^2/с$;

Ar – число Архимеда,

$$\mathrm{Ar} = \frac{g \cdot d^3}{\nu^2}\left(\frac{\rho_м}{\rho_г} - 1\right), \qquad (6.3)$$

где g – ускорение силы тяжести, $м/с^2$;

$\rho_м$ – плотность материала, $кг/м^3$;

$\rho_г$ – плотность ожижающего газа $кг/м^3$.

Отношение

$$W = \frac{w_{об}}{w_{\min}}$$

называется числом псевдоожижения (здесь $w_{об}$ скорость, отнесенная к полному сечению). Спокойное псевдоожижение соответствует $W = 2 \ldots 5$. при этом верхняя поверхность кипящего слоя напоминает поверхность равномерно кипящей жидкости. Псевдоожиженный слой обладает свойствами капельной жидкости (текучестью), поэтому возможен переток кипящего слоя из одной зоны в другую по законам движения жидкости.

Среднестатистическое время пребывания зернистого материала в кипящем слое при непрерывной загрузке и выгрузке определяется из выражения

$$\tau = \frac{H \cdot \omega}{M}(1 - f)\rho_м, c, \qquad (6.4)$$

где H – высота слоя, м;

ω – поперечное сечение реактора кипящего слоя, $м^2$;

f – порозность слоя (отношение газового объема к общему), при спокойном псевдоожижении $f \cong 0{,}7$;

$\rho_м$ – плотность материала, $кг/м^3$.

Время пребывания материала в слое должно превышать требуемое время нагрева зерна, определяемое по известной «конвективной формуле»:

$$\tau_н = \frac{r_0 \cdot \rho_м \cdot c}{k_1 \cdot \alpha} \ln \frac{t_{ср} - t_н}{t_{ср} - t_к}, c, \qquad (6.5)$$

где $r_0 = 0{,}5 \cdot d$ – толщина прогреваемого слоя зерна, принимаемого по форме в виде сферы ($k_1 = 3$);

c – удельная теплоемкость материала, $Дж/(кг \cdot К)$;

$t_{ср}$ – температура греющей среды (газов), ºС;

$t_н, t_к$ – начальная и конечная температура материала, ºС;

α – коэффициент теплоотдачи, $Вт/(м^2 \cdot К)$, определяемый из эмпирической критериальной зависимости

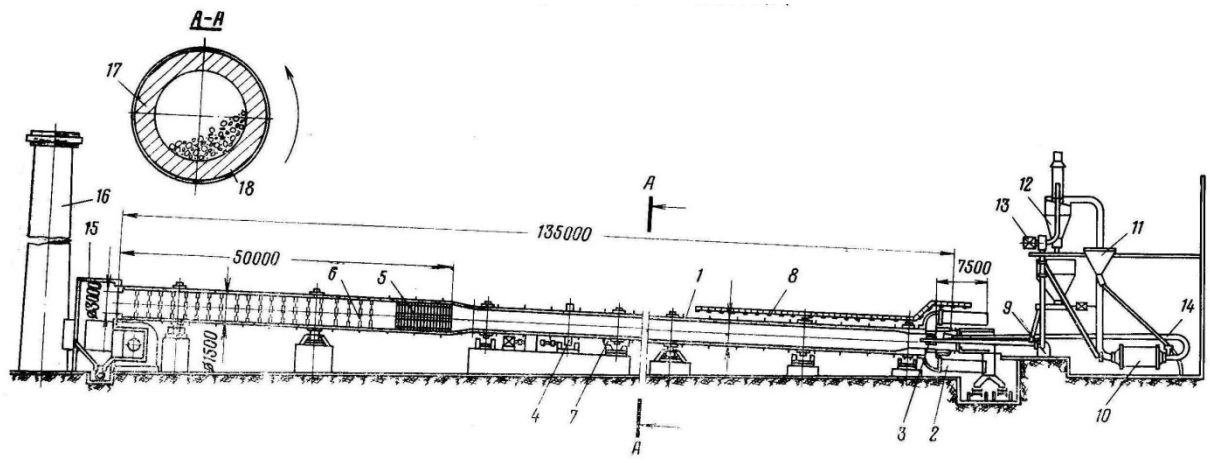
$$Nu = 0{,}12 \cdot Re^{1{,}03} \cdot Pr^{0{,}54},$$

$$Re = \frac{w_{об}}{\nu_г}; \qquad Pr = \frac{\nu_г}{a_г}; \qquad Nu = \frac{l \cdot \alpha}{\lambda_г},$$

где а – коэффициент температуропроводности, $м^3/с$.

Интенсивность теплоотдачи в кипящем слое достаточно высока: $200 < \alpha < 1000$. Зернистый материал относится к категории термически тонких тел ($Bi_{max} < 0{,}1$). Благодаря интенсивному перемешиванию и большой турбулизации потоков процесс теплопередачи проходит очень интенсивно, а работа печи характеризуется большой удельной производительностью. Недостатком кипящего слоя является истирание частиц, большой унос и запыление газов, вследствие чего приходится прибегать к дорогостоящей очистке газов.

Вращающаяся печь (трубчатая печь, барабанная печь). Печь (рис.6.6) представляет собой стальной цилиндр, футерованный в зоне высоких температур огнеупором и наклоненный к горизонту под углом ≈4°. Стальной кожух (барабан печи) располагается на опорных роликах и совершает вращательное движение вокруг продольной оси (1-2 оборота в минуту) посредством механизма вращения.



1 – печь; 2 – холодильник; 3 – горелка; 4 – привод; 5 – теплообменники; 6 – цепная завеса; 7 – упорные ролики; 8 – трубы водяного охлаждения печи; 9 – вентилятор; 10 – шаровая мельница; 11 – сепаратор; 12 – циклон; 13 – вентилятор; 14 – трубопровод для отбора горячего воздуха из головки печи; 15 – пылеосадительная камера; 16 – дымовая труба; 17 – стальной кожух; 18 – футеровка.

Рисунок 6.6 – Вращающаяся печь

Для улучшения условий теплопередачи в печи применяются различные теплообменные устройства (перегребающие лопасти, полки, цепные завесы). Основные размеры вращающихся печей различного назначения варьируется в значительных пределах: длина от 50 до 250 м, диаметр от 3 до 7,5 м.

Сырой материал поступает в верхнюю зону печи и движется, пересыпаясь, навстречу дымовым газам, проходя последовательно зоны подсушки, подогрева и обжига. Отопление печи осуществляется с помощью дальнобойной (длиннофакельной) горелки, установленной в нижнем торце печи. Воздух для сжигания нагревается в холодильнике за счет охлаждения обожженного материала. Холодильник представляет собой ряд барабанов, связанных с печью, в которые поступает при вращении печи раскаленный обожженный материал, продуваемый воздухом. В печи может использоваться топливо любого вида. На рисунке 6.6 показана печь, отапливаемая пылеугольным топливом; система топливоподачи показана позициями 9-14. Дымовые газы (сильнозапыленные продукты сгорания) отводятся в верхней части печи через систему газоочистки дымососом в дымовую трубу.

Во вращающихся печах проходит тепловую обработку сыпучий материал в виде кусков размером 30-80 мм. При вращении в поперечном сечении печи положение, показанное на рисунке 6.6 (сечение А-А), которое соответствует понятию «пересыпающийся слой», и при котором осуществляется постоянное перемешивание кусков. Считается [22], что пересыпающийся слой можно считать термически тонким телом. Тепло от продуктов сгорания излучением и конвекцией передается пересыпающемуся слою, внутри которого существует также контактный теплообмен между кусками, в результате чего температура в слое постоянно выравнивается. Определенную роль в передаче тепла материалу играет футеровка. Футеровка вращающихся печей работает в весьма тяжелых условиях, что

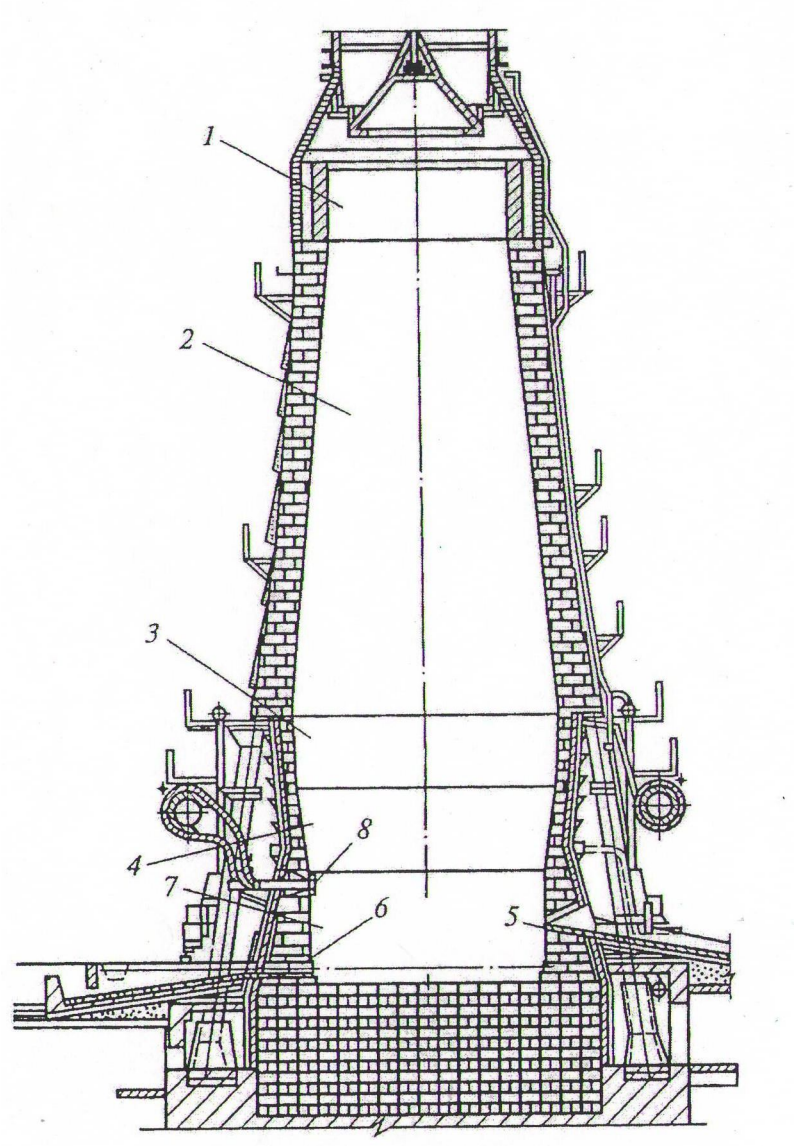
связано с периодическим колебанием температур, обусловленном вращением печи и перемещением в ней материала. Перепады температуры на внутренней поверхности барабана при входе и выходе из-под слоя шихты составляют 150-250ºС. Продолжительность работы печи обычно составляет 2-4 года.

6.1.3 Производство чугуна

Производство чугуна, или доменное производство, представляет собой восстановительную плавку железных руд или окускованных железорудных материалов (агломерат, окатыши) в доменных печах. Чугун – сплав железа с углеродом (обычно более 2%) является первичным продуктом при производстве черных металлов.

Доменная печь – это вертикальная (шахтная) печь круглого сечения (рис.6.7), работающая в режиме *плотного фильтрующего слоя*. Исходные сыпучие материалы (шихта – агломерат, окатыши, кокс, руда, флюсы) загружаются скипами сверху (рис. 6.8) через засыпной аппарат, включающий приемную воронку, распределитель шихты, малый и большой конусы. Шихта загружается на *колошник* (рис. 6.7, 1) – верхнюю цилиндрическую часть печи. Футеровка колошника защищена изнутри от ударного и истирающего воздействия шихты металлическими плитами. Затем шихта опускается постепенно в расширяющуюся книзу часть печи, которая называется *шахта* (рис. 6.7, 2); толщина футеровки из шамота увеличивается сверху вниз от 900-1000 мм до 1300-1500 мм. Ниже шахты располагается цилиндрическая часть печи – *распар* (рис. 6.7, 3). Ещё ниже идет коническая часть печи – *заплечики*, затем нижняя цилиндрическая часть – *горн* (рис. 6.7, 4,7). В верхней части горна по окружности располагаются воздушные фурмы (рис. 6.7, 8), через которые вдувают горячий воздух (дутье), а

также заменители дорогостоящего кокса – природный газ, мазут, пылеугольное топливо (ПУТ). В нижней части горна скапливаются жидкие продукты – чугун и шлак, для выпуска которых имеются чугунные и шлаковые летки (рис. 6.7, 5, 6).



1 – колошник; 2 – шахта; 3 – распар; 4 – заплечики; 5 – шлаковые летки; 6 – чугунные летки; 7 – горн; 8 – воздушные фурмы.

Рисунок 6.7 – Доменная печь (разрез)

В современных доменных печах, как правило, применяют следующие виды футеровок:

- лещадь и горн – графитированные блоки, полуграфитовые блоки, микропористые улеродистые блоки (крупноблочная футеровка), алюмокарборундовый кирпич (керамический стакан);

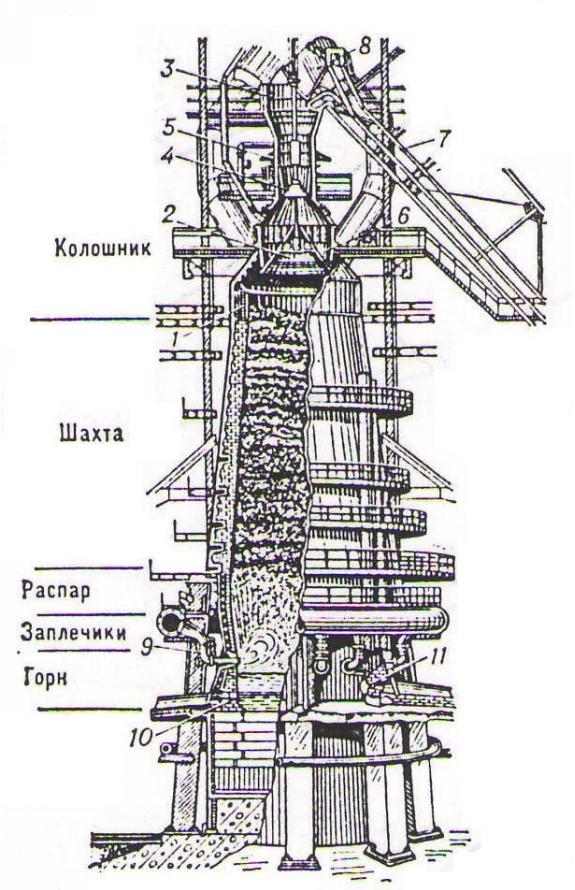
- фурменная зона – алюмокарборундовый кирпич или микропористый алюмоуглеродистый кирпич на нитридной связке;

- зона заплечиков, распар – карбидкремниевый кирпич на нитридной связке;

- шахта печи:

  - охлаждаемая часть – холодильные плиты, алюмоуглеродистый кирпич;
  - неохлаждаемая часть – плотный шамотный кирпич;

- огнеупорные массы, используемые для закачки между кожухом и плитовыми холодильниками, должны обеспечивать плотность и ограничивать проникновение газов.



1 – защитные сегменты колошника; 2 – большой конус; 3 – приёмная воронка; 4 – малый конус; 5 – распределитель шихты; 6 – воронка

большого конуса; 7 – наклонный мост; 8 – скип; 9 – воздушная фурма; 10 – чугунная лётка; 11 – шлаковая лётка.

Рисунок 6.8 – Доменная печь (общий вид)

Фундамент печи изготавливается из огнеупорных блоков. Непосредственно на фундаменте располагаются лещадь, горн, заплечики и распар, а также колонны, на которых монтируется *мораторное* (опорное) кольцо как опора для шахты и конструкций верхней части печи.

Футеровка печи заключена в кожух (стальная броня толщиной 25 - 40 мм), который обеспечивает прочность и жесткость всей конструкции, а также герметичность (газоплотность). Доменная печь – это объект повышенного давления (0,3÷0,5 МПа), поэтому герметичность печи – одно из условий нормальной работы. Для обеспечения прочности между кожухом и футеровкой устанавливаются *холодильники на водяном испарительном охлаждении*. Некоторые элементы печи с интенсивным теплоотводом (фурмы, шлаковые летки) работают на водяном охлаждении.

Основной характеристикой доменной печи является полезный объем (V, $м^3$). Основные параметры доменных печей разного объема приведены в таблице 6.3.

Таблица 6.3 – Основные параметры доменных печей

Параметр	Полезный объем, $м^3$				
	1000	1500	2000	3000	5000
Полезная высота печи, м	25,5	27,8	29,4	31,2	32,2
Высота шахты, м	14,5	16,3	18,2	18,7	19,5
Высота горна, м	2,9	3,2	3,6	3,9	4,5
Диаметр горна, м	7,2	8,6	9,7	11,6	14,9
Число фурм	14	18	20	28	36

Основные химические процессы в доменной печи – горение топлива и восстановление Fe, Si, Mn и других элементов. Часть

кокса расходуется на процессы восстановления, но основная масса кокса опускается в горн и сгорает вместе с вдуваемым топливом у фурм. Образующиеся при этом *фурменные газы* с температурой 1800-2200 °С содержащие 35-45% CO, 1-12% H_2 и 45-65% N_2 поднимаются по печи, нагревают опускающуюся шихту, при этом CO и H_2 частично окисляются до CO_2 и H_2O. Колошниковые газы, выходящие из печи, имеют температуру 150-300°С.

У фурм возникают очаги горения, (окислительные зоны), в которых вихревое движение газов приводит к циркуляции кусков кокса. В упрощенном виде процесс горения углерода твердого топлива у фурм сводится к экзотермической реакции

$$2C + O_2 = 2CO. \qquad (6.6)$$

При сжигании вдуваемых природного газа или мазута поглощается часть тепла, выделяемого при сжигании углерода, и понижается температура горения у фурм. Во избежание снижения температуры применяют обогащение воздуха кислородом.

Восстановление поступающих в печь оксидов железа Fe_2O_3 и Fe_3O_4 происходит по реакциям:

$$3Fe_2O_3 + CO(H_2) = 2Fe_3O_4 + CO_2(H_2O); \qquad (6.7)$$

$$Fe_3O_4 + CO(H_2) = 3FeO + CO_2(H_2O). \qquad (6.8)$$

Затем оксид FeO восстанавливается или газами (косвенное восстановление)

$$FeO + CO(H_2) = Fe + CO_2(H_2O), \qquad (6.9)$$

или углеродом (прямое восстановление)

$$FeO + C = Fe + CO. \quad (6.10)$$

Реакция прямого восстановления железа составляет $\sim 30 - 40\%$ и проходит в нижней высокотемпературной зоне печи. В доменном процессе происходит также восстановление Mn и Si.

Одним из важнейших химических процессов является удаление серы S:

$$FeS + CaO = CaS + FeO. \quad (6.11)$$

Науглероживание железа $Fe \rightarrow FeC$ идет как в твердом, так и в жидком состоянии.

Шлак в доменном процессе состоит из невосстановившихся оксидов SiO_2, Al_2O_3, CaO $(\approx 90 - 95\%)$, MgO $(2 - 10\%)$, FeO $(0{,}1 - 0{,}4\%)$, MnO $(0{,}3 - 3\%)$, а также $1{,}5 - 2{,}5\%S$ (главным образом в виде CaS). Для характеристики шлаков пользуются обычно показателем *основности* (CaO/SiO_2), которая колеблется в пределах $0,95 - 1{,}35$ в зависимости от содержания S в коксе.

Работа доменной печи (рис. 6.9). Сырые шихтовые материалы подают к загрузочному устройству печи в *скипах* по скиповому подъемнику. Шихта заполняет весь полезный объем печи, и по мере опускания нагревается и участвует в химических реакциях восстановления. Дутье, подаваемое через фурмы, предварительно подогревается в *воздухонагревателях* (ВН), в которые воздух под давлением $0{,}5 - 0{,}6$ МПа подается турбовоздуходувками, расположенными на ТЭЦ ПВС (паровоздуходувная станция и теплоэлектроцентраль – специальное подразделение металлургического предприятия).

Дутье через фурмы поступает в *фурменную зону*, которая представляет собой полость и в которой происходит интенсивное горение кокса, а также природного газа, мазута, пылеугольного топлива и других заменителей дорогостоящего кокса. В результате горения образуются *горновые газы* – продукты

неполного горения – восстановительные газы, которые поднимаются вверх по шахте и участвуют в химических реакциях процесса и нагреве шихты.

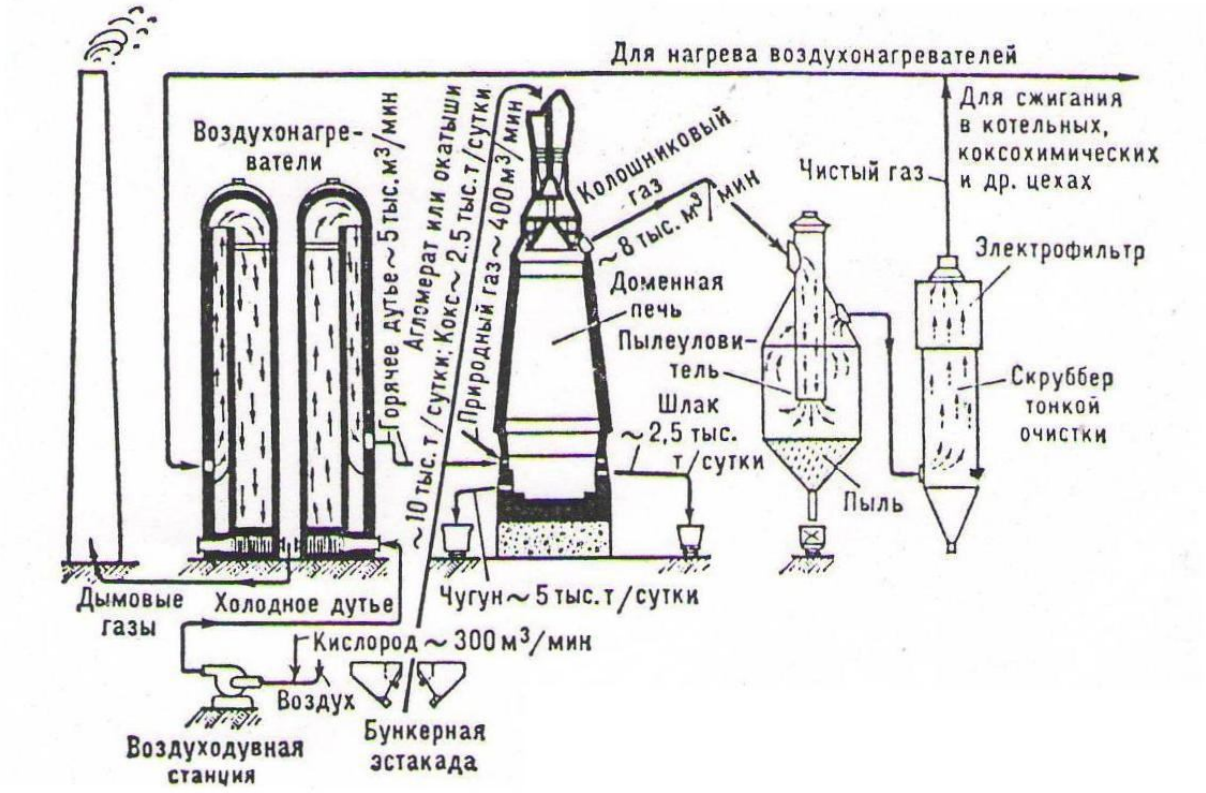


Рисунок 6.9 – Работа доменной печи

Из печи выходят *колошниковые газы*, которые имеют высокое содержание пыли ($10 \div 20$ г/м^3) и поступают в систему газоочистки. Колошниковый газ после очистки называют *доменным газом* – это низкокалорийное топливо с теплотой сгорания $Q_н^р = 3{,}7 \div 4{,}5$ МДж/м^3 и химическим составом(%):

$$CO = 20 - 26, \quad CO_2 = 13 - 20, \quad H_2 = 2 - 8,$$

$$CH_4 = 0{,}1, \qquad N_2 = 54 - 56, \qquad H_2O = 3 - 4.$$

Доменный газ используется в воздухонагревателях доменных печей, в коксохимическом производстве, в котлах ТЭЦ ПВС, а также как составляющая смешанных газов для нагревательных и др. металлургических печей.

Основным показателем производительности доменных печей является величина, которая традиционно применяется в отечественной металлургии – «КИПО» (коэффициент использования полезного объема печи), который является отношением полезного объема к суточной выплавке чугуна в тоннах:

$$\text{КИПО} = \frac{\text{V}_{\text{пол}}}{\text{P}_{\text{суточн}}}. \qquad (6.12)$$

Например, суточное производство чугуна на печи $\text{V}_{\text{пол}} = 3000$ м^3 составит $\text{P}_{\text{суточн}} = 5000$ т, следовательно

$$\text{КИПО} = \frac{3000}{5000} = 0{,}6.$$

На современных печах КИПО составляет величину от 0,4 до 0,7 в зависимости от технологии и применяемого сырья. В последнее время чаще используется величина, обратная КИПО, представляющая удельную производительность или съем с печи $\text{P}_{\text{уд}}$, которая составляет величину от 1,4 до 2,5 т/(м^{3}сутки).

Особенности *теплообменных* и *газодинамических процессов* в доменной печи состоят в том, что они происходят в условиях неопределенных или очень приблизительно определяемых размеров кускового материала, объема фурменных зон и т.д. Практическое отсутствие изучающих трехатомных газов (CO_2 и H_2O) в горновых газах делают преобладающим теплообменном между газами и материалами шихты и продуктов плавки *конвективный*. Значительно интенсифицируется теплообмен *излучением* при использовании пылеугольного топлива (ПУТ),

подаваемого как заменитель кокса вместе с дутьем. В фурменной зоне ПУТ сгорает в потоке высокотурбулизированных газов, в результате образуются газообразные продукты сгорания и частички расплавленной золы. В этом случае фурменная зона представляет собой сильно запыленный объем с высокой степенью черноты (т.е. излучательной способностью). Исследование*) показало, что степень черноты объема фурменной зоны может достигать максимального значения, т.е. единицы, а степень черноты системы в формуле Стефана-Больцмана для определения теплового потока излучением

$$Q = \varepsilon_{сист} \cdot \sigma_0 \left(T_ф^4 - T_n^4\right) \cdot F_ф, \text{Вт.} \qquad (6.13)$$

$\varepsilon_{сист}$ составляет 0,3-0,4. При этом нагрев продуктов плавки (чугуна и шлака) только за счет излучения в фурменной зоне составляет 200-300ºС. Это, в свою очередь, способствует снижению температуры горновых газов, уходящих из фурменной зоны, снижению температуры колошниковых газов.

(В формуле (6.13) $T_ф$ – температура в фурменной зоне, К; T_n – температура внутренней, тепловоспринимающей поверхности фурменной зоны, К; $F_ф$ – суммарная внутренняя поверхность фурменных зон, $м^2$; σ_0 – коэффициент излучения абсолютно-черного тела, $Вт/(м^2 \cdot К^4)$).

Интенсивность теплообмена между газами и материалами по высоте печи существенно различается. На рисунке 6.10 показано изменение температур газа $t_г$ (кривая 1) и материала $t_м$ (кривая 2) по высоте печи. Верхняя зона I – интенсивный теплообмен при соотношении водяных эквивалентов газа и материала $W_г > W_м$ и большой начальной разнице $t''_г - t'_м$; температура материала $t'_м$ равна температуре загружаемой в печь

*) Исследования выполнены автором Ю.Л.Курбатовым и аспирантом И.В.Мишиным под руководством д.т.н.С.Л.Ярошевского [52-55].

шихты, т.е. фактически температуре атмосферного воздуха; температура газов $t_г'' = 150 - 500\,℃$ равна температуре колошниковых газов, отводимых от печи. Средняя зона II – низкая интенсивность теплообмена при соотношении $W_г \cong W_м$ и при практическом отсутствии перепада температур, т.е. $t_г \cong t_м$. Нижняя зона III – интенсивный теплообмен при соотношении $W_г < W_м$ и большой конечной разности температур газа и материала $t_г' - t_м''$; температура газа $t_г'$ равна температуре горения газов в фурменной зоне, $t_г' = 2000 - 2200\,℃$; температура материала равна конечной температуре продуктов плавки, $t_м'' = 1450 - 1500\,℃$.

Основные расчетные уравнения, связанные с теплотехникой доменной печи, в общем виде имеют следующий вид [11,12]:

- температура материала

$$t_м = t_г'\left(1 - \exp\left(\frac{\alpha_v}{c_м \cdot \rho_м}\left(1 - \frac{W_м}{W_г}\right)\frac{\tau}{1 + \frac{1}{5 \cdot Bi}}\right)\right), ℃; \quad (6.14)$$

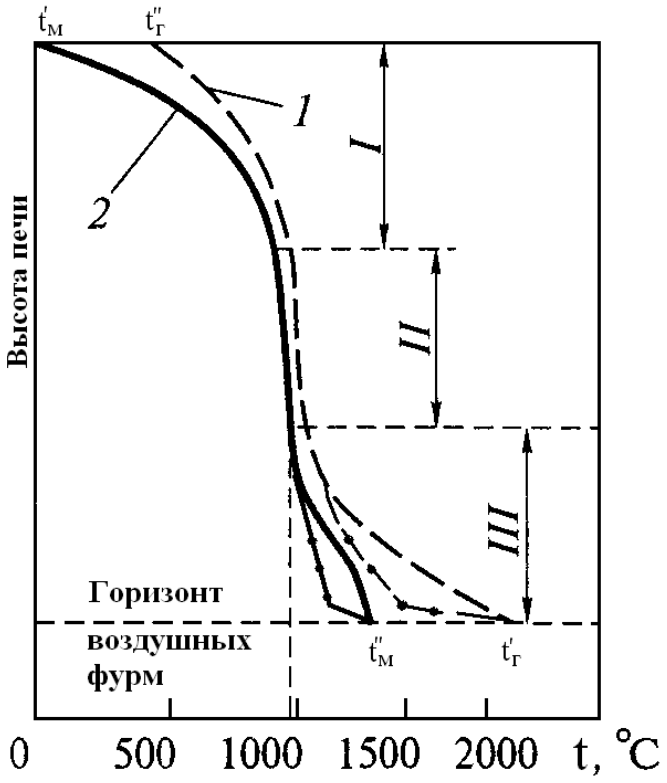


Рисунок 6.10 – Изменение температуры газа и материала

- время пребывания материалов в печи

$$\tau = \frac{H}{p}, ч \qquad (6.15)$$

- объемный коэффициент теплоотдачи (формула Furnas-Китаева)

$$\alpha_v = A \cdot \frac{w_г^{0,9} \cdot T^{0,3}}{d^{0,75}} \cdot 10^{1,68 \cdot f - 3,56 \cdot f^2}. \qquad (6.16)$$

- критерий Био

$$Bi = \frac{\alpha_v \cdot d}{\lambda}. \qquad (6.17)$$

В формулах (6.14-6.17):

α_v −объемный коэффициент теплоотдачи в слое кусковых материалов, $Вт/(м^3 \cdot К)$; связь между объемным α_v и поверхностным α_F коэффициентами определяется формулой

$$\alpha_F = \alpha_v \cdot \frac{V}{F}, \qquad (6.18)$$

где отношение полного объема кусковых материалов V (известная величина) к поверхности кусковых материалов F (относительно неопределенная величина) рассчитывается из выражения

$$\frac{V}{F} = \frac{d}{7,5 \cdot (1 - f)}; \qquad (6.19)$$

d − усредненный размер кускового материала, м;

$f-$ порозность слоя кусковых материалов, равное отношению объема пор к полному объему; для условий доменной печи $f = 0{,}45 \div 0{,}50$;

$T-$ температура газов, К;

$w_г-$ скорость газов, приведенная к действительным физическим условиям и полному поперечному сечению, $м/с$;

$A-$ коэффициент формы кусков, для условий доменной печи $A = 180 \div 200$;

$H-$ высота печи, м;

$p-$ удельный объемный расход материалов, $м^3/(м^2 \cdot ч)$, представляющий отношение объемного расхода, $м^3/ч$, к площади поперечного сечения печи, $м^2$.

Газодинамика печи. Столб кусковых шихтовых материалов высотой 25-32 м представляет собой высокое газодинамическое сопротивление. При одинаковом массовом расходе газов это сопротивление обратно пропорционально начальному давлению газов [44]. Располагаемый перепад давлений для компенсации этого сопротивления равен разнице давлений газов в фурменной зоне и на колошнике. За последние несколько десятилетий все доменные печи переведены на работу с повышенным давлением на колошнике. Это позволило увеличить расход дутья, а следовательно и производительность печи.

Газодинамические потери в доменной печи определяют по формуле [11,12]:

$$\Delta p = k_{сл} \cdot \frac{w^2 \cdot \rho}{2} \cdot \frac{1}{f^2}, \qquad (6.20)$$

где $k_{сл}-$ коэффициент сопротивления слоя, который равен

$$k_{сл} = 4 \cdot \xi \cdot \frac{H}{d}; \qquad (6.21)$$

w, ρ – скорость газов, отнесенная к полному сечению печи, и плотность при ДФУ;

$\xi = 1{,}56 \cdot Re^{0{,}15}$ – коэффициент сопротивления на единицу соотношения H/d;

Re – число Рейнольдса для газов при средней температуре,

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu}; \qquad (6.22)$$

ν – коэффициент кинематической вязкости газов, $м^2/с$.

Минимизация газодинамических потерь достигается путем рациональной послойной загрузки шихты, при которой используется высокая газопроницаемости кокса.

Доменная печь – это теплотехнически совершенный аппарат, работающий по идеальной схеме *противотока*. Современная доменная печь – это крупный агрегат энерготехнологического комбинирования, продуктами которого являются:

- *чугун*, как первичный продукт черной металлургии;
- *шлак*, используемый в строительстве;
- *вторичные энергоресурсы*, в т.ч.
    - ♦ *доменный газ*, как широко используемое топливо;
    - ♦ *водяной пар* испарительного охлаждения, как теплоноситель в системах теплоснабжения;
    - ♦ *избыточное давление доменного газа,* как энергия для газовых турбин. Схема комплексного использования ВЭР доменной печи приведена на рисунке 6.11.

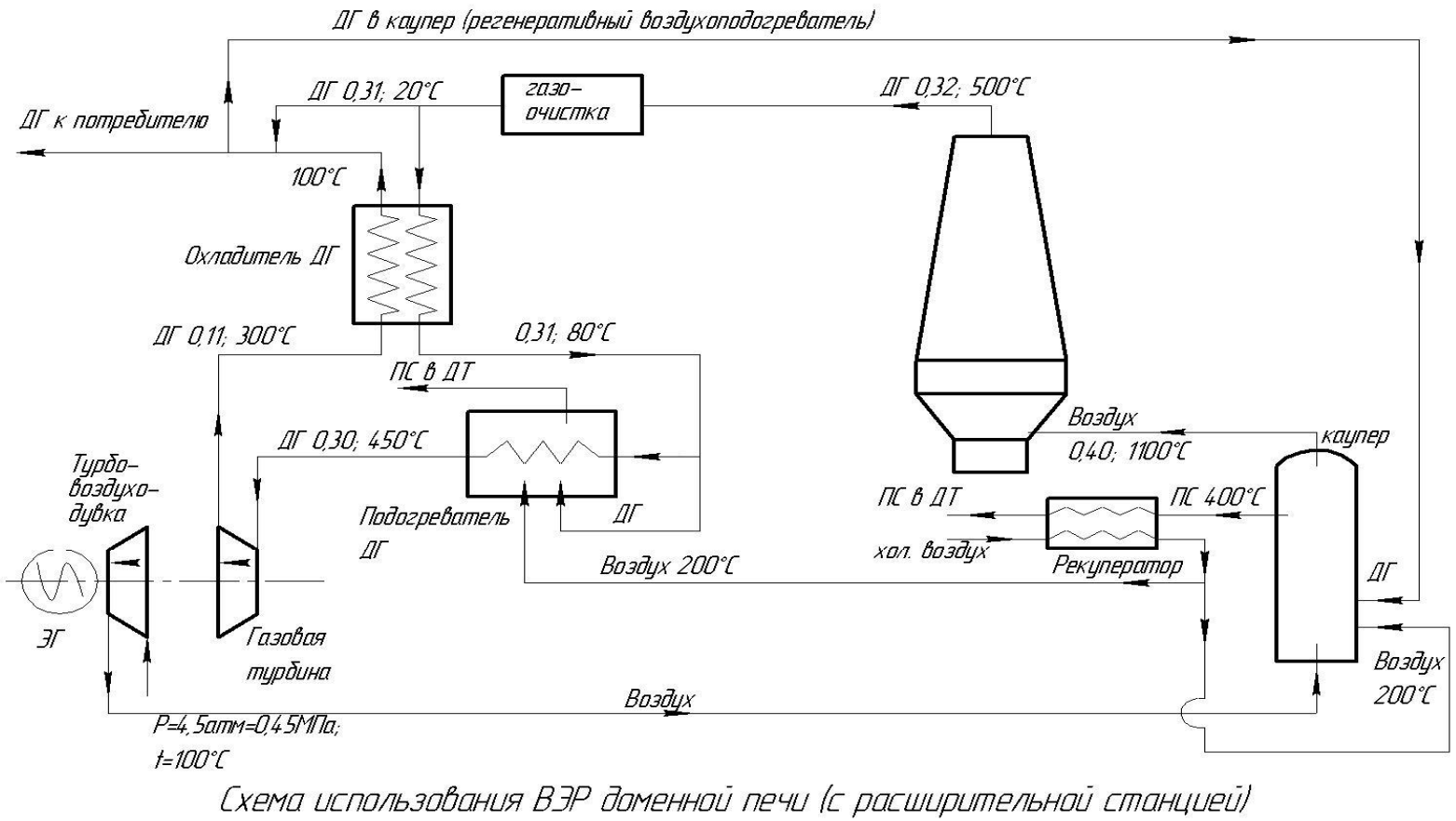


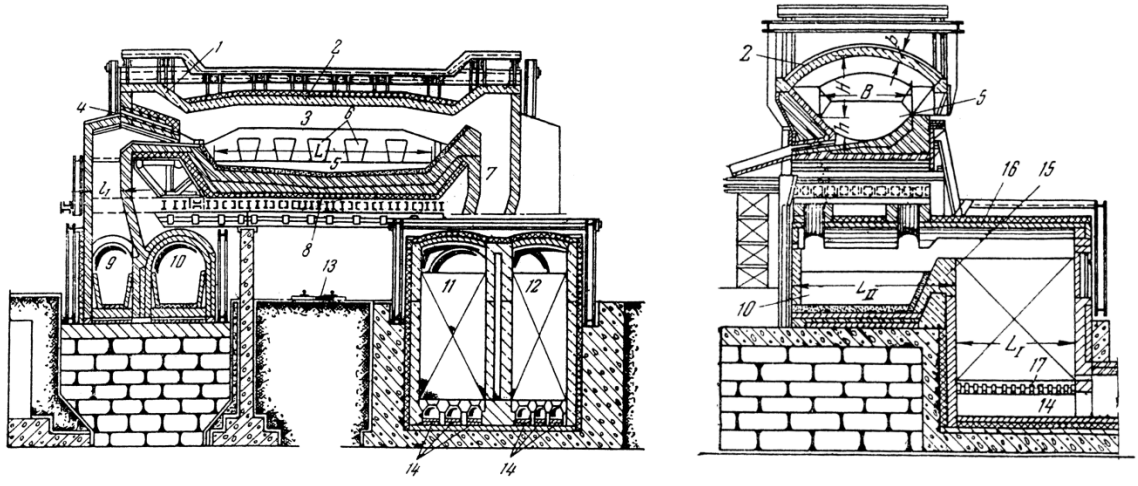
Схема использования ВЭР доменной печи (с расширительной станцией)

Рисунок 6.11 – Схема использования ВЭР доменной печи

6.1.4 Сталеплавильное производство

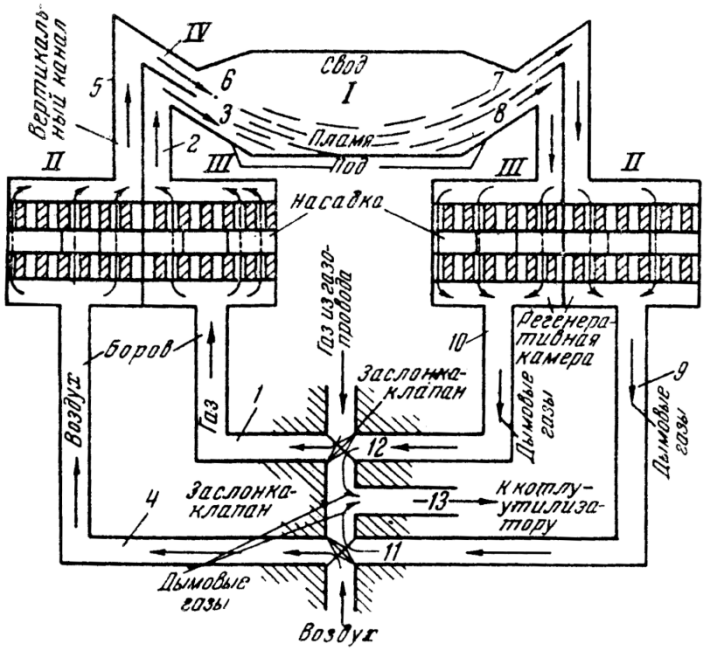
Мартеновские печи – это плавильные печи периодического действия с реверсированием факела. На рисунках 6.12 и 6.13 показана печь, работающая с подогревом воздуха и коксо-доменной смеси газов – это наиболее сложный вариант отопления мартеновских печей, т.к. при использовании топлива с высокой теплотой сгорания подогрев горючего газа в регенераторах нецелесообразен. Рабочая камера печи, которая традиционно называется *рабочее пространство* состоит из ванны, боковых стен, главного свода, левой и правой головок (горелок). На передней стенке расположены завалочные окна, которые закрываются подъемными крышками (заслонками) и через которые производится загрузка шихтовых материалов. Все размеры печи привязаны к *порогам завалочных окон:* глубина ванны «h», длинна ванны «L», ширина ванны «B», высота главного свода «H». Главными параметрами мартеновских печей является *садка* (масса стали на выпуске из печи), а также *площадь пода* на уровне порогов завалочных окон. Все элементы рабочего пространства имеют огнеупорную футеровку (магнезит, хромомагнезит и др.), соответствующую температурному уровню печи (температура стали на выпуске $1600 - 1620$ ℃) и физико-химическим свойствам шлака. В задней части ванны имеется сталевыпускное отверстие с желобами. Схема работы печи приведена на рисунке 6.13. Топливо и воздух в *реверсивном режиме*, т.е. поочередно подается через левую и правую головки. Переключение головок производится автоматически в зависимости от температурного состояния *регенераторов* в среднем через 5-15 мин. *перекидными устройствами (клапанами)*. На рисунке 6.13 показано направление потоков при движении слева-направо. Холодный воздух от вентилятора и газовое топливо от источника газоснабжения перекидными клапанами направляются через левые регенераторы, нагреваются

и через левую головку поступают в рабочее пространство, где происходит диффузионное сжигание топлива в виде факела, направленного на ванну, а выделенное тепло излучением передается от факела к ванне, стенам и своду печи. Продукты сгорания удаляются через правую головку, *по вертикальным каналам* опускаются в *шлаковики*, где осаждаются частички плавильной пыли (рис. 6.12). Затем продукты сгорания переходят в *регенераторы*, нагревают кирпичную насадку, и по *дымовым боровам* (рис. 6.14) через перекидные клапаны направляются в котлы-утилизаторы. После перекидки клапанов происходит *реверсирование* потоков, воздух и газ поступают в правые регенераторы, правую головку, удаляются через левую головку, нагревают насадки левых регенераторов, и т.д.



1 – свод головки; 2 – главный свод; 3 – рабочее пространство; 4 – кессон (водоохлаждаемая металлическая конструкция, поддерживающая кладку газового сопла; 5 – ванна; 6 – завалочные окна; 7 – вертикальный воздушный канал; 8 – подина; 9 – газовый шлаковик (пылеуловитель); 10 – воздушный шлаковик; 11 – воздушный регенератор; 12 – газовый регенератор; 13 – путь для шлаковых ковшей; 14 – поднасадочные каналы; 15 – перевальная стенка; 16 – свод регенератора; 17 – поднасадочные арки.

Рисунок 6.12 – Мартеновская сталеплавильная печь, работающая на смешанном коксодоменном газе

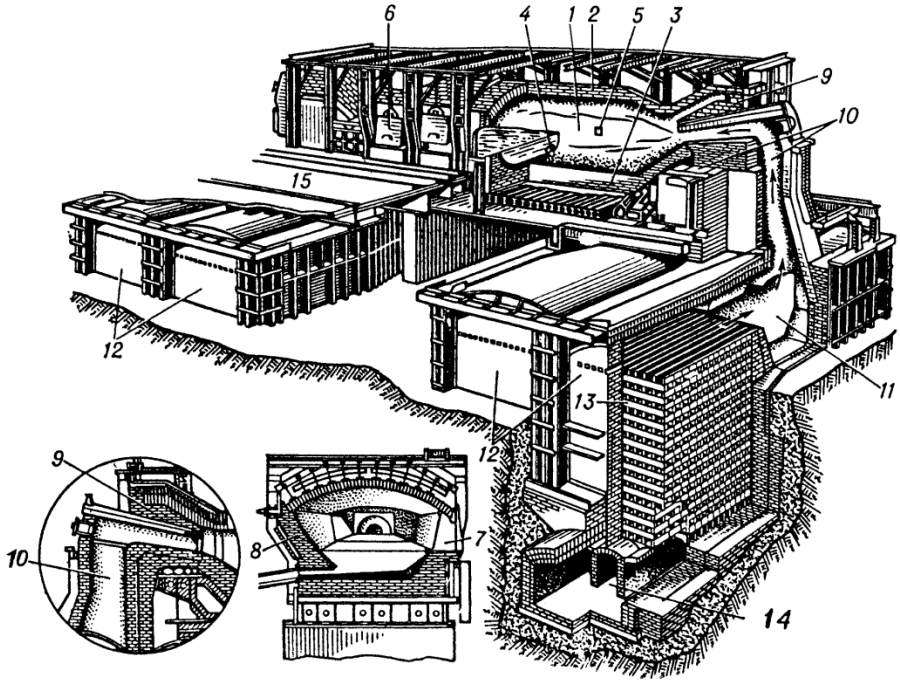


I – плавильное пространство; *II* – воздушные регенераторы (одна пара); *III* – газовые регенераторы (одна пара); *IV* – головка печи (2 шт.); 1 – подача холодного газа в регенератор для подогрева; 2 – подача горячего газа из регенератора в головку печи; 3 – выход газа в плавильное пространство; 4 – подача холодного воздуха в регенератор; 5 – подача горячего воздуха в головку; 6 – выход горячего воздуха в плавильное пространство; 7 – отвод раскаленных дымовых газов в воздушный регенератор; 8 – отвод раскаленных дымовых газов в газовый регенератор; 9 – отвод дымовых газов, остывших в воздушном регенераторе; 10 – отвод дымовых газов, остывших в газовом регенераторе; 11 и 12 – перекидные устройства (для переключения направления газов); 13 – отвод дымовых газов к котлу-утилизатору.

Рисунок 6.13 – Схема мартеновской печи сталеплавильной печи, работающей на смешанном коксодоменном газе

Технология мартеновской плавки заключается в получении стали из передельного чугуна. Т.к. содержание углерода в чугуне ~4%, а в стали от 0,1 до 1, мартеновский процесс является окислительным, в котором происходит *выгорание углерода* и других примесей для получения в конечном счете стали заданного состава. Различают скрап-процесс, когда чугун загружается в печь в твердом виде, и скрап-рудный-процесс, когда чугун подается в жидком, расплавленном виде (на

металлургическом предприятии с полным циклом). Шихтой при скрап-рудном процессе является: металлическая часть (жидкий чугун, железный лом, ферросплавы); твердые окислители (железная руда, агломерат, окалина); шлакообразующие (известь, известняк, полевой шпат, бокситы).



1 – рабочее пространство; 2 – свод; 3 – подина; 4 – сталевыпускное отверстие; 5 – отверстие для отпуска шлака; 6 – завалочные окна; 7 – передняя стенка; 8 – задняя стенка; 9 – головки; 10 – вертикальные каналы; 11- шлаковик; 12 – регенераторы; 13 – насадка регенераторов; 14 – борова; 15 – рабочая площадка.

Рисунок 6.14 – Устройство мартеновской печи

Цикл мартеновского процесса состоит из периодов: заправка (восстановление шлакового пояса, мелкий ремонт подины); завалка твердой шихты; прогрев; заливка (слив чугуна через специальный временно устанавливаемый в завалочном окне желоб); плавление (полное расплавление, выгорание основной массы углерода, образование шлака необходимого состава), доводка (доведение стали до нужного содержания углерода и других компонентов); выпуск (готовая сталь и шлак через сталевыпускное отверстие сливаются в сталерозливочный ковш;

во время выпуска начинается заправка подины под очередную плавку). При использовании *печь-ковша* выпуск полупродукта производится после расплавления, а доведение стали до нужного состава и температуры происходит в агрегате *печь-ковш*.

Мартеновская печь – это сложный теплотехнический агрегат, в котором представлены все элементы теплотехники. Особенностью сжигания топлива в мартеновской печи является необходимость получения продуктов сгорания с высокой излучательной способностью, т.е. высокой степени черноты. Т.к. газообразные продукты сгорания, в которых излучение определяется только наличием трехатомных газов CO_2 и H_2O, могут иметь степень черноты не более 0,3, то для интенсификации теплоотдачи от факела применяют различные способы карбюризации, т.е. насыщения частицами сажистого углерода, что позволяет повысить степень черноты практически до $\varepsilon \approx 1{,}0$. Для карбюризации чаще всего применяют добавку мазута к газообразному топливу. Более сложными приемами *карбюризации* являются *реформирование* газообразного топлива в реформаторах, в которых происходит частичное сжигание природного газа с недостатком воздуха ($\alpha < 1{,}0$) и образования сажистых частиц, а также *самокарбюрация* путем сжигания части природного газа в вертикальных каналах с $\alpha < 1{,}0$. Сжигание топлива должно быть диффузионным, таким, чтобы зона горения (факел) – была растянута на всю длину рабочего пространства. Факел должен быть жестким (высокоскоростным), настильным, газодинамически воздействующим на теплоизолирующий слой шлака. *Тепловая мощность печи*, т.е. количество тепла выделяемого при сжигании топлива за единицу времени, принимает максимальное значение в *завалку* и *прогрев*, и минимальное – в *плавление*, когда происходит генерация тепла за счет выгорания углерода; в некоторых случаях (при продувке ванны кислородом) возможно полное отключение топлива при сохранении максимального расхода воздуха. Большое значение

для работы мартеновской печи имеет *газодинамический режим*, т.к. продукты горения содержат большое количество плавильной пыли, т.е. частиц шлака и металла в расплавленном состоянии. Наиболее крупная пыль осаждается в шлаковиках при повороте потока на 90° в регенератор, остальная масса пыли забивает верхние ряды насадок регенераторов, при этом возрастает газодинамическое сопротивление. Засорение насадок уменьшают путем периодической чистки (промывка, продувка). Мониторинг засорения проводят путем измерения разности давлений до и после насадок, т.е. газодинамического сопротивления регенераторов. Когда сопротивление достигает критического значения, печь останавливают на ремонт. Особенностью мартеновских печей является также большой *износ огнеупорной футеровки* как следствие действия высоких температур (температура факела $1850 - 1950℃$) и механического и физико-химического воздействия шихты в период завалки, а также стали и шлака в периоды плавления и доводки. Некоторые элементы печи для поддержания механической прочности находятся на *испарительном и водяном охлаждении*. Наиболее тяжелые условия службы – у главного свода, т.к. он находится под действием самых высоких температур и брызг шлака и металла. Через главный свод, толщина которого от ремонта до ремонта уменьшается с 520 до 100-150 мм, наблюдается наибольшие тепловые потери теплопроводностью и излучением в окружающую среду. Поддержание работоспособности мартеновских печей производится путем проведения *горячих и холодных ремонтов*. На горячих ремонтах (без полного охлаждения печи) производится удаление шлака из шлаковиков, малые ремонты вертикальных каналов, верхних рядов насадки и др. На холодных ремонтах (с полным охлаждением печи) производится замена главного свода, на больших холодных ремонтах – ремонт подины, на капитальных – полная замена

кладки, металлических конструкций с внедрением инновационных разработок.

Мартеновская печь является источником большого количества ВЭР прежде всего в виде тепла отходящих газов, температура которых в разные периоды плавки находится в пределах $1400-1700℃$. Первичное использование ВЭР происходит в регенераторах для подогрева компонентов горения (всегда воздуха до температуры $1000-1200℃$, иногда – газа до температуры $800-900℃$). После регенераторов температура отходящих газов составляет $600-800℃$, поэтому целесообразно вторичное использование ВЭР в котлах-утилизаторах (КУ). После КУ отходящие газы с температурой $150-200℃$ проходят очистку от пыли в электрофильтрах и дымососом отводятся через дымовую трубу в атмосферу.

Для оценки работы мартеновских печей применяют относительные показатели:

- для производительности – напряженность пода, которая традиционно для мартеновских печей определяются как «съем стали с $1\,м^2$ пода в сутки» и имеет единицу измерения $т/(м^2 \cdot сутки)$. Эта величина составляет от 40 до 120;

- для затрат топлива – удельный расход условного топлива, $кг.усл.т-ва/т$. Эта величина составляет от 50 до 150.

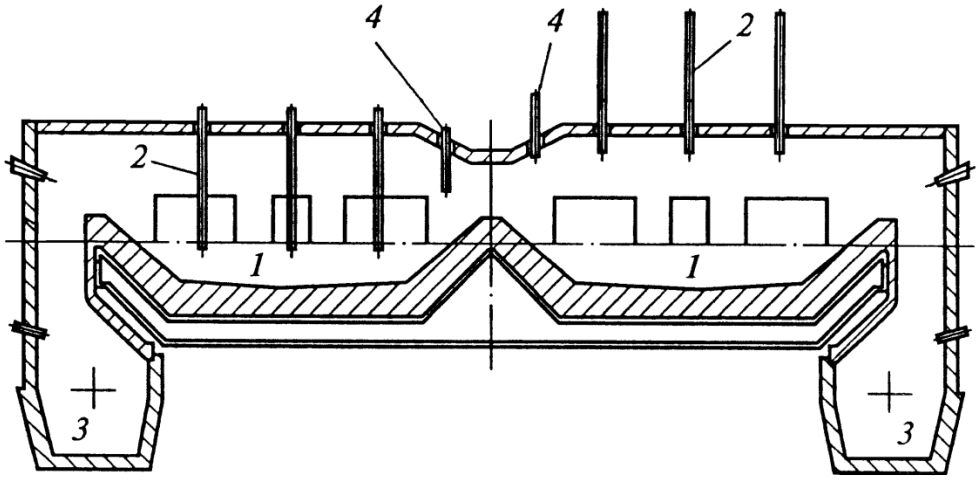
Общей энергетической оценкой является термический КПД, который составляет 20-25% для печи. С учетом использования ВЭР в котлах-утилизаторах и в системах испарительного охлаждения полезное использование топлива может доходить до 40-50%. Показатели работы мартеновских печей значительно улучшаются *интенсификацией горения* путем подачи высокопотенциальных энергоносителей в факел (кислород, сжатый воздух, природный газ высокого давления), а также путем вдувания кислорода в жидкую ванну. При экономической оценке учитывается также большие расходы огнеупоров на 1 тонну стали, расходы на ремонты, длительность *кампании печи*

(это количество плавок выпущенных на печи между двумя ремонтами со сменой главного свода; эта величина составляет 100-300 плавок).

Экономическая оценка работы мартеновских печей показывает на их низкую конкурентоспособность с другими способами производства стали (конверторным, электросталеплавильным). Поэтому мартеновские печи в последние годы выводятся из эксплуатации в отечественной черной металлургии.

Двухванные печи (рис. 6.15) созданы как результат реконструкции мартеновских печей. При интенсивной продувке мартеновской ванны кислородом выделяется значительное количество оксида углерода CO, полностью сжечь который в пределах рабочего пространства не представляется возможным. Часть несгоревшего CO и большее количество плавильной пыли выносятся из рабочего пространства. Для лучшего использования CO и частичного улавливания пыли в самом рабочем пространстве оно разделяется перевалом на две ванны. Обе ванны имеют общий свод с пережимом. В своде располагаются фурмы для продувки ванны кислородом и газокислородные горелки. В пережиме свода установлены эжекторы. Печь не имеет регенераторов. В каждой ванне на передней стенке имеются стационарные желоба для заливки чугуна и завалочные окна с заслонками. Для изменения направления движения газов имеются перекидные шиберы. Печь работает следующим образом. В одной ванне (*горячей*) происходит плавление и доводка с интенсивной продувкой металла кислородом (на рис. 6.15 – левая ванна), а во второй ванне (*холодной*) в то же время идет завалка и прогрев твердой шихты. Газы, содержащие до 35% CO, из горячей части печи переходят в холодную. В холодной части печи CO догорает до CO_2, и за счет выделяющегося тепла происходит нагрев твердой шихты. Недостающее тепло восполняется подачей природного газа через газокислородные

горелки. Когда готовую сталь из первой ванны выпускают, во вторую ванну, в которой твердая шихта достаточно прогрелась, заливают жидкий чугун. После заливки сразу начинается продувка ванны кислородом. С выпуском металла из первой ванны цикл плавки заканчивается и начинается новый. В это же время изменяется направление движения газов с помощью перекидных шиберов. Теперь бывшая холодная ванна становится горячей. Первую ванну заправляют, производят завалку твердой шихты, и цикл повторяется.



1 – ванны печи; 2 – фурмы; 3 – шлаковики; 4 – эжекторы.

Рисунок 6.15 – Двухванная печь 2х250 т

Двухванная печь должна работать таким образом, чтобы было равенство холодного и горячего периодов, протекающих одновременно в разных ваннах. В холодный период входит выпуск, заправка, завалка, прогрев и заливка чугуна; в горячий период – плавление и доводка. Например, для печи с садкой каждой ванны 250 т общая продолжительность плавки составляет 4ч, каждый период длится 2ч, металл выпускается также через каждые 2ч. Раскисление стали производится в ковше.

Газы, покидающие горячую ванну, имеют температуру $\sim 1700^{\circ}C$, переходят в холодную ванну, которая частично выполняет роль регенераторов, аккумулируя тепло газов. Дымовые газы, покидающие рабочее пространство с

температурой до 1500℃, поступает по вертикальному каналу в шлаковик, в котором охлаждаются водой до 1000℃, а затем направляются по дымовому борову на очистку и утилизацию.

Распространение двухванных печей определилось их преимуществами перед мартеновскими печами: малым удельным расходом огнеупоров (4-5 кг на 1 т вместо 12-15 кг), меньшим объемом ремонтов, в 3-5 раз меньшим расходом топлива, более высокой стойкостью главного свода, достигающей 800-1000 плавок, в 3-4 раза большей производительностью. Двухванные печи устанавливают на месте мартеновских без реконструкции здания и изменения грузопотоков. Качество стали широкого сортамента не уступают выплавляемым в мартеновских печах. К недостаткам относятся, меньший выход годной стали, повышенный расход жидкого чугуна, выбивание большего количества технологических газов через завалочные окна в цех.

Двухванные печи имеют много эксплуатационных и сантехнических недостатков. В связи с этим и, несмотря на то, что они имеют высокую производительность, двухванные печи следует рассматривать как временную конструкцию, соответствующую сложному (в техническом и экономическом отношении) периоду полного перехода отечественной металлургии с мартеновского на конверторный способ производства стали.

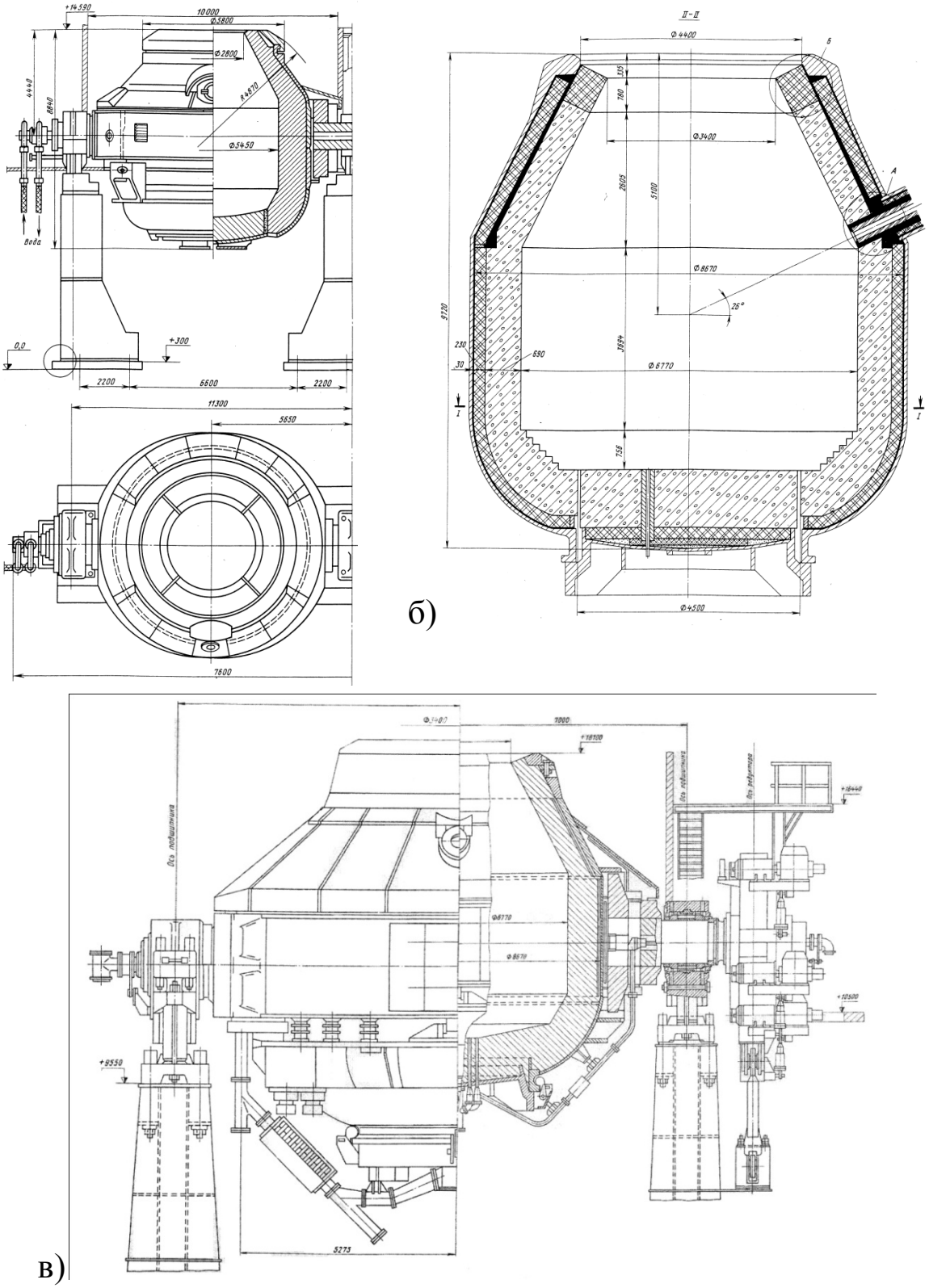
Кислородный конвертор – это сталеплавильный агрегат, *печь-теплогенератор*, в котором источником тепловой энергии является выгорание углерода и других примесей. Кислородные конверторы пришли на смену воздушным конверторам и мартеновским печам благодаря ряду технико-экономических преимуществ, главным из которых является высокая производительность по сравнению с мартеновскими печами, способность переплавлять скрап и давать сталь лучшего качества по сравнению с воздушными конверторами. Кислородные

конверторы являются наиболее распространенными сталеплавильными агрегатами в мире.

В настоящее время в эксплуатации находятся кислородные конверторы с верхней, наклонной и донной продувкой ванны кислородом. Наибольшее распространение получили конверторы с верхней продувкой, которые обычно называют *ЛД – конверторами* (по имени австрийских городов Линц и Доннавиц, где они были впервые построены в 1953г.). Они способны переплавлять до 25% сталеплавильного скрапа в металлургическую завалку. Продувка производится через фурмы со скоростью выхода кислорода в ~2 раза превышающей скорость звука. Увеличение доли скрапа невозможно, т.к. образующийся при окислении углерода чугуна оксид CO не дожигается в пределах рабочего пространства конвертора. Дожигание CO оказалось возможным в конверторах, вращающихся вокруг продольной оси и расположенных наклонно (*Кал-До-конверторы* предложены профессором Каллингом и построен в 1956г. в шведском городе Домнарвяте). Конвертор Кал-До имеет развитую поверхность металлической ванны, подача кислорода производится под углом к поверхности металлической ванны с умеренной скоростью до 250 м/с. Доля скрапа в металлическую завалку достигает 45%. Кислородные конверторы с *донной продувкой* начали строить в 1966-67г.г. Необходимость создания таких конверторов объясняется, во-первых, необходимостью переработки чугунов с повышенным содержанием марганца, кремния и фосфора, т.к. в конверторах ЛД переработка такого чугуна сопровождается выбросами металла в ходе продувки, и во-вторых, конверторы с донной продувкой вписываются в здания существующих мартеновских цехов. Продувка через днище через большое количество (от 16 до 22) фурм обеспечивает хорошее перемешивание ванны и более спокойный ход плавки.

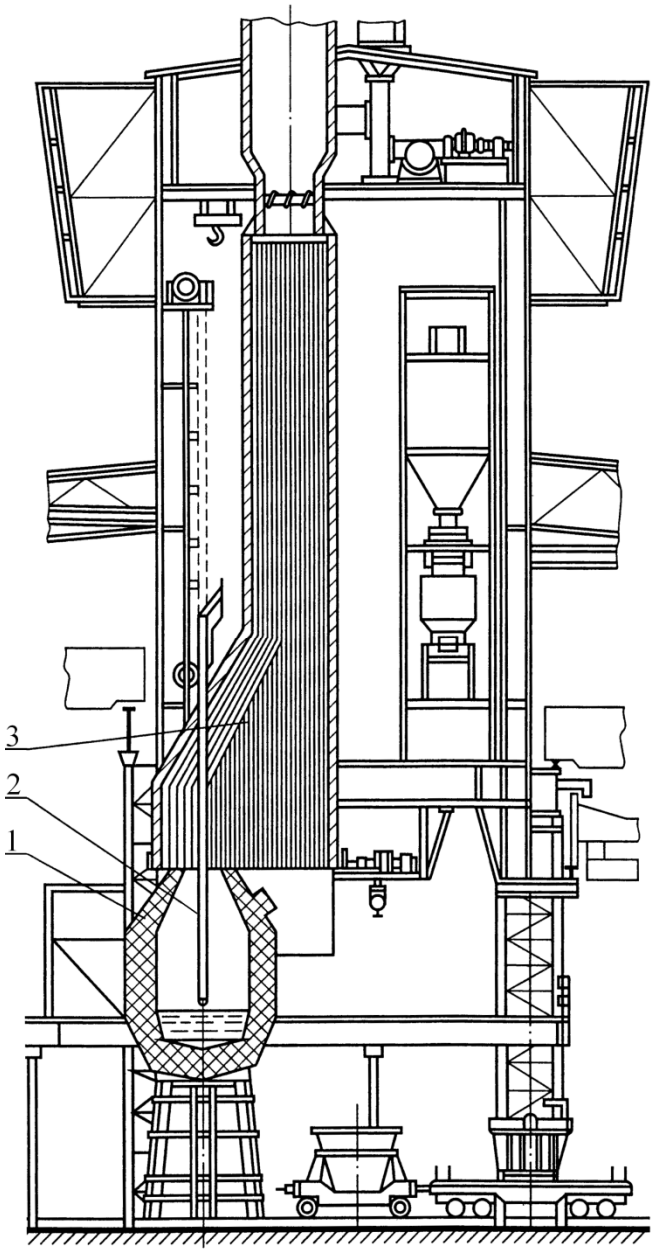
Кислородный конвертор ЛД представляет собой грушевидную реторту (рис. 6.16), стальной кожух который футеруется изнутри, как правило, двумя (реже – тремя) слоями огнеупоров: арматурным, защищающим кожух от перегрева из хромомагнезитового, и рабочим из смолодоломитового кирпича. Толщина футеровки – до 900 мм. Конвертор устанавливают на цапфах, что обеспечивает поворот на разный угол от вертикальной оси для осуществления различных технологических операций.

Конверторы различают по *емкости*, или *садке,* т.е. массе выплавляемой стали в тоннах (от 50 до 400 т). В зависимости от садки наружные размеры кожуха составляют: по высоте – 8-10 м, по диаметру – 5-9 м. Характерным параметром конвертора является *относительный объем* (отношение внутреннего объема конвертора к садке) который находится в пределах 0,7-1,0 $м^3/т$; глубина жидкой ванны при этом составляет 1,1-2,0 м в спокойном состоянии (без продувки кислородом). Загрузка скрапа производится в разогретый конвертор, наклоненный на определенный угол, специальным коробом-совком. Затем заливают жидкий чугун, устанавливают конвертор в вертикальное положение, через горловину вводят водоохлаждаемую кислородную фурму, и начинает подачу кислорода. Продувка продолжается 15-20 минут, за это время подают до 70-80 $м^3$ на 1 тонну стали. В процессе продувки выделяется газ, состоящий из смеси CO_2 и $CO\,(80-90\%)$, который при температуре $1500-1700℃$ выходит из горловины в *камин* (рис. 6.17). Конверторные газы имеют высокое содержание пыли – до 90 $г/м^3$. В камине которой по сути представляет собой котел-утилизатор, внутренняя поверхность экранирована трубами испарительных поверхностей, газы охлаждаются, затем поступают в систему газоочистки.



а) емкостью 160 т с верхней продувкой; б), в) емкостью 250 т с донной продувкой.

Рисунок 6.16 – Кислородные конверторы



1 – конвертер; 2 – фурма; 3 – камин.

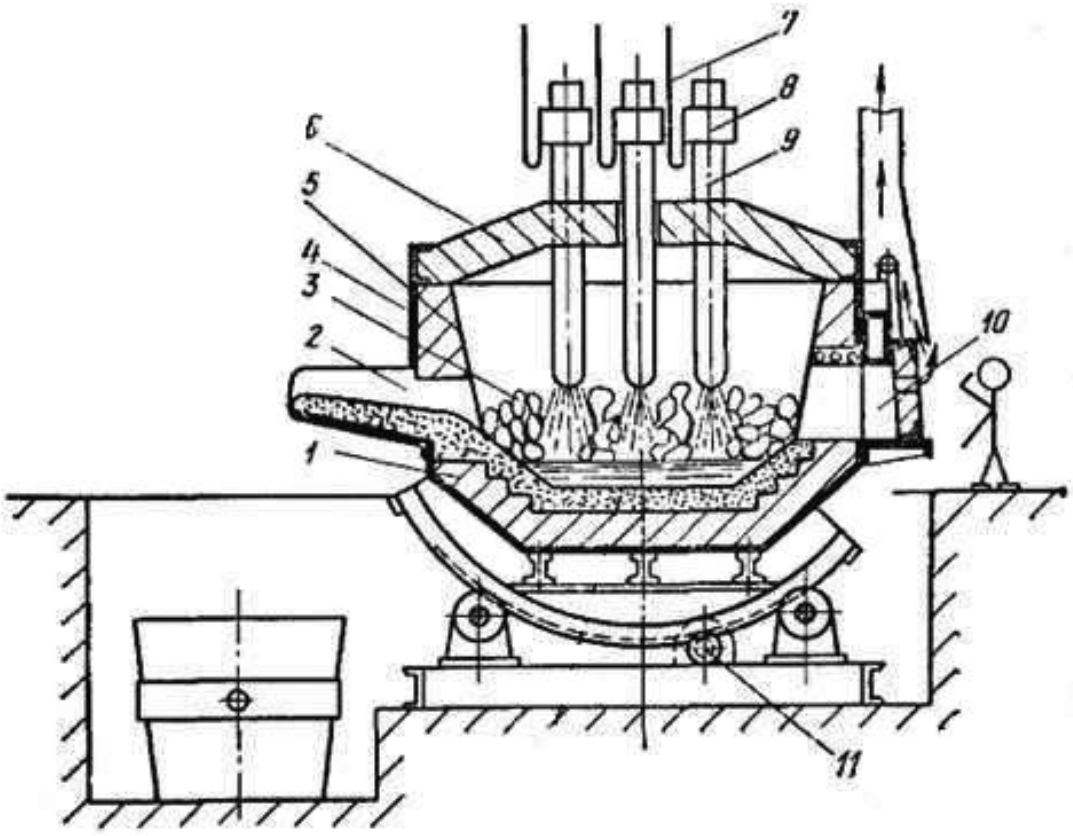
Рисунок 6.17 – Размещение конвертора в цехе

В конверторном производстве возможны варианты отвода газов: 1) с полным дожиганием CO до CO_2 ; 2) с частичным дожиганием и 3) без дожигания. В варианте с полным дожиганием на входе газов в камин обеспечивается подсос атмосферного воздуха, CO сгорает, и в котле-утилизаторе используется и физическое и химическое тепло газов. В варианте без дожигания подсос воздуха исключается, и в котле-

утилизаторе используется только физическое тепло газов; после очистки конверторные газы представляют собой топливо с теплотой сгорания $Q_н^р = 10 - 11$ МДж/м^3.

Кислородно-конверторный способ является примером энерготехнологического комбинирования, т.к. продукцией являются: 1) сталь; 2) товарный водяной пар для использования в теплоэнергетике и теплоснабжении; 3) в варианте работы без дожигания CO – товарное топливо в виде конверторного газа для использования в металлургии (практически не применяется).

Дуговые сталеплавильные печи (ДСП) – это агрегаты, в которых используется тепловой эффект электрической дуги для плавки металла. ДСП (рис. 6.18) имеет плавильное пространство, состоящее из подины, расширяющихся кверху боковых стен, и съемного свода, в котором имеются отверстия для электродов. Электроды – это графитовые или угольные стержни с механизмом подъема-опускания. Электроснабжение производится от трансформатора, мощность которого достигает 180 МВт. Печь имеет опоры и механизм наклона на 45° назад и 15° вперед, загрузочное окно и выпускной желоб. В печи применяется водяное охлаждение (рамы окна, заслонки, графитовые стержни). Образующиеся технологические газы отводятся через вытяжной зонт в дымовую трубу. Загрузка печи производится через свод, который предварительно поднимается и отводится в сторону. Загрузка осуществляется с помощью металлической сетки или коробом. Через окно производится загрузка материалов для корректировки состава, отбор проб, заправка и ремонт подины. После загрузки шихты опускают электроды, возникает дуга – источник тепла; по мере проплавления образуются «колодцы», в которые опускают электроды. Температура в электрических дугах достигает $4000 - 5000$℃ при атмосферном давлении; температура печи к концу плавления повышается и достигает ~ 1800℃.

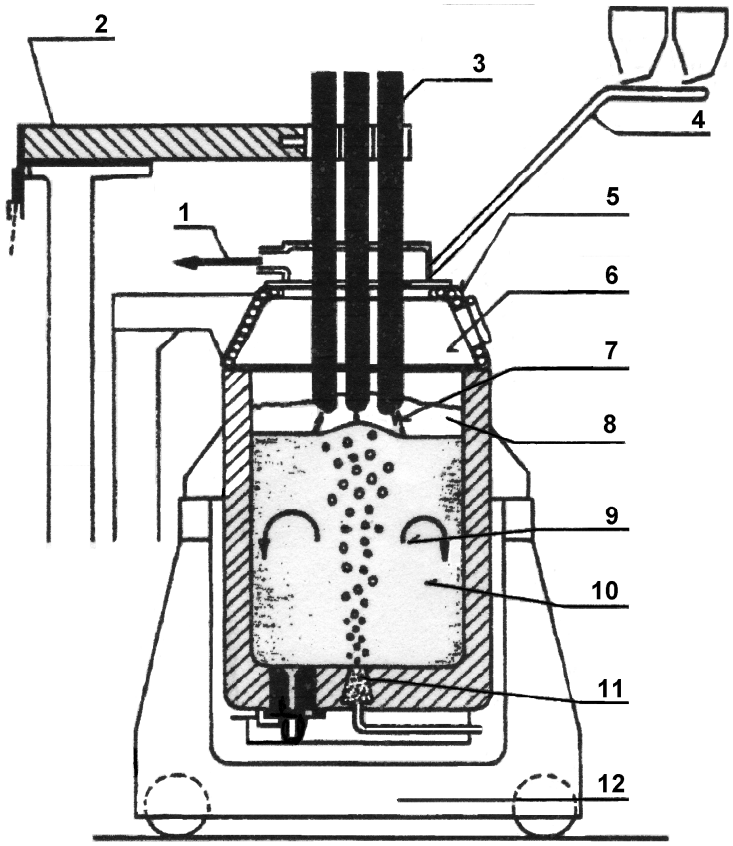


1 – подина; 2 – желоб; 3 – шихта; 4 – кожух; 5 – боковые стенки; 6 – подъемный свод; 7 – токопроводы; 8 – электродержатели; 9 – электроды; 10 – загрузочное окно; 11 – опоры печи и механизм наклона.

Рисунок 6.18 – Дуговая электросталеплавильная печь

Печь-ковш, называемый также агрегатом комплексной обработки стали (АКОС) – это звено в единой технологической схеме с дуговыми печами, конверторами и мартеновскими печами. Выплавляемый полупродукт – железоуглеродистый сплав – сливают в сталь-ковш, после чего он устанавливается под свод с отверстиями для введения графитовых электродов (рис. 6.19) и подачи присадок. В агрегате производится доводка стали до заданного химсостава, вакуумирование для удаления газов, раскисление. В печи-ковше возможна продувка инертным газом (аргоном), подаваемым через днище ковша. После окончания процесса ковш выкатывается из под свода и подается на разливку. Выведение процесса доводки из сталеплавильного

агрегата в агрегат печь-ковш позволило значительно повысить производительность производства стали, а также повысить гибкость производства, т.е. демпфировать рассогласование стадий выплавки и разливки.



1 – отходящие газы; 2 – токоподводящие электрододержатели; 3 – электроды; 4 – подача добавок; 5 – свод; 6 – инертная атмосфера; 7 – электрическая дуга; 8 – основной шлак; 9 – струи инертного газа; 10 – расплавленная сталь; 11 – пористая пробка; 12 – транспортная тележка.

Рисунок 6.19 – Схема установки печь-ковш

Сталь-ковш, используемый в агрегате печь-ковш, имеет форму и размеры, представленные на рисунке 6.20 и в таблице 6.4.

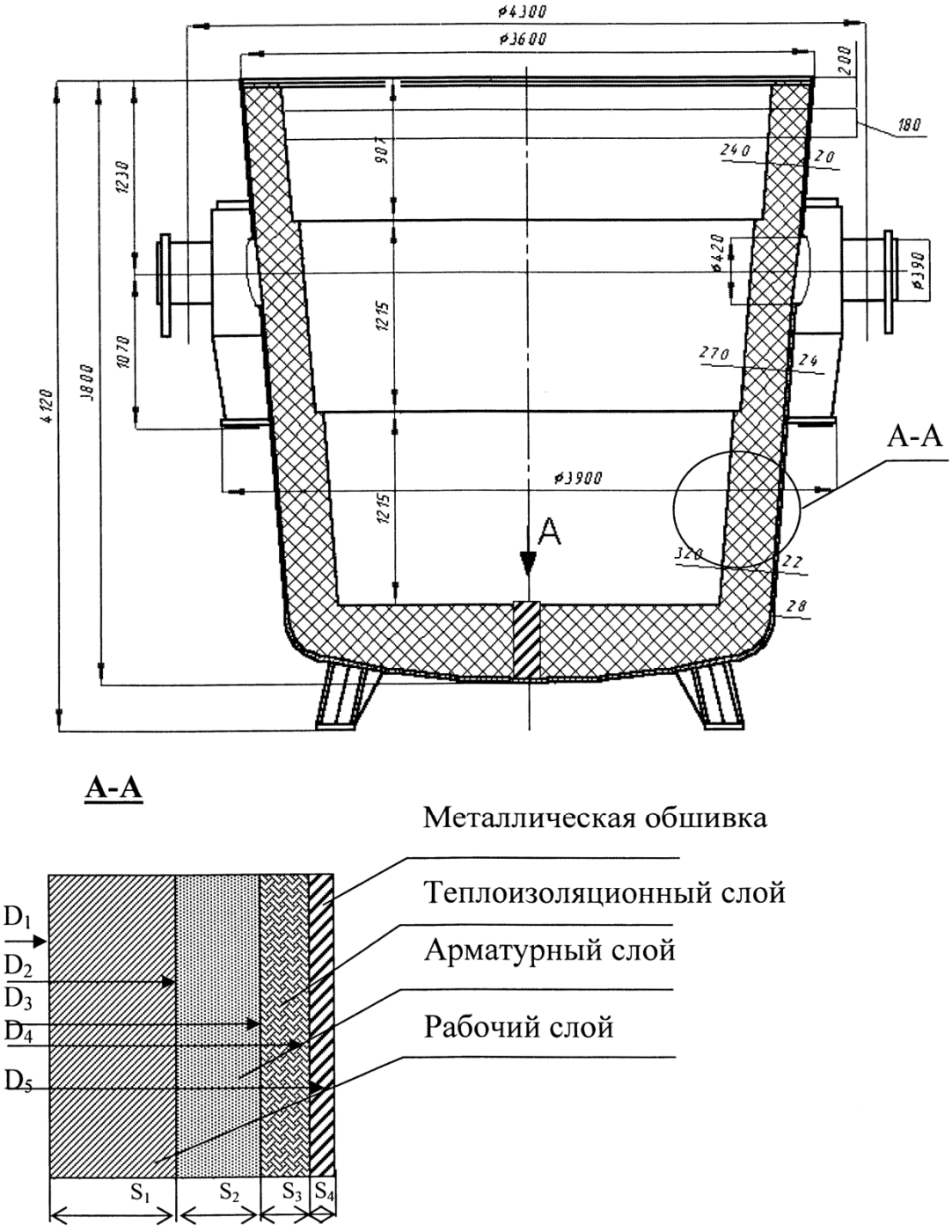


Рисунок 6.20 – Пример конструкции сталеразливочного ковша емкостью 90 тонн и схемы футеровки

Таблица 6.4 – Основные размеры сталеразливочных ковшей

Вместимость ковша, т	Основные размеры, мм		
	Высота	Внутренний диаметр	
		Вверху	Внизу
50	2860	2620	2340
90	3250	3220	2850
100	3360	3400	2950
150	4370	3700	3170
200	4380	4000	3420
250	4400	4350	3570
300	4790	4500	3780
350	5000	4700	4000
430	5250	5050	3780
480	5400	5340	4615

Сталеразливочные ковши проходят следующий цикл работы:

1. Ремонт футеровки;
2. Сушка футеровки ковша (удаление влаги);
3. Разогрев футеровки ковша до рабочей температуры 1000-1200ºС;
4. Выпуск стали в ковш;
5. Внепечная обработка и разливка стали;
6. Поддержание рабочей температуры ковша до нового выпуска.

Кожух и все металлические элементы защищаются от перегрева внутренней футеровкой. Кожух изготавливают сварным из отожженных стальных листов толщиной 16-40 мм. В соответствии с условиями службы ковша футеровка должна быть термостойкой, устойчивой против коррозионного и эрозионного разрушения жидким металлом и шлаком, обладать небольшой теплопроводностью, теплоемкостью и усадкой при температурах службы, а в процессе внепечной обработки не взаимодействовать с вводимыми в металл реагентами. В полной мере этим

требованиям не отвечает ни один из применяемых вариантов футеровки ковшей. Выбор варианта зависит также от стоимости огнеупоров, а также влияет на число ковшей в цехе, занимаемые ремонтным оборудованием площади, количество трудящихся и т.д. В связи с этим, наряду с наиболее распространенной футеровкой из недорогих алюмосиликатных огнеупоров используются высокоглиноземистые и основные огнеупоры. По методу изготовления рабочего слоя футеровки различают использование формованных, набивных и наливных огнеупоров.

Для обеспечения минимальных тепловых потерь и высокой стойкости при относительно небольшой массе применяют многослойные тонкостенные футеровки. Трехслойная футеровка (рис. 6.20) состоит из теплоизоляционного (выравнивающего), арматурного и рабочего слоев, выполняемых из различных материалов, определяющих конструкцию футеровки днища и стен в соответствии с условиями эксплуатации ковшей.

Теплоизоляционный слой. Поскольку при внедрении технологии внепечной обработки значительно увеличивается время нахождения жидкого металла в ковше, а в рабочем слое применяются периклазоуглеродистые или высокоглиноземистые огнеупоры с высокой теплопроводностью, то в целях уменьшения тепловых потерь большое внимание уделяется теплоизоляции. Теплоизоляционный слой укладывается (приклеивается) непосредственно на металлическую часть кожуха ковша и служит для ограничения передачи теплоты в атмосферу, поэтому основным его свойством должна являться низкая теплопроводность. Достаточно эффективную теплоизоляцию обеспечивает традиционная кирпичная кладка теплоизоляционного слоя из легковесного шамотного кирпича толщиной 30-40 мм. В современных технологиях также применяют волокнистые муллитокремнеземистые материалы: войлок, фетр или картон толщиной 5-20 мм.

Арматурный слой. Арматурный слой укладывается

вплотную к теплоизолирующему слою. Он должен обладать одновременно следующими свойствами:

- высокой прочностью, т.е. выдерживать нагрузки, передаваемые через рабочий слой (ферростатическое давление металла, расширение кирпича рабочего слоя – периклазоуглеродистый кирпич рабочего слоя обладает высоким коэффициентом термического расширения);
- должен противостоять некоторое время действию агрессивной среды (металла или шлака) в случае полного износа рабочего слоя;
- достаточной термостойкостью – не менее 10 теплосмен.

От выбора огнеупоров арматурного слоя во многом зависит и стойкость рабочего слоя. Традиционно арматурный слой выполнялся из шамотного кирпича ввиду его низкой теплопроводности 1-1,5 Вт/(м·К), но предел прочности при сжатии менее 30 Н/мм^2 недостаточен, и приводит к скорому его разрушению, кроме этого шамотный кирпич не противостоит агрессивному воздействию высокоосновного шлака в ситуациях полного износа рабочего слоя шлакового пояса. Поэтому в настоящее время арматурный слой днища и стен ниже шлакового пояса выполняют из высокопрочного мулитового кирпича с пределом прочности не менее 80 Н/мм^2 и содержанием Al_2O_3 более 75 %. Для кладки слоя применяют высокоглиноземистый хромсодержащий пластифицированный мертель или периклазосодержащий материал.

Рабочий слой. Футеровка сталеразливочных ковшей, используемых для комплексной внепечной обработки стали, в процессе эксплуатации изнашивается неравномерно. Учитывая зональный износ, на практике используют комбинированный принцип конструкции футеровки, который предусматривает дифференцированный подход к физическим, термомеха-ническим, теплофизическим свойствам выбираемых материалов.

В качестве основных огнеупоров применяют периклазо-хромитовые, известковопериклазовые, периклазоуглеродистые и др. Толщина рабочего слоя составляет 150-220 мм.

Эксплуатация ковшей. В процессе эксплуатации ковша не допускается снижение температуры рабочей футеровки ковша менее 700ºС. Максимальная стойкость ковшей достигается, если ковш будет поддерживаться настолько горячим, насколько это возможно, при максимальной частоте использования. В процессе разливки и во время межплавочного простоя ковш должен быть накрыт теплоизолирующей крышкой.

Для обеспечения процесса сушки с оптимальными показателями по расходу топлива и продолжительности нагрева необходима установка следующего оборудования:

– горелочное устройство, позволяющее сжигать топливо с коэффициентом расхода воздуха α в диапазоне 1,3÷8, для получения рабочей среды с температурой 1200-400ºС;

– плотная изолированная крышка, позволяющая:

– снизить тепловые потери через внешнюю поверхность;

– за счет прилегания к обечайке ковша с минимальным зазором обеспечить положительное давление в рабочем пространстве ковша для равномерного распределения теплоносителя по объему и создания условий для рециркуляции горячих газов;

– автоматическое управление процессом для плавного изменения расхода топлива в зависимости от температуры в ковше.

Максимальная стойкость футеровки ковшей достигается в том случае, если разогрев будет закончен непосредственно перед использованием ковша. Перед первой плавкой не следует разогревать ковш заранее и тем более дать ему остыть. Перед сливом плавки рекомендуется иметь температуру рабочей футеровки ковша в пределах от 1000ºС до 1200ºС.

6.1.5 Нагревательные печи обработки металла давлением

Нагревательными обычно называют печи, в которых осуществляется нагрев металла перед обработкой давлением (прокаткой, ковкой). Часто прокатку ведут последовательно на нескольких станах, что определяет и состав парка печей.

Печи для нагрева слитков (нагревательные колодцы). Слитки стали, полученные в мартеновском, конвертерном или электросталеплавильном цехах, перед прокаткой на обжимном стане подвергают дополнительному нагреву. Обычно толщина их не менее 400 мм, поэтому для ускорения и повышения качества нагрева целесообразно греть их с четырех сторон, располагая вертикально. Подобный нагрев осуществляют в нагревательных колодцах, которые обеспечивают: ускоренный и равномерный нагрев металла, исключающий возможность смещения усадочной раковины; удобство транспортирования, загрузки и выгрузки металла при вертикальном положении слитков.

К нагревательным колодцам предъявляют следующие требования:

1)достаточно быстрый нагрев металла, обеспечивающий высокую производительность (общую и удельную);

2)качественный нагрев металла: равномерность нагрева по высоте и сечению слитков без местных оплавлений;

3)эффективная работа воздухо- и газоподогревателей, обеспечение невысокого удельного расхода топлива;

4)возможность надежного автоматического регулирования теплового режима;

5)высокие эксплуатационные качества (удобство удаления шлака, полное сжигание топлива в пределах рабочего пространства, достаточная герметизация рабочего пространства и теплообменных устройств, достаточная стойкость крышек и других нагревательных колодцев);

6)простота конструкции и невысокие капитальные затраты

на строительство.

Каждый нагревательный колодец в отдельности называется ячейкой. Несколько ячеек составляют группу. Для группы ячеек предусмотрены одна дымовая труба и общее помещение для управления и контроля. Производительность нагревательных колодцев обычно исчисляют на группу в год. Зная производительность стана и производительность одной группы, можно найти необходимое число групп нагревательных колодцев.

Современные нагревательные колодцы являются камерными печами периодического действия с переменными во времени тепловыми и температурными режимами. Нагрев металла осуществляется садками, т.е. после выдачи из ячейки всех нагретых слитков печь вновь загружают слитками по начальной температуре слитков различают *холодный посад* ($t_{нач} = t_{атмосферы}$), и *горячий посад*, когда в ячейку загружают не полностью остывшие после разливки слитки с температурой поверхности $700 - 850\,℃$. (Следует заметить, что название печей *нагревательные колодцы* происходит из технологии металлургического производства 19-20 веков, когда сталеплавильное и прокатное производства располагались в одном промышленном здании, и слитки из изложниц сажали в специальную глубокую яму-*колодец* – и накрывали крышкой. В таком колодце происходило выравнивание температуры по сечению слитка без подачи топлива.) В некоторых случаях в момент посадки в слитке остается незакристаллизовавшаяся центральная часть (нагрев слитков с *жидкой сердцевиной*), в процессе нагрева происходит как нагрев поверхностных слоев слитка, так и кристаллизация центра; в результате достигаются минимальные затраты тепла и времени. На металлургических предприятиях, где культура производства достаточно высока, горячий посад составляет 90-95%.

В процессе нагрева металла происходит его окисление.

Образовавшаяся окалина собирается на подине колодца и должна быть оттуда удалена. Существуют два метода удаления окалины или, как говорят, *шлакоудаления*: сухое и жидкое. При сухом шлакоудалении на подину колодца насыпается мелкий коксик, который через 5-6 всадов вместе с окалиной удаляется через специальные лючки. Затем сверху при открытой крышке засыпается и разравнивается новая порция коксика. Вслед за этим металл нагревают вновь. При жидком шлакоудалении коксик на поду отсутствует; подину выполняют из огнеупорных материалов, не взаимодействующих с окалиной (обычно хромомагнезита); окалина в жидком состоянии удаляется с пода ячейки через специальную летку.

Каждому из этих методов присущи свои недостатки и достоинства.

Недостатки сухого шлакоудаления:

1)непроизводительные затраты времени на засыпку и удаление коксика;

2)замедленный прогрев и науглероживание донной части слитка, несколько утопленной в коксик;

3)необходимость иметь в цехе хранилище для коксика и плохое санитарное состояние цеха (при засыпке коксика поднимается облако пыли);

4)крайне отрицательное влияние коксовой пыли на керамику регенераторов и рекуператоров.

Однако сухое шлакоудаление – это единственный метод удаления окалины в таких конструкциях, где невозможно обеспечить жидкотекучесть окалины на поду ячейки. Этим обстоятельством и определяется область применения метода сухого шлакоудаления.

Жидкое шлакоудаление не имеет недостатков, свойственных сухому шлакоудалению; но и оно также не лишено недостатка, заключающегося в том, что при жидком шлакоудалении неравномерно изнашивается подина колодца, и

слитки теряют устойчивость. Причем устойчивое стекание шлака через летку возможно только в том случае, если на поду колодца поддерживается достаточно высокая температура, при которой шлак жидкотекуч. Однако в некоторых широко применяемых конструкциях нагревательных колодцев наивысшая температура развивается в верхней части ячейки, а температура на поду не всегда достаточна для того, чтобы шлак стекал должным образом. При этом на поду начинают образовываться бугры окалины, для удаления которых добавляют материалы, снижающие температуру плавления окалины, и интенсивно прогревают пустой колодец с целью удаления скопившегося шлака.

Огнеупорная футеровка нагревательных колодцев должна соответствовать условиям службы отдельных частей:

1) подина и нижняя часть стен, поскольку они интенсивно соприкасаются с окалиной и слитками;

2) пояса футеровки стен, на которые опираются слитки;

3) крышка, так как она подвержена действию наиболее высоких температур, колебанию температур и механическому воздействию в связи с частым открыванием и закрыванием крышки;

4) регенераторов и рекуператоров (особенно верхние ряды), керамика работает в тяжелых условиях высоких температур, резкой смены температуры, воздействия газовых потоков, несущих окалину и пыль.

Подину колодцев выкладывают обычно в три слоя: внутренний слой из хромомагнезитового кирпича, средний – шамотный кирпич, внешний – теплоизоляционный слой из диатомового кирпича. При сухом шлакоудалении уровень подины по всей площади колодцев одинаков, при жидком – подину выкладывают с уклоном в сторону шлаковой летки.

Стены колодцев также выполняют трехслойными. Внешний слой – теплоизоляционный, затем слой шамотного кирпича.

Внутренний слой в нижней части стен (приблизительно на 1 м высоты) выполняют из хромомагнезита, остальное из динаса. Интенсивнее всего стены изнашиваются на том уровне, где опираются слитки. В связи с этим в этом месте выполняют выступ кладки внутрь колодца, который выкладывают из динаса, хромомагнезита, каолинового кирпича. Стойкость выступов из динаса наименьшая. Применяют также футеровку из огнеупорных блоков.

В настоящее время применяют крышки, как с арочной футеровкой, так и с подвесным сводом. И в том, и в другом случае можно применять шамотный кирпич. В последнее время для футеровки крышек все шире используют каолиновый кирпич, который в футеровке крышек значительно более стоек, поскольку обладает большой огнеупорностью и меньшей дополнительной усадкой.

Насадку регенераторов нагревательных колодцев делают двухслойной: верхнюю часть из динаса, нижнюю из шамота.

Керамические рекуператоры, применяемые в нагревательных колодцах, выполняют из восьмигранных трубок. Обычно монтируют 6-8 рядов труб, из них два верхних и нижний ряды – из карбошамотных трубок, остальные – из шамотных.

При правильно выбранных огнеупорных материалах стойкость огнеупорной футеровки зависит от ряда теплотехнических и технологических факторов, главными из которых являются следующие: температура в колодце, колебания температур в колодце, полнота сгорания топлива, метод шлакоудаления. Чрезмерное повышение температуры в колодце приводит к снижению стойкости, как огнеупорной кладки рабочего пространства, так и насадок регенераторов и рекуператоров. Значительно ускоряют разрушение кладки колебания температуры в рабочем пространстве, связанные с открыванием и, особенно, с охлаждением колодцев перед посадкой холодных слитков. Если не обеспечивается полное

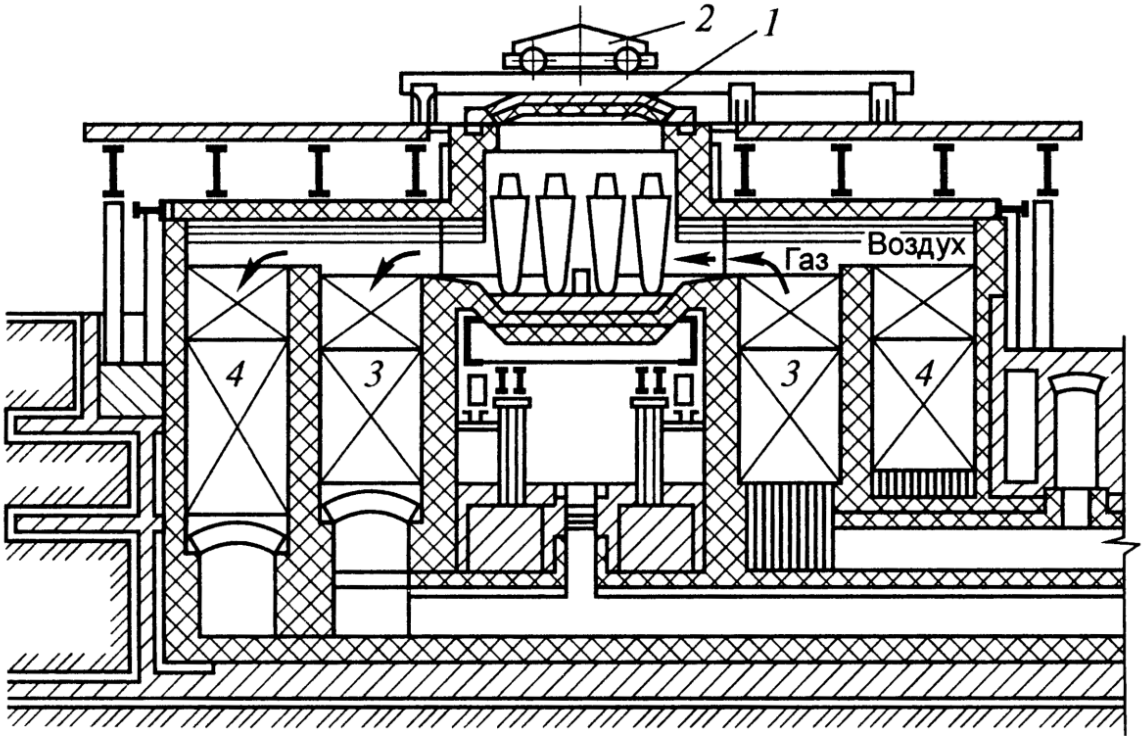
сгорание топлива в пределах рабочего пространства, то горение завершается в регенераторах и рекуператорах, что приводит к их быстрому разрушению. При жидком шлакоудалении кладка в целом изнашивается быстрее, так как для обеспечения удаления шлака в жидком виде приходится повышать температуру в колодцах.

В обычных регенеративных колодцах на 6-8 слитков смену внутреннего слоя стен и подины выполняют через каждые 2,5-3 мес., а полную замену кладки – через 8-9 мес. В газовых регенераторах насадку необходимо сменять через 8 мес., а в воздушных она может служить в течение 2 лет. Для стен и подины рекуперативных колодцев смена внутреннего слоя необходима через 5-6 мес., а полная замена кладки – через 12-18 мес. В рекуператорах насадку следует сменять раз за 1,2-2 года.

Смена футеровки крышек осуществляется через 7-9 мес. В отдельных случаях, чаще всего в регенеративных колодцах, быстро сгорает металлическая рама крышек.

Регенеративные колодцы. На некоторых отечественных заводах работают регенеративные нагревательные колодцы (рис. 6.21), вмещающие по 6-8 слитков массой 6-7 т. Колодец снабжен двумя парами регенераторов, причем ближайший к рабочему пространству регенератор – газовый. Доменный газ и воздух подогревают примерно до 800°С. Колодец работает реверсивно. Сначала топливо и воздух поступают с одной стороны и, нагреваясь в регенераторах, попадают в рабочее пространство. Образовавшиеся дымовые газы проходят через другую пару регенераторов и отдают свое тепло огнеупорной насадке. Затем происходит перекидка клапанов, и весь цикл повторяется в обратном направлении. Металл нагревается до 1200-1250°С, температура в рабочем объеме колодца составляет 1350-1400°С. Общая тепловая мощность подобных колодцев составляет 5,8-6,4 МВт, причем на долю топлива приходится около 65%, на долю тепла подогрева воздуха и газа – примерно

35%. Нагревательные колодцы подобного типа могут работать как на чистом доменном газе, так и на смеси коксового и доменного газов. В регенеративных нагревательных колодцах в каждой группе по четыре ячейки. Большинство нагревательных колодцев работает, как правило, в значительной мере на слитках горячего посада. При этом температура горячего посада обычно составляет около 750°С, но иногда достигает и 850-870°С. Удельная доля слитков горячего посада по отношению к массе всех слитков достигает 95%. Увеличение температуры и массы горячего посада – один из важнейших резервов повышения производительности нагревательных колодцев и экономии топлива.



1 – крышка; 2 – механизм для перемещения крышки; 3 – газовый регенератор; 4 – воздушный регенератор.

Рисунок 6.21 – Регенеративный нагревательный колодец

Производительность группы регенеративных колодцев рассматриваемой конструкции при 95% горячего посада с температурой около 780°С составляет 300 тыс. т/год, а удельный расход тепла 1150-1200 кДж/кг. При увеличении производительности существующих обжимных станов, оборудованных регенеративными колодцами, задача увеличения количества нагреваемого металла может быть решена двумя способами: либо достройкой недостающих групп колодцев, либо реконструкцией существующих ячеек.

В регенеративных колодцах горение топлива развивается в нижней части колодца, поэтому температура около подины достаточно высокая и надежно осуществляется жидкое шлакоудаление.

В нагревательных колодцах регенеративного типа крайне несовершенна система сжигания топлива, что влечет за собой существенные недостатки:

1) горение топлива практически начинается над газовыми регенеративными насадками, через которые подается топливо, протекает в рабочем пространстве и заканчивается в противоположных насадках. Это приводит к неравномерности нагрева садки металла, так как слитки, расположенные ближе к регенераторам, нагреваются значительно быстрее, чем слитки в средней части рабочего пространства;

2) для автоматизации теплового процесса печи необходимо правильно выбрать в рабочем пространстве такую точку, по изменению температуры в которой можно строить процесс автоматизации. В регенеративных колодцах надежно выбрать такую точку невозможно, поскольку в результате перекидки клапанов и плохого смешения газа и воздуха температура может все время изменяется по всей длине рабочего пространства, причем возможны и случайные колебания температур.

На ряде металлургических предприятий регенеративные

колодцы переведены на высококалорийное топливо (коксовый или природный газ). При этом за счет ликвидации газовых регенераторов появилась возможность увеличить длину рабочей камеры, массу садки и производительность.

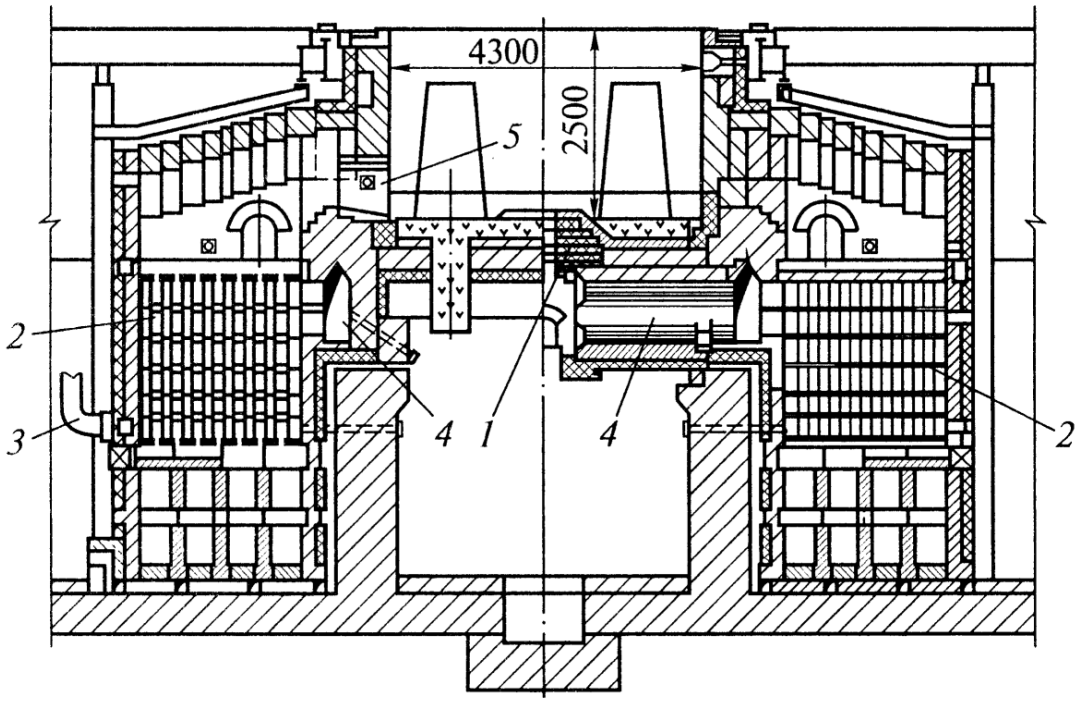
Рекуперативные нагревательные колодцы с отоплением из центра подины (ОЦП). Такие колодцы (рис. 6.22) широко применяют для нагрева слитков перед прокаткой на блюмингах. Они достаточно надежны в эксплуатации, отапливают их смешанным коксо-доменным газом с теплотой сгорания 5800-8400 кДж/м^3 при помощи горелки, расположенной в центре пода. Группа состоит из двух ячеек. В каждую ячейку помещается по 12-16 слитков квадратного сечения.

Колодцы оборудованы керамическими рекуператорами из восьмигранных карбошамотных трубок для подогрева воздуха до 600-650°С. Воздух, пройдя через рекуператоры, поступает к горелке с двух сторон по сборным каналам. Газ подается в горелку по специальной трубе снизу вверх, поэтому факел направлен снизу вверх. Продукты сгорания удаляются из рабочего пространства через специальные окна и, пройдя через рекуператор, уходят в дымовую трубу.

Рекуперативные колодцы с отоплением из центра пода в настоящее время работают на 90-95% горячего посада, обеспечивая при этом производительность одной группы около 220-270 тыс. т/год. Удельный расход тепла на нагрев металла составляет 1100-1200 кДж/кг. Процесс нагрева металла в этих колодцах можно автоматизировать. Импульсную точку выбирают на одной из боковых стен в зоне наиболее высоких температур, т.е. несколько выше верхней кромки слитка. Тепловая мощность колодцев составляет 6-8 МВт.

Качество нагрева металла в рекуперативных колодцах с отоплением из центра пода выше, чем в регенеративных колодцах, но все-таки недостаточно. Вследствие вертикального расположения факела зона наибольших температур создается в

верхней части рабочего пространства, что приводит к перегреву верхней части слитка при недостаточном нагреве его основания. Перепад температур по высоте рабочего пространства достигает 100°С и более, что вызывает неравномерность нагрева слитка по высоте. Однако положительным является то, что все слитки, входящие в садку, греются почти одинаково.



1 – горелка; 2 – рекуператор; 3 – подвод холодного воздуха; 4 – канал для подвода горячего воздуха; 5 – каналы для отвода дымовых газов из рабочего пространства колодца.

Рисунок 6.22 – Рекуперативные колодцы с отоплением из центра пода

Рекуператоры нагревательных колодцев имеют поверхность нагрева около 400 м^2. В рекуператоре шесть рядов трубок. Два нижних и два верхних ряда – из карбошамотных трубок, средние ряды – из шамотных. Воздух в рекуператор поступает под давлением, в результате чего между воздушной и дымовой сторонами рекуператора возникает значительный перепад давлений (до 200Па) и создается возможность для утечки воздуха

в дымовые каналы. Утечка иногда достигает 40-50 % всего воздуха, поданного в рекуператор. Низкая герметичность рекуператоров влияет на работу колодцев, так как в результате утечек количество воздуха, достигшего горелки, становится недостаточным и, что очень важно, неопределенным. При недостатке воздуха топливо не сгорает полностью в пределах рабочего пространства и поэтому становится возможным его дожигание в рекуператоре, что вызывает разрушение рекуператора и дальнейшее увеличение утечек. При уменьшении количества воздуха, попадающего в ячейку, приходится сокращать количество подаваемого топлива, т.е. снижать тепловую нагрузку, а это в свою очередь приводит к снижению производительности.

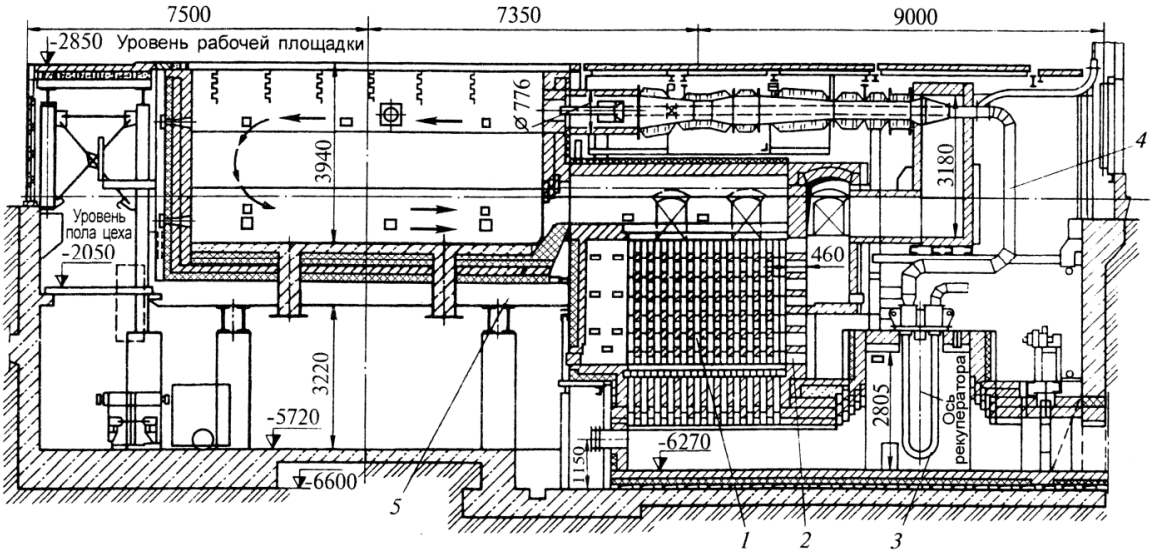
Подача в рекуператоры воздуха в количестве, превышающем необходимое для горения, не дает желаемого результата, поскольку увеличение количества воздуха требует соответствующего повышения его давления. Чтобы уменьшить утечку воздуха, следует стремиться к снижению гидравлического сопротивления на воздушном пути и уменьшению неплотностей, для чего необходимо применять специальные приемы сборки рекуператора, а при эксплуатации исключить термические удары. Во избежание термических ударов предусматривают блокировку крышки нагревательного колодца и шибера, установленного в дымовом борове, которая обеспечивает закрытие шибера при открывании крышки колодца и препятствует попаданию холодного воздуха в трубы рекуператора. Ненадежная (в смысле герметичности) работа рекуператоров наряду с высокой стоимостью сооружения является, пожалуй, самым большим недостатком этих нагревательных колодцев. Поэтому предпринимают различные попытки уменьшить и стабилизировать во времени утечку воздуха, что необходимо для автоматизации теплового режима. Герметичность рекуператоров зависит также от состояния

дымовых каналов. Трубки засоряются частицами окалины и коксика, захватываемыми дымовыми газами. Поскольку трубка верхнего ряда рекуператора нагревается до весьма высоких температур, эти частицы прилипают к керамике, постепенно сечение для прохода дыма все больше и больше суживается. В результате этого возрастают сопротивление дымового тракта и утечка воздуха. Особенно сильно засоряются трубки рекуператора, когда колодцы работают при сухом шлакоудалении и когда в рекуператор попадает много коксовой пыли, причем засорение трубок не только увеличивает утечку воздуха, но и ухудшает его подогрев в рекуператоре. Все это заставило отказаться от сухого шлакоудаления. В тоже время на колодцах с отоплением из центра пода применять жидкое шлакоудаление сложнее, чем на регенеративных колодцах. Это объясняется тем, что в регенеративных колодцах при горизонтальном направлении факела на поду поддерживается температура 1400-1450°С, достаточная для получения жидкотекучести шлака. В колодцах с отоплением из центра пода в верхней части температура достигает 1370-1400°С, а внизу 1290-1320°С. При этой температуре шлак только размягчается; чтобы он стал жидкотекучим, необходимо внести на подину специальные разжижающие материалы. На некоторых заводах в качестве таких материалов используют шлак от сжигания твердого топлива, кварцевый песок, бой динасового кирпича.

Переход на жидкое шлакоудаление позволяет увеличить производительность ячейки и сократить расход топлива, однако при этом резко возрастает число ремонтов, а следовательно, и удельный расход огнеупоров. Колодцы при жидком шлакоудалении работают более форсированно, что увеличивает толщину окалины и возможность оплавления слитков.

Рекуперативные нагревательные колодцы с одной верхней горелкой (ОВГ) признаны в отечественной металлургии наиболее прогрессивными и соответствующими обжимным станом с

высокой годовой производительностью (до 6млн.т). Конструкция колодцев представлена на рисунке 6.23. Колодец вытянутой формы, шириной 2,2-2,5 м, и длиной 7,8-9,6 м. Группа колодцев включает обычно 2 ячейки. Тепловую нагрузку в колодцах поддерживают около 10-12 МВт; удельный расход тепла составляет 1300-1350 кДж/кг. Поскольку на поду этих колодцев температура относительно низкая, применяют сухое шлакоудаление. Производительность колодцев на группу из двух ячеек несколько меньше (200-220 тыс.т/год), чем колодцев с отоплением из центра пода. Это объясняется особенностями их тепловой работы.



1 – керамический рекуператор; 2 – каналы для холодного воздуха; 3 – металлический рекуператор; 4 – подвод компрессорного воздуха; 5 – каналы для удаления дымовых газов из рабочего пространства колодца.

Рисунок 6.23 – Нагревательный колодец с одной верхней горелкой

Колодец ОВГ отапливают газообразным топливом при различной степени подогрева воздуха. Выходные скорости в горелке должны быть подобраны так, чтобы кинетической энергии струй было достаточно для проталкивания газов от

горелки до торцевой стенки и до дымоотборного окна по петлеобразной траектории. Наибольшая температура развивается около стены, противоположной горелке; на этой стене и выбирают импульсную точку для автоматизации теплового режима. Причем раньше других нагреваются слитки, находящиеся около этой стены. Когда температура в импульсной точке достигает заданного значения, то во избежание ее дальнейшего повышения расход топлива снижается, и кинетическая энергия струй топлива и воздуха уменьшается. Это приводит к тому, что газы уже не достигают противоположной стенки и двигаются по прогрессивно укорачивающейся петле. Т.к. процесс нагревания садки протекает неравномерно, затягивается, поэтому производительность группы, состоящей из двух ячеек таких колодцев, меньше производительности колодцев с отоплением из центра пода. Однако колодцы с одной верхней горелкой более компактны и при одной и той же общей длине отделения нагревательных колодцев их можно установить больше, чем колодцев с отоплением из центра пода. Нагревательные колодцы с одной верхней горелкой обеспечивают наивысшую производительность на 1 п.м длины отделения. Однако при их использовании возникают значительные трудности с подогревом воздуха, которые заключаются в том, что вследствие узкой, удлиненной формы рабочего пространства приходится и рекуператор выполнять такой же формы. При этом создается высокое сопротивление на пути движения воздуха, для преодоления которого требуется весьма высокое давление. Необходимость значительного давления воздуха перед рекуператором при подаче его вентилятором приводит к возникновению большой утечки воздуха.

Для исключения утечек возможны два способа подачи воздуха из рекуператора к горелке:

1) с помощью эксгаустера из жароупорного материала.

Воздух просасывается через рекуператор и возможность утечки практически устраняется. Однако в этом случае температура подогрева воздуха ограничивается 400-450°С, так как при более высокой температуре существующие эксгаустеры работать не могут;

2) с помощью инжектора (рис. 6.23). Инжектирующей средой служит воздух высокого давления (200-400 кПа), количество которого составляет 25-30 % общего расхода и который подогревается в металлическом трубчатом рекуператоре до 250-350°С. В этом случае температура воздуха перед горелкой составляет 650-700°С.

Режимы нагрева слитков в нагревательных колодцах зависит от температуры посада. Холодные слитки нагревают осторожно ограниченным тепловым потоком в начале до достижения температуры пластичности стали (500-550°С), затем тепловой поток увеличивают, а после достижения расчетной конечной температуры печи – уменьшающимся во времени тепловым потоком. Режим нагрева слитков горячего посада значительно проще, т.к. нет опасности температурных напряжений. Поэтому продолжительность нагрева слитков углеродистых сталей горячего посада составляет 3-3,5 часа, холодного – 7-10 часов. Производительность одной группы колодцев в среднем можно определить по формуле

$$P = n\frac{G}{\tau_п + \tau_н + \tau_ш}m, \frac{т}{ч}, \qquad (6.23)$$

где $\tau_п, \tau_н, \tau_ш$ – соответственно продолжительность посадки слитков, нагрева слитков и уборки шлака, ч; n – число ячеек в группе, шт; G – масса садки одной ячейки, т; m – коэффициент, учитывающий простои на ремонт ($m \approx 0{,}85$).

Длина пролета отделения нагревательных колодцев в обжимном цехе определяется *компактностью* нагревательных

колодцев, или производительностью на 1 п.м. длины пролета. Наименее компактны колодцы ОЦП, наиболее компактны – регенеративные колодцы и колодцы ОВГ. Это связано с временем доставки горячего слитка от колодца до прокатного стана, количеством слитковозов (один, два, кольцевая подача слитков), капитальными затратами на сооружение пролета.

Печи с выкатным подом (рис. 6.24) используют при нагреве особо крупных слитков (25-40 т и более) для получения поковок в кузнечных цехах. Такие печи имеют внутренние размеры рабочего пространства не менее 4,0х4,0х10,0 м и футеруются волокнистыми огнеупорными материалами.

Печи для нагрева блюмов и слябов. Блюмы и слябы, полученные на МНЛЗ или в обжимных цехах, перед дальнейшей прокаткой на рельсобалочных, сортовых, листовых и других станах нагревают до температуры прокатки в нагревательных печах непрерывного действия различного типа.

Наряду с тепловым и температурным режимами определяющее значение для работы этих печей имеет метод транспортирования металла через печь. Толкательные печи широко применяются для нагрева прямоугольной заготовки. В таких печах лежащие на поду и соприкасающиеся друг с другом заготовки задаются и перемещаются в печи при помощи специального механизма – толкателя. Выдача металла из печи может быть торцевой и боковой. При торцевой выдаче функции выталкивателя выполняет толкатель: задавая очередную заготовку в печь, он перемещает все заготовки и выталкивает ближайшую к окну выдачи заготовку. При боковой выдаче применяют специальный выталкиватель. Преимуществом толкательных печей является то, что проталкивание – наиболее простой и дешевый метод транспортирования металла через печь. Основные недостатки данного метода заключаются в следующем:

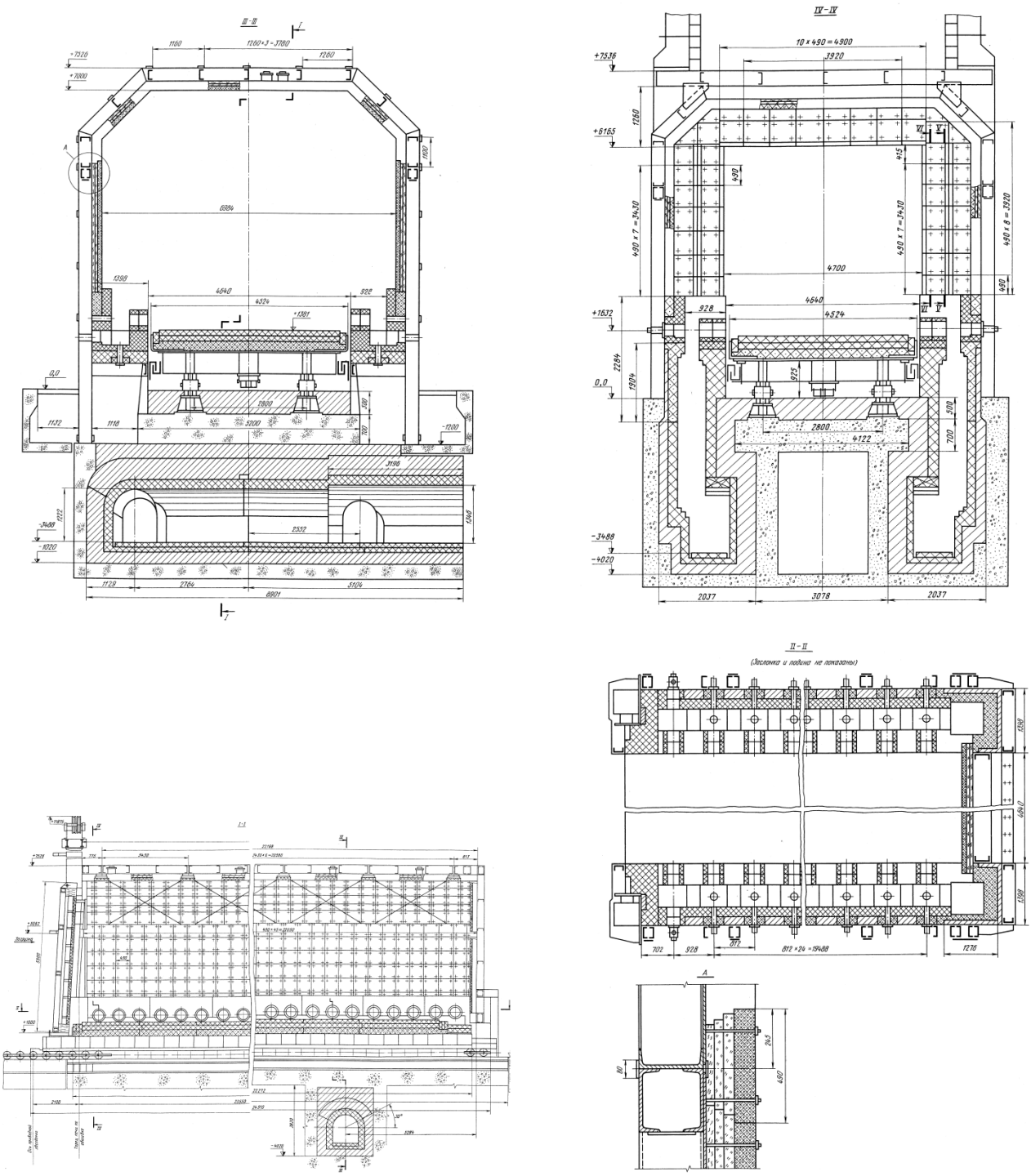


Рисунок 6.24 – Печь с выкатным подом, футерованная волокнистыми огнеупорами

1) при перемещении заготовки трутся друг о друга и о подину, что ухудшает качество поверхности металла;

2) при движении заготовок образовавшаяся окалина осыпается и создается возможность дополнительного окисления;

3) осыпающаяся окалина попадает на под печи, реагирует с материалом пода, в результате чего на подине образуются бугры, препятствующие нормальному проталкиванию металла, и возникает проблема удаления окалины;

4) печь не может быть без специальных мер освобождена от металла в случае остановки стана, ремонта или с целью проведения работы по удалению окалины;

5) современные печи выполняют большой ширины, что крайне затрудняет операцию удаления окалины (осуществляемую фактически вручную);

6) в толкательных печах без взгорбливания возможно проталкивание не более чем 200–250 квадратных заготовок, что ограничивает длину и производительность печей.

Все эти недостатки толкательных печей в условиях непрерывно возрастающей производительности станов и увеличения длины заготовок до 14 м и более привели к необходимости создания печей с механизированным подом, свободных от большинства из этих недостатков (печи с роликовым подом и с шагающим подом или шагающими балками).

Печи с роликовым подом представляют собой весьма совершенную и перспективную конструкцию проходных печей с механизированным подом. Они удачно компонуются в линиях поточного производства, поскольку роликовый под может быть продолжением цехового рольганга. Их широко применяют при термической обработке металла. Использование таких печей для высокотемпературного нагрева перед прокаткой несколько сдерживается недостаточной стойкостью роликов (особенно при необходимом увеличении ширины печей) и большими потерями

тепла с охлаждающей водой.

Печи с шагающими подом или балками также весьма перспективны. Они свободны от недостатков, присущих толкательным печам. В толкательных печах металл в лучшем случае может нагреваться с двух сторон, тогда как в печах с шагающим подом нагрев металла происходит как минимум с трех сторон.

Кроме того, в печах с шагающим подом легко менять режим нагрева, что является большим преимуществом в случае частой смены сортамента нагреваемого металла.

Однако печи с шагающим подом сравнительно дороги: капитальные затраты на их сооружение на 40 - 45% выше, чем для толкательной печи аналогичной производительности. Сравнивая их с роликовыми печами, надо отметить, что масса оборудования печей с шагающими балками на 1 $м^2$ площади пода на 40% больше, чем роликовых печей.

Наиболее ответственной частью футеровки проходных нагревательных печей являются участки монолитного пода, футеровка элементов шагающего пода, т.е. все элементы футеровки, подвергающиеся воздействию окалины при достаточно высокой температуре (1200-1250°С), при которой окалина может активно взаимодействовать с огнеупорными материалами. В силу этого верхние слои таких участков футеровки печи обычно выполняют из хромомагнезита и магнезитохромита – материалов, не взаимодействующих с окалиной. Есть положительный опыт выполнения монолитного пода из электроплавленого корунда (93% $A1_20_3$): к кладке пристает сравнительно небольшое количество окалины, а образующиеся бугры ее легко счищаются. Подину обычно выполняют трехслойной: 1) из хромомагнезита (или другого окалиностойкого материала); 2) из шамота класса Б; 3) из диатомитового кирпича.

В печах с нижним обогревом под также делают

трехслойным (хромомагнезит, шамот, диатомит).

Своды печей выполняют как арочными, так и плоскими подвесными. В качестве огнеупорного материала чаще всего используют шамот класса А и каолиновый кирпич. Стены печей выкладывают в низкотемпературных зонах двухслойными (из шамота класса Б и диатомита), в высокотемпературных зонах – трехслойными (из шамота класса А или каолина, шамота класса Б, диатомита).

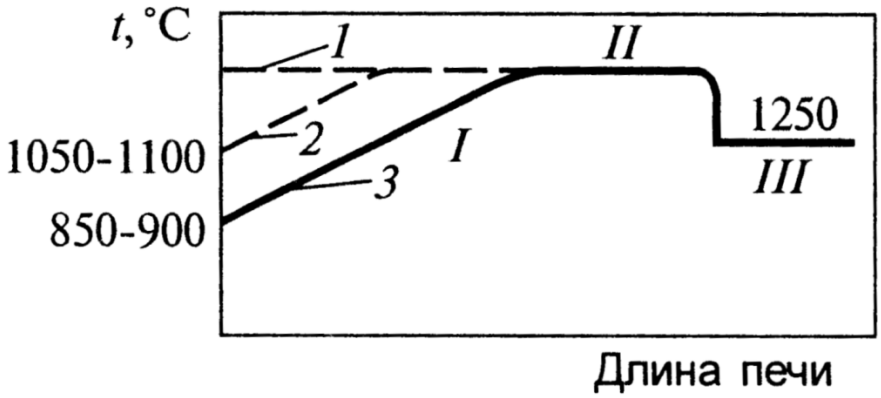
Тепловой и температурный режимы проходных нагревательных печей неизменны во времени. Однако температура по длине печи может быть неизменна, но может и значительно меняться.

Режим работы печей, при котором температура в рабочем пространстве практически неизменна, называется *камерным*. Если температура по длине печи переменна, то такой режим называется *методическим*. Характер изменения температуры раскаленных газов и поверхности нагреваемого металла по длине печи зависит в первую очередь от характера взаимного движения газов и металла, который может быть противоточным и прямоточным. Прямоточный режим допустим практически только при нагреве тонких в тепловом отношении заготовок. Печи с прямоточным движением теплоносителей встречаются сравнительно редко. На противоточном режиме в настоящее время работает подавляющее большинство проходных нагревательных печей.

При нагреве в металле возникают температурные напряжения, которые не должны превышать максимально допустимых. Температурные напряжения пропорциональны перепаду между температурами поверхности и центра металла. Чем выше температура в печи, в которую попадает холодный металл, тем быстрее растет температура поверхности металла. Если нагревается тело массивное в тепловом отношении, то резкое повышение температуры поверхности может быть

причиной возникновения чрезмерного температурного перепада. Поэтому массивные изделия нагревают сравнительно медленно, постепенно (методически), до тех пор, пока они не приобретут необходимых пластических свойств, т.е. до ~500°С.

Этим в основном и вызвано использование методического температурного режима работы печей (рис. 6.25). В зоне *I* (методической) происходит постепенный нагрев металла; в зоне *II* (сварочной) – нагрев металла до тех пор, пока его поверхность не достигнет конечной температуры нагрева; в зоне *III* (томильной) при неизменной температуре поверхности осуществляется выравнивание температуры по толщине металла.



1 – камерный; 2 – промежуточный; 3 - методический

Рисунок 6.25 – Температурные режимы нагревательных печей

Следует одновременно с этим заметить, что температура печи в месте загрузки металла существенно влияет на производительность печи. Вызвано это тем, что чем выше разница температур между печью и металлом, тем больше тепла он поглощает и тем быстрее нагревается. Поэтому нередко в существующих печах, стремясь увеличить производительность, принимают различные меры для повышения температуры в зоне посадки металла выше 850-900°С.

Для нагрева заготовок, которые по своим размерам и свойствам ближе к тонкому телу, чем к массивному (например, слябы), созданы печи, работающие по режиму, занимающему промежуточное положение между камерным и методическим (см. рис. 6.25). Чтобы обеспечить на большем по длине участке печи высокую температуру, выполняют две сварочных зоны, в каждой из которых происходит сжигание топлива. Назначение зоны *III* при этом сохраняется.

При нагреве заготовок, тонких в тепловом отношении, используют камерный режим, при котором поддерживается практически одинаковая температура по всему рабочему пространству. Обеспечение того или иного температурного режима работы печей достигается выбором метода отопления и соответствующего расположения горелочных устройств и дымоотводящих каналов. Для обеспечения камерного режима необходимо горелки (форсунки) и дымоотборные каналы равномерно распределить по длине рабочего пространства.

Методический режим нагрева металла имеет место в тех случаях, когда при встречном движении металла и дымовых газов горелочные устройства располагают на одном конце рабочего пространства в зоне интенсивного нагрева металла, а дымоотборные каналы – на другом, где металл загружается в печь. При этом дымовые газы будут постепенно остывать, отдавая тепло металлу, температура которого будет постепенно повышаться.

Выбор режима отопления определяет, по существу, изменение температуры по длине печи при любом методе транспортировки металла. В крупных проходных нагревательных печах прокатных цехов заводов черной металлургии наибольшее распространение имеют торцевое и сводовое отопление печей. При торцевом отоплении (рис. 6.26) характер изменения температуры по длине печи определяет число и назначение ее зон. Металл поступает в зону наиболее низких температур и,

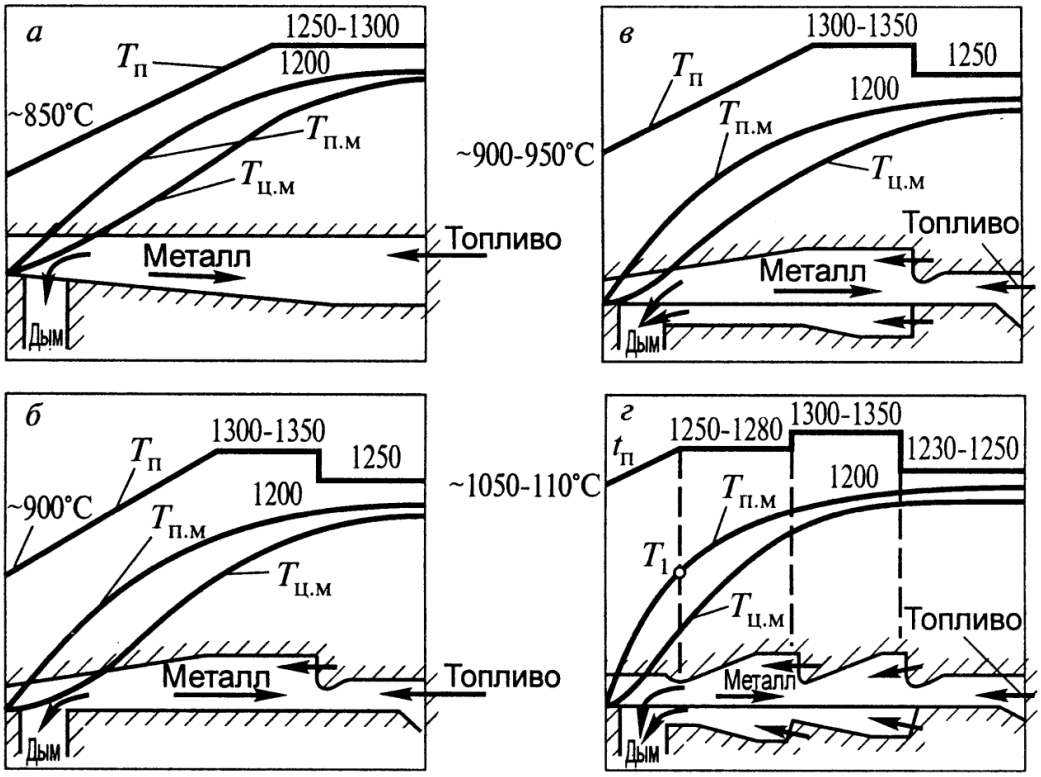
продвигаясь навстречу дымовым газам, температура которых все повышается, постепенно (методически) нагревается. Методические печи по числу зон нагрева металла могут быть двух-, трех- и многозонными с односторонним и с двусторонним нагревом металла. Рассмотрим назначение зон на примере трехзонной печи.

Методическая зона – первая (по ходу металла) с изменяющейся по длине температурой. В этой зоне металл постепенно подогревается до поступления в зону высоких температур (сварочную). Как было отмечено, во избежание возникновения чрезмерных термических напряжений часто необходим медленный нагрев металла в интервале температур от 0 до 500°С в начале нагретой части заготовки.

Вместе с тем методическая зона представляет собой противоточный теплообменник. Находящиеся в состоянии теплообмена дымовые газы и металл двигаются навстречу друг другу. Металл нагревается дымовыми газами, т.е. утилизирует тепло дымовых газов, отходящих из зоны высоких температур. Общее падение температуры дымовых газов в методической зоне весьма значительно. Обычно в зоне высоких температур методических печей температура газов держится на уровне 1300-1400°С, в конце же методической зоны она находится в пределах 850-1100°С. Методическая зона значительно увеличивает коэффициент использования топлива, который достигает 40-45%, тогда как в камерных нагревательных кузнечных печах он составляет 18-20%.

Зона высоких температур или *сварочная* – вторая по ходу металла. В этой зоне осуществляется быстрый нагрев поверхности заготовки до конечной температуры. Температура нагрева металла в методических печах обычно составляет 1150-1250°С. Для интенсивного нагрева поверхности металла до этих температур в сварочной зоне необходимо обеспечивать температуру на 150-250°С выше, т.е. температура газов в

сварочной зоне должна быть 1300-1400°С.



а – двухзонная печь с монолитным подом; б – трехзонная печь с монолитным подом; в – то же с нижним обогревом; г – многозонная печь с нижним обогревом; $T_п$ – температура печи; $T_{пм}$ – температура поверхности металла; $T_{ц\ м}$ – температура центра металла

Рисунок 6.26 – Температурный режим и профиль толкательных печей с торцевым отоплением

Томильная зона (зона выдержки) – третья по ходу металла. Она служит для выравнивания температуры по сечению металла. В сварочной зоне до высоких температур нагревается только поверхность металла. В результате создается большой перепад температур по сечению металла, недопустимый по технологическим требованиям. Температуру печи в томильной зоне поддерживают всего па 30-50°С выше необходимой температуры нагрева металла. Поэтому температура поверхности металла в томильной зоне практически не меняется, а происходит только выравнивание температуры по толщине

заготовки.

Подобный трехступенчатый режим нагрева необходим в тех случаях, когда нагревают заготовки, в которых может возникнуть значительный перепад температур по толщине (>200°С на 1 м толщины металла). Такие печи (с тремя зонами) называют трехзонными методическими печами (рис. 6.26 б, в).

В раде случаев при нагреве тонких заготовок нет необходимости делать выдержку для выравнивания температур по сечению, так как возникший в сварочной зоне перепад температур небольшой. Томильную зону при этом не предусматривают и применяют двухзонные печи – с методической и сварочной зонами (см. рис. 6.26 а).

При нагреве металла перед прокаткой на листовых и сортовых станах иногда применяют методические печи большой длины, имеющие четыре и пять зон отопления, что позволяет повысить общий температурный уровень печи и получить большую производительность. В этом случае делают две или три сварочные зоны, в каждой из которых устанавливают горелки. Это дает возможность повысить температуру в конце (по ходу газов) методической зоны, уменьшить ее длину и увеличить общую длину сварочной зоны, в результате чего достигается более форсированный нагрев металла.

В зависимости от толщины заготовок в методических печах можно применить односторонний или двусторонний их нагрев. При толщине заготовок до 100 мм двусторонний нагрев не рационален, так как интенсивный (ускоренный) нагрев поверхности заготовки в сварочной зоне приведет к удлинению выдержки в томильной камере. Причем увеличение длительности выдержки будет больше, чем выигрыш во времени нагрева в сварочной зоне, достигнутый за счет применения нижнего обогрева. При одностороннем нагреве заготовки движутся по монолитному поду (рис. 6.26 а, б). Для обеспечения двустороннего обогрева на всю длину сварочной и методической

зон делают специальную камеру с собственным отоплением.

При *сводовом отоплении* плоско-пламенные горелки могут располагаться с разным шагом и группируются в зоны, каждая со своим автоматическим регулированием. Благодаря этому можно менять подводимое количество топлива и влиять на распределение температуры по длине печи, обеспечивая необходимый режим нагрева металла. На рисунке 6.27 приведены графики изменения температуры печи и металла, полученные на одной из действующих нагревательных печей со сводовым отоплением, обеспечивающей постепенный (методический) нагрев металла при величине КИТ, лежащей в пределах – 40-47%. Следует подчеркнуть, что при сводовом отоплении можно получить более равномерное распределение температуры по длине и ширине рабочего пространства печи и тем самым повысить интенсивность и эффективность нагрева металла.

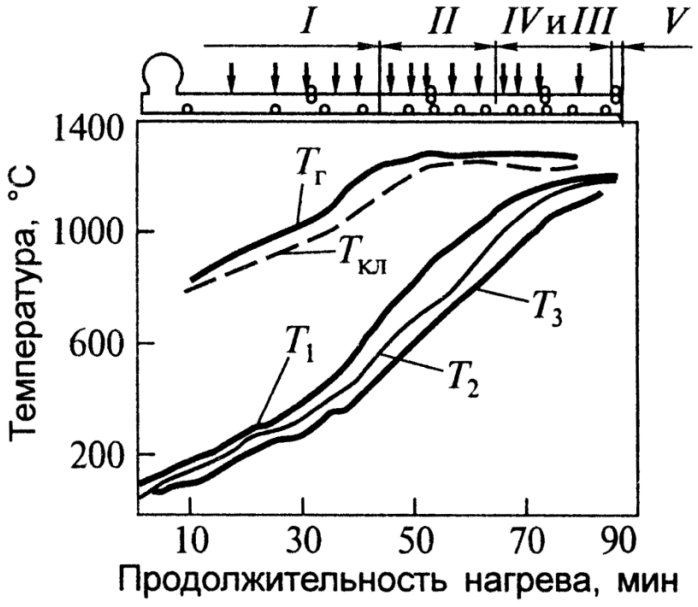


Рисунок 6.27 – Изменение температуры металла T_1, T_2, T_3, температуры газов $T_г$ и $T_{кл}$ печи по зонам I – V в процессе нагрева заготовки сечением 150х150 мм.

Методические толкательные печи до самого последнего времени удовлетворяли требованиям по производительности и

удельному расходу тепла. В последнее время наметилась прогрессивная тенденция к увеличению длины заготовок и, как следствия, к увеличению ширины нагревательных печей, что значительно усложняет их эксплуатацию, особенно удаление окалины с пода печи. Поэтому, несмотря на то, что в прокатных цехах в настоящее время основным типом нагревательных печей являются толкательные методические печи, перспективы их дальнейшего распространения ограничены. Расширяется применение более совершенных печей с шагающими балками, которые могут работать так же, как и толкательные печи, в режиме методического нагрева.

При нижнем обогреве вдоль толкательной печи прокладывают специальные глиссажные (водоохлаждаемые) трубы, по которым движется металл. Из-за охлаждающего действия глиссажных труб в нижнюю часть сварочной зоны печи необходимо подавать больше тепла, чем в верхнюю.

Глиссажные трубы выполняют только в методической и сварочной зонах. В местах соприкосновения заготовки с водоохлаждаемыми трубами металл прогревается хуже и на его поверхности образуются темные пятна. Поэтому в трехзонных печах с нижним обогревом томильная зона предназначена не только для выравнивания температуры по толщине металла, но и для ликвидации темных пятен на нижней поверхности заготовки, и в ней глиссажных труб нет.

В настоящее время предпринимаются попытки использования двустороннего нагрева и в пределах томильной зоны. Для этого используют мощные глиссажные шины особой конструкции, в которых отсутствует возможность охлаждения металла снизу (рис. 6.32).

Выбор конструкции методической печи и графика нагрева зависит от толщины заготовки, пластичности металла в холодном состоянии и теплофизических свойств нагреваемого металла. Ограничение скорости нагрева холодного металла в

интервале температур от 0 до 500°С распространяется в основном на качественные и высоколегированные стали. Этим сталям свойственны относительно низкие коэффициенты теплопроводности и температуропроводности, в результате чего чрезмерная скорость нагрева может привести к недопустимому перепаду температур по толщине заготовки. Скорость повышения температуры металла в начале его нагрева в первую очередь зависит от того, какова температура в начале методической зоны, при которой проводится посад холодного металла. Выбор этой температуры, а следовательно, температурного режима печи и ее конструкции во многом зависит от того, какая начальная температура печи допустима для той или иной марки стали. Существует большое число весьма ходовых марок стали (углеродистые, низколегированные, рельсовые и др.), для которых эта температура практически неограниченна. Однако для ряда других марок стали должны быть введены достаточно строгие ограничения, вплоть до того, что некоторые стали можно помещать в печь, температура которой не превышает 600-650°С. Ограничения подобного рода достаточно четко определены и приведены в соответствующей справочной литературе.

Методические нагревательные печи по сравнению с печами, работающими по камерному режиму, обеспечивают более высокий КПД и более высокий КИТ в рабочем пространстве, что объясняется наличием методической зоны. Если в камерной печи при температуре в рабочем пространстве 1400°С и нагреве металла до 1200°С температура уходящих продуктов сгорания составляет 1350-1400°С, то в методической печи при тех же условиях эта температура составит 850-950°С. Поэтому КПД методических печей может достигать 40-45%. Основными статьями расходной части теплового баланса методических печей являются, %:

Тепло, затрачиваемое на нагрев металла 30-45

Потери тепла с уходящими газами	45-50
То же, с охлаждающей средой	10-15

Конструкцию методических печей выбирают в зависимости от типа стана и вида топлива. Тип стана определяет производительность печей, толщину нагреваемой заготовки, температуру нагрева металла и его сортамент. От вида используемого топлива зависит конструкция горелочных устройств и применение рекуператоров. В таблице 6.5 приведены данные, которые позволяют ориентироваться в выборе конструкции методических печей.

Как было отмечено, при горизонтальном поде квадратные заготовки без взгорбливания проталкиваются через печь, если их общее число не превышает 200. Для увеличения числа заготовок, а, следовательно, и для повышения производительности печи под делают наклонным на 6-8°. При этом угле наклона число заготовок, находящихся в печи, можно увеличить до 240-250. Увеличение угла наклона недопустимо во избежание самопроизвольного сползания заготовок.

Таблица 6.5 – Методические печи для различных прокатных станов

Тип стана	Размер заготовки, мм	Длина заго-товки, мм	Характеристика печей		
			Нагрев	Под	Оптимальное число зон отопления
Мелкосортные, проволочные	60x80 80x80 100x100	9000 – 12000	Односто-ронний	Наклон-ный	2
Среднесортные	150x150	1000 – 12000	Двусто-ронний	Горизон-тальный	3
Среднесортные, крупносортные, листовые	200x200 200x350 350x350	1000 – 12000	То же	То же	≥3

Для достижения требуемой рабочей температуры в печи необходимо, как уже отмечалось, чтобы калориметрическая температура горения составляла 1800°С и более. Подобная калориметрическая температура может быть достигнута при использовании:

1) холодного высококалорийного топлива – газа с теплотой сгорания выше 12,5 МДж/м^3 или мазута. В этом случае утилизация тепла отходящих дымовых газов преследует только одну цель – повысить экономичность работы печи (снизить расход топлива), а для повышения калориметрической температуры подогрев воздуха и газа в данном случае необязательны;

2) холодного газа со средней теплотой сгорания, равной 8,4 МДж/м^3, с подогревом воздуха до 450-500°С и применением горелок любой конструкции – как с предварительным, так и с внешним смешением;

3) газа с низкой теплотой сгорания, т.е. $Q_н^р$=5000÷5800 кДж/м^3, вплоть до чистого доменного газа с подогревом воздуха до 500-550°С и газа до 250-300°С, а также желательно с применением инжекционных горелок, обеспечивающих хорошее смешение топлива с воздухом при наиболее низкой величине коэффициента расхода воздуха α = 1,02 - 1,03.

Рассмотрим одну из печей для мелкосортных станов (рис. 6.28). Это трехзонная печь с нижним обогревом и наклонным подом. Воздух для горения засасывается из атмосферы через расположенный под печью керамический рекуператор из шамотных блоков и систему воздухопроводов. Аэродинамическое сопротивление воздушного пути преодолевается за счет геометрического напора подогретого воздуха, движущегося вверх через рекуператор и воздухопроводы, а также в результате инжектирующего действия горелок. Поэтому утечек воздуха практически нет, а управление тепловым режимом можно автоматизировать.

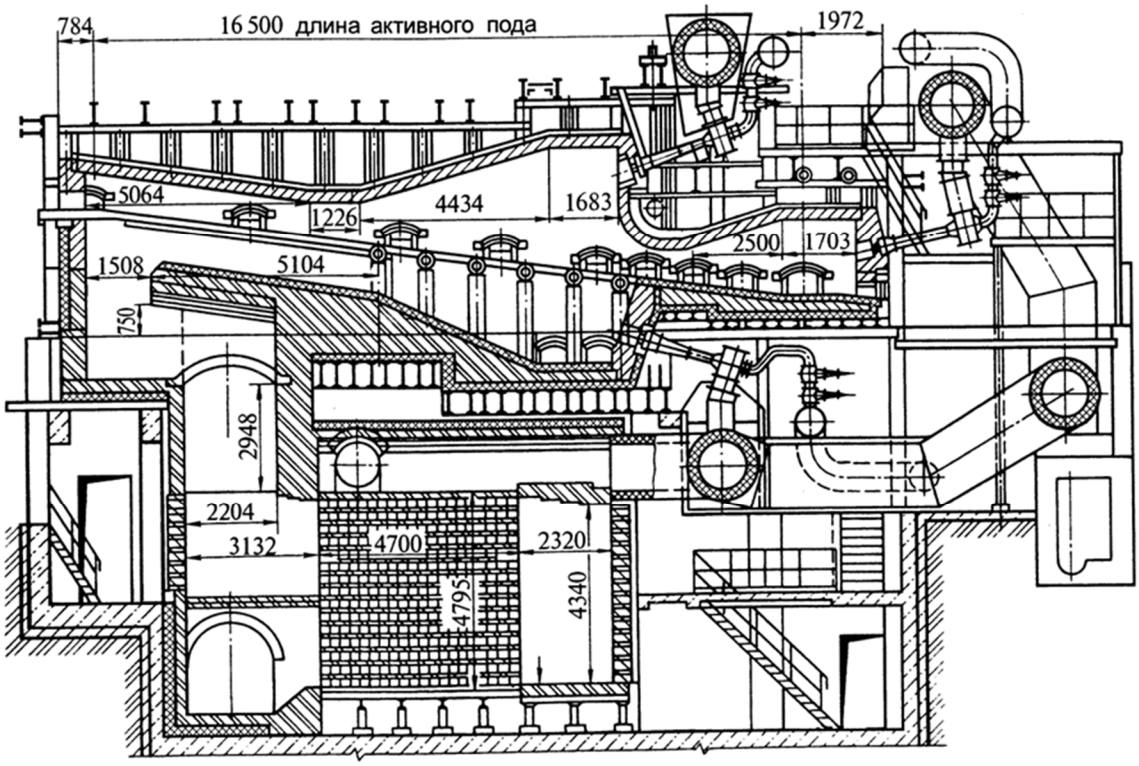


Рисунок 6.28 – Методическая печь, отапливаемая газообразным топливом с низкой теплотой сгорания

У всех методических трехзонных печей весьма схожие характеристики по напряженности активного пода и удельному расходу тепла. Лишь для печей с монолитным подом и с нижним обогревом эти показатели различаются (табл. 6.6).

Таблица 6.6 – Технико-экономические показатели работы методической печи

Тип печи	Толщина заготовки, мм	Напряжение активного пода, кг/(м^2 ·ч)	Удельный расход тепла, кДж/кг
С монолитным подом	100 200	450 500	1700-1900 2100-2500
Трехзонные с нижним обогревом	200	500	2100-2500

Существенное увеличение производительности крупносортных и особенно листовых станов требует, естественно, увеличения производительности пролета нагревательных печей. Решить эту задачу можно двумя способами: 1) увеличением числа печей при прежней интенсивности нагрева; 2) повышением интенсивности нагрева.

В печах большой протяженности и производительности существуют 5 зон отопления (томильная, две верхних сварочных зон и две нижних сварочных зон). Температурный режим может регулироваться в зависимости от задачи нагрева (рис. 6.29).

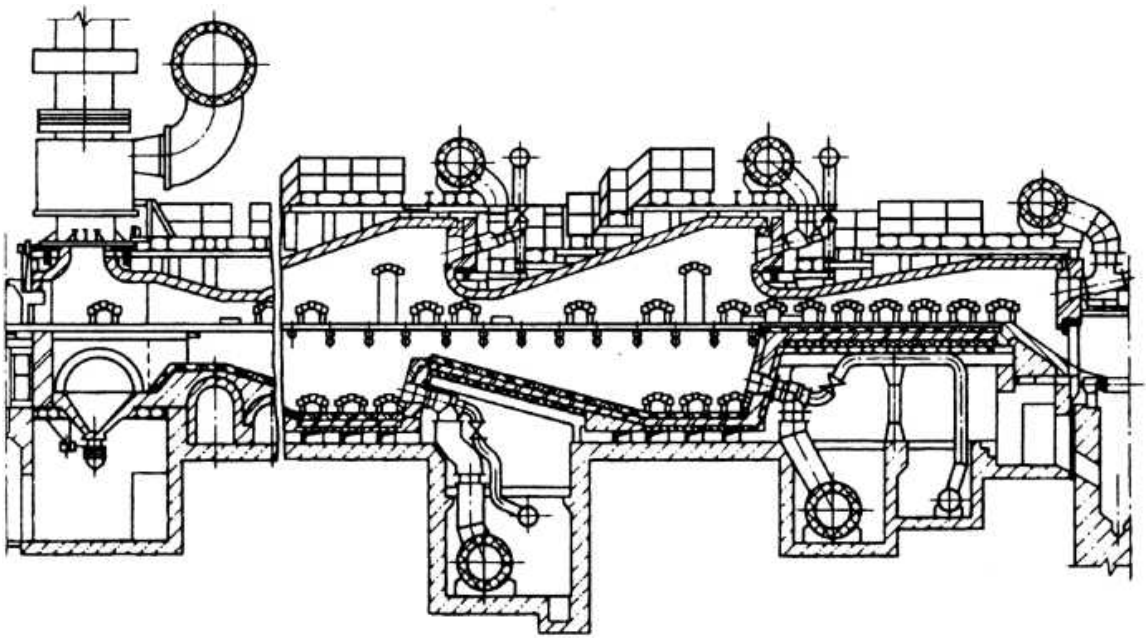


Рисунок 6.29 – Многозонная нагревательная печь

При создании методических печей важно правильно в соответствии с назначением каждой зоны отопления распределить топливо по зонам. В таблице 6.7 приведены данные по обычно применяемому распределению топлива по зонам методических печей.

На рисунке 6.30 представлена методическая нагревательная печь со сводовым отоплением. Нижний обогрев таких печей в настоящее время осуществляется с использованием торцевого

или бокового отопления. В печи подогреваются слябы, полученные на МНЛЗ. Печь работает на природном газе, обеспечивает производительность 150-170т/ч при напряженности активного пода 600-650 кг/(м^2·ч) и удельном расходе топлива около 2100 кДж/кг.

Таблица 6.7 – Распределение топлива по зонам методической печи

Зона отопления	Тепловая мощность зоны, % от общей тепловой мощности печи	
Томильная Верхняя сварочная	30-45 55-70	2 зоны
Томильная Верхняя сварочная Нижняя сварочная	18-25 30-40 35-45	3 зоны
Томильная Две верхние сварочные, каждая Нижняя сварочная	15-20 20-30 25-40	4 зоны
Томильная Две верхние сварочные, каждая Две нижние сварочные, каждая	12-18 18-22 20-25	5 зон

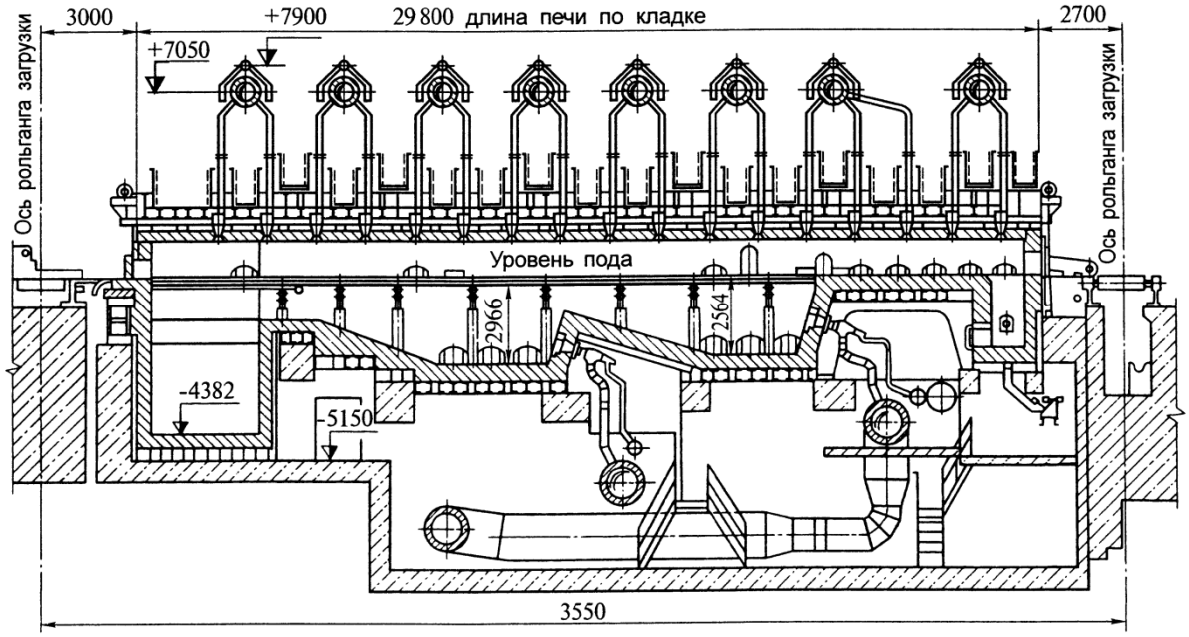
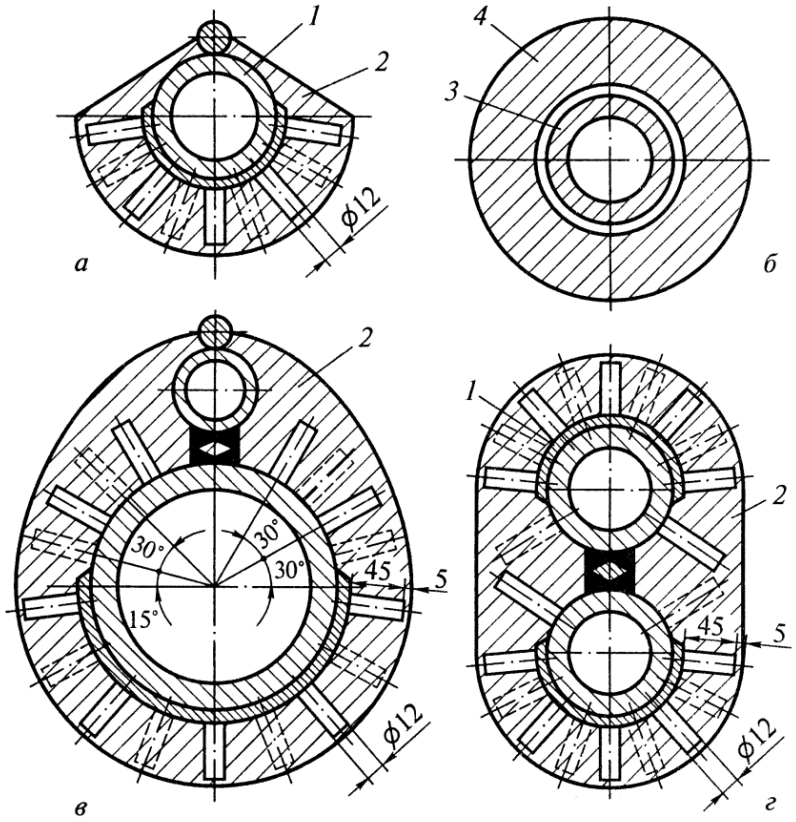


Рисунок 6.30 – Методическая печь со сводовым отоплением

*Глиссажные трубы***.** В методических печах с нижним обогревом на каждый ряд движущихся в печи заготовок устанавливают по две-три продольные глиссажные трубы. Для предохранения труб от истирающего воздействия движущегося металла к ним приваривают металлические прутки. Продольные глиссажные трубы в значительной части методической зоны опираются на продольные огнеупорные столбики. В сварочной зоне продольные глиссажные трубы опираются на поперечные водоохлаждаемые трубы, расположенные на расстоянии 1-1,5 м одна от другой. Концы поперечных труб выведены за пределы печи и прикреплены к вертикальным стойкам каркаса. В середине поперечные глиссажные трубы опираются на вертикальную опору, выполненную из пары водоохлаждаемых труб, футерованных снаружи огнеупорным кирпичом. Чтобы снизить охлаждающее действие глиссажных труб, предусматривают тепловую изоляцию, в качестве которой применяют специальные огнеупорные блоки. Блоки нанизывают на трубу и прикрепляют специальными металлическими шипами (рис. 6.31). Однако стойкость тепловой изоляции глиссажных труб все еще недостаточна.

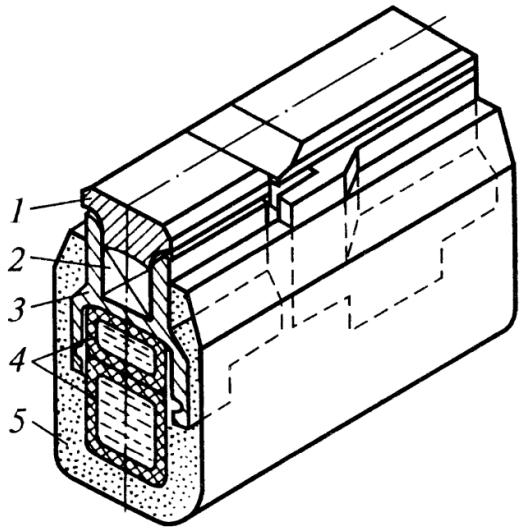
Потери тепла с охлаждающей средой (водяное или пароиспарительное охлаждение) водой при использовании набивной изоляции между шипами по сравнению с потерями при неизолированной трубе снижаются в 2-3 раза, а при навесной изоляции из сегментов или блоков их удается снизить в 4-6 раза. Промышленная проверка срока службы блочной изоляции показала, что для печей, отапливаемых газом, где температура под металлом не превышает 1375°С, применимы набивные и сборные шамотные блоки, срок службы которых в указанных условиях составляет от 9 мес. (в области повышенных температур) до двух лет (в области пониженных температур).



а – продольной трубы; *б* - стежка поперечной трубы: *в* – продольной трубы и опорного змеевика; г – двойной поперечной трубы; 1 – термоблок; 2 – набивка из жароупорного бетона; 3 – стояк поперечной трубы; 4 – фасонный кирпич

Рисунок 6.31 – Изоляция подовых труб

В печах, отапливаемых мазутом, где температура под металлом достигает 1500°С, хорошие результаты показали набивные блоки, изготовленные из магнезитовой (магнезитохромитовой) массы, срок службы которых составляет более 9 мес. Как отмечалось выше, в настоящее время разработаны глиссажные шины особой конструкции, позволяющие и в томильной зоне создать двусторонний подвод тепла к поверхности металла. Подобные шины представлены на рисунке 6.32. Наличие в конструкции керамического бруса предотвращает охлаждающее действие воды на нагреваемый металл.



1 – металлические направляющие, по которым скользит металл; 2 – керамический брус; 3 – металлический корпус для установки керамического бруса и металлических направляющих; 4 – водо-охлаждаемые грубы; 5 – тепловая изоляция

Рисунок 6.32 – Глиссажные шины для обеспечения двустороннего нагрева в томильной зоне

*Угар металла и удаление окалины***.** В нагревательных печах, работающих с открытым пламенем, неизбежно происходит угар (окисление) металла. Количество металла, перешедшего в окалину**,** зависит от основных факторов: состава атмосферы, температуры и времени пребывания металла в печи. Чем больше содержится окисляющих газов (0_2, $S0_2$, $C0_2$, H_20) в атмосфере печи, чем выше температура и больше время пребывания заготовок в печи, тем больше угар металла (обычно составляющий 1,5-2%), который не только вызывает экономические потери, но и серьезно усложняет эксплуатацию печей. В большинстве современных методических печей есть участки, имеющие монолитный под, с материалом которого и взаимодействует окалина, образуя бугры, препятствующие нормальному проталкиванию заготовок. Поэтому необходимо стремиться и к уменьшению угара и к тому, чтобы конструкция печи была приспособлена к надежной работе при неизбежном

угаре металла. Интенсивное увеличение окисления металла начинается с температуры поверхности металла 850-900°С. Поэтому температурный режим печи следует выбирать таким образом, чтобы время нагрева металла с 850-900°С до температуры прокатки (≈1200°С) было как можно короче. Заготовки должны сравнительно медленно без возникновения существенного перепада температур по сечению нагреваться до 850-900°С в зоне предварительного нагрева печи, в которой максимальная температура достигает 1000°С. Затем они попадают в зону ускоренного нагрева с температурой 1350°С, где как можно быстрее должны нагреваться до температуры прокатки. Параметры теплового режима по минимуму окалины определяется путем решения задачи оптимизации.

Удаление окалины и шлака с монолитного пода толкательных методических печей – трудоемкая и тяжелая операция, зачастую выполняемая вручную через боковые окна. Подину чистят как в процессе работы печи, так и в период ремонтов. Для очистки по ходу печи через печь пропускают специальный фигурный сляб. В период ремонта перед чисткой пода печь вручную или при помощи специального приспособления освобождают от металла. В печах с нижним обогревом окалину из нижних зон периодически удаляют через боковые окна.

Печи с шагающим подом и шагающими балками. Строительство печей с шагающим подом обходится значительно дороже, чем толкательных печей аналогичной производительности, однако печи с шагающим подом все шире применяют для нагрева металла перед сортовыми, толстолистовыми и другими станами. Преимущества этих печей перед печами толкательного типа, обусловленные методом транспортирования металла через печь, могут быть разделены на две группы: 1) эксплуатационные; 2) связанные с возможностью обеспечения значительно более высокой интенсивности нагрева

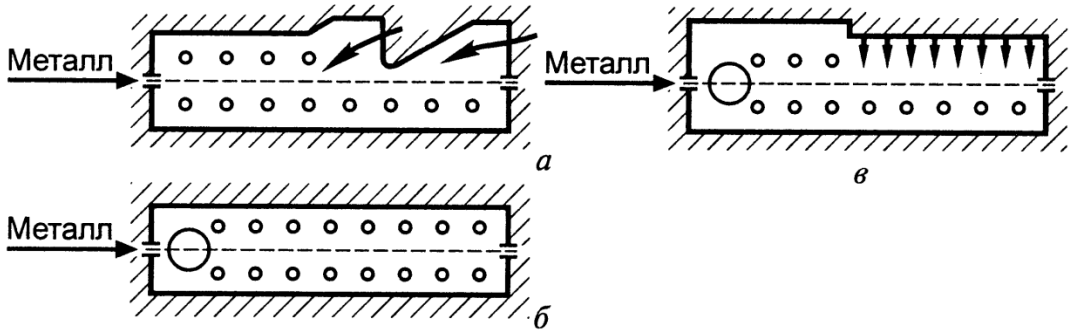
металла.

Эксплуатационные преимущества состоят в ликвидации проблемы уборки окалины из печи; возможности легко удалять металл из печи в случае остановок стана и ремонтов; возможности гибкого регулирования скорости перемещения металла через печь, что очень важно при частом изменении сортамента металла; уменьшении на 30% повреждений поверхности нагреваемых заготовок; значительном (до 0,3-0,5%) снижении угара металла за счет повышения скорости нагрева и отсутствии осыпания окалины.

Наряду с эксплуатационными преимуществами применение шагающего пода позволяет обеспечить практически всесторонний нагрев металла. Это особенно сказывается при нагреве квадратных заготовок, прокатываемых на сортовых станах, и позволяет значительно увеличить интенсивность нагрева металла. В печах с шагающим подом поверхность нагрева квадратных заготовок увеличивается вдвое в сравнении с толкательными печами с нижним обогревом. Так, например, на одной из отечественных печей, обслуживающей мелкосортный стан и нагревающий заготовку 80х80мм, продолжительность нагрева, отнесенная к толщине заготовки, составила 3-4 мин/см, тогда как в толкательных печах эта величина лежит в пределах 6-8 мин/см. Эти цифры соответствуют напряжению активного пода 1200-1500 и 800-1000 кг/($м^2 \cdot ч$).

Тепловой и температурный режим неизменны во времени, так как это проходные печи постоянного действия. Говоря о температурном режиме, следует заметить, что печи подобного типа могут работать как по камерному режиму, так и с переменной температурой по длине печи. Как уже отмечалось, температурный режим печей зависит от характера их отопления, а также от распределения горелок и дымоотводов. В печах с шагающим подом применяют самое разнообразное расположение горелок: торцовое, боковое и сводовое

(рис. 6.33). Наиболее часто пользуются комбинированным расположением горелок: торцовым и боковым или боковым и сводовым. При боковом отоплении ширина печи ограничивается 11-12 м. При большей ширине печи возможно возникновение неравномерности нагрева по длине заготовки (сляба). При сводовом отоплении заготовки греются достаточно равномерно, поэтому целесообразен такой метод отопления, когда нижний обогрев оборудован боковыми горелками, а в зонах верхнего обогрева использованы сводовые горелки. Продукты сгорания топлива отводят на стороне загрузки металла. Печи с шагающим подом работают обычно с переменной температурой по длине.



а – торцевое и боковое; *б* – боковое; *в* – боковое и сводовое

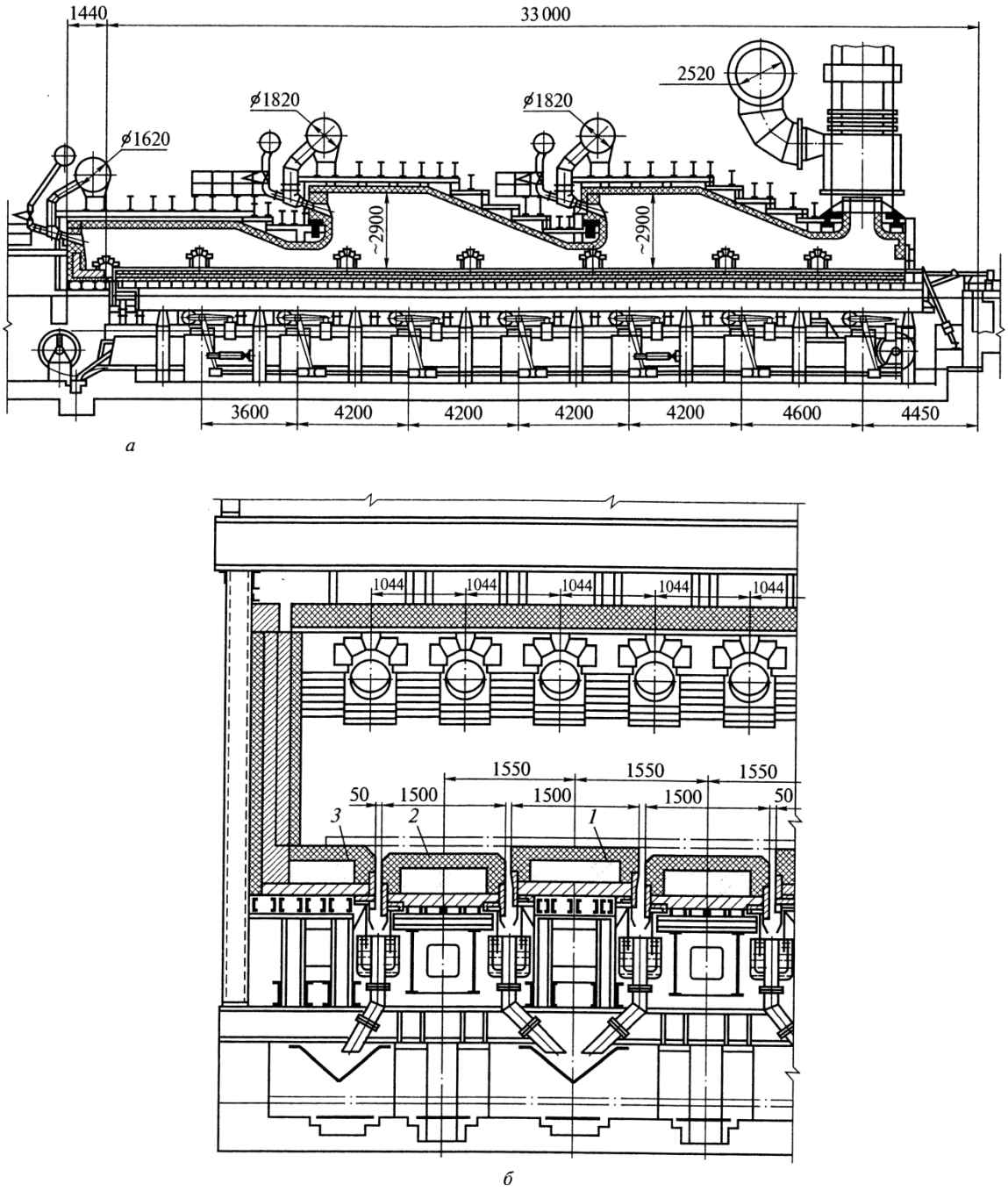
Рисунок 6.33 – Расположение горелок в печах с шагающими балками

В отличие от методических толкательных печей в печах с шагающим подом нагрев заготовок происходит во всех зонах, но интенсивность его в разных зонах может быть различной. Так, например, печь, нагревающая заготовки размером 80х80мм для прокатки на проволочном стане, работает при следующем температурном графике:

Участок печи	Температура, ºС
Начало зоны предварительного нагрева (место загрузки металла)	740-900
Первая по ходу металла зона нагрева	1000-1150
Вторая по ходу металла зона нагрева	1220-1300

Печи с шагающим подом выполняют как без нижнего обогрева (рис. 6.34), так и с нижним обогревом (рис. 6.35). При наличии нижнего обогрева конструкции шагающего пода делаются водоохлаждаемыми, в результате чего на нагреваемых заготовках образуются темные пятна. Чтобы исключить возникновение темных пятен, горизонтальные трубы шагающих балок, несущие металл, расположены не параллельно оси печи, и место контакта их со слябом при продвижении металла в печи постоянно меняется. Возможны следующие варианты конструктивного оформления идеи «шагания» пода: 1) под печи может состоять из трех частей в двух вариантах: неподвижного участка (у стен), шагающих и стационарных балок; неподвижного участка (у стен) и двух групп шагающих балок; 2) под может не иметь неподвижных участков и состоять из двух групп шагающих балок.

При двух группах шагающих балок обеспечивается более высокий темп выдачи заготовок, но стоимость строительства печи возрастает. Щели между шагающими (или шагающими и стационарными) балками полностью перекрыты при помощи кожуха, погруженного в водяной затвор. Водяные затворы смещены относительно щели между балками, а напротив щели предусмотрен короб для гидравлического удаления окалины. Устройство водяных затворов исключает попадание в печь воздуха из атмосферы. В печах без нижнего обогрева стационарные и подвижные балки футеруют (сверху вниз) следующим образом: хромитовая пластинчатая масса; огнеупорный материал, содержащий 35-44 % $A1_20_3$; легковесный изоляционный бетон. Части футеровки балок, примыкающие непосредственно к щели, выполняют из огнеупорного бетона, легко восполнимого при ремонтах. В некоторых случаях для футеровки балок применяют магнезитохромитовые кирпичи.



а – продольный разрез; б – поперечный разрез; 1 – неподвижные балки; 2 – подвижные балки; 3 – керамические бортики

Рисунок 6.34 – Печь с шагающим подом без нижнего обогрева

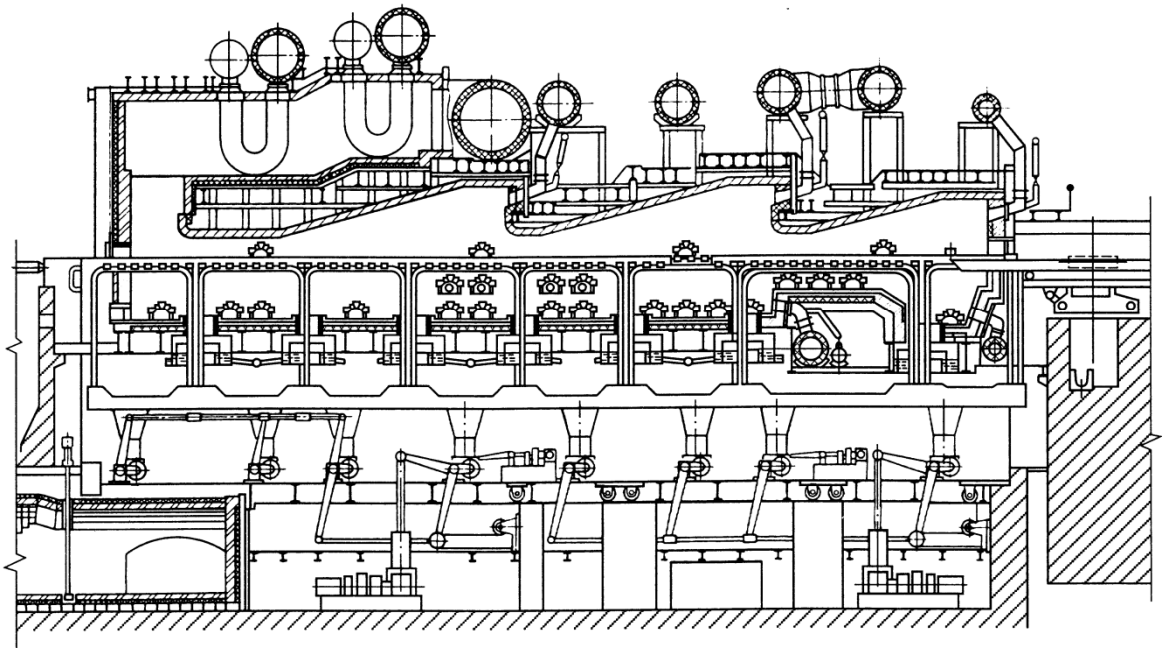


Рисунок 6.35 – Печь с шагающими балками с нижним обогревом металла

Напряжение активного пода в печах с шагающими подом и балками достигает 1300-1400 кг/(м^2·ч), продолжительность пребывания заготовок размером 80х 80 мм в печи составляет 23-30 мин, удельный расход тепла 1800-2000 кДж/кг. Дымовые газы удаляются в дымосборник, расположенный у торца загрузки, а затем поступают в петлевой металлический рекуператор, расположенный ниже уровня пола цеха. Температура подогрева воздуха в рекуператоре около 300°С.

Печи трубопрокатных и колесопрокатных цехов. Для нагрева круглых заготовок перед обработкой на трубопрокатных и колесопрокатных станах требуются печи специальной конструкции, что объясняется формой заготовок. Возможны два принципа транспортирования подобных заготовок: по наклонному поду и вместе с вращающимся подом. Крупные недостатки методических печей с наклонным подом привели к тому, что для нагрева круглой заготовки были созданы высокомеханизированные печи с вращающимся подом и секционные скоростного нагрева.

В печах с вращающимся подом, кроме нагрева круглой трубкой заготовки, удобно нагревать заготовки для колесопрокатных станов. Под в этих печах может быть кольцевым или так называемым тарельчатым. В трубо- и колесопрокатных цехах применяют печи с кольцевым подом. Наряду с кольцевыми печами для нагрева труб и трубной заготовки применяют секционные печи.

Печи с кольцевым подом. На ряде отечественных металлургических заводов работают печи с кольцевым подом (рис. 6.36). Заготовки, лежащие неподвижно на вращающемся поду, вместе с подом проходят все необходимые зоны нагрева и выдаются через окно выдачи, расположенное рядом с окном загрузки. Загрузку и выдачу заготовок осуществляют одновременно двумя кранами. Угол между осями окна загрузки и окна выдачи обычно составляет 28°. Следовательно, заготовка, пройдя 332° полного оборота пода, будет нагреваться до необходимой температуры, т. е. время полного оборота пода, соответствующее 332°, равно продолжительности нагрева заготовки. Под движется толчками, причем при каждом толчке он поворачивается на угол, соответствующий расстоянию между двумя соседними заготовками (10-12°).

Кольцевые печи могут работать на жидком и газообразном топливах. Горелки (форсунки) устанавливают во внутренних и наружных стенах печи. Применяют также и сводовое отопление таких печей. Продукты сгорания можно отбирать в одном месте (у окна выдачи) и в нескольких местах. Расположение горелок и дымоотводящих каналов – весьма важная характеристика кольцевых печей. В зависимости от этого печь может работать по методическому или камерному режиму. При работе по методическому режиму дымовые газы отбираются через два дымоотводящих канала, расположенных один напротив другого около окна загрузки. На подобных печах часто предусматривают промежуточные дымоотводящие каналы. Если эти

промежуточные дымоотборы отключены, то обеспечивается методический режим. Если они включены, то печь работает по камерному режиму.

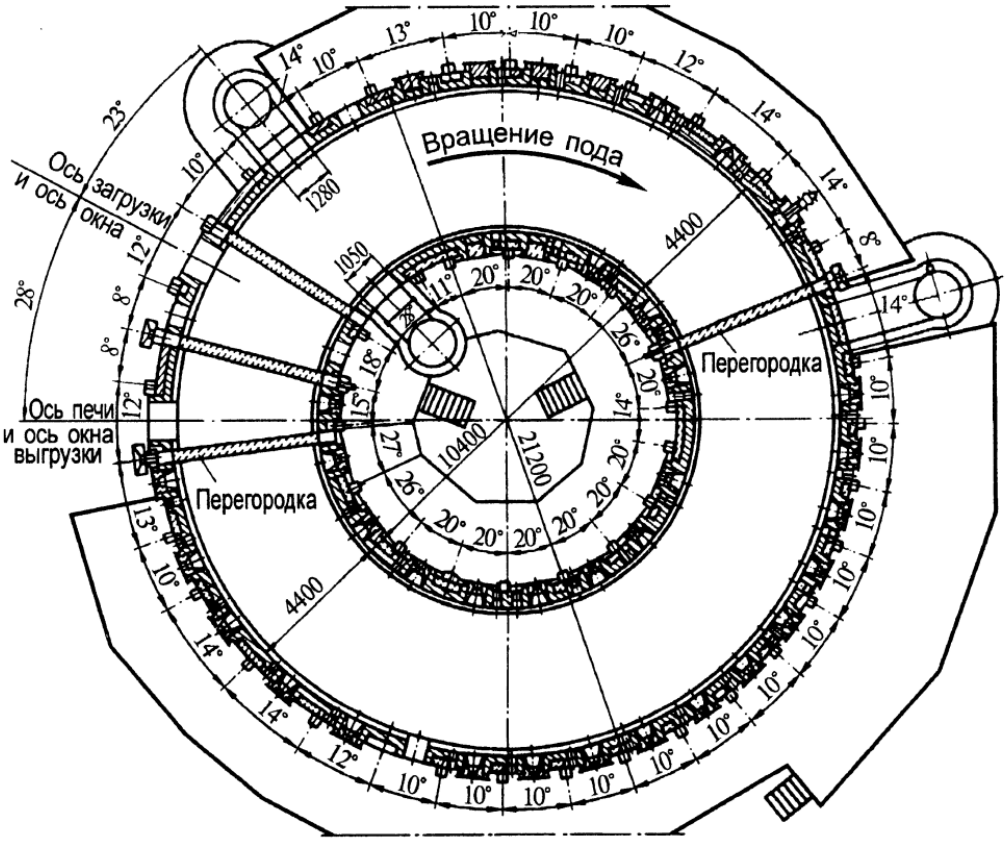


Рисунок 6.36 – Горизонтальный разрез кольцевой печи.

Горелки (форсунки) расположены равномерно по всей окружности печи, но при методическом режиме работы мощность горелок в зонах подогрева металла, нагрева и выдержки должна быть различной и обеспечивать температурный график, свойственный этому режиму. При камерном режиме мощность горелок распределяется равномерно. Методический режим обычно применяют при нагреве легированных сталей.

В соответствии с температурным режимом печь делят на ряд участков, к каждому возможен свой отдельный автоматически регулируемый подвод газа и воздуха. Причем для

поддержания определенных температурных условий на отдельных участках используют подвесные перегородки («занавески»). Между подом печи и «занавеской» остается зазор, необходимый для свободного перемещения заготовок. Перегородки обычно устанавливают в следующих местах:

а)между окном загрузки и выгрузки для устранения охлаждающего влияния загрузочного участка печи на нагретые заготовки;

б) между нагревательной зоной и зоной выдержки для устранения влияния высокой температуры нагревательной зоны на температурный режим зоны выдержки;

в) между нагревательной зоной и зоной подогрева металла для уменьшения теплового излучения из высокотемпературной нагревательной зоны.

При методическом режиме нагрева в кольцевых печах выполняется следующее распределение топлива по зонам, %: на подогревательную зону приходится 25-27, на нагревательную 60-54 и на зону выдержки 15-19.

В соответствии с опытом работы кольцевых печей во избежание оплавления металла оптимальная высота расположения горелок над подом должна составлять ≈ 600 мм. С целью утилизации тепла отходящих из печи продуктов сгорания все отдельные дымоотводящие каналы объединены в одну общую систему дымоходов, которая позволяет установить за печью рекуператоры для подогрева воздуха и в случае необходимости – для подогрева газа.

Кольцевые печи – механизированные и автоматизированные агрегаты, что позволило устранить тяжелый физический труд по кантовке металла. Применение этих печей позволяет без затруднений переходить от методического режима к камерному, и наоборот. Угар в кольцевых печах составляет 0,5-1%, т.е. меньше, чем в печах иных конструкций. Для заготовок диаметром 110-150 мм удельная производительность печей

составляет 250-350 кг/(м^2·ч) при удельном расходе тепла 1670-2500 кДж/кг. Коэффициент полезного действия кольцевых печей при максимальной производительности достигает 30-40%.

Тепловой расчет кольцевых печей можно выполнить так же, как и расчет методических или камерных печей с учетом того, что в кольцевых печах не весь под занят металлом, а следовательно, подина хорошо прогрета и активно участвует в теплообмене, излучая тепло на лежащие заготовки. Установлено, что заготовка удовлетворительно прогревается по сечению. Поэтому нагрев заготовки в таких печах следует рассматривать как двусторонний и брать в качестве расчетного размера радиус заготовки.

Секционные печи скоростного нагрева. Эти печи применяют в трубопрокатных цехах для нагрева перед прокаткой круглой заготовки диаметром до 200 мм и для термообработки (нормализации, отжига) труб различного диаметра. Их также используют для нагрева круглых заготовок при прокатке стальных шаров. Эти печи используют также для подогрева металла между клетями прокатного стана, когда первичного нагрева перед прокаткой недостаточно. Скоростной нагрев металла достигается в результате применения всестороннего обогрева при условии, что температура печных газов и кладки значительно превышает конечную температуру нагрева металла.

Секционные печи состоят из секций, между которыми расположены водоохлаждаемые ролики, для каждого из них предусмотрен собственный привод. Ролики установлены под углом к направлению движения, что обеспечивает вращение нагреваемых изделий. Каждая секция представляет собой хорошо за футерованную небольшую камеру (рис. 6.37) с высокой тепловой нагрузкой. Печи отапливают газообразным топливом.

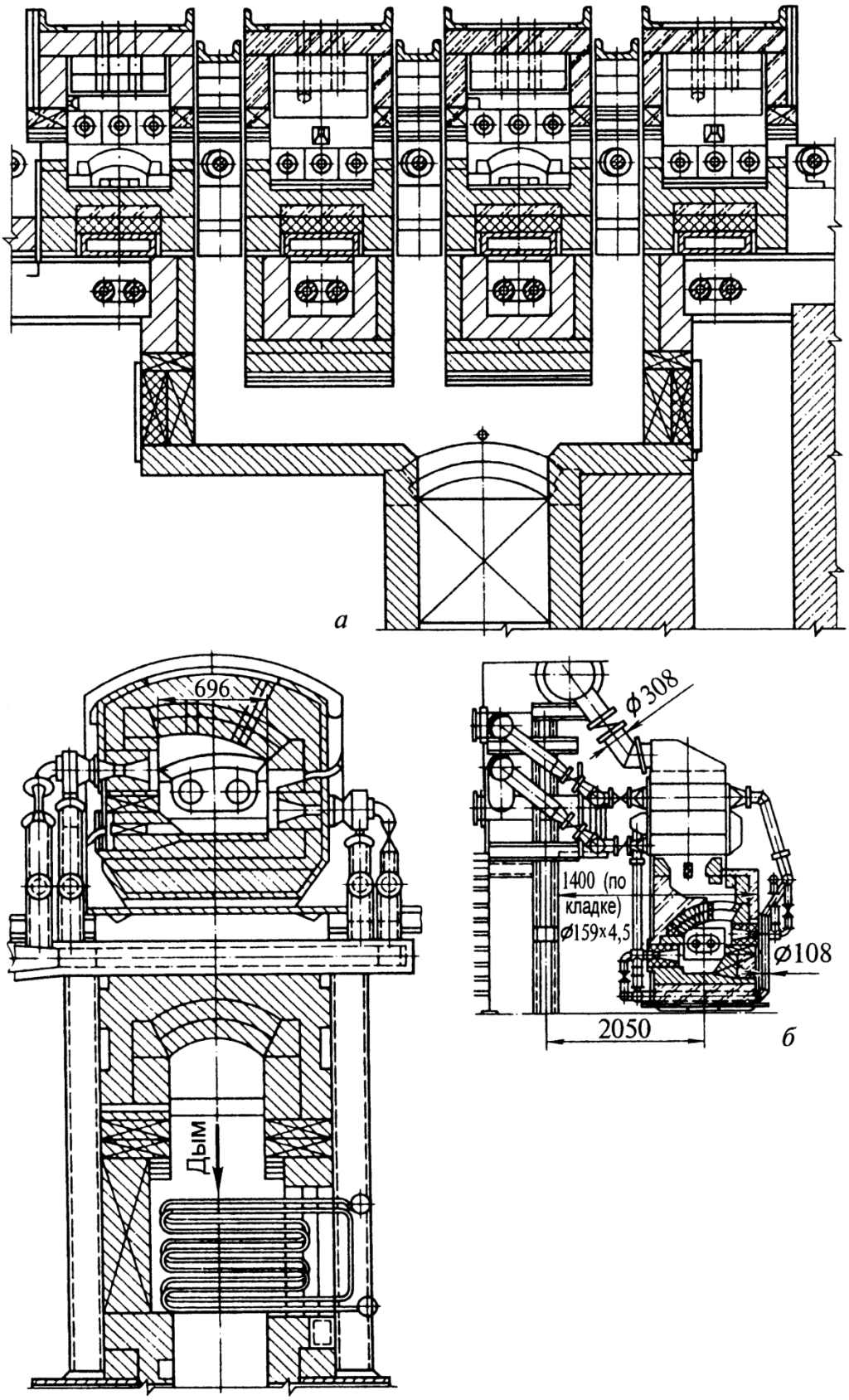


Рисунок 6.37 – Секционные печи с расположением рекуператоров под печью (а) и над печью (б)

В каждой секции размещено 5-6 горелок. Горелки установлены тангенциально, с одной стороны - под металлом, а с другой стороны – над ним. При тангенциальном расположении горелок создается интенсивное движение газов, что приводит к значительному разогреву поверхности кладки и интенсификации конвективного теплообмена. Несколько секций объединены в одну тепловую зону. Тепловая нагрузка в тех секциях, в которые поступает холодный металл, всегда больше, чем в секциях последующих зон.

Секционные печи работают на газе с высокой теплотой сгорания, часто с подогревом воздуха и газа до 300-400°С. Обычно применяют металлические трубчатые рекуператоры или рекуператоры типа «термоблок» с залитыми в чугун трубками. Рекуператоры могут быть установлены под секциями, а также над печью. При установке рекуператоров сверху каждый из них обычно обслуживает одну секцию. При установке внизу один рекуператор обслуживает несколько секций, составляющих одну зону. Более удобна установка рекуператоров под печью, так как в случае выхода одной секции печи из строя ее легче заменить другой, без дополнительных демонтажных операций.

Наиболее эффективно секционные печи работают при температуре секции около 1450-1500°С. Обычно скорость нагрева в секционных печах характеризуется удельным временем прогрева (мин/см толщины), которое для нагрева горячекатаных труб, холоднокатаных труб, круглой заготовки до температуры прокатки составляет соответственно 3-4; 2-2,5 и 1,0-1,2 мин/см. Скорость прохода изделий через печь обычно равна 4-16 м/мин. Печи для отжига холоднокатаных труб обычно состоят из девяти секций и обеспечивают производительность 2,5-4 т/ч. Печи для нагрева заготовок перед прокаткой шаров и труб состоят из 20-35 секций и могут обеспечивать производительность 20-40 т/ч.

6.1.6 Термические печи

Общая характеристика. В прокатных цехах предприятий черной металлургии термической обработке подвергаются сортовой прокат, горячекатаные и холоднокатаные листы, холоднокатаная лента, рельсы и другая продукция. Применяемые виды термической обработки достаточно разнообразны. Наиболее распространенные виды термической обработки приведены в таблице 6.8.

Таблица 6.8 – Виды термической обработки

Обрабатываемая продукция	Виды термообработки
Сортовой прокат	Полный и изотермический отжиг
Горячекатаный лист: -специальная и легированная -сталь толщиной 4 мм и более, малоуглеродистая и низколегированная сталь толщиной 50 мм	Нормализация или закалка с последующим отпуском Отжиг или высокий отпуск
Холоднокатаный лист и лента	Низкотемпературный рекристаллизационный отжиг
Рельсы	Нормализация, изотермическая выдержка, отпуск

Все виды термической обработки проката могут быть разделены на две группы:

1) режимы, связанные со значительными затратами времени на выдержку при определенной температуре и медленным охлаждением (отжиг, отпуск);

2) режимы, связанные лишь с нагревом металла в печи до определенной температуры с последующей выдачей на воздух (нормализация) или в жидкие среды (закалка).

Такое распределение оказывает решающее влияние на выбор типа применяемых печей. При термической обработке

прокатанной стали применяют печи двух типов (садочные и проходные), принципиально отличающиеся друг от друга.

Садочные печи являются периодически действующими агрегатами с переменной во времени температурой. Металл в них загружают на неподвижный под или на выкатную подину и в процессе нагрева он находится в неподвижном состоянии. Загрузка металла осуществляется обычно в полуостывшую печь, и нагрев его происходит вместе с нагревом печи.

Проходные печи – это агрегаты постоянного действия с постоянной температурой во времени и в пределах рабочего пространства (печи камерного типа). В этих печах металл в процессе нагрева перемещается от одного конца печи к другому при помощи специальных механизмов.

Преимущество садочных печей заключается в их универсальности, поскольку в них могут быть обеспечены любые температурные и тепловые режимы. Однако большим недостатком садочных печей является то, что в них не достигается желаемая равномерность нагрева металла и они непригодны для поточного производства. Кроме того, в садочных печах большое количество тепла тратится непроизводительно, на периодический нагрев кладки печи.

Проходные печи более совершенны, так как в них обеспечивается непрерывность, поточность производства и однородность нагрева металла. Работу этих печей можно полностью механизировать и автоматизировать. Непрерывность потока производства позволяет совместить термическую обработку с другими технологическими операциями (очисткой, резкой и др.). Следует отметить, что строительство высокомеханизированных проходных печей требует значительных первоначальных капитальных затрат, которые, однако, впоследствии окупаются.

При осуществлении режимов термообработки, связанных с длительной выдержкой, применение проходных печей

нецелесообразно, так как для обеспечения необходимой производительности термического отделения пришлось бы установить большое число крайне длинных печей. Разумное исключение в данном случае составляют протяжные печи для термообработки холоднокатаной ленты, в которых применяется ускоренное охлаждение.

Большое значение при выборе конструкции термических печей имеет качество получаемого металла. Например, при отжиге ленты в протяжных печах металл получается более жестким. Поэтому, несмотря на то, что протяжные печи являются более прогрессивными агрегатами, для отжига автолиста в рулонах приходится применять и садочные печи колпакового типа. Металл в них охлаждается медленнее и, имея меньшую жесткость, более пригоден для штампования.

При нагреве металла в термических печах обязательными являются равномерность и относительная невысокая скорость нагрева без окисления и обезуглероживания поверхности. Для отопления термических печей используют обычно газообразное топливо. Чтобы обеспечить равномерность нагрева металла, горелки и дымоотборы стараются разместить равномерно по длине рабочего пространства. Температура в термических печах может превышать конечную температуру металла не более чем на 50-70°С. Особое место занимают протяжные печи для нагрева тонкой ленты, в которых создается и поддерживается очень высокая скорость нагрева при значительном перепаде температур.

Сжигание топлива в рабочем пространстве термических печей затруднено, поскольку факел, характеризуемый высокой температурой, может вызвать нежелательный перегрев нагреваемого металла, и температура рабочего пространства бывает порой недостаточна для достижения устойчивого горения топлива. По указанным причинам топки термических печей часто размещают либо вне рабочего пространства или под подом печи

(подподовые топки), либо выносят за пределы печи (выносные топки). Применение подподовых топок позволяет обеспечить необходимую для равномерного нагрева циркуляцию газов.

В зависимости от величины рабочей температуры печи можно разделить на три группы: высокотемпературные, среднетемпературные и низкотемпературные. Высокотемпературные печи (рабочая температура 1100-1150°С) применяют для закалки и высокотемпературного отжига нержавеющих кремнистых и других легированных сталей. При этом топливо сжигают в рабочем пространстве печи.

Среднетемпературные печи (рабочая температура 600-950°С) используют для отжига, высокого отпуска и нормализации углеродистых и низколегированных сталей. В таких печах в зависимости от рабочей температуры сжигают топливо в рабочем пространстве или применяют подподовые и экранированные топки.

Низкотемпературные печи (рабочая температура до 600°С) применяют для низкого и среднего отпуска. В таких печах топливо всегда сжигают вне рабочего пространства, причем часто используют рециркуляцию дымовых газов.

При термической обработке металла используют специальные *защитные атмосферы*, чтобы получить металл с чистой, неокисленной поверхностью (светлый отжиг). Поэтому все существующие конструкции термических печей могут быть разделены на две большие группы: прямого и косвенного нагрева. В печах прямого нагрева металл не отделен от печных газов. Такие печи применяют в том случае, когда допустим контакт между металлом и дымовыми газами, которые оказывают на него окисляющее действие. Обычно металл (лист), нагреваемый в печах прямого нагрева, проходит последующее химическое травление.

В печах косвенного нагрева (муфельных) нагреваемый металл отделен от печных газов. Такой метод нагрева применяют

в тех случаях, когда недопустимо даже малейшее окисление поверхности металла. Различают два принципа отделения металла от печных газов: *муфелирование металла и муфелирование пламени*. В первом случае садку металла закрывают специальным металлическим колпаком – *муфелем* (съемным или стационарным). Под муфель подают специальную защитную атмосферу, препятствующую окислению металла. Тепло от печных газов передается муфелю, а от него – нагреваемому металлу. Во втором случае топливо сжигают в *радиантных трубах*. Продукты сгорания в рабочее пространство печи не попадают, а пройдя по трубе, уходят в атмосферу. В этом случае печь также заполняют защитной атмосферой во избежание окисления металла. Как при муфелировании металла, так и при муфелировании пламени необходима высокая степень герметизации, чтобы избежать попадания в печь атмосферного воздуха. Муфелирование применяется как в садочных, гак и в проходных печах.

Печи прямого нагрева обычно применяют для нормализации (закалки) и отжига сортового проката и горячекатаного листа. Печи косвенного нагрева используют для светлого отжига холоднокатаного листа, ленты и других видов проката.

Современное металлургическое производство является высокомеханизированным и автоматизированным. В полной мере это относится и к термическим печам, степень механизации которых непрерывно повышается. Садочные печи оборудованы выкатными подинами, специальными загрузочными машинами, кранами. Проходные печи для транспортирования металла через печь снабжены шагающим подом, роликовым подом, специальными конвейерами.

Печи для термической обработки сортового проката. Наиболее распространенным видом термической обработки сортового проката является отжиг с целью проведения полной фазовой перекристаллизации, которая обеспечивает получение

необходимой твердости и оптимальной структуры, создающих наилучшие условия для обработки стали резанием. Отжиг стали, как известно, состоит из трех этапов: нагрева до заданной температуры, выдержки при температуре нагрева, охлаждения по тому или иному режиму.

Температура нагрева зависит от состава стали и ее выбирают таким образом, чтобы она на 20-40°С превышала положение верхней критической точки Ac_3. Для сталей наиболее распространенных типов применяют следующую температуру нагрева, °С:

Шарикоподшипниковая	780-820
Инструментальная углеродистая	745-820
Инструментальная легированная	730-880
Быстрорежущая	880-900

Скорость достижения конечной температуры нагрева не ограничивается, но обычно она составляет 100°С/ч. Время выдержки выбирают таким образом, чтобы успели завершиться все те превращения, которые являются целью термической обработки. Строго говоря, выдержку следует проводить после выравнивания температуры по толщине садки металла. В садочных печах выравнивание температуры садки наступает после 10-12 ч с момента начала нагрева. После этого проводят выдержку в течение 2-3 ч.

Скорость охлаждения металла при проведении отжига лимитируется только до 550-600°С, чтобы все превращения аустенита были закончены в перлитной области. Это охлаждение обычно осуществляется со скоростью 20-30°С/ч. Таким образом, весь цикл отжига сортового проката занимает 18-24 ч.

В некоторых случаях сортовой прокат подвергают нормализации с нагревом до температуры на 30-50°С выше точки $\mathbf{Ac_3}$ с последующим охлаждением на спокойном воздухе.

Конструкция печей. Для отжига чаще всего применяют садочные печи с выкатным подом и с загрузочной машиной (с внешней механизацией). Кроме того, иногда используют колпаковые печи с радиационными трубами или без них с защитной атмосферой. Для нормализации применяют проходные печи с шагающим подом, конвейерные и роликовые.

Садочные печи. Некоторые время наиболее были распространены печи с выдвижным подом (рис. 6.38). В эту печь металл загружают при помощи подвижной тележки и нагревают вместе с печью. Масса садки печей с выдвижным подом изменяется в очень широких пределах и составляет до 2 т/м^2 площади пода. Печь обычно отапливают газообразным топливом, для этого предусмотрено два ряда горелок, расположенных в шахматном порядке. Дымовые газы удаляются в боров через шесть отводящих каналов, расположенных попарно в середине и по концам печи. Специфическим недостатком печей с выкатным подом является то, что при выкатывании подины теряется много тепла.

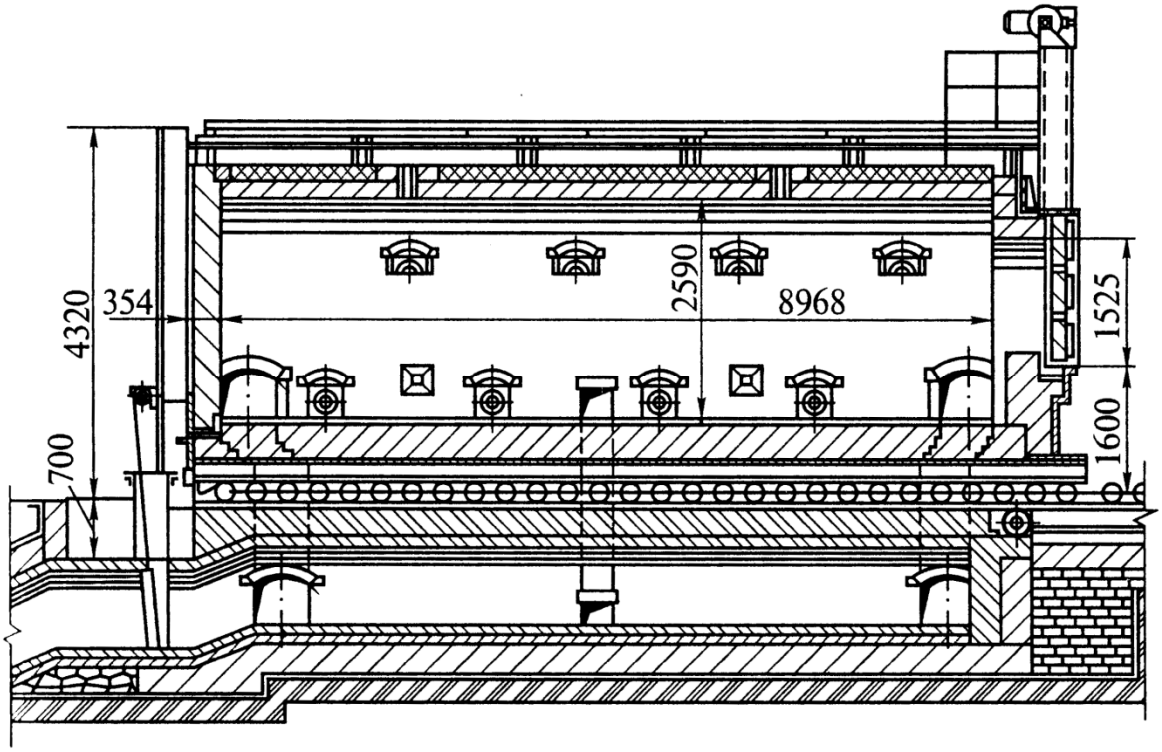


Рисунок 6.38 – Термическая печь с выдвижным подом.

С целью устранения этого недостатка для отжига сортового проката применяют печи с механизированной загрузкой металла (рис. 6.39). Печь оборудуется подподовыми топками, чаще всего ее отапливают смесью коксового и доменного газов с теплотой сгорания 7500-8300 кДж/м^2 при помощи горелок типа «труба в трубе».

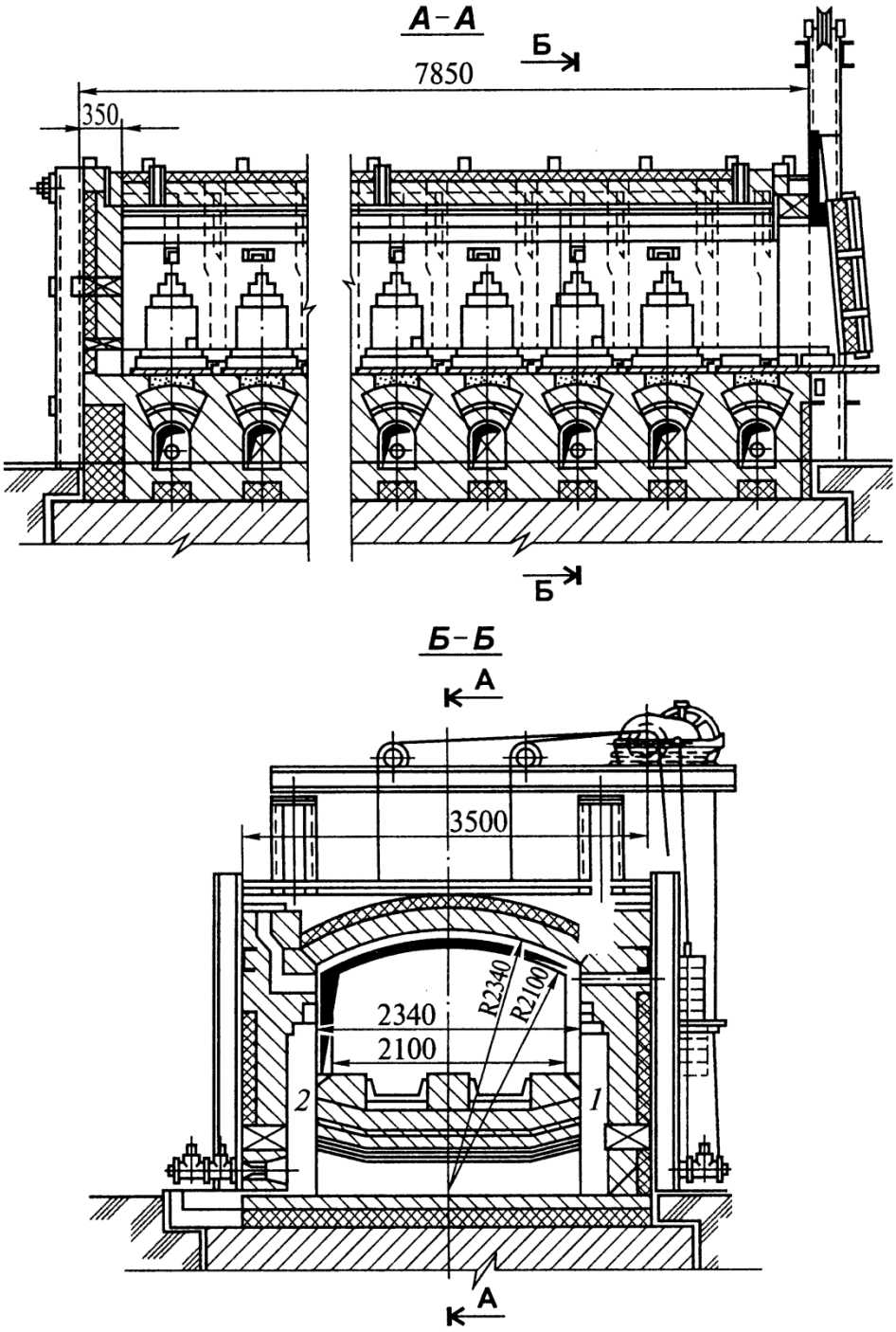


Рисунок 6.39 – Термическая печь с подподовыми топками.

Характер движения газов в рабочем пространстве определяется наличием подподовых топок. Для удаления дымовых газов из рабочего пространства печи в стенках выполнены специальные каналы. Масса садки печей составляет 15-20 т. Металл загружают в печь при помощи специальной машины.

Отжигу в рассматриваемых печах обычно подвергают круглые заготовки диаметром 30-60 мм или квадратные сечением 120-180мм. Между отдельными пакетами металла помещают специальные прокладки, что способствует циркуляции газов внутри садки и повышает равномерность нагрева. В печах с механизированной загрузкой применяют изотермический отжиг с нагревом до 780°С и охлаждение до 650°С с выдержкой при этой температуре.

Возможны два метода проведения этой операции.

1. Всю операцию проводят в одной печи. Металл нагревают до 780°С, а затем вместе с печью его охлаждают до 650°С и выдерживают при этой температуре. Для ускоренного охлаждения через горелки можно продувать воздух.

2. Операцию проводят в двух печах. Металл нагревают до 780°С в одной печи и пересаживают для выдержки при 650°С в другую печь. В этом случае на четыре печи для нагрева необходима одна печь для изотермической выдержки.

Второй метод более рационален, поскольку нагревательная печь, а также печь для выдержки, постоянно нагреты до необходимой температуры и периодически не охлаждаются (до 400°С и ниже). Это положительно сказывается на работе футеровки и горелок печи и снижает удельный расход тепла. Производительность при втором методе также возрастает и составляет 800-900кг/ч на каждую печь, тогда как при работе по первому методу на печь приходится 600-700кг/ч.

В садочных печах, как в печах периодического действия, значительное количество тепла тратится на нагрев кладки. Для

таких печей характерно, что на нагрев металла расходуется 17-18% тепла, унос с продуктами сгорания составляет 54-56% и потери кладкой обычно равны 18-19%. Иначе говоря, тепло, теряемое кладкой, равновелико полезному расходу тепла.

Футеровку термических печей выполняют обычно двухслойной: внутренний слой из шамота класса Б, наружный – из теплоизоляционного диатомового кирпича.

Садочным печам присущи следующие серьезные недостатки:

- непостоянный во времени температурный режим, отрицательно сказывающийся на равномерности нагрева металла;
- высокий удельный расход топлива, вызванный периодическим нагревом кладки печи;
- сложность автоматического регулирования теплового режима печи;
- непригодность для высокопроизводительного поточно-массового производства.

Однако эти печи пока являются наиболее приемлемыми агрегатами для выполнения таких операций термообработки, которые связаны со значительными выдержками и замедленным охлаждением. Для снижения потерь тепла, связанным с периодическим нагревом кладки, в последнее время все более широко применяют *волокнистые огнеупорные материалы*.

Проходные печи. Применение проходных печей позволяет обеспечить более совершенный метод нагрева металла. Для термической обработки сортового проката применяют непрерывные (постоянного действия) печи прямого нагрева трех конструкций: с шагающим подом, с роликовым подом и конвейерные.

В печах с шагающим подом, применяемых для термической обработки, температура по длине печи чаще всего постоянна. В печах для нормализации иногда предусматривают по длине две зоны: нагрева до 900°С и охлаждения до 300-400°С. Обычно

температура печи составляет около 1000-1050°С. Металл нагревается до 900~950°С. Печи отапливают холодным газообразным топливом. Горелки расположены равномерно по всей длине, дымовые газы удаляются из печи под зонт через рабочие окна и специальные, выполненные в своде, каналы. Печи с шагающим подом, предназначенные для термообработки, обеспечивают удельную производительность около 400-450кг/(м^2 ·ч) при удельном расходе тепла около 2100 кДж/кг.

Наиболее широкое распространение для термической обработки приобретают печи с роликовым подом.

В конвейерных печах через рабочее пространство проходит цепной конвейер, транспортирующий металл. Конвейерным печам присущи серьезные недостатки, в силу которых в черной металлургии эти печи применяют крайне редко. Главными недостатками являются:

- значительный вынос тепла из рабочего пространства печи элементами цепей, в результате чего увеличивается удельный расход тепла;

- недостаточный прогрев металла в местах соприкосновения с цепью;

- недолговечность цепей.

Печи для термической обработки горячекатаных листов. Методом горячей прокатки обычно производят листы толщиной выше 1,5 мм. Во многих случаях горячекатаные листы проходят термическую обработку. Толстые горячекатаные листы малоуглеродистых и низколегированных сталей подвергают чаще всего неполному или изотермическому отжигу, а иногда высокому отпуску. Неполный отжиг выполняется при нагреве стали до температур, лежащих между точками Ac_1 и Ac_3 и преследует цель повышения вязкости стали и снижения пределов текучести и прочности. Температура наименьшей устойчивости аустенита лежит на 150-200°С ниже равновесной точки Ac_3. В практических условиях температуру выдержки металла при

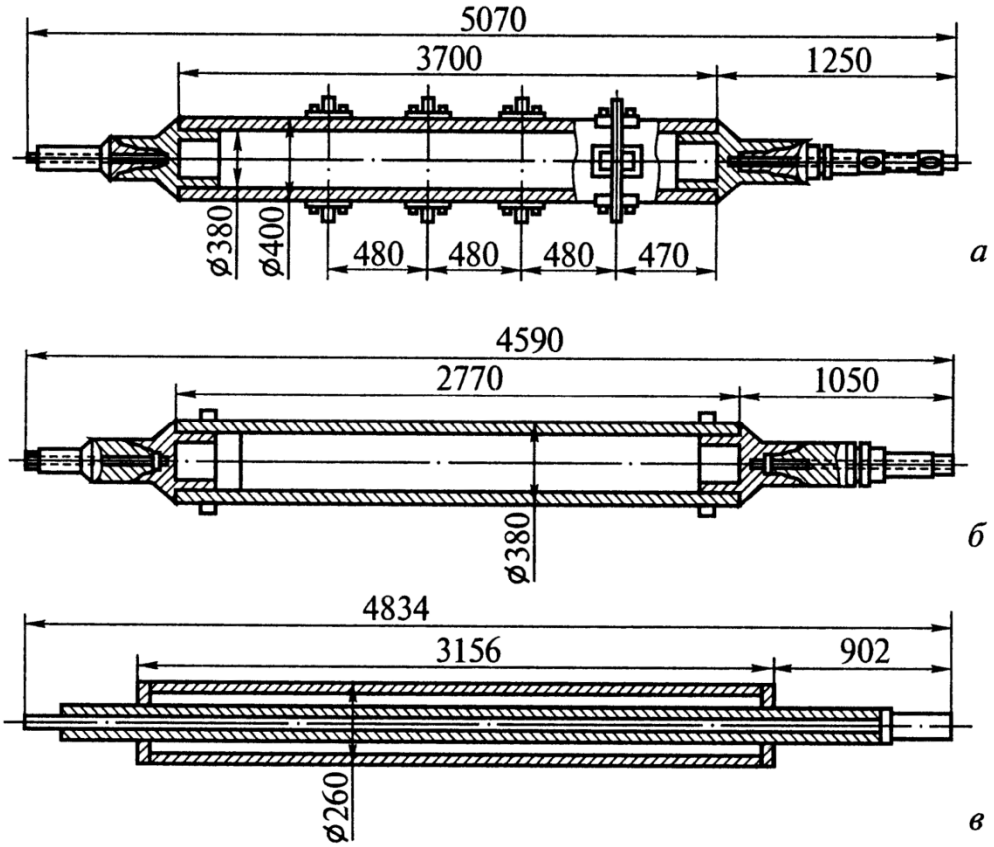
изотермическом отжиге берут на 100-150°С ниже точки Ac_1. Время выдержки обычно составляет 4-6 ч. Кроме указанных видов термообработки, горячекатаные листы проходят также нормализацию.

Конструкции печей. Для термообработки горячекатаных листов применяют садочные колпаковые и проходные, главным образом роликовые, печи.

В колпаковых печах осуществляют чистый отжиг металла, который нагревается под муфелем, с защитной атмосферой. Печи подобного типа применяют при производстве холоднокатаного листа и ленты, поэтому они рассмотрены ниже.

В печах с роликовым подом, широко применяемых для нагрева листов, сорта, рельсов, бунтов проволоки, металл прямо с рольганга поступает на ролики печи, вращающиеся по несколько штук от одного привода или от индивидуальных приводов. Скорость вращения роликов может быть различной. Ролики обычно выполняют из жаропрочной стали (например, содержащей 20 30 % Ni и 20-25 % Сг).

Конструкция роликов зависит от назначения и температуры рабочего пространства печи. В печах для термообработки тонкого листа применяют ролики с дисками (рис. 6.40). Диски, располагаемые в шахматном порядке, заходят друг за друга и препятствуют попаданию листа под ролики. Печи для толстого листа (рельсов, сорта) с рабочей температурой 800-1000°С оборудуют роликами с неводоохлаждаемой бочкой. Для температуры печи 1000-1200°С ролик выполняют с водоохлаждаемым несущим валком и укрепленной на нем жаропрочной бочкой. Пространство между бочкой и валом заполняют теплоизоляцией (шамотным или диатомитовым порошком).



а – с дисками; б – с неводоохлаждаемой бочкой; в – с водоохлаждаемым валом

Рисунок 6.40 – Конструкция роликов

Роликовые печи (рис. 6.41 и 6.42) в зависимости от их назначения делают различной ширины. Правильный выбор ширины роликовой печи очень важен, так как, чем шире печь, тем большую нагрузку испытывают ролики. В работающей печи нельзя останавливать вращения роликов во избежание их прогиба. Поэтому длина роликовых печей всегда больше суммарной длины листов, загружаемых в печь. В этом случае в процессе нагрева необходимо непрерывное вращение роликов, осуществляемое перемещением листов то немного вперед, то немного назад (режим «качания»).

Роликовые печи обычно отапливают различным газообразным топливом; горелки располагают в боковых стенах печи выше и ниже уровня роликового пода. Для обеспечения

более равномерного нагрева широких листов горелки устанавливают и на своде печи.

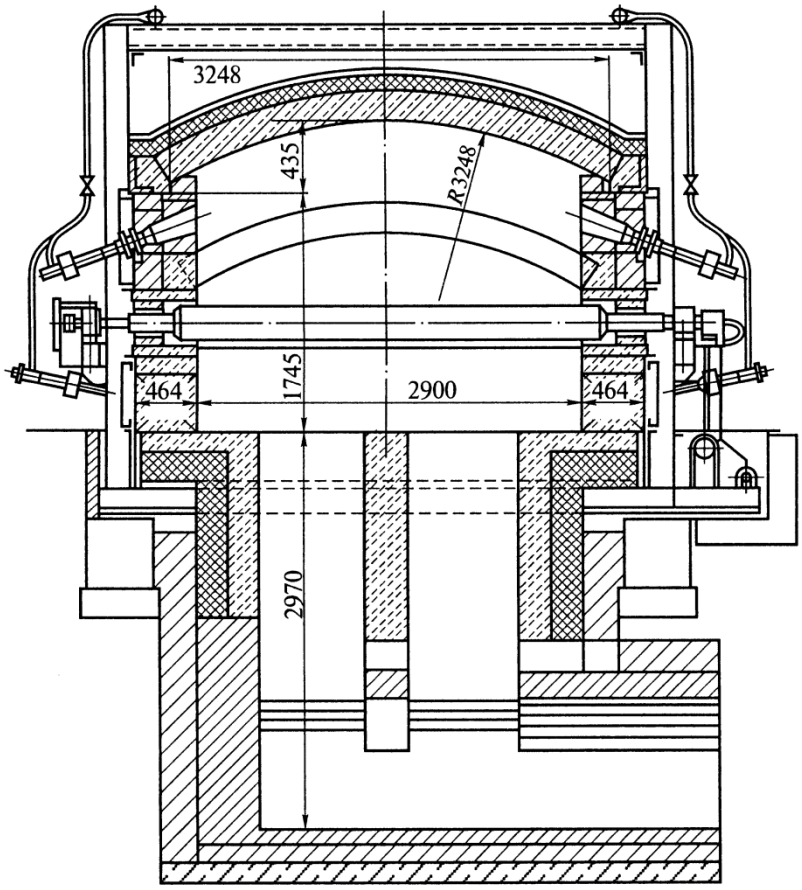


Рисунок 6.41 – Печь с роликовым подом

Производительность роликовых печей колеблется от 4-5 до 40 т/ч при удельной производительности около 250 кг/(м^{2}ч) и удельном расходе тепла 3300-5000 кДж/кг.

Роликовые печи по сравнению с конвейерными и печами с шагающим подом обладают рядом преимуществ:

1) наилучшим соответствием поточному производству, так как роликовый под может служить продолжением цехового рольганга;

2) отсутствием подсоса холодного воздуха, увеличивающего окисление металла;

3) скоростью и равномерностью нагрева, которые выше, чем в печах других типов.

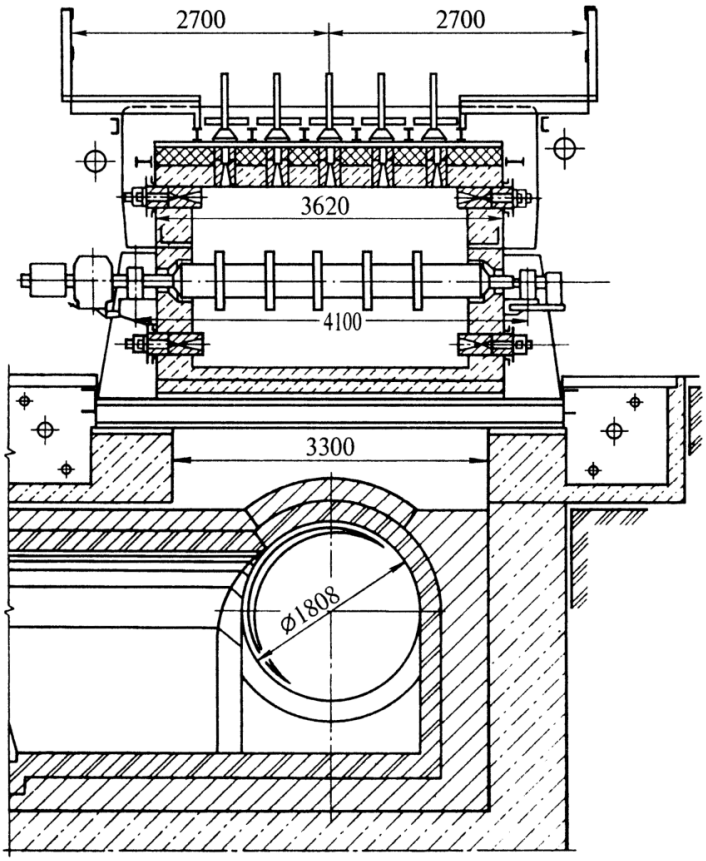


Рисунок 6.42 – Печь с роликовым подом для нагрева широких листов

Одним из вариантов термообработки листов в роликовых печах является работа печей в технологическом потоке листопрокатного стана (рис. 6.43). После прокатки в чистовой клети и резки листы шлеппером передаются к роликовым печам и загружаются в горячем состоянии, т.е. при этом сохраняется тепло прокатного нагрева. На толстолистовых станах толщина листа может сильно отличаться (например, от 5 до 50 мм), то и температура посада листов в роликовые печи различна (чем тоньше лист, тем больше он охлаждается при перемещении его от стана до печи). По технологии термообработки возможно ограничение температуры посада (например, не более 500°С), и в этом сличает листы большой толщины дополнительно охлаждаются перед резкой.

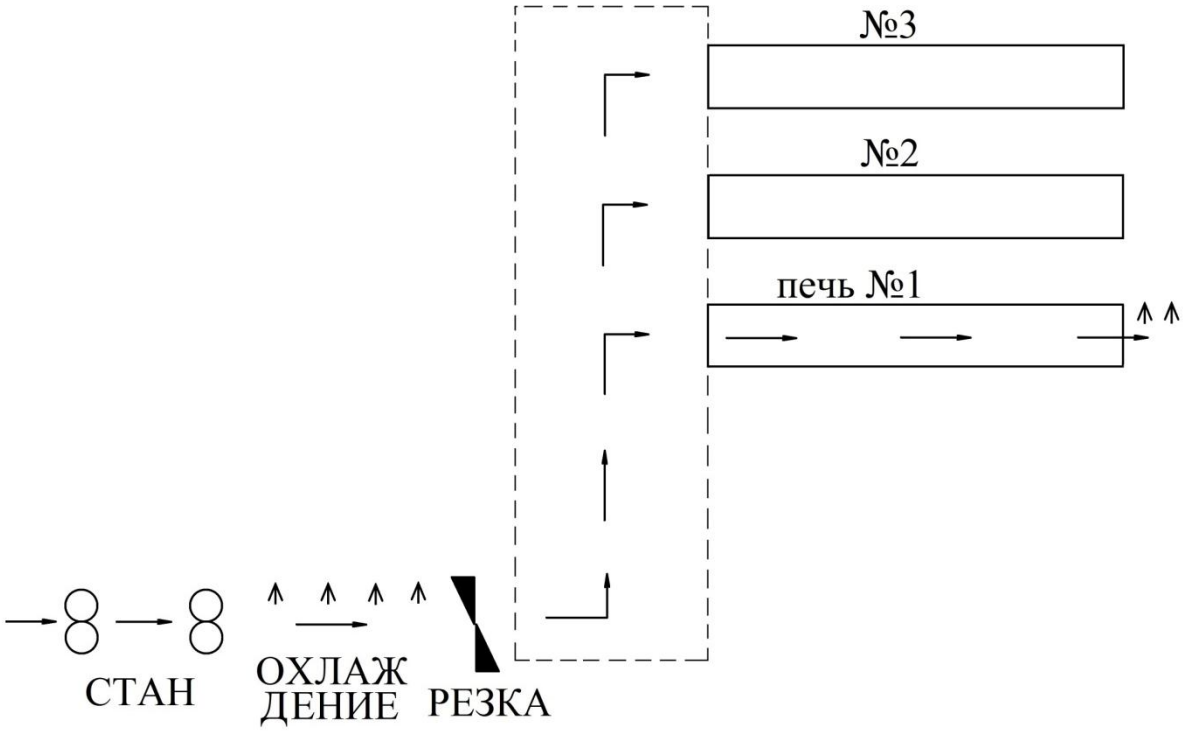


Рисунок 6.43 – Роликовые печи в технологическом потоке стана

Роликовые печи в технологическом потоке работают с двумя скоростями роликового пода: постоянной транспортной в зоне загрузки и выгрузки и переменной технологической (например, $w_{техн} = 1 \div 30$ м/мин) . Это значит, что перед загрузкой необходимо освободить в зоне загрузки место длиной «а» (рис. 6.44), а после выгрузки в зоне выгрузке освобождается место длиной «а», на которое медленно, с технологической скоростью заходит очередной лист. Это также значит, что часть длины печи в зоне загрузки и выгрузки не занята листом, а, следовательно, используется не вся длина печи, и возникает проблема с определением текущей часовой производительности печи. Производительность любой печи рассчитывается как отношение массы металла ко времени пребывания:

$$P = \frac{E}{\tau}, \frac{т}{ч}. \qquad (6.23)$$

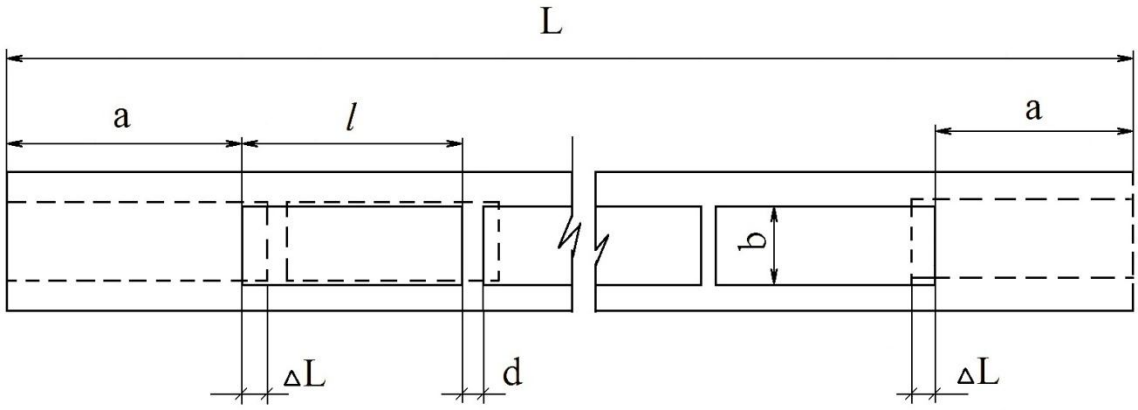


Рисунок 6.44 – Расположение листов в печи при загрузке и выгрузке

Масса садки для проходной печи, которой является роликовая печь, определяется по формуле

$$\mathbf{E = L_{акт} \cdot b \cdot \rho,} \qquad (\mathbf{6.24})$$

где $\mathbf{b}$ – ширина листа, м;

$\boldsymbol{\rho}$ – плотность стали, т/м^3 ;

$\mathbf{L_{акт}}$ – активная длина пода, м, т.е. длина печи, непосредственно занятая металлом. Эта длина меньше длины печи «**L**» (рис. 6.44), т.к., во-первых, потому, что между листами должен быть технологический интервал «d», а во-вторых, потому, что часть зоны загрузки и выгрузки периодически не используется. Активная длина пода, таким образом, определяется из выражения

$$\mathbf{L_{акт} = L - d(n - 1) - \mathit{l} + \Delta L,}\ \text{м}, \qquad (\mathbf{6.25})$$

где $\mathbf{L}$ – полная длина печи, м;

$\mathbf{d}$ – технический интервал между листами в печи, м;

$\mathbf{n}$ – количество листов в печи, шт;

$\boldsymbol{l}$ –длина листа, м;

$\mathbf{\Delta L}$ –эквивалентная длина пода, м

$$\Delta L = \tau_{загр} \cdot w_{техн}, \qquad (6.26)$$

где $\tau_{загр}$ −время загрузки листа длиной l, мин.

Приведенный анализ дает возможность получить расчетную формулу для определения текущей часовой производительности печи[*)].

$$P = \frac{0{,}06 \cdot b \cdot \rho}{\tau' \left(1 + \frac{\alpha \cdot \mu \cdot \delta \cdot 10^{-3}}{3 \cdot \lambda}\right)} \times$$

$$\times \left(L - d(n-1) - l + \frac{2 \cdot l(L-l)}{\vartheta_{тр} \left(\tau' \cdot \delta \left(1 + \frac{\alpha \cdot \mu \cdot \delta \cdot 10^{-3}}{3 \cdot \lambda}\right) - \frac{l}{\vartheta_{тр}}\right)} \right), \frac{т}{ч}, \qquad (6.27)$$

где τ' − время наргева термически тонкого тела, мин;

α −коэффициент теплоотдачи, $Вт/(м^2 \cdot К)$;

μ − коэффициент несимметричности;

λ − коэффициент теплопроводности, $Вт/(м \cdot К)$;

δ − толщина листа, мм.

Анализ выражения (6.27) показывает, что чем меньше толщина листа, тем выше производительность печи.

Печи для термической обработки холоднокатаных листов и ленты. Для термической обработки применяют колпаковые садочные печи и протяжные печи постоянного действия. В колпаковых печах термообработке подвергают стопы листов или рулоны ленты. В протяжных печах происходит обработка одного слоя ленты, что обеспечивает большую скорость и равномерность нагрева. Протяжные печи более прогрессивные агрегаты, соответствующие требованиям современного поточного производства. Они обычно входят в состав непрерывных линий, в которых наряду с термообработкой металла осуществляют ряд

[*)]Методика определения производительности, а также технология перемещения листа разработаны автором, Ю.Л.Курбатовым, совместно с к.т.н. Карбышевым В.Г.

других технологических операций (травление, нанесение покрытий и др.). Однако, несмотря на эти преимущества, современное производство холоднокатаного листа не может обойтись пока без колпаковых печей.

Основным видом термической обработки холоднокатаного металла является низкотемпературный рекристаллизационный отжиг. Режимы отжига приведены на рисунке 6.45. Из графика видно, что скорость охлаждения ленты в протяжных печах по сравнению с колпаковыми очень велика. Поэтому получается более мелкозернистая структура и, как следствие, выше предел текучести и твердость металла. В протяжных печах структура получается однородной, чего нельзя сказать о металле, отожженном в колпаковых печах. Колпаковым печам, как печам садочного типа, свойственна неравномерность нагрева металла. В результате этого у одного и того же металла, отожженного в колпаковых печах, структура и свойства могут быть различными.

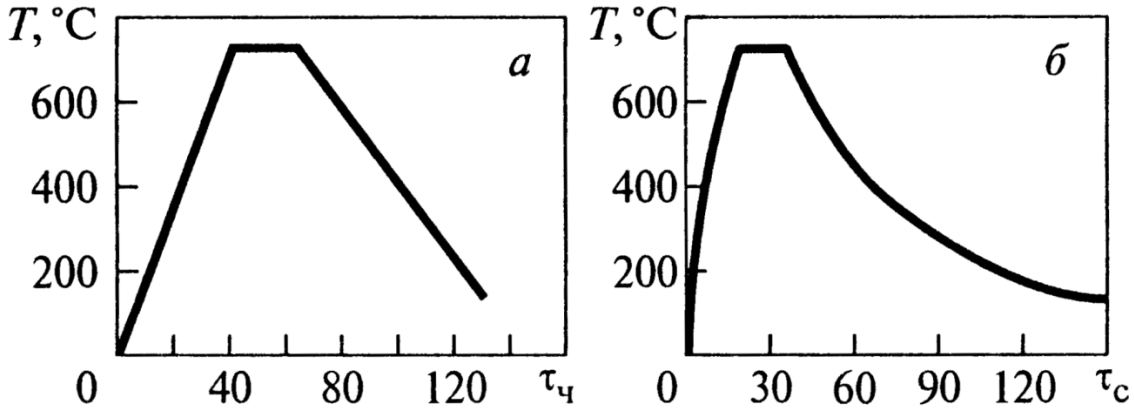


Рисунок 6.45 – Режимы рекристаллизационного отжига холоднокатаного металла в колпаковых *(а)* и протяжных *(б)* печах.

Режим работы протяжных печей теснейшим образом связан с технологией термической обработки. Температура рекристаллизации (близкая к Ac_3) определяет температуру нагрева металла. Скорость нагрева металла обычно составляет

25-100°С/с, чем и определяется продолжительность нагрева. Для завершения рекристаллизации необходима выдержка при температуре рекристаллизации, которая должна быть не менее 25 с. Скорость охлаждения ленты следует выбирать такой, чтобы из твердого раствора в феррите успевал полностью выпадать углерод и не образовывался перенасыщенный раствор. При температуре около 500°С содержание углерода примерно такое же, как и при 20°С, поэтому регулируемое охлаждение надо вести до 480-500°С. Продолжительность регулируемого охлаждения не должна быть менее 25 с. Дальнейшее охлаждение ниже 480-500°С можно вести с любой скоростью, но до 120°С ленту следует охлаждать в защитной атмосфере, а ниже 120°С – обдувкой холодным воздухом. Ускорение охлаждения от 500 до 120°С представляет собой значительный резерв увеличения производительности печи.

Колпаковые печи. В колпаковых печах лист отжигают в пакетах, а рулоны – в стопах (при этом рулоны установлены один на другой). Для ускорения нагрева используют принудительную циркуляцию защитной атмосферы. Между рулонами предусмотрены специальные прокладки, которые позволяют защитной атмосфере циркулировать между рулонами и способствовать тем самым их прогреву в осевом направлении.

Применяют многостопные и одностопные колпаковые печи. В многостопных печах один нагревательный колпак приходится на несколько стоп, которые взаимно экранируют друг друга. Это приводит к неравномерности нагрева стопы и необходимости увеличения продолжительности выдержки и, следовательно, к снижению производительности.

Более совершенны с этой точки зрения одностопные колпаковые печи, в которых рулоны прогреваются равномернее.

Печи с муфелированием металла. Колпаковая печь для светлого отжига листа представлена на рисунке 6.46. Она предназначена для отжига листов, уложенных в стопу. Нагрев

стопы листов целесообразно вести так, чтобы тепло поступало к торцам листов, а не в поперечном направлении. Между листами, сложенными в стопу, находятся газовые прослойки, которые снижают теплопроводность в поперечном направлении в 30-40 раз по сравнению с теплопроводностью сплошного металла. У печи два колпака: внутренний – из листового железа и наружный футерованный колпак, на котором и размещены горелки. Внутренний колпак – это муфель, которым закрывают стопы, помещенные на неподвижный под (стенд) печи. Внизу внутреннего муфеля устроен песочный затвор, обеспечивающий необходимую герметизацию. Под внутренний муфель по специальной трубке подается защитная атмосфера.

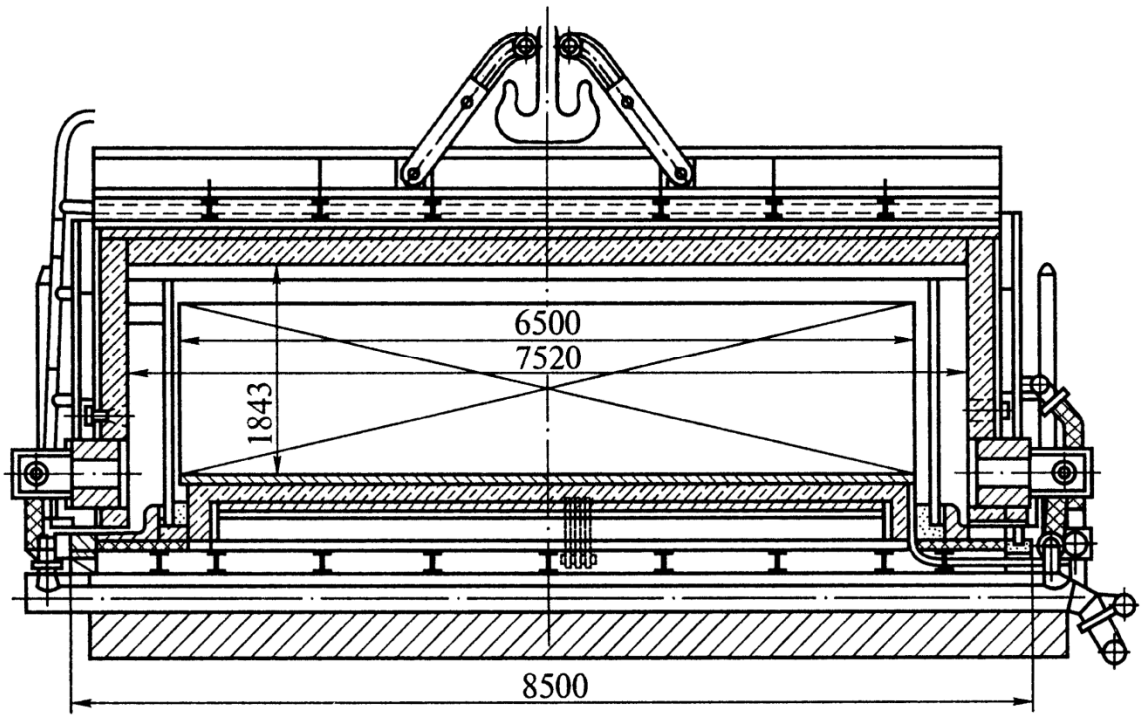


Рисунок 6.46 – Колпаковая печь для светлого отжига листов

Весь процесс делится на следующие стадии: а) загрузка стоп металла на стенд; б) установка внутреннего муфеля и продувка подмуфельного пространства защитной атмосферой для удаления воздуха; в) нагрев садки до 650-750°С (с защитной атмосферой); г) охлаждение садки под внутренним муфелем до 120°С (с

защитной атмосферой); охлаждение от 120 °С на воздухе и разгрузка стенда.

Выдавать металл на воздух с температурой выше 120°С нельзя во избежание появления на поверхности металла цветов побежалости.

Продолжительность нагрева садки до 650-750°С приблизительно в три раза меньше суммарного времени охлаждения садки до 120°С, загрузки и разгрузки металла. Поэтому обычно *на один наружный колпак приходится три стенда*. Когда один стенд находится под наружным колпаком, второй разгружают и нагружают, а на третьем охлаждают металл под внутренним муфелем. Колпак переносят с одного стенда на другой специальным мостовым краном. Масса наружного колпака около 40 т.

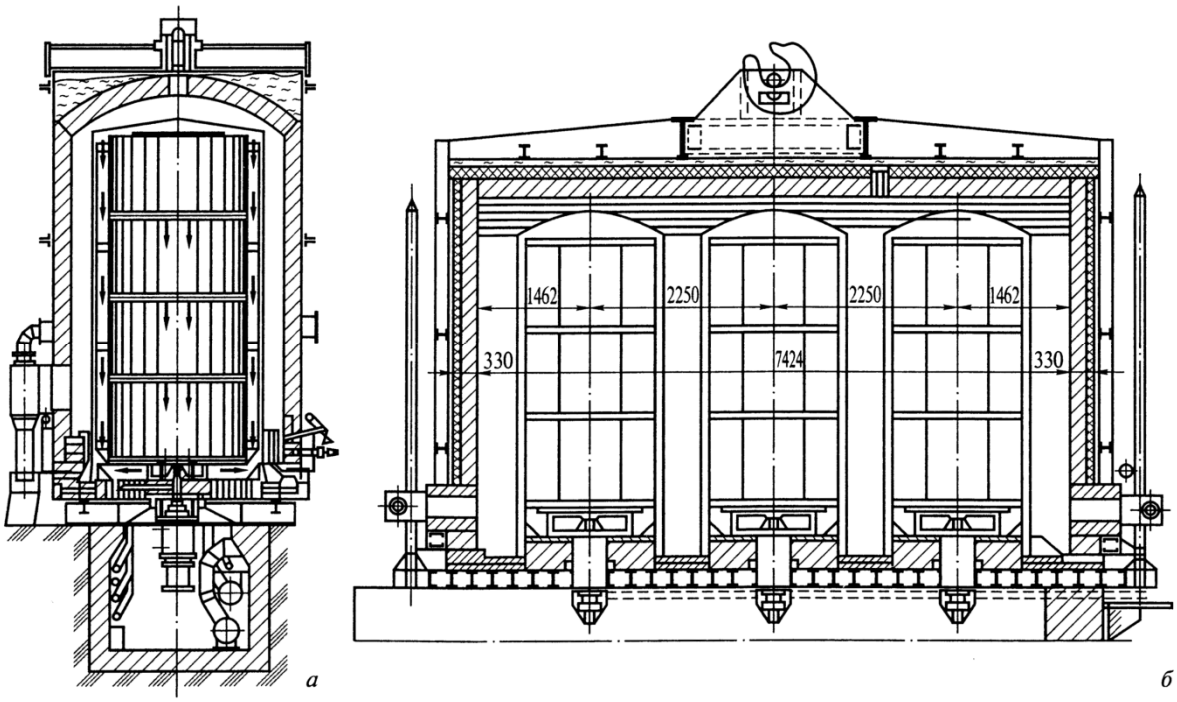
При переносе с одного стенда на другой внутренняя поверхность футеровки колпака остывает до 300-350°С. В нижней части наружного колпака с двух сторон по всей его длине расположена серия небольших инжекционных горелок, что обеспечивает торцовой подвод тепла к стопам листов. Перед каждой горелкой установлена карборундовая пластина, предохраняющая внутренний муфель от местного перегрева. У наружного колпака также устроен внизу песочный затвор. В качестве топлива можно использовать любое газообразное топливо, чаще всего употребляют смеси коксового и доменного газов с $Q_н^р = 5800 \div 10000$ кДж/м^3.

Дымовые газы отдают тепло внутреннему муфелю, а он в свою очередь передает тепло нагреваемому металлу. Удаляют дымовые газы из рабочего пространства при помощи эжектора. Газ и инжектирующий воздух подают через специальные гибкие шланги. Дымовые газы удаляются в дымоотводящие трубопроводы, присоединенные к дымовой трубе, оборудованной дымососом.

Масса садки в колпаковых печах составляет 80-120 т, удельная производительность достигает 250-300 кг/(м^2·ч), а удельный расход топлива равен 1200-1400 кДж/кг.

Колпаковые печи с муфелированием металла также широко применяют для светлого отжига рулонов холоднокатаной ленты. Обычно по высоте печи устанавливают вертикально три – четыре рулона, между которыми размещают специальные прокладки. Если основной поток тепла поступает к рулону в радиальном направлении, то равномерность и скорость нагрева невелики. Для ускорения нагрева создают интенсивную циркуляцию защитного газа под муфелем, для чего служит специальный вентилятор.

Колпаковые печи для отжига рулонов ленты чаще всего одностопные (рис. 6.47, а), однако встречаются еще и трехстопные (рис. 6.47, б).



а – одностопная; б – трехстопная

Рисунок 6.47 – Печи для светлого отжига рулонов ленты

В конструкциях колпаковых печей для отжига рулонов и для отжига листов много общего. Садка трехстопных колпаковых

печей составляет 120 т. Один наружный нагревательный колпак обслуживает три печных стенда. Отличительной особенностью этих печей является применение трех (по числу стоп) внутренних муфелей и наличие вентилятора для создания циркуляции защитной атмосферы. В одностопных печах металл нагревается равномернее и быстрее. Показатели работы одностопных и трехстопных колпаковых печей приведены ниже:

	Печи одностопные	Печи трехстопные с циркуляцией
Удельный расход тепла, кДж/кг	1200-1400	1180-1300
Масса наружного клапана, т	15	40
Производительность, т/ч:		
общая	1,2-2,0	3,5-3,7
на 1 стопу	1,2-2,0	1,15-1,25

Из приведенных данных видно, что производительность одностопных колпаковых печей выше, если исходить из расчета на одну стопу при втрое меньшей массе наружного колпака, что удешевляет здание цеха.

В работе колпаковых печей для отжига ленты в рулонах большое значение имеет циркуляция защитного газа. Если сравнивать работу колпаковой печи в отсутствие циркуляции и с циркуляцией, то при циркуляции производительность увеличивается в 2-3 раза, а удельный расход тепла на отжиг уменьшается. Циркуляция позволяет не только ускорить нагрев рулонов, но и повысить равномерность нагрева садки.

Циркуляцию осуществляют при помощи вентиляторов с крыльчаткой центробежного типа. Крыльчатка помещена под стопой внутри специального направляющего аппарата. Вентилятор засасывает защитный газ из внутренней полости стопы рулонов и через направляющий аппарат подает его в щель между наружным и внутренним цилиндрами двойного муфеля или вдоль стен внутри одинарного муфеля. Поднимаясь вдоль

стен муфеля, газ нагревается и затем поступает во внутреннюю полость стопы через специальные кольца, проложенные между рулонами. Проходя с большой скоростью между рулонами, газ отдает свое тепло торцу рулона, значительно ускоряя его нагрев. Чтобы защитный газ направлялся между рулонами, внутреннюю полость их сверху закрывают специальной крышкой.

Иногда применяют термическую обработку ленты в распушенном состоянии, для чего рулон направляют на специальную перемотку. Для того, чтобы защитный газ мог циркулировать между витками, рулон перематывают так, чтобы между витками были зазоры, соизмеримые с толщиной ленты. Цикл отжига распушенного рулона значительно меньше, чем для тугосмотанных рулонов.

Печи с муфелированием пламени. Светлый отжиг металла также осуществляют в колпаковых печах, в которых топливо сгорает внутри радиантных труб.

Печи с радиантными трубами применяют для светлого отжига металла в рулонах (рис. 6.48). Эти печи отапливают газообразным топливом с теплотой сгорания не ниже 7500 кДж/м^3. Температура нагрева металла 650-750°С. Масса садки зависит от размеров печи и колеблется в пределах 20-80 т. Удельная производительность печей составляет 150-250 кг/(м^2·ч) при удельном расходе тепла 1050-1400 кДж/кг.

Для предотвращения окисления металла в печах применяют внутренний металлический муфель. Этот муфель позволяет осуществить циркуляцию защитной атмосферы.

Протяжные печи для термической и термохимической обработки тонкой стальной ленты и жести. Выше было отмечено, что отжиг рулонов в колпаковых печах широко распространен. Однако этому методу присущи следующие недостатки: а) цикл отжига длится очень долго – до нескольких дней; б) равномерный нагрев металла не обеспечивается; в) невозможно полностью механизировать и автоматизировать

загрузку, транспортирование и уборку рулонов; г) требуются большие производственные площади.

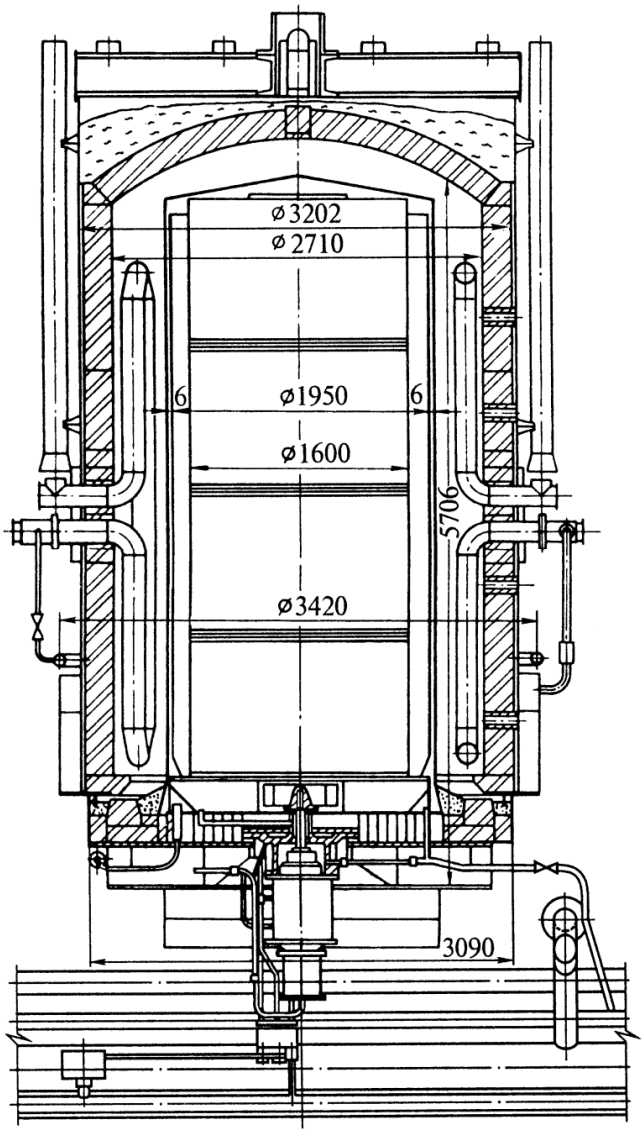
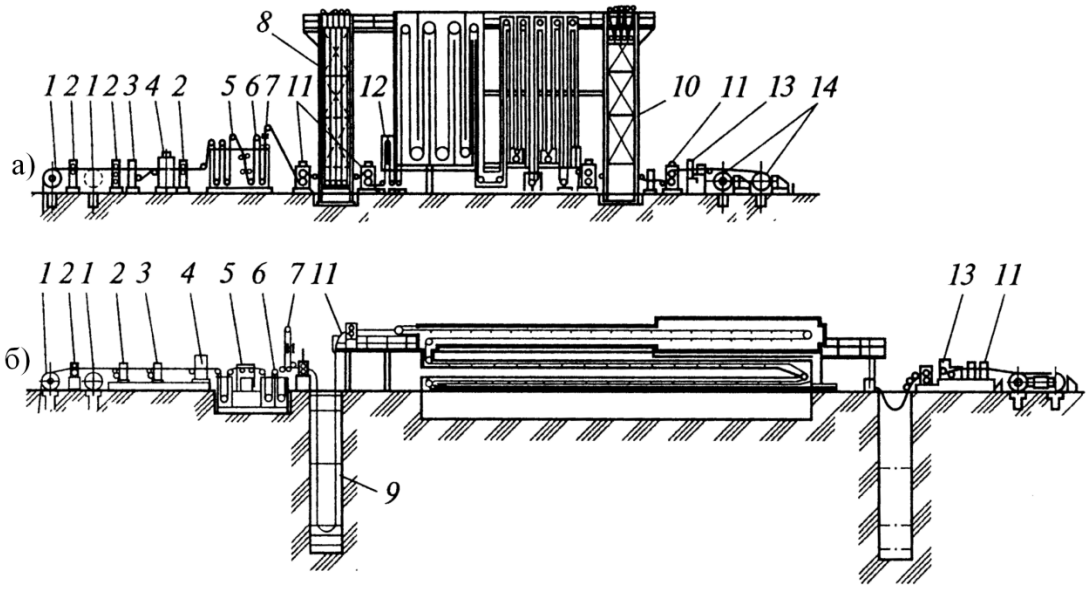


Рисунок 6.48 – Одностопная печь с вертикальными радиантными трубами

Поэтому все шире применяют непрерывные линии с протяжными печами, которые используют для обезуглероживающего отжига электротехнической стали, светлого отжига жести, светлой закалки нержавеющей полосы, цинкования тонкого листа и лужения жести. Все шире начинают применять протяжные печи для отжига тонкого автомобильного листа.

Протяжные печи могут быть разделены на две большие группы: горизонтальные и вертикальные (башенные). Длина ленты в горизонтальных печах допускается не более 200 м, а скорость движения до 2 м/с, так как при больших значениях трудно обеспечить центрирование при движении ленты через печь. Производительность горизонтальных печей невелика и их обычно применяют при небольшом объеме производства. В вертикальных печах условия центрирования благоприятнее, поэтому длина ленты в таких печах может достигать 1 км, а скорость движения достигает 10 м/с. Такие печи распространены шире, так как при весьма высокой производительности они занимают меньшую производственную площадь. Подобные печи обычно состоят из трех секций: входной, печной и выходной (рис. 6.49).



а – линия для отжига жести с вертикальной печью; б – то же, с многоэтажной горизонтальной печью; 1 – разматыватель рулонов; 2 – тянущие ролики; 3 – ножницы; 4 – машины для сварки концов; 5 – устройство для очистки ленты; 6 – моющее устройство; 7 – устройство для сушки ленты; 8, 10 – петлевые башни; 9 – петлевая яма; 11 – устройства для натяжения ленты; 12 – регулятор натяжения ленты; 13 – ножницы; 14 – сматыватели

Рисунок 6.49 – Схема линии с протяжными печами

Входная и выходная секции отделены от печной секции петлевыми башнями, в которых накапливается запас полосы. Во входной и выходной секциях скорости синхронизируются со скоростями движения полосы в рабочей (печной) секции. Для этого устраивают специальные петлевые ямы, в которых положение свободно висящей ленты контролируется фотоэлементами. Скорость движения полосы во всех агрегатах задают в зависимости от скорости нагрева и охлаждения полосы.

На входном участке происходит сварка рулонов между собой, а также обезжиривание и очистка полосы при помощи специальных щелочных ванн; на выходном участке – разрезка полосы после намотки рулона требуемого размера.

Печная секция состоит из четырех камер: нагрева, выдержки, замедленного и быстрого охлаждения. В камере нагрева металл нагревается до конечной температуры 700–730°С. Эту камеру в топливных печах обычно отапливают коксовым или природным газом, сжигаемым в радиантных трубах. Светлый отжиг полосы проводят чаще всего в азотной защитной атмосфере (96 % N_2 и 4 % H_2). Чтобы дымовые газы не попадали в печь, радиантные трубы работают под разрежением. Разность между температурой в печи и конечной температурой металла около 20°С; при этом продолжительность нагрева полосы толщиной 0,25 мм составляет 15-20 с. Предельная температура печи 1000°С, выше которой возможен перегрев и разрыв полосы. Камера нагрева с радиантными трубами приведена на рисунке 6.50. Камеры выдержки конструктивно весьма схожи с камерой нагрева с той лишь разницей, что в камеру выдержки подается такое количество тепла, которого было бы достаточно для покрытия тепловых потерь. Кроме радиантных труб, камеры нагрева и выдержки иногда оборудованы электронагревателями.

В камере замедленного охлаждения температура металла падает с 700-780 до 480°С в течение 25 с. Камера оборудована воздухоохлаждаемыми трубами и электронагревателями.

Скорость охлаждения регулируют изменением расхода воздуха. Электронагреватели включают при разогреве и остановках печи.

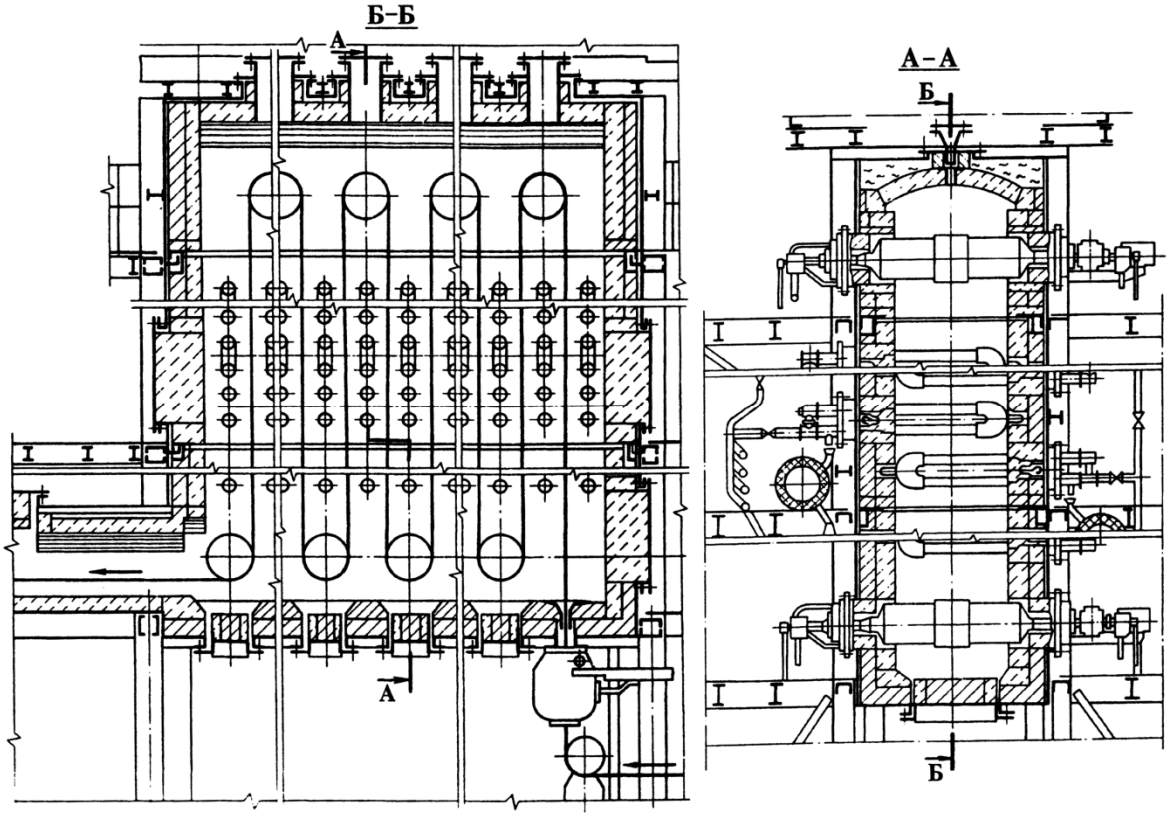


Рисунок 6.50 – Камера нагрева башенной печи

В камере быстрого охлаждения металл охлаждается до заданной температуры. Применяют две системы высокоскоростного охлаждения: первой предусмотрена установка в камере большого числа водяных теплообменников со встроенными вентиляторами для обеспечения интенсивного движения охлажденного защитного газа. По второй системе – охлажденный в водяных холодильниках защитный газ подается вентиляторами в вертикальные проходы и через щелевые отверстия с большой скоростью обдувает с двух сторон движущуюся полосу. Такое струйное охлаждение резко уменьшает длительность операции и позволяет сократить длину камеры.

Непрерывные агрегаты для светлого отжига жести с вертикальными башенными печами распространены достаточно широко. Обычно обработке подвергают полосу толщиной 0,2-0,3мм, движущуюся со скоростью 150-600 м/мин. Производительность агрегатов колеблется в пределах 25-60 т/ч. В камере нагрева обычно предусмотрено 6-12 проходов, она вмещает 100-200 м полосы, камера выдержки вмещает 120-170 м полосы, камеры медленного охлаждения – около 100-130 м, общая длина полосы составляет 600-1200 м.

При отоплении камеры нагрева коксовым газом на 1 т отжигаемой полосы расходуется около 40 $м^3$ газа и 9 кВт·ч электроэнергии. Расход защитной азотной атмосферы при производительности агрегата 55 т/ч составляет 700-900 $м^3$/ч. В печах поддерживают давление 50-150 Па. При использовании башенной печи с защитной атмосферой для светлой закалки полосы из нержавеющей стали толщиной от 0,08 до 0,3 мм полосу нагревают до 1100-1150°С, температуру в печи поддерживают на 200-250°С выше конечной температуры металла. Такие печи работают со скоростью движения полосы 20-30 м/мин и обеспечивают производительность до 10 т/ч. В качестве защитной атмосферы применяют диссоциированный аммиак или чистый водород, которые должны быть абсолютно обезвоженными.

Основное звено непрерывных линий для горячего цинкования стальной полосы – ванна с расплавленным цинком, через которую непрерывно движется полоса металла. Наибольшее распространение получил такой метод обработки, при котором в одной линии совмещены отжиг полосы и нанесение цинкового покрытия.

Вся непрерывная линия состоит из входной, технологической и выходной секций. Во входной и выходной секциях находится следующее оборудование: сварочные машины, ножницы, тянущие ролики, петлевые устройства и др.

В технологической секции осуществляются три стадии обработки:

1) нагрев полосы в окислительной атмосфере до 465°С для сжигания прокатной смазки и образования тонкой равномерной пленки оксидов на поверхности полосы;

2) отжиг при 830°С или нормализация при 950°С в восстановительной атмосфере (75 % H_2 и 25 % N_2, с температурой точки росы - 65°С). На этой стадии наряду с отжигом восстанавливаются оксиды и образуется тонкий слой металлически чистого железа, что обеспечивает прочное сцепление цинкового покрытия с полосой;

3) охлаждение до 480-520°С с обязательным применением защитной атмосферы для сохранения светлой поверхности. После охлаждения до этой температуры полоса поступает в ванну цинкования, не соприкасаясь с воздухом. Рабочую температуру ванны цинкования автоматически поддерживают на уровне 450°С. На выходе из расплавленного цинка полоса проходит пассивацию в ванне с хромовым ангидридом, промасливается и поступает на моталки.

В соответствии с тремя стадиями термохимической обработки протяжная горизонтальная печь состоит из трех камер: окислительной, восстановительной и камеры охлаждения. Печь обычно отапливают газообразным топливом. В окислительной камере происходит нагрев в атмосфере продуктов сгорания. В восстановительной камере газ сгорает в радиантных трубах, располагаемых поперек печи (сверху и снизу движущейся полосы). В камере охлаждения устанавливают охладительные трубы, через которые пропускают холодный воздух. Восстановительную камеру и камеру охлаждения заполняют водородной защитной атмосферой, поэтому печь должна быть герметизирована.

На непрерывных линиях горячего цинкования обрабатывают полосу толщиной 0,3-3,5 мм и шириной

500-1500 мм. Расход цинка составляет 0,2-0,35 кг/м^2 поверхности полосы, толщина покрытия 0,025-0,038 мм. Скорость движения полосы достигает 120 м/мин, производительность линии 10-15 т/ч.

Как уже отмечалось, непрерывные агрегаты применяют и для электролитического лужения жести. Толщина жести, применяемой в пищевой промышленности, 0,15-0,18 мм. Такая тонкая жесть требует в процессе обработки осторожного обращения. Поэтому поддерживающие и направляющие ролики во избежание чрезмерных напряжений и разрывов ленты выполняют в большинстве случаев приводными, причем конструкция роликов и других элементов должна быть такой, чтобы исключить повреждения поверхности ленты. Все это удорожает и усложняет производство. В настоящее время начинается распространение использования для транспортирования ленты газовой подушки, которая образуется при пропускании определенного количества газа между лентой и поддерживающей поверхностью.

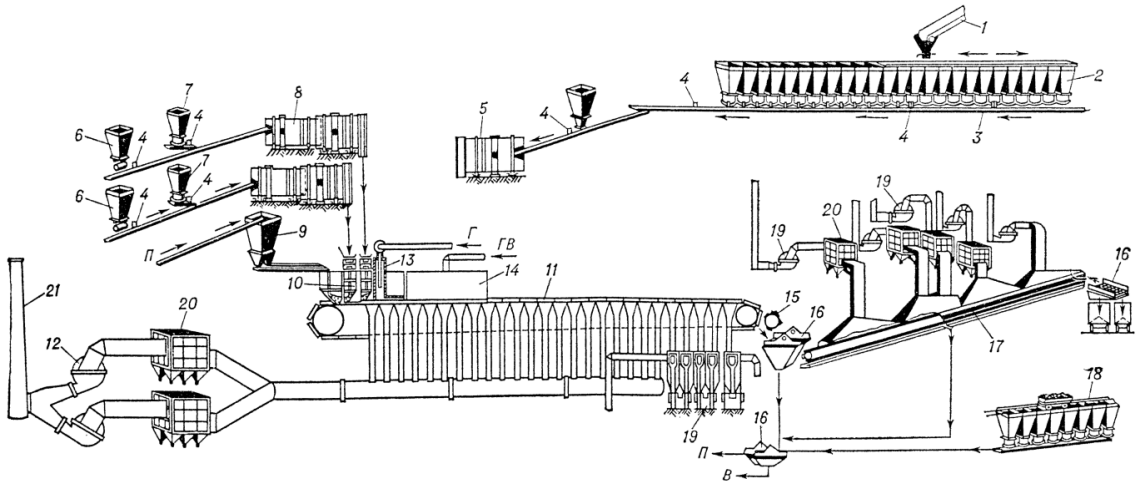
6.1.7 Агломерация

Агломерация в металлургии – это термический процесс окускования измельченных материалов (руды, рудных концентратов, содержащих металлы отходов и др.), являющихся составными частями металлургической шихты, путем их спекания с целью придания формы и свойств (химического состава, структуры), необходимых для плавки. Спекание происходит непосредственно слипанием отдельных нагретых частиц шихты при поверхностном их размягчении либо в результате образования легкоплавких соединений, связывающих частицы при остывании агломерируемого продукта. Тепло, необходимое для спекания, получается, от горения

углеродистого топлива, прибавляемого к агломерируемому материалу, либо от окисления сульфидов, если агломерации подвергаются сернистые рудные концентраты. На практике агломерация чаще всего осуществляется на колосниковых решётках, с просасыванием воздуха сверху вниз сквозь лежащую на решётке шихту. При этом происходит последовательное горение топлива в лежащих один под другим её слоях. Шихта должна быть максимально однородной. Для равномерного окисления горючего в процессе спекания и получения прочного и пористого агломерата соответствующего химического состава требуется, чтобы шихта обладала необходимой газопроницаемостью, что зависит в первую очередь от размера зёрен и степени начального увлажнения.

Основные исходные материалы агломерации: мелкая сырая руда (8-10 мм) и её концентрат, а также топливо (коксовая и антрацитовая мелочь до 3 мм), флюс (известняк и доломит до 3 мм), в отдельных случаях – мелкие отходы (колошниковая пыль, окалина и др.). Конечный продукт – *агломерат*. Более 95% агломерата используется в чёрной металлургии; в цветной металлургии агломерат применяется в алюминиевом, никелевом и свинцовом производствах. Промышленное производство агломерата освоено в начале 20 века (США).

Агломерация включает: подготовку шихты (дозировка отдельных компонентов, смешивание, увлажнение и окомкование), спекание подготовленной шихты на агломерационных машинах, обработку горячего спека (дробление, рассев с удалением кусков до 5-10 *мм,* охлаждение до 100°С, сортировка). Агломерация осуществляется на агломерационных фабриках, в состав которых входят склады для усреднения и хранения запасов шихтовых материалов, приёмные бункера, отделения для измельчения кокса и известняка (иногда и обжига известняка), шихтовое, спекательное и обработки готового агломерата (рис. 6.51).



1 – конвейер для подачи шихтовых материалов со склада или из приёмных бункеров; 2 – бункера шихтового отделения; 3 – конвейер; 4 – весы; 5 – смесительный барабан; 6 – бункера шихты спекательного отделения; 7 – бункера топлива; 8 – смеситель-окомкователь; 9 – бункер постели; 10 – распределитель-укладчик шихты; 11 – агломерационная машина; 12 – эксгаустер; 13 – горн; 14 – камера горячего воздуха; 15 – дробилка; 16 – грохот; 17 – охладитель; 18 – приёмные бункера возврата; 19 – дымососы; 20 – мультициклоны; 21 – дымовая труба; Г – газ; ГВ – горячий воздух; П – материал для защиты колосников от действия высокой температуры (постель);В – возврат.

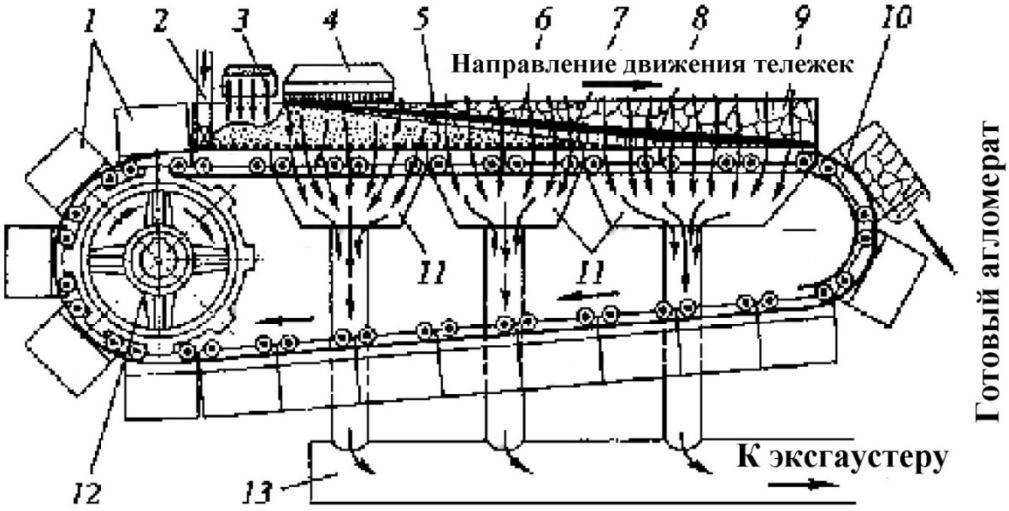
Рисунок 6.51 – Технологическая схема агломерационной фабрики

Руда, концентрат, колошниковая пыль, а также другие добавки, не требующие дробления, подаются в шихтовое отделение из приёмных бункеров или со склада конвейерами. Коксовая мелочь и известняки поступают в отделение измельчения, а затем в шихтовое отделение. Сюда же направляется возврат (мелочь, отсеянная от готового агломерата). Из шихтовых бункеров заданные количества каждого из компонентов шихты дозировочными питателями выдаются на сборный конвейер, который передаёт шихту в барабаны первичного смешивания и затем в бункера шихты агломерационных машин, расположенные в спекательном отделении. Перед загрузкой на агломерационную машину шихта подвергается вторичному смешиванию, увлажнению и частичному

окатыванию в окомковательных барабанах.

При разгрузке с машины агломерат дробится и сортируется с удалением из него мелочи (возврата), вновь используемой в шихте. Затем агломерат охлаждается и сортируется. Отходящие газы через газовый тракт и газоочистительное устройство отсасываются *эксгаустером* и через дымовую трубу "удаляются в атмосферу.

Агломерационные машины – основное технологическое оборудование для агломерации. Распространена агломерационная машина ленточного типа (рис. 6.52) представляющая собой непрерывную цепь движущихся спекательных тележек (палет) с днищами в виде колосниковой решётки. Тележка проходит под питателем, которым на неё укладывается шихта слоем 250-400 мм, а затем под *зажигательным горном*, где твёрдое топливо, содержащееся в поверхностной зоне спекаемого слоя, зажигается. Эксгаустером через слой сверху вниз просасывается воздух (80-100 $м^3$/мин на 1 $м^2$ площади спекания), и зона горения (толщиной 15-20 мм) перемещается вниз по слою со скоростью 20-40 мм/мин. В зоне горения твёрдого топлива при t 1200-1500°С значительная часть шихты плавится. По мере перемещения зоны горения вниз полурасплавленная масса вышележащей части слоя застывает, образуя спекшийся пирог агломерата (спек). Атмосферный воздух, просасываемый через спек, охлаждают его и поступают в зону горения подогретым. Газы, отходящие из зоны горения, подсушивают и нагревают нижележащие слои шихты, из которой удаляются гигроскопическая и гидратная вода, углекислый газ и прочие летучие, а также сера, мышьяк и другие вредные примеси. Таким образом, отходящие газы поступают в вакуум-камеры охлажденными.



1 – спекательные тележки-паленты; 2 – укладчик постели; 3 – челноковый питатель ленты шихтой; 4 – газовый зажигательный горн; 5 – постель; 6 – зона сырой шихты; 7 – зона сушки и подогрева шихты; 8 – зона горения твердого топлива; 9 – зона готового агломерата; 10 – разгрузочный конец машины; 11 – вакуум-камеры; 12 – ведущая звездочка привода ленты; 13 – сборный газопровод

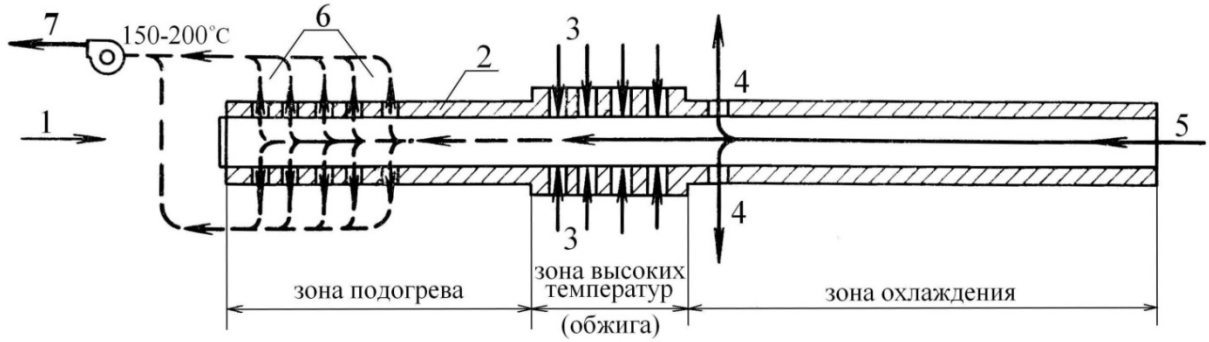
Рисунок 6.52 – Схема процесса спекания на агломерационной машине ленточного типа

В отечественной металлургии работают самые крупные в мире агломерационные машины с площадью спекания 312 м^2 при ширине 4 м, их удельная (часовая) производительность на единицу площади (1 м^2) спекания 1-2 т, а годовая – 2-3 млн. т агломерата.

6.1.8 Туннельные печи для обжига штучных и сыпучих огнеупорных материалов

Печи предназначены для обжига огнеупорных кирпичей и других фасонных огнеупоров, а также сыпучих огнеупорных материалов. Туннельная печь представляет непрерывно действующий агрегат, не требующий регенеративных устройств в виде рекуператоров или регенераторов. Печь (рис. 6.53) – это длинный (80-200м) туннель, по которому движется поезд из

вагонеток, нагруженных обрабатываемыми изделиями. Металлические основы вагонеток футеруются огнеупорным и теплоизоляционным кирпичом. Состав вагонеток периодически проталкивается посредством толкателя. Рабочее пространство печи отсоединяется от атмосферы при помощи песочных затворов. Холодные вагонетки загружаются в туннель, где материал сначала подогревается за счет тепла продуктов сгорания, затем проходит обжиг в зоне высоких температур, после чего охлаждается встречным потоком воздуха, и выгружается из печи. Физическое тепло обожженных материалов используется для нагрева воздуха. Часть нагретого воздуха отводится к горелкам в качестве первичного, остальная поступает в зону высоких температур для полного сжигания топлива. Продукты сгорания охлаждаются в зоне подогрева обрабатываемого материала до температуры 150-200 ℃ и отводятся дымососом в дымовую трубу.



1 – направление движения вагонеток; 2 – туннель; 3 – горелки; 4 – отвод подогретого воздуха к горелкам; 5 – холодный воздух для охлаждения обожженного материала; 6 – отвод продуктов сгорания; 7 – дымосос

Рисунок 6.53 – Схема туннельной печи (план)

Принципиальная противоточная схема туннельной печи удовлетворяет большинству требований, предъявляемой к лучшей тепловой схеме (высокая степень регенерации тепла обожженных изделий, достаточно глубокое охлаждение дымовых газов), и печь имеет расход топлива в 1,5-2 раза меньший, чем периодически действующая камерная печь того же назначения.

6.2 Топливные печи цветной металлургии

6.2.1 Шахтные печи

Тепловая работа шахтных печей цветной металлургии отличается рядом особенностей, обусловленных видом протекающих в них технологических процессов. Шахтные печи широко применяют на заводах цветной металлургии для плавки кусковой руды, брикетов, агломерата и различных промежуточных продуктов металлургического производства, имеющих кускообразную форму. Помимо этого шахтные печи используют для переплавки вторичных металлов и катодной меди. Конечным продуктом шахтной плавки в зависимости от вида технологического процесса могут быть штейн (черновой металл) и шлак. При плавке кусковых материалов в печь сверху загружается шихта вместе с твердым топливом, роль которого обычно выполняет высококачественный кокс.

В зависимости от вида перерабатываемого материала топливные шахтные печи могут иметь два принципиально различных режима работы, основанных на газогенераторном и топочном процессах. Печи, работающие на базе газогенераторного процесса, применяют для плавки окисленных руд и аналогичных им по составу шихтовых материалов. В них на участке сжигания топлива, наряду с генерацией тепла, протекают процессы образования газообразной восстановительной среды, содержащей большое количество оксида углерода (CO). Оксид углерода, образующийся в результате газогенераторного процесса, используется при плавке как реагент для так называемого непрямого восстановления оксидов металлов, содержащихся в шихте.

Прямым восстановителем является кокс. Однако энергозатраты на восстановление оксидов при использовании в качестве реагента кокса, отнесенные к килограмму углерода, в 2,5 раза выше, чем в случае применения оксида углерода.

Шахтные печи с режимом работы на базе топочного процесса применяют для переработки сульфидных материалов и переплавки вторичных металлов и катодной меди. В печах для плавки сульфидов кислород дутья используется при горении топлива и как реагент для окисления части сульфидов железа и элементарной серы, выделившейся при термическом разложении минералов. В печи, таким образом, поддерживается окислительная атмосфера. В шахтных печах, применяемых для переплавки вторичных металлов и катодной меди, газовая фаза не является реагентом технологического процесса. Для того чтобы предотвратить угар металла, в рабочем пространстве печи обычно поддерживается восстановительная атмосфера. Однако образование больших количеств оксида углерода в процессе горения топлива является нежелательным явлением, так как оно сопровождается значительным потреблением тепла.

Шахтные печи цветной металлургии являются агрегатами непрерывного действия с режимом работы, характеризующимся неизменностью во времени основных параметров теплового и температурного режимов плавки. Конкретные значения параметров находятся в непосредственной зависимости от вида, протекающего в печи технологического процесса и состава перерабатываемого сырья. В качестве примера рассмотрим процессы, осуществляемые в наиболее распространенных шахтных печах, применяемых на никелевых и свинцовых заводах.

Тепловая работа шахтных печей для плавки *никельсодержащего сырья* отличается крайней сложностью, и ее количественная оценка базируется на анализе теплового баланса процесса. Примерно 95-97% тепла, используемого в зоне технологического процесса, поступает в нее при горении твердого топлива и 3-5% в процессе шлакообразования. Эта энергия распределяется среди продуктов плавки следующим образом: примерно 40-45% расходуется на нагрев и расплавление шихты; 12-14% – на осуществление эндотермических реакций и

21-22% отводится с газообразными продуктами сгорания топлива и техническими газами. Потери тепла на нагрев воды в кессонах составляют 22-24%.

Температурный режим плавки пока еще не поддается расчету и выбирается опытным путем. При определении его параметров необходимо учитывать, что протекающие в печи процессы нагрева и расплавления шихты сопровождаются многочисленными экзо- и эндотермическими реакциями. К экзотермическим относятся, в основном, окисление углерода и процесс шлакообразования. Эндотермические реакции протекают в широком диапазоне температур и могут быть условно разделены на три группы, к которым относятся: образование газообразного реагента-восстановителя, состоящего из оксида углерода; диссоциация содержащихся в шихте основных флюсов и сульфидирующих компонентов; восстановление оксидов и сульфидирование переходящих в штейн металлов.

Газообразные продукты сгорания топлива, фильтруясь через слой шихтовых материалов, поднимаются вверх по шахте и постепенно охлаждаются за счет того, что в процессе теплообмена передают тепло шихте и активно участвуют в эндотермических реакциях. Восстановление диоксида углерода начинается сразу же после выхода газов из зоны горения и продолжается до тех пор, пока они не охладятся до 700°С. Образующийся в этих условиях оксид углерода, взаимодействует с оксидами содержащихся в шихте металлов. Наиболее интенсивно протекает восстановление оксида никеля, начинающееся при 250-300°С. Для восстановления магнетита до оксида железа, имеющего большое значение в процессах формирования шлака, необходимы температуры свыше 900°С и концентрация оксида углерода в газовой фазе не менее 23%.

Тепло, полученное материалом слоя в процессе теплообмена, расходуется на нагрев и плавление шихты, а также на диссоциацию и сульфидирование. Диссоциация известняка и

сульфидирующих реагентов типа пирита происходит при температурах свыше 600-650 °С. Реакции сульфидирования металлов идут в широком интервале температур от 800 до 1300°С.

В нижней части шахты, где накапливаются жидкие продукты плавки, температурный режим определяется условиями наиболее полного разделения шлака и штейна. Температура шлака, как правило, поддерживается на уровне 1400°С, температура штейна во многом зависит от его состава. С уменьшением содержания серы в штейне его температура должна увеличиваться, чтобы избежать настылеобразования, связанного с выпадением кристаллов ферроникеля. Например, при концентрации серы в штейне около 15% выделение кристаллов ферроникеля начинается при 1250°С, а для штейна, содержащего 21% серы, – при 1100°С.

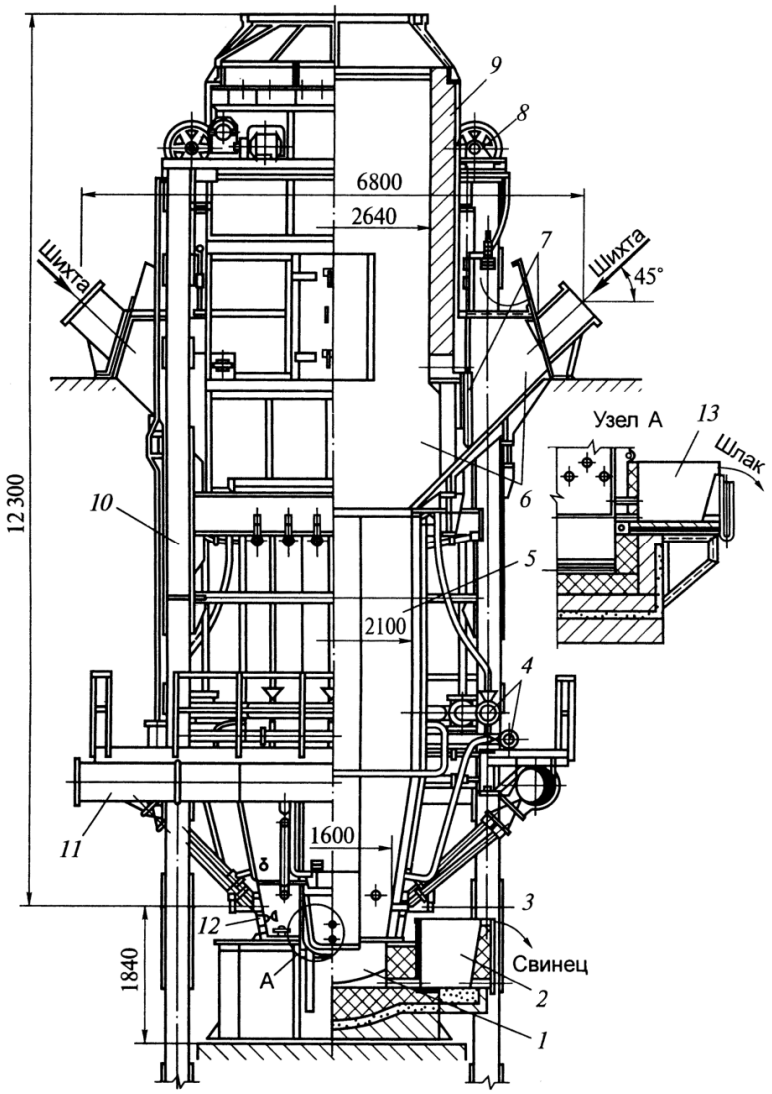
В шахтных печах *свинцовых производств* плавят сырьевые материалы (агломерат), содержащие свинец в форме легковосстановимых оксидных соединений. В результате их переработки получают черновой металл, в который переходят также медь, олово, висмут, золото, серебро и некоторые другие компоненты шихты. Трудновосстановимые оксиды, например железа и цинка, соединяясь с диоксидом кремния, переходят в шлак. Помимо оксидов металлов в шихте содержится небольшое количество сульфидных соединений, которые при плавке могут образовывать самостоятельную фазу – штейн и шпейзу.

Восстановление оксида свинца начинается практически сразу после того, как шихта попадает в печь при температуре 160-180°С. Интенсивность этого процесса нарастает по мере прогревания шихты, достигая максимального значения при температурах порядка 750-1000°С. Плавление шихты начинается задолго до завершения процессов восстановления. Эвтектики сплавов свинца и меди плавятся при 550°С, смесь оксидов свинца и сурьмы – при 550 °С, ферриты свинца – при 752°С и т. д.

Легкоплавкая жидкая фаза образуется уже в верхних частях шахты и движется вниз гораздо быстрее, чем слой твердого материала. На своем пути она вступает в многочисленные реакции с твердой шихтой и коксом. В результате в центральной части печи слой в основном состоит из кокса и остатков нерасплавившейся шихты. Между ними идет интенсивное взаимодействие, протекающее с потреблением большого количества тепла, и поэтому температура на этом участке зоны технологического процесса невелика и составляет примерно 1300-1350°С. То, что значительная часть оксидов восстанавливается непосредственно углеродом, влечет за собой некоторый перерасход кокса. В нижних частях шахты, где в зону технологического процесса подается газообразный окислитель (воздух, или дутье, обогащенное кислородом), до 75% площади поперечного сечения печи занято коксом, свободным от шихты (коксовая постель). Температура здесь достигает 1400-1450°С. Жидкие продукты плавки на выходе из печи имеют существенно более низкую температуру: шлак порядка 1200°С, штейн 1000-1050°С.

Конструкция и основные показатели работы. Шахтные печи, применяемые для переработки одного и тем более разных видов сырья, могут существенно отличаться друг от друга профилем и размерами шахты, числом дутьевых устройств (фурм) и рядом других параметров. Однако для всех печей характерен единый принцип работы, что позволяет осуществлять компоновку агрегата из практически одинаковых конструктивных элементов, к которым относятся горн, шахта, колошник и шатер. В ряде случаев к печи может примыкать внешний обогреваемый отстойник (передний горн), используемый для разделения жидких продуктов плавки.

Конструкцию конкретного агрегата удобнее всего рассмотреть на примере широко распространенной в промышленности шахтной печи свинцовой плавки прямоугольной формы (рис. 6.54).



1 – горн; 2 – сифон для выпуска чернового свинца; 3 – фурменное устройство; 4 – коллекторы системы водяного охлаждения; 5 – шахта; 6 – колошник; 7 – шиберы загрузочные; 8 – привод подъема шиберов; 9 – шатер; 10 – каркас; 11 – коллектор для подвода дутья; 12 – фурменный кессон; 13 – сифон для выпуска шлака

Рисунок 6.54 – Шахтная печь свинцовой плавки

Горн печи, повторяющий форму и размеры шахты на уровне фурм, сооружают из огнеупорного кирпича и устанавливают на массивном бетонном фундаменте. Изнутри горн футеруют хромомагнезитовым кирпичом, стойким по отношению к агрессивному воздействию расплавленной среды, для внешней кладки стен используют шамот. Снаружи горн заключен в

сварной кожух из листовой стали. Сверху на стенки горна укладывают и приваривают к кожуху массивные металлические плиты, служащие основанием для установки и крепления кессонов.

В условиях непрерывно работающей печи горн всегда заполнен расплавом. Внизу на лещади, выполненной в виде обратной арки, скапливается свинец, над которым располагаются штейн и шлак. Выпуск свинца организуется непрерывно через один или (для больших печей) два сифона, примыкающих к боковой стенке печи. Они представляют собой небольшую футерованную огнеупорным кирпичом камеру-копильник, соединенную с внутренним пространством горна специальным каналом. Шлак из печи выпускается периодически по мере накопления через специальные шпуровые отверстия в медных водоохлаждаемых кессонах, установленных в торцевой стенке горна. Для больших печей при получении легкоплавких, жидкотекучих шлаков может быть организован непрерывный сифонный выпуск.

Шахта печи состоит из кессонов, представляющих собой плоские металлические коробки шириной 0,6-0,9 м и высотой 1,5-6,0 м, охлаждаемые проточной водой. В последнее время кессоны в основном оборудуют системой испарительного охлаждения. Обычно устанавливают два ряда кессонов. Нижние или фурменные кессоны крепят друг к другу болтами и устанавливают на основании с небольшим наклоном (3-5°) к вертикальной плоскости, образуя так называемые заплечики, воспринимающие активное давление слоя, находящегося в печи материала. Кессоны торцевых стен устанавливают вертикально. Верхнюю часть второго ряда кессонов крепят с помощью домкратов, опирающихся на специальную балку, опоясывающую печь по периметру и жестко соединенную со стоечным каркасом. Для уплотнения зазоров между кессонами используют шнуровой асбест.

На высоте 300 мм от нижней кромки кессонов первого ряда расположены отверстия, в которые вставляют металлические водоохлаждаемые фурмы, заглубляемые в рабочее пространство печи на 200-300 мм. Фурмы имеют в диаметре 100-125 мм и устанавливаются в один, реже в два ряда. Ширину печи на уровне фурм выбирают таким образом, чтобы воздух, подаваемый в печь под давлением порядка 20 кПа, достигал центра слоя. Обычно она составляет от 1,3 до 1,9 м. Высота печи зависит от ее производительности и колеблется в пределах от 2,5 до 26 м.

Колошником называется верхняя часть печи, расположенная над шахтой. Он сооружается из металлических плит, при необходимости футеруемых огнеупорным кирпичом. Колошник служит для размещения устройств загрузки перерабатываемых материалов, которые могут быть расположены в центре или вдоль боковых стен печи. Предпочтение отдается, как правило, боковой загрузке, так как в этом случае крупные куски материала располагаются в центре слоя, что способствует увеличению его газопроницаемости и улучшению аэродинамических характеристик печи. При боковой загрузке с одной или двух продольных стен колошника расположены несколько (3-4) загрузочных окон, оборудованных двухшиберными устройствами. Сначала открывают наружный шибер и в приемную камеру загружают порцию (колошу) агломерата или кокса. Затем закрывают наружный и открывают внутренний водоохлаждаемый шибер и материал по наклонной плоскости сползает в шахту.

Шатер накрывает колошник, выполняя функции газоотводящей и сепарационной камеры. В куполе шатра имеются два-три отверстия, соединенные с металлическим газоходом. Внутреннюю поверхность заключенного в металлический кожух шатра футеруют огнеупорным кирпичом. На шахтных печах, применяемых для переработки шихт с большим содержанием цинка, применяют в основном шатры,

изготовленные из металлических кессонов, охлаждаемых водой. Такая конструкция позволяет значительно облегчить очистку стен от пыли и настылей. Сложность тепло- и массообменных процессов, протекающих в шахтных печах, и отсутствие надежных данных о теплофизических характеристиках перерабатываемых в них материалов в значительной степени ограничивают возможность применения расчетных методов при оценке тепловой работы этих агрегатов. В настоящее время эффективность работы шахтных печей оценивается в основном на базе статистической обработки производственных данных.

Важнейшими показателями работы печи являются ее удельная производительность, которую рассчитывают по количеству проплавляемой в течение суток шихты, отнесенному к 1 $м^2$ площади сечения печи в области фурм, и удельный расход топлива (кокса), определяемый в процентах от массы перерабатываемой шихты. Широкие пределы изменения этих показателей в условиях одного технологического процесса обусловлены, как правило, различиями в химическом и фракционном составе сырья, качеством применяемого топлива и характером дутья. Например, при свинцовой плавке высота слоя в зависимости от фракционного состава материала может изменяться от 2,5 до 6,0 м. Удельная производительность и расход топлива в зависимости от его химического состава колеблются соответственно в пределах от 35 до 100 $т/м^2$ в сутки и от 8 до 13%. Отходящие газы шахтной печи свинцовой плавки имеют температуру порядка 250-400 °С. Они содержат большое количество пыли, являющейся ценным полиметаллическим сырьем, направляемым после очистки газов в металлургическое производство.

6.2.2 Плавильные пламенные печи

Общие сведения. Плавильные пламенные печи широко применяют в цветной металлургии при производстве меди, никеля, олова и других металлов. По энергетическому признаку эти агрегаты относятся к классу печей теплообменников с радиационным режимом тепловой работы, благодаря чему они называются отражательными печами. По назначению их делят на две большие группы: печи для переработки минерального сырья, основными представителями которых являются отражательные печи для плавки сульфидных медных концентратов на штейн, и печи, предназначенные для рафинировочной плавки металлов.

Отражательная печь для плавки на штейн является универсальным агрегатом с продолжительностью кампании от 1-2 до 6 лет. В ней можно плавить разнообразные по составу и физическим характеристикам материалы, основу которых составляет сырая (подсушенная) шихта. Большая емкость печи, в которой одновременно находится около 900-1000 т расплавленного материала, позволяет поддерживать стабильные теплотехнические параметры плавки при значительных колебаниях в производительности предшествующего (подготовка шихты) и последующего (конвертирование штейнов) за отражательной плавкой переделов. К основным недостаткам отражательных печей следует отнести отсутствие очистки дымовых газов от пыли и сернистого ангидрида и сравнительно высокий удельный расход топлива.

До настоящего времени отражательные печи остаются весьма распространенными агрегатами на медеплавильных заводах. Однако с повышением требований к комплексному использованию сырья и охране окружающей среды, перспективы их дальнейшего использования существенно снизились. Кроме того, в отражательных печах практически не используют тепло, получаемое при окислении серы, выделяющееся при разложении

сульфидных минералов. Поэтому в последнее время осуществляется постепенная замена отражательных печей более совершенными агрегатами для автогенной плавки медных концентратов на штейн.

Отражательные печи, в которых производится очистка металлов от примесей, носят названия, отражающие сущность протекающих в них технологических процессов. Например, печи, применяемые для получения специальных отливок – анодов, которые используют в последующем процессе электролитического рафинирования меди, называют анодными печами. Это малопроизводительные плавильные агрегаты периодического действия, в которых перерабатывается твердая и жидкая черновая медь, причем жидкую черновую медь подают в печь ковшом непосредственно из конвертера. Так называемые вайербарсовые печи отличаются от анодных только тем, что в них перерабатываются катоды, полученные в процессе электролиза, а также отходы красной и электролитной меди.

Отражательные печи для плавки медных концентратов на штейн. Конструкции печей для плавки на штейн различаются в зависимости от площади пода, состава и вида перерабатываемого сырья, способа отопления и применяемого топлива. В мировой практике встречаются агрегаты с площадью пода 300-400 $м^2$, однако наибольшее распространение получили печи, площадь пода которых порядка 200-240 $м^2$.

Основные характеристики отражательных печей приведены в таблице 6.9. Отражательные печи работают в основном на газовом, реже газо-мазутном и крайне редко на пылеугольном топливе. Для интенсификации процессов горения топлива на некоторых предприятиях используют дутье, обогащенное кислородом. Для большинства печей применяют торцевую подачу топлива, на ряде агрегатов торцевую подачу комбинируют со сводовым отоплением. При торцевом отоплении обычно используют комбинированные газомазутные горелки,

производительность которых по природному газу составляет 1100-1600 $м^3$/ч, по мазуту – до 300 кг/ч. Основное назначение мазута – повышение степени черноты газового факела. В тех случаях, когда нет необходимости в интенсификации внешнего теплообмена в рабочем пространстве отражательной печи, горелки такого типа успешно работают на одном природном газе. В зависимости от производительности агрегата на печи устанавливают от 4 до 6 горелок. Такое же число горелок устанавливают на печи и при пылеугольном отоплении. Пылеугольные горелки типа «труба в трубе» работают с коэффициентом расхода воздуха порядка 1,1-1,2 и обеспечивают хорошее перемешивание топливо-воздушной смеси.

Таблица 6.9 – Техническая характеристика отражательных печей для плавки медных сульфидных концентратов на штейн

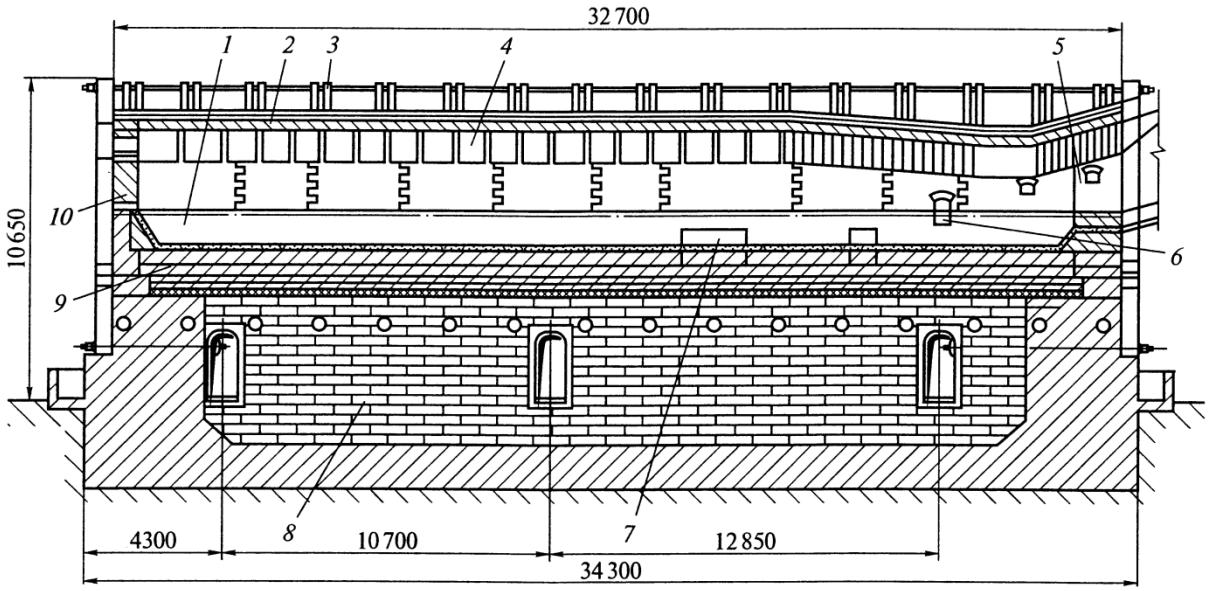
Параметры	Характеристика печей с площадью пода, $м^2$				
	182[*1]	190[*2]	225[*2]	240[*3]	240[*3]
Основные размеры печи, м:					
длина по ванне	31,8	31,8	32,8	30,6	30,0
ширина по ванне	7,8	8,0	7,6	8,0	8,0
высота от лещади до свода	2,6	2,4	2,6	3,2	3,8
Глубина ванны, м	0,8	1,1	1,0	1,0	0,9
Конструкция подины	Набивная		Арочная		
Способ выпуска штейна	Сифонный		Через шпуры		

[*1]Свод арочный из магнезитохромита; [*2]свод арочный из динаса; [*3]свод распорноподвесной из магнезитохромита.

При комбинированном отоплении отражательных печей на своде печи могут быть установлены плоскопламенные горелки типа ГР, работающие на природном газе с использованием холодного и подогретого до 400°С воздуха.

Основными элементами отражательной печи (рис. 6.55) являются: фундамент, под, стены и свод, которые в совокупности образуют рабочее пространство печи; устройства для подачи шихты, выпуска продуктов плавки и сжигания топлива; система

отвода дымовых и технологических газов, боров и дымовая труба. Фундамент печи представляет собой массивную бетонную плиту толщиной 2,5-4 м, верхняя часть которой выполнена из жаропрочного бетона. В фундаменте обычно имеются вентиляционные каналы и смотровые проходы.



1 – ванна; 2 – свод; 3 – каркас; 4 – загрузочное устройство; 5 – наклонный газоход; 6 – окно для выпуска шлака; 7 – шпур для выпуска штейна; 8 – фундамент; 9 – подина; 10 – стена

Рисунок 6.55 – Общий вид отражательной печи для плавки на штейн

Рабочее пространство является основной частью печи, так как в нем протекает технологический процесс и развиваются высокие температуры (1500-1650°С). Подина (лещадь) выполняется в виде обратного свода, толщиной 1,0-1,5 м. Для кислых шлаков в качестве огнеупорных материалов при кладке пода и стен печи используют динас, для основных шлаков – хромомагнезит. Толщина стен на уровне ванны 1,0-1,5 м, над ванной – 0,5-0,6 м. Для теплоизоляции стен обычно используют легковесный шамот. Расстояние между боковыми стенами (ширина печи) в зависимости от конструкции агрегата изменяется

в пределах 7-11 м, между торцевыми стенами (длина печи) 28-40м.

Свод печи является наиболее ответственным элементом ее конструкции, так как от его стойкости зависит продолжительность кампании печи. Свод имеет толщину 380-460 мм и выкладывается из специального магнезитохромитового и периклазошпинелидного кирпича. Как правило, используют распорно-подвесные и подвесные своды. У боковых стен свод опирается на стальные пятовые балки. Для компенсации распирающих усилий, создаваемых ванной расплава и сводом, стены печи заключены в каркас, состоящий из стоек, расположенных через 1,5-2 м вдоль стен, скрепленных продольными и поперечными тягами, которые позволяют компенсировать температурные расширения кладки.

Для загрузки шихты используют специальные отверстия, расположенные в своде через каждые 1,0-1,2 м вдоль боковых стен печи, в которых установлены воронки с патрубками диаметром 200-250 мм. К загрузочным воронкам шихта подается ленточными или скребковыми транспортерами. В некоторых случаях загрузку шихты производят с помощью шнековых питателей или забрасывателей через окна в боковых стенах печи. Загрузочные отверстия имеются по всей длине печи, но шихта подается, как правило, только в плавильную зону.

Конвертерный шлак заливают в печь через окно в торцевой стенке, расположенное над горелками. Иногда для этого используют специальные отверстия в своде или окна в боковых стенах, расположенные вблизи от передней торцевой стенки печи. Для выпуска штейна применяют сифонные или специальные разборные металлические шпуровые устройства с керамическими или графитовыми втулками. Устройства для выпуска штейна расположены в двух или трех местах вдоль боковой стенки печи. Шлак выпускают периодически по мере его накопления через специальные окна, расположенные в конце печи в боковой или торцевой стенке на высоте 0,8-1,0 м от поверхности пода.

Отвод газов из рабочего пространства печи осуществляется через специальный газоход (аптейк), наклоненный к горизонтальной плоскости под углом 7-15°. Наклоненный газоход переходит в боров, который служит для отвода продуктов сгорания топлива в котел-утилизатор и в дымовую трубу. Боров представляет собой горизонтально расположенный газоход прямоугольного сечения, внутренняя поверхность которого выложена из шамота, наружная – из красного кирпича.

Для утилизации тепла отходящих газов в сборном борове отражательных печей устанавливают водотрубные котлы-утилизаторы, которые оборудованы специальными экранами, позволяющими эффективно бороться с заносом и ошлакованием рабочей поверхности котлов, содержащимися в газах пылью и каплями расплава. Для предотвращения сернокислотной коррозии металлических элементов температура газов на выходе из котла должна быть существенно выше 350°С. После котла-утилизатора устанавливают металлический петлевой рекуператор, позволяющий использовать тепло газов, выходящих из котла, для нагрева дутьевого воздуха.

Основными достоинствами отражательной плавки являются: относительно небольшие требования к предварительной подготовке шихты (влажность, повышенное содержание мелких фракций и т. п.); высокая степень извлечения меди в штейн (96-98%); незначительный унос пыли (1-1,5%); повышенная производительность единичного агрегата, достигающая до 1200-1500 т в сутки по проплавляемой шихте, а также высокий коэффициент использования топлива в печи, который составляет в среднем около 40-45%.

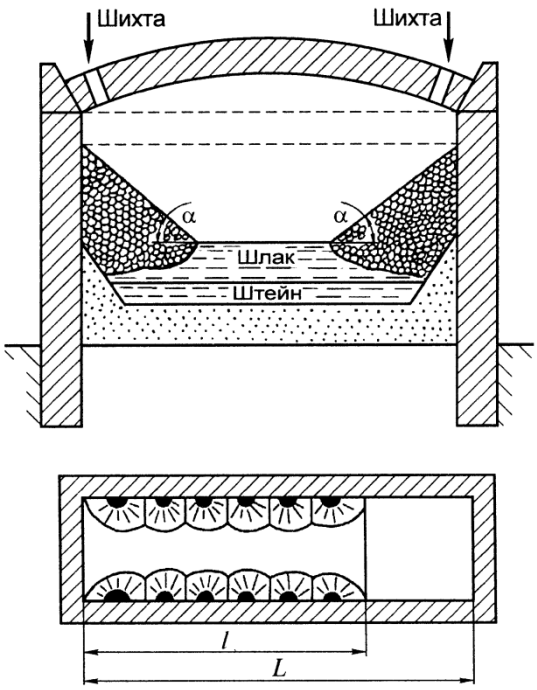
К недостаткам процесса следует отнести низкую степень десульфурации (получение сравнительно бедных по меди штейнов) и большой удельный расход топлива, который составляет примерно 150-200 кг у.т. на тонну шихты. Значительное количество дымовых газов на выходе из печи ограничивает

возможность их очистки и использования в сернокислотном производстве из-за низкого содержания в них сернистого ангидрида (2,5 %).

Отражательная печь для плавки на штейн является агрегатом непрерывного действия с относительно постоянными во времени тепловым и температурным режимами работы. В ней осуществляется технологический процесс, состоящий из двух последовательно протекающих операций: расплавления шихтовых материалов и разделения полученного расплава под действием силы тяжести на штейн и шлак. Для сохранения последовательности этих процессов они осуществляются в различных участках рабочего пространства печи. На протяжении всей работы агрегата в нем постоянно находятся твердая шихта и продукты плавки.

Схема расположения материалов в печи представлена на рисунке 6.56. Шихтовые материалы располагаются вдоль стен с обеих сторон печи, образуя откосы, которые закрывают боковые стены почти до свода на 2/3 их длины. Между откосами и в хвостовой части печи размещается слой расплава, который условно можно разделить на две части. Верхний слой занимает шлак, нижний – штейн. По мере накопления их выпускают из печи. При этом шлаковый расплав постепенно перемещается вдоль агрегата и непосредственно перед выпуском попадает в так называемую отстойную зону, свободную от откосов.

Технологический процесс в отражательной печи осуществляют за счет тепла, выделяемого в пламени при горении топлива. Тепловая энергия поступает на поверхность ванны и шихтовых откосов в основном в виде потока тепла излучением от факела, свода и других элементов кладки (~90%), а также конвекцией от раскаленных продуктов сгорания топлива (~10%).



l – длина плавильной зоны; *L* – длина печи

Рисунок 6.56 – Схема расположения материалов в рабочем пространстве отражательной печи для плавки на штейн

Нагрев и расплавление шихты на откосах. В состав шихты в качестве основных компонентов входят сульфидные минералы меди и железа, а также оксиды, силикаты, карбонаты и другие породообразующие соединения. Под действием высоких температур эти материалы нагреваются. Нагрев сопровождается испарением влаги, содержащейся в шихте, разложением минералов и другими физико-химическими превращениями, обусловленными принятой технологией. Когда температура на поверхности загружаемой шихты достигает примерно 915-950°С, начинают плавиться сульфидные соединения, образующие штейн. Наряду с плавлением сульфидов продолжается нагрев остальных материалов и при температурах порядка 1000°С в расплав начинают переходить оксиды, образующие шлак. Интервал температур плавления основных шлаков составляет 30-80°С. С увеличением степени кислотности шлака, этот интервал растет и может достигать 250-300°С. Полного

расплавления шлака на откосах, как правило, не происходит, так как штейн и легкоплавкие соединения шлака стекают с наклонной поверхности откосов, увлекая за собой остальной материал. В период плавления откосы покрыты тонкой пленкой расплава, температура которого постоянна во времени и зависит в основном от состава шихты.

Процессы, протекающие на откосах, можно условно разделить на два периода, включающие в себя нагрев поверхности загруженной шихты до температуры, при которой образующийся расплав начинает стекать с откосов, и дальнейший нагрев шихты в сочетании с плавлением материала. Длительность первого периода определяется условиями внешней задачи, примерно одинакова для всех шихт и составляет около 1,0-1,5 мин. Продолжительность второго периода определяется условиями внутренней задачи. Она обратно пропорциональна величине плотности теплового потока на поверхности откосов и прямо пропорциональна толщине слоя загружаемой шихты. В условиях конкретной печи длительность этого периода зависит от способа загрузки и может составлять от нескольких минут до 1-2 ч. После окончания периода плавления на откосы загружается новая порция шихты и процесс повторяется.

Необходимо отметить, что с уменьшением интервала времени между загрузками снижается средняя (во времени) температура поверхности откосов. Соответственно растут плотность результирующего теплового потока на этой поверхности и скорость плавления шихты. Максимальный эффект достигается тогда, когда этот интервал сопоставим по величине с продолжительностью первого периода, т. е. практически при непрерывной загрузке. Поэтому при конструировании печи следует учитывать, что системы непрерывной загрузки имеют несомненное преимущество.

Средняя по массе скорость плавления материала (кг/с) может быть определена по формуле

$$G^0 = \frac{k \cdot q_w^0 \cdot F_0}{Q_ш^0}, \qquad (6.28)$$

где $Q_ш^0$ – теплопотребление шихты на откосах, Дж/кг;

k – коэффициент, учитывающий конвективную составляющую суммарного теплового потока на поверхности шихтовых откосов, $k = 1{,}1 \div 1{,}15$;

F_0 – поверхность откосов, м^2;

q_w^0 – результирующий тепловой поток на единицу поверхности откоса (Дж/м^2·с).

Переработка материалов в шлаковой ванне. В ванну поступает расплавленный материал с откосов и, кроме того, обычно заливается конвертерный шлак, содержащий примерно 2-3 % меди и других ценных компонентов, которые при плавке переходят в штейн. Поступающие материалы прогреваются в ванне до средней температуры содержащегося в ней расплава, что сопровождается завершением процессов формирования шлака, а также эндо- и экзотермическими реакциями, характер которых обусловлен технологией плавки. Расходуемое на эти процессы тепло распределяется следующим образом: нагрев продуктов, поступающих с откосов (Q_1) 15-20%; завершение процессов плавления и образования вновь поступившего шлака (Q_2) 40-45 %; прогрев конвертерного шлака (Q_3) и эндотермические реакции (восстановление магнетита и т. п.) (Q_4) 35-40 % и потери тепла теплопроводностью через стены и под печи 1 %. Кроме того, в ванне происходят экзотермические процессы, связанные с усвоением кремнезема расплавом шлака (Q_5). Суммарный эффект от протекания процессов, идущих с потреблением и выделением тепла, отнесенный к единице массы перерабатываемой шихты ($\sum_{i=0}^{n} Q_1$) носит название теплопотребления шихты в ванне и обозначается $Q_т^в$.

Процессы тепло- и массопереноса в ванне отличаются

крайней сложностью вследствие сочетания конвекции и теплопроводности. Задачу можно существенно упростить, если учесть, что температура капель штейна, распределенных по объему шлака, равна температуре окружающего их расплава. В этом случае можно предположить, что штейн фильтруется через относительно неподвижный шлак, в котором тепло передается теплопроводностью, и что капли штейна практически принимают температуру шлака в любой точке ванны. С целью создания возможностей для математического описания крайне сложных тепло- и массообменных процессов, протекающих в шлаковой ванне, были приняты следующие необходимые допущения.

1. Завершение тепловой обработки материала, поступающего с откосов в ванну расплава отражательной печи, происходит в условиях, когда температурный режим ванны не изменяется во времени. Скорость осаждения капель штейна считается постоянной, равной среднемассовому удельному расходу штейна $nG_y^в$, где $G_y^в$ – скорость поступления материала в ванну, равная количеству шихты проплавляемой в единицу времени на откосах и отнесенная к единице поверхности ванны $F_в$, кг/(м^2·с); n – доля штейна в 1 кг шихты. Удельная теплоемкость штейна принимается равной $c_{шт}$.

2. Градиенты температур по длине и ширине ванны (~1,0-1,5°С/м) незначительны по сравнению с градиентами температур по ее глубине (~300-400°С/м) и их значениями можно пренебречь, считая поле температур в ванне одномерным.

3. Процессы тепло- и массопереноса в ванне сопровождаются эндо- и экзотермическими реакциями, которые могут рассматриваться как стоки и источники тепла, распределенные по глубине ванны.

4. Содержание штейна в шлаковой ванне невелико и поэтому предполагается, что занимаемый им объем пренебрежимо мал по сравнению с объемом ванны. Глубина ванны принимается равной 5, средняя температура шлака, а

также температуры на верхней (x=0) и нижней (x=5) границах шлаковой ванны определяются параметрами технологического процесса и соответственно равны $T_{ср.ш}$, T_0, T_δ.

В процессе эксплуатации печи параметры температурного режима ванны оказывают существенное влияние на основные технологические показатели плавки. Например, величина средней температуры шлаковой ванны имеет непосредственное влияние на скорость разделения продуктов плавки. Чем она выше, тем меньше вязкость расплавленного шлака и выше скорость осаждения штейна. Однако величина средней температуры шлака ограничена значениями температур на верхней и нижней границах шлаковой ванны. Повышение температуры на границе раздела шлака и штейна способствует интенсификации процессов диффузии штейна (и вместе с ним меди и других ценных компонентов) в шлак и увеличению растворимости штейна в шлаковом расплаве. Снижение этой температуры до значений, при которых начинает выделяться твердая фаза, ведет к образованию настылей на подине печи. Поверхность ванны находится в непосредственном контакте с печными газами, т.е. с окислительной атмосферой. В этих условиях увеличение температуры шлака влечет за собой рост химических потерь металла.

Таким образом, параметры температурного режима ванны зависят от состава перерабатываемой шихты, индивидуальны для каждой печи и определяются опытным путем в ходе технологических экспериментов. Любое отклонение от заданных параметров приводит к повышению содержания металла в шлаке, что из-за большого выхода шлака ведет к существенным потерям металла. Вместе с тем повышение потерь металла со шлаками при прочих равных условиях свидетельствует о нарушении температурного и теплового режимов работы отражательной печи.

Количество тепла, подводимого к продуктам плавки за счет

теплопроводности, в основном определяется характером распределения стоков и источников тепла по глубине ванны. Чем ближе они расположены к поверхности ванны, тем больше тепла подводится к ним за счет теплопроводности

Теоретически могут существовать такие шихтовые материалы, тепловая обработка которых полностью завершается внутри ванны шлакового расплава. В этом случае скорость поступления материала в ванну определяется условиями внешней задачи, так как любое количество тепла, подводимое к ее поверхности, усваивается продуктами плавки. Удельная производительность отражательной печи, рассчитываемая по количеству проплавляемой шихты, фактически определяется скоростью процессов плавления материала на откосах, которая прямо пропорциональна плотности теплового потока на их поверхности и может достигать 15-20 т/м^2 в сутки в расчете на единицу площади пода печи. Скорость последующей тепловой обработки шихты в ванне, от величины которой зависит содержание металла в шлаке, лимитируется условиями внутренней задачи, т. е. интенсивностью процессов тепло- и массопереноса в шлаковом расплаве, и составляет, как показывает практика, примерно 2-5 т/м^2 в сутки при плавке сырой (подсушенной) шихты.

За счет интенсификации внешнего теплообмена при обогащении дутья кислородом, установки дополнительных сводовых горелок, и т.п. может быть увеличена величина результирующего теплового потока на поверхность зоны технологического процесса. На откосах соответственно возрастает скорость плавления шихты и вместе с ней удельная производительность печи. Скорость тепловой обработки продуктов плавки в ванне не зависит от условий внешней задачи и поэтому увеличение плотности результирующего теплового потока на ее поверхности и количества, поступающих в нее материалов приводит к перестройке температурного поля

шлаковой ванны, т.е. к нарушению заданного температурного режима плавки и, как следствие, способствует росту потерь металла со шлаком.

Зона отстаивания продуктов плавки. Этот участок ванны расположен в хвостовой части печи и в нем происходит завершение процессов разделения продуктов плавки. Средняя температура шлака в нем на 70-100°С ниже, чем в зоне плавления, что способствует повышению извлечения меди в штейн за счет снижения степени растворимости штейна в шлаке. При охлаждении шлака штейн выделяется из него в виде мельчайших капель, для отстаивания которых требуется продолжительное время. Так как время пребывания шлака в отстойной зоне прямо пропорционально количеству содержащегося в ней материала, под нее отводится обычно около одной третьей части рабочего пространства печи.

Печи для рафинирования меди. К пламенным плавильным печам для рафинирования меди относятся в основном стационарные анодные и вайербарсовые печи, которые различаются в зависимости от емкости, состава перерабатываемой шихты и применяемого топлива. Техническая характеристика этих агрегатов приведена в таблице 6.10.

В анодных печах можно перерабатывать как первичную, так и вторичную черновую медь. Первая получается из руд и концентратов, вторая при переплавке вторичных металлов. В первичной черновой меди количество примесей, к которым относятся мышьяк, сурьма, свинец, олово, сера, железо и т.п., составляет от десятых долей до одного процента; во вторичной 2-4%.

Загружаемый материал может подаваться в печь как в твердом, так и в жидком состоянии. Соотношение между твердой и жидкой фазами зависит от условий конкретного производства.

Таблица 6.10 – Техническая характеристика анодных и вайербарсовых печей

Параметры	Характеристика печей емкостью, т				
	350	200	150	80	50
Размеры ванны, м:					
глубина	0,94	0,76	0,69	0,75	0,46
длина	14,6	13,8	16,8	7,9	4,8
ширина	4,5	4,8	2,5	2,7	2,7
Число горелочных устройств, шт	3	2	2	2	2
Продолжительность плавки, ч	24	12	18	18	16
Содержание твердого в загрузке, %	100	15	90	100	100

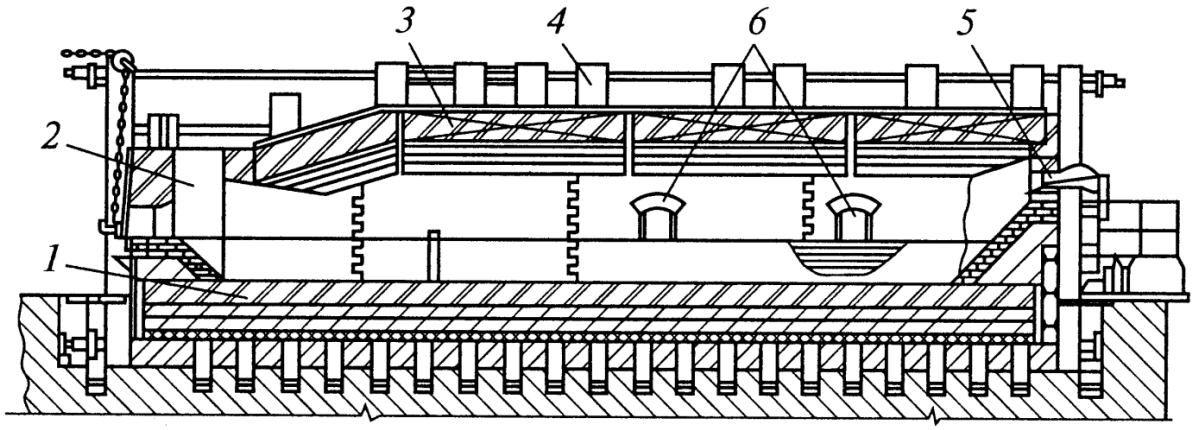
Примечание. Печи емкостью 350 т анодные и вайербарсовые, остальные – анодные.

Когда загрузка целиком состоит из расплавленной черновой меди для анодной плавки, используют печи типа конвертера, которые не могут быть отнесены к плавильным агрегатам. В вайербарсовых печах переплавляется катодная медь повышенной чистоты (99,90-99,99% Cu). Однако в ней содержатся растворенные газы: оксид углерода, водород, сернистый ангидрид в количестве ~80см^3/кг металла, которые удаляются в процессе плавки.

Технологический процесс, осуществляемый в рафинировочных печах, протекает в четыре стадии, которые включают в себя: загрузку и плавление металла, окисление содержащихся в нем нежелательных примесей кислородом воздуха, восстановление переокисленной меди и разливку металла в изложницы. К недостаткам анодных и вайербарсовых печей можно отнести: повышенный удельный расход топлива; низкий коэффициент использования вспомогательного оборудования (механизмы для загрузки металла и разливочные машины), обусловленный периодичностью процесса; применение ручного труда (съемка шлака, загрузка шихты и т. п.). Основным направлением в совершенствовании конструкций анодных печей следует считать создание агрегатов подового типа с

непрерывным режимом работы. Для переплавки катодов в последнее время все чаще применяют шахтные печи, а также индукционные, дуговые и вакуумные электропечи, в которых получается металл, обладающий высокими механическими свойствами и имеющий электропроводность на 4-5% выше обычной вайербарсовой меди.

Конструкция стационарной анодной печи для рафинирования меди. Общий вид печи представлен на рисунке 6.57. Ее возводят на мощном фундаменте, выполненном из бетона в виде монолитной плиты с наклонной поверхностью корытообразной формы, на которой установлены опорные столбики из шамотного кирпича сечением 700х700 мм и высотой от 0,5 до 1,0 м. Опорные столбики и уклон фундамента предназначены для того, чтобы обеспечить беспрепятственный сток металла в аварийной ситуации при его прорыве через подину, а также для создания условий эффективного охлаждения элементов металлического каркаса печи (поперечных тяг) за счет естественной циркуляции воздуха. На опорные столбики укладывают чугунную плиту толщиной 25-50 мм, которая служит основанием подины.



1 – подина; 2 – вертикальный газоход; 3 – свод; 4 – каркас; 5 – горелочные устройства; 6 – загрузочные окна

Рисунок 6.57 – Общий вид анодной печи

Под печи выполняют в виде трехслойной обратной арки, имеющей уклон в сторону летки для выпуска металла. Между чугунной плитой и подом располагается прослойка из жаропрочного бетона. Нижний слой арки выкладывают из шамотного кирпича. Материал последующих слоев зависит от состава ванны. Для кислых ванн используют динасовые огнеупоры, для основных – хромомагнезитовые, магнезито-хромитовые или периклазошпинелидные.

Стены печи возводят преимущественно из хромомагнезитового и магнезитохромитового огнеупорного кирпича. Для теплоизоляции стен используют шамот-легковес. Свод большегрузных печей имеет распорно-подвесное или подвесное исполнение, обычно он изготовляется из магнезитохромитового огнеупорного кирпича и имеет толщину 380 мм. В хвостовой части печи к своду примыкает вертикальный боров, который служит для отвода продуктов сгорания топлива.

Снаружи печь заключена в стоечный каркас подвижного типа. Для придания прочности конструкции печи на уровне ванны ее нижняя часть забрана в металлический кожух, который выполняют в двух вариантах: составным из чугунных плит или цельносварным из листового железа толщиной ~ 25 мм.

Рафинировочные печи в основном отапливают природным газом, реже используют газо-мазутное отопление. Устройства для сжигания газа устанавливают в специальных отверстиях, расположенных в передней торцевой стенке печи, к которой со стороны печи примыкает камера для предварительного сжигания топлива. В отдельных случаях для отопления рафинировочных печей используют комбинированные газо-мазутные горелки. На большинстве заводов применяют горелки типа «труба в трубе».

Шихтовые материалы и жидкая черновая медь подаются в печь через специальные загрузочные окна в боковой стенке печи, размеры которых зависят от габаритов загружаемых слитков и способа загрузки. Обычно ширина рабочих окон составляет 1,5 м,

высота 1,0 м. Шлаковое окно расположено в задней торцевой стенке печи. Отверстие для выпуска металла имеет форму щели, высота которой соответствует уровню ванны. Оно расположено в боковой стенке печи и заделано специальной набивочной массой. Снаружи щель закладывают съемными чугунными плитами. При выпуске металла плиты и набивную массу из выпускной щели удаляют постепенно по мере понижения уровня ванны. Внутренние размеры щели зависят от емкости и назначения печи. Отношение длины ванны к ее ширине составляет величину порядка 3,5÷2.

Для утилизации тепла отходящих газов рафинировочных печей используют в основном радиационно-конвективные рекуператоры, в которых осуществляется подогрев дутьевого воздуха до 500-550°С независимо от периода плавки. Применение рекуператоров позволяет на одной печи получить экономию топлива за счет нагрева дутья до 4-5 млн. $м^3$ в год.

Основной задачей при организации теплового и температурного режимов в рафинировочных печах является создание условий для ускоренного расплавления металла в первый период процесса и обеспечение минимальных колебаний температуры в ванне в остальные периоды плавки.

6.2.3 Нагревательные печи

В цветной металлургии нагрев в топливных печах с последующей обработкой давлением применяется в большинстве случаев для слитков и заготовок из меди, алюминия и сплавов на их основе. Чаще всего для этой цели на обрабатывающих заводах используют двухзонные методические печи с монолитным подом или с нижним обогревом, конструкция которых подробно описаны выше в разделе 6.1.6 данного учебника.

Температура нагрева металла в методических печах цветной

металлургии обычно не превышает 850-900°С. Для нагрева металла до этих температур в сварочной зоне необходимо поддерживать температуру порядка 1000-1050°С. Печи отапливаются обычно природным газом, который подводится к горелкам, расположенным в сварочной зоне. Иногда для того, чтобы рассредоточить тепловую нагрузку по длине печи горелки устанавливают в шахматном порядке вдоль боковых стен печи. Сжигание газа осуществляется чаще всего с помощью двухпроводных горелок.

С целью повышения эффективности использования топлива и улучшения условий его сгорания методические печи оборудуют металлическими рекуператорами для подогрева дутья до 250-300°С. Напряжение активного пода при нагреве медных слитков составляет 1600 кг/(м^2·ч) при удельном расходе тепла 1540 кДж/кг; для алюминиевых слитков эти показатели соответственно равны 500кг/(м^2·ч) и 2160 кДж/кг. Производительность методических печей для нагрева цветных металлов и сплавов около 25-30 т/ч.

Конструкции методических печей для нагрева цветных металлов и сплавов практически не отличаются от аналогичных печей черной металлургии (см. раздел 6.1.6), поэтому остановимся только на особенностях нагрева цветных металлов.

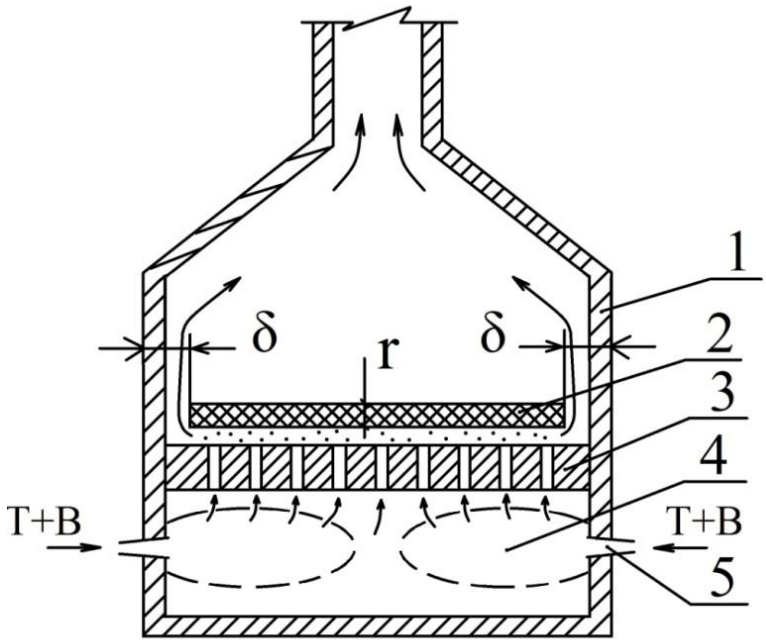
Заготовки из меди, алюминия и сплавов на их основе по сравнению с черными металлами обладают исключительно высокими коэффициентами теплопроводности и относительно низкими значениями степени черноты нагреваемых поверхностей. Помимо того заготовки из цветных металлов отличаются небольшими габаритами, что в сочетании с высокой теплопроводностью позволяет отнести их к категории тонких в тепловом отношении тел. Нагрев таких заготовок может осуществляться значительно более интенсивно, чем изделий из черных металлов, так как отсутствует реальная опасность возникновения высоких термонапряжений, вызываемых

большими перепадами температур между поверхностью и центром нагреваемых слитков или заготовок. Вместе с тем необходимо учитывать, что цветные металлы отличаются повышенной склонностью к окислению, и поэтому нельзя допускать, чтобы газовая атмосфера в печи содержала более 0,1% кислорода.

Технология нагрева цветных металлов и сплавов содержит также ряд специфических требований. Например, при нагреве сплавов на основе алюминия отклонение от заданного режима нагрева допускается в очень узких пределах порядка 5-10°С. При нагреве заготовок из латуни и других медноцинковых сплавов должны быть полностью исключены местные перегревы из-за склонности цинка к активному «выгоранию». Недопустимо также насыщение нагреваемой меди водородом, так как это ведет к повышению хрупкости металла вследствие так называемой «водородной болезни» меди.

Невысокие конечные температуры нагрева цветных металлов и их сравнительно низкая поглощательная способность являются основной причиной необходимости интенсификации конвективного теплообмена в рабочем пространстве нагревательных печей.

Печь для нагрева на газовой подушке. Схема печи показана на рисунке 6.58. Печь предназначена для нагрева или термообработки непрерывной ленты и отдельных листов. Топливо сжигается в подподовой топке, а продукты сгорания выходят через отверстия в перфорированной подине в зазор между подиной и нагреваемым листом, который и является *газовой подушкой*. Газы из подушки выходят через зазор шириной «δ» между краями листа и стеной печи и удаляются из печи через выпускное отверстие, отводятся на утилизацию. Для поддержания листа во взвешенном состоянии в газовой подушке должно поддерживаться давление, равное давлению листа, значение которого определяется скоростью газов в зазоре «δ».



1 – стена рабочей камеры; 2 – нагреваемый лист; 3 – перфорированная подина; 4 – подподовая топка; 5 – горелки; Т – топливо; В – воздух

Рисунок 6.58 – Схема печи для нагрева листового проката на газовой подушке

Например, для алюминиевого листа ($\rho = 2700$ кг/м^3) толщиной r=10мм, в газовой подушке должно поддерживаться давление

$$p = \rho \cdot g \cdot r = 2700 \cdot 9{,}8 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 265 \text{ Па}.$$

Продукты сгорания ($\rho_{г0} = 1{,}25$ кг/м^3, $t_г = 400$°C) должны выходить через зазор «δ» со скоростью, определяемой по формулам истечения

$$W_г = \varphi \sqrt{\frac{2p}{\rho_г}},$$

если

$$\rho_г = \rho_{г0} \cdot \frac{273}{273 + t_г} = 1{,}25 \cdot \frac{273}{273 + 400} = 0{,}51 \text{ кг/м}^3;$$

$\varphi \cong 0{,}8 -$ коэффициент истечения,
тогда

$$W_г = 0{,}8 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 265}{0{,}51}} = 25{,}8 \text{ м/с}.$$

Печь на газовой подушке имеет следующие достоинства:

- транспортировка металла без травмирования поверхности листа;

- высокий коэффициент теплоотдачи от газов к металлу ($\alpha = 300 - 400$ Вт/(м$^2 \cdot$ К)) за счет интенсивного конвективного теплообмена, т.к. струи греящих газов, выходящие из отверстий подины, направлены к поверхности листа под углом 90°;

- возможность совмещения процессов нагрева на газовой подушке и охлаждения на воздушной подушке в одном агрегате.

К недостаткам печи следует отнести:

- высокое давление в подушке затрудняет обслуживание агрегата в местах загрузки и выгрузки металла и требует дополнительного оборудования;

- высокая температура газов на выходе из печи требует обязательной утилизации тепла отходящих газов;

- проблемы устойчивости при нагреве отдельных листов.

7 Теплотехнические расчеты печей

7.1 Расчет горения топлива

Расчет горения топлива производится на основе химического состава топлива для определения следующих величин:

- $Q_н^р$ – низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг($м^3$);
- L_0 – теоретически необходимое количество воздуха, $м^3/м^3$;
- $L_д$ – действительное количество воздуха, $м^3/м^3$;
- $V_д$ – объем продуктов сгорания, $м^3/м^3$;
- химический состав продуктов сгорания %: CO_2, H_2O, SO_2, N_2;
- $t_к, t_д$ – калориметрическая и действительная температуры горения.

Для осуществления процесса горения вместе с топливом к месту горения нужно подавать необходимое количество воздуха. Горение газообразного топлива происходит по следующим реакциям:

$$CO + 0{,}5O_2 = CO_2,$$
$$H_2 + 0{,}5O_2 = H_2O,$$
$$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O,$$
$$H_2S + 1{,}5O_2 = SO_2 + H_2O,$$
$$C_mH_n + \left(m + \frac{n}{4}\right)O_2 = mCO_2 + \frac{n}{2}H_2O.$$

Низшая теплота сгорания газообразного топлива определяется по формуле:

$$Q_н^р = 127{,}7 \cdot CO + 108 \cdot H_2 + 358 \cdot CH_4 + 590 \cdot C_2H_4 +$$
$$+636 \cdot C_2H_6 + 913 \cdot C_3H_8 + 1185 \cdot C_4H_{10} + 1465 \cdot C_5H_{12} +$$
$$+234 \cdot H_2S, \text{ кДж}/м^3. \quad (7.1)$$

где 127,7, 108, 358 и т.д. – тепловые эффекты реакции окисления соответствующих компонентов (CO, H_2, CH_4 и т. д.);

CO, H_2, CH_4 и т. д. – содержание горючих компонентов в топливе, %.

Методика расчета горения жидкого и твердого топлива приведена [49].

Теоретически необходимое количество воздуха:

$$L_0 = \frac{100}{O_2^в} \cdot 0{,}01 \cdot \left(0{,}5 \cdot CO + 0{,}5 \cdot H_2 + 2 \cdot CH_4 + \left(m + \frac{n}{4}\right) C_m H_n + \cdots - O_2^т\right) \times (1 + 0{,}001242 \cdot d_в), \frac{м^3 воздуха}{м^3 топлива}, \quad (7.2)$$

где $O_2^в$ – содержание кислорода в окислителе (воздухе);

$d_в$ – влажность воздуха, г/м^3, определяется в зависимости от температуры воздуха (табл. 7.1)

Таблица 7.1 – Зависимость влажности воздуха от температуры

t, °C	0	10	20	30	40
$d_в$, г/м^3	4,8	9,8	18,9	35,1	63,1

Действительное количество расход воздуха:

$$L_д = \alpha \cdot L_0, \quad (7.3)$$

где α – коэффициент расхода воздуха, который является отношением действительного расхода воздуха к теоретически необходимому.

При сжигании топлива образуются продукты сгорания. Объем продуктов сгорания (дыма):

$$V_д = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2} + V_{O_2} + V_{N_2}, \frac{м^3 дыма}{м^3 топлива}; \quad (7.4)$$

$$V_{CO_2} = 0{,}01 \cdot \left(CO + CH_4 + mC_mH_n + \cdots + CO_2^p\right), \frac{м^3}{м^3}; \quad (7.5)$$

$$V_{H_2O} = 0{,}01 \cdot \left(H_2 + 2CH_4 + \frac{n}{2}C_mH_n + H_2O^p\right) + \\ +0{,}00124 \cdot d_в, \frac{м^3}{м^3}; \quad (7.6)$$

$$V_{SO_2} = 0{,}01 \cdot (H_2S + SO_2), \frac{м^3}{м^3}; \quad (7.7)$$

$$V_{O_2} = (\alpha - 1) \cdot 0{,}01 \cdot O_2^в \cdot L_0, \frac{м^3}{м^3}; \quad (7.8)$$

$$V_{N_2} = 0{,}01\left(N_2^p + N_2^в \cdot L_д\right), \frac{м^3}{м^3}. \quad (7.9)$$

Состав продуктов сгорания (дыма), %:

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_д} \cdot 100; \quad (7.10)$$

$$H_2O = \frac{V_{H_2O}}{V_д} \cdot 100; \quad (7.11)$$

$$SO_2 = \frac{V_{SO_2}}{V_д} \cdot 100; \quad (7.12)$$

$$O_2 = \frac{V_{O_2}}{V_д} \cdot 100; \quad (7.13)$$

$$N_2 = \frac{V_{N_2}}{V_д} \cdot 100. \quad (7.14)$$

$$\underline{\qquad\qquad\qquad\qquad}$$
$$\sum = 100\%$$

Температура горения топлива – температура, которую приобретают продукты сгорания при сжигании топлива. Различают следующие понятия температуры сгорания топлива:

- жаропроизводительность;
- калориметрическая;

- теоретическая;
- действительная.

Жаропроизводительность – это расчетная температура горения топлива при условии, что вся выделившаяся при горении теплота идет на нагрев продуктов сгорания при сжигании холодного топлива и воздуха при теоретически необходимом расходе воздуха:

$$t_ж = \frac{Q_н^р}{V_д \cdot c_д^{t_ж}}, °C, \qquad (7.15)$$

где $V_д$ – объем продуктов сгорания (дыма), м^3/ м^3, при $\alpha = 1{,}0$;

$c_д^{t_ж}$–теплоемкость продуктов сгорания при температуре жаропроизводительности, Дж/(м^3·К).

Калориметрическая температура – это расчетная температура горения при условии, что вся выделившаяся при горении теплота идет на нагрев продуктов сгорания. Компоненты горения (топливо и воздух) могут быть как холодными, так и подогретыми, а сжигание топлива происходит при любом коэффициенте расхода воздуха α:

$$t_к = \frac{Q_н^р + Q_{ф.т.} + Q_{ф.в.}}{V_д \cdot c_д}, °C, \qquad (7.16)$$

где $Q_{ф.т.}$ и $Q_{ф.в.}$ – физическая теплота подогретого соответственно топлива и воздуха, Дж/м^3.

Теоретическая температура – это калориметрическая температура с учетом диссоциации продуктов сгорания.

$$t_т = \frac{Q_н^р + Q_{ф.т.} + Q_{ф.в.} - Q_{дис}}{V_д \cdot c_д}, °C, \qquad (7.17)$$

где $Q_{дис}$ – теплота диссоциации CO_2 и H_2O, кДж/м^3. Заметная диссоциация наблюдается при температуре выше 1800...2000°С.

При сжигании топлива в реальных условиях достигается действительная температура, которая ниже калориметрической и теоретической, т.к. из зоны горения идет излучение (потеря тепла). Действительная температура определяется по формуле:

$$t_д = \frac{Q_н^р + Q_{ф.т.} + Q_{ф.в.} - Q_{дис} - Q_{пот}}{V_д \cdot c_д}, °C, \quad (7.18)$$

где $Q_{пот}$ – потери теплоты излучением из зоны горения, кДж/м^3.

Действительную температуру трудно определить расчетом. Поэтому вводится понятие *пирометрического коэффициента*, который является эмпирической величиной и зависит от температурного уровня процесса:

$$t_д = \eta_{пир} \cdot t_к. \quad (7.19)$$

Например: для нагревательных колодцев

$$\eta_{пир} = 0{,}6 - 0{,}7,$$

для мартеновских печей

$$\eta_{пир} = 0{,}8 - 0{,}9.$$

7.2 Расчет внешнего теплообмена

Общий тепловой поток от источника тепла в печи на поверхность материала, подвергаемого тепловой обработке

может быть представлен суммой тепловых потоков, переданных излучением и конвекцией

$$Q = Q_{изл} + Q_{конв}, Вт. \quad (7.20)$$

Тепловой поток излучением определяется по закону Стефана-Больцмана

$$Q_{изл} = \varepsilon_{прив} \cdot \sigma_0 (T_{ист}^4 - T_м^4) \cdot F_м, Вт, \quad (7.21)$$

тепловой поток конвекцией определяется по закону Ньютона-Рихмана

$$Q_{конв} = \alpha \cdot (t_{ист} - t_м) \cdot F_м, Вт, \quad (7.22)$$

где $\varepsilon_{прив}$ – приведенная степень черноты системы («газ-кладка-материал», «печь-материал», «кладка-материал»).

α – коэффициент конвективной теплоотдачи, $Вт/(м^2 \cdot К)$;

$\sigma_0 = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ $Вт/(м^2 \cdot К^4)$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

$T_{ист}, К$; $t_{ист}, °C$ – температура источника тепла;

$T_м, К$; $t_м, °C$ – температура поверхности материала;

$F_м$ – тепловоспринимающая поверхность, м.

Коэффициент конвективной теплоотдачи определяется по критериальным формулам, в зависимости от скорости, теплофизических свойств продуктов сгорания, геометрических размеров, расчет производится по эмпирическим критериальным зависимостям

$$Nu = f(Re, Pr, Gr), \quad (7.23)$$

где Nu –критерий Нуссельта

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha \cdot \mathrm{d}}{\lambda} \qquad (7.24)$$

является определяющим, т.к. содержит искомый коэффициент теплоотдачи α.

- критерий Рейнольдса

$$\mathrm{Re} = \frac{\mathrm{w} \cdot \mathrm{d}}{\nu}; \qquad (7.25)$$

- критерий Прандтля

$$\mathrm{Pr} = \frac{\nu}{\mathrm{a}}, \qquad (7.26)$$

- критерий Грасгофа

$$\mathrm{Gr} = \frac{\beta \cdot \mathrm{g} \cdot \Delta\mathrm{t} \cdot \mathrm{d}^3}{\nu^2}. \qquad (7.27)$$

В формулах (7.24-7.27) d – характерный линейный размер, м; w – скорость дымовых газов, м/с; λ – коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м · К); ν – кинематический коэффициент вязкости, $\mathrm{м}^2/\mathrm{с}$; a – коэффициент температуро-проводности газа, $\mathrm{м}^2/\mathrm{с}$; $\beta = 1/273$ – коэффициент объемного расширения газа; $\mathrm{g} = 9{,}8\ \mathrm{м}/\mathrm{с}^2$ – ускорение силы тяжести; $\Delta\mathrm{t}$ – разница температур газа и тепловоспринимающей поверхности, °С.

Эмпирические формулы (7.23) выбираются по справочникам в зависимости от следующих характеристик: 1) режим движения газов (турбулентный, ламинарный); 2) взаимное расположение потока газа и тепловоспринимающей поверхности (продольное омывание, омывание под углом); 3) форма омываемой поверхности (плоскость, одиночная труба, пучок труб и др.).

Например, для омывания плоской поверхности при турбулентном движении имеет вид [25]

$$\mathrm{Nu} = \varphi \cdot 0{,}037\mathrm{Re}^{0,8}\mathrm{Pr}^{0,43}, \qquad (7.28)$$

где $\varphi -$ коэффициент, зависящий от угла β, под которым поток газа направлен на поверхность:

β	0	10	40	60	70	90
φ	1,00	1,05	1,87	2,32	2,42	2,50

При турбулентном режиме движения газов, который как правило имеет место в современных топливных печах, коэффициент теплоотдачи конвекцией пропорционален скорости в степени $0{,}8, \text{т. е. } \alpha \infty \mathrm{w}^{0,8}$. В высокотемпературных печах ($\mathrm{t_{ист}} > 700°\mathrm{C}$) тепловой поток конвекцией составляет 5-10% от общего и учитывается поправочным коэффициентом 1,05-1,10 без расчета.

В печах с развитым радиационным внешним теплообменом основная задача расчета – определение приведенной степени черноты системы $\varepsilon_{\text{прив}}$. В системе выделяются плотные поверхности материала (7.21) и кладки, а объем между этими поверхностями заполнен излучающими или лучепрозрачными газами. Реальный процесс радиационного теплообмена весьма сложен, и расчеты $\varepsilon_{\text{прив}}$ должны содержать элементы интегрального излучения с учетом неравномерности температурного поля кладки, материала и объема газов. Для того, чтобы задача определения $\varepsilon_{\text{прив}}$ стала решаемой, делают допущения:

- температура печных газов одинакова по всему объему;
- температура кладки одинакова по всей поверхности;
- температура материала одинакова по всей поверхности;
- степень черноты излучающих газов $\varepsilon_{\text{г}}$ одинакова по всем направлениям и определяется по средней температуре газов;

- печь имеет идеальную обмуровку, т.е. тепловые потери через кладку равны нулю.

Несмотря на допущения, приводимые ниже, расчетные формулы имеют достаточное совпадение с практическими результатами. При выборе формул для расчета $\varepsilon_{прив}$ учитываются следующие параметры радиационного теплообмена.

1) Степень черноты газового объема. а) Вариант $\varepsilon_г = 0$, что соответствует или муфельным печам, или электрическим печам сопротивления. В муфельных печах зона горения отделена *муфелем* от зоны теплообмена, или горение топлива производится внутри *радиантных труб*. Источником тепла в этих случаях являются или поверхности муфелей, или электронагревателей. в) Степень черноты в варианте $\varepsilon_г > 0$, в этом случае печные газы являются продуктами сгорания, а $\varepsilon_г$ зависит от содержания трехатомных газов, размеров излучающего объема, температуры, а также содержания плотных частиц (сажистого углерода, твердых или жидких частиц золы, и т.п.).

2) Температура источника тепла. Первоисточником тепла в топливной печи с $\varepsilon_г > 0$ являются продукты сгорания, или печные газы. Поверхность кладки является посредником в передачи тепла от газов к материалу, и является вторичным источником тепла. В печной теплотехнике также широко используется понятие *температуры печи* как усредненной температуры источника тепла. Поэтому в формуле (7.21) если $T_{ист} = T_г$, то $\varepsilon_{прив} = \varepsilon_{гкм}$; если $T_{ист} = T_{печ}$, то $\varepsilon_{прив} = \varepsilon_{печ.м}$; если $T_{ист} = T_{кл}$, то $\varepsilon_{прив} = \varepsilon_{км}$. Т.к. в любом варианте должен быть получен одинаковый результат $Q_{изл}$, а $T_г > T_{печ} > T_{кл}$, то $\varepsilon_{гкм} < \varepsilon_{печ.м} < \varepsilon_{км}$.

3) Форма тепловоспринимающей поверхности материала, что характеризуется угловыми коэффициентами. Если поверхность материала плоская или выпуклая, то угловой

коэффициент $\varphi_{мм} = 0$, т.е. теплообмен излучением «с материала на материал» невозможен. Если излучение «с материала на материал» возможно, то $\varphi_{мм} \neq 0$ (поверхность материала вогнутая, или садка состоит из нескольких тел, и др.)

Выбор расчетных формул удобно выбирать с помощью таблицы 7.2.

Таблица 7.2 – Выбор расчетных формул $\varepsilon_{прив}$

$\varepsilon_г = 0$	$\varepsilon_г \neq 0$		
6.28	$T_{ист}$	$\varepsilon_{прив}$	
		$\varphi_{мм} \neq 0$	$\varphi_{мм} = 0$
	$T_г$	6.29	6.32
	$T_{печ}$	6.30	6.33
	$T_{кл}$	6.31	6.34

Приведенная степень черноты для $\varepsilon_г = 0$ определяется по формуле 7.29 [25]:

$$\varepsilon_{прив} = \frac{\varepsilon_к \cdot \varepsilon_м}{\left(1 - \varphi_{кк}(1 - \varepsilon_к)\right)\left(1 - \varphi_{мм}(1 - \varepsilon_м)\right) - \varphi_{км}\varphi_{мк}(1 - \varepsilon_к)(1 - \varepsilon_м)}, \quad (7.29)$$

где $\varepsilon_к$ – степень черноты поверхности источника тепла (*кладки*);

$\varepsilon_м$ – степень черноты поверхности материала;

$\varphi_{кк}, \varphi_{мм}, \varphi_{км}, \varphi_{мк}$ – угловые коэффициенты.

Приведенные степени черноты для варианта $\varepsilon_г \neq 0$ выбирается в зависимости от температуры источника тепла и углового коэффициента.

Для $T_{ист} = T_г$ и $\varphi_{мм} \neq 0$

$$\varepsilon_{прив} \equiv \varepsilon_{гкм} = \frac{\varepsilon_г \cdot \varepsilon_м}{\varepsilon_г + \varphi_{км} \cdot \varepsilon_м(1 - \varepsilon_г)}. \quad (7.30)$$

Для $T_{ист} = T_{печ}$ и $\varphi_{мм} \neq 0$

$$\varepsilon_{прив} \equiv \varepsilon_{печ.м} = \frac{\varepsilon_м \cdot \varphi_{мк}}{1 - \varphi_{мм}(1 - \varepsilon_м)}. \quad (7.31)$$

Для $T_{ист} = T_{кл}$ и $\varphi_{мм} \neq 0$

$$\varepsilon_{прив} \equiv \varepsilon_{км} = \varepsilon_м. \quad (7.32)$$

Для $T_{ист} = T_г$ и $\varphi_{мм} = 0$

$$\varepsilon_{прив} \equiv \varepsilon_{гкм} = \frac{\varepsilon_г \cdot \varepsilon_м(1 + \varphi_{км}(1 - \varepsilon_г))}{\varepsilon_г + \varphi_{км}(1 - \varepsilon_г)(1 - (1 - \varepsilon_г)(1 - \varepsilon_м))}. \quad (7.33)$$

Для $T_{ист} = T_{печ}$ и $\varphi_{мм} = 0$

$$\varepsilon_{прив} \equiv \varepsilon_{печ.м} = \varepsilon_м. \quad (7.34)$$

Для $T_{ист} = T_{кл}$ и $\varphi_{мм} = 0$

$$\varepsilon_{прив} \equiv \varepsilon_{км} = \frac{\varepsilon_м(1 + \varphi_{км}(1 - \varepsilon_г))}{1 + \varphi_{км}(1 - \varepsilon_г)(1 - \varepsilon_м)}. \quad (7.35)$$

Угловые коэффициенты определяются из выражений:

для $\varphi_{мм} \neq 0$

$$\varphi_{кк} = \frac{F_к}{F_к + F_м}, \quad (7.36)$$

$$\varphi_{км} = \frac{F_м}{F_к + F_м}, \quad (7.37)$$

$$\varphi_{мм} = \frac{F_м}{F_к + F_м}, \quad (7.38)$$

$$\varphi_{мк} = \frac{\varphi_к}{F_к + F_м}; \quad (7.39)$$

для $\varphi_{мм} = 0$

$$\varphi_{кк} = 1 - \frac{F_м}{F_к}, \quad (7.40)$$

$$\varphi_{км} = \frac{F_м}{F_к}, \quad (7.41)$$

$$\varphi_{мм} = 0, \quad (7.42)$$

$$\varphi_{мк} = 1, \quad (7.43)$$

где $F_м$ – поверхность материала, м^2;

$F_к$ – поверхность кладки, м^2.

На практике чаще используют формулы для $T_{ист} = T_{печ}$, что связано с относительной простотой измерения температуры печи по сравнению с температурой газа или температурой кладки. Температуру печи измеряют обычно термопарой, которая устанавливается в *представительной точке* объема печи. Эта точка выбирается в процессе наладочных работ, когда температуру газов и кладки измеряют специальными способами, а температуру печи находят из системы уравнений:

$$q = \varepsilon_{гкм} \cdot \sigma_0 (T_г^4 - T_м^4), \quad (7.44)$$

$$q = \varepsilon_{печ.м} \cdot \sigma_0 (T_{печ}^4 - T_м^4), \quad (7.45)$$

$$q = \varepsilon_{км} \cdot \sigma_0 (T_{кл}^4 - T_м^4). \quad (7.46)$$

Степень черноты продуктов горения определяют суммой

$$\varepsilon_г = \varepsilon_{CO_2} + \zeta \cdot \varepsilon_{H_2O}$$

причем степень черноты углекислого газа ε_{CO_2} и водяных паров ε_{H_2O} определяется в зависимости от толщины газового слоя, парциального давления газа и температуры с помощью номограмм

$$\varepsilon_{CO_2} = f\left(s, p_{CO_2}, T\right) \text{и } \varepsilon_{H_2O} = f\left(s, p_{H_2O}, T\right),$$

которые приводятся в специальной литературе.

Для диапазона температур 400-1500°С могут быть использованы эмпирические формулы:

$$\varepsilon_{CO_2} = 0{,}165\left(p_{CO_2} \cdot S\right)^{0{,}33} \cdot (0{,}01 \cdot T)^{-0{,}5};$$

$$\varepsilon_{H_2O} = 0{,}209 \cdot {p_{H_2O}}^{0{,}8} \cdot S^{0{,}6} \cdot (0{,}01 \cdot T)^{-1};$$

$$[p] = \text{кПа}; \qquad [S] = \text{м}; \qquad [T] = \text{К}.$$

Степень черноты в варианте $\varepsilon_г > 0$, когда помимо излучающих треатомных газов CO_2 и H_2O в излучающем объеме содержатся плотные частицы (сажистого углерода, твердых или жидких частиц золы и др.) можно представить как сумму степеней черноты газов и плотных частиц

$$\varepsilon_г = \varepsilon_{(CO_2 + H_2O)} + \varepsilon_{пл} \qquad (7.47)$$

где степень черноты плотных частиц

$$\varepsilon_{пл} = k_п \cdot \mu \cdot l, \qquad (7.48)$$

где $k_п$ – коэффициент ослабления [54],

$$k_п = 0{,}42\frac{B}{\rho}273 \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{T^2 \cdot d^2}}, (\text{доли ед.}) \qquad (7.49)$$

μ – плотность запыленного потока (например, при сжигании пылеугольного топлива

$$\mu = \frac{A^c \cdot G}{V_г}, \frac{кг}{м^3}, \qquad (7.50)$$

где A^c – содержание золы (доли единицы);

G – расход твердого топлива, $кг/с$;

$V_г$ – выход продуктов сгорания, $м^3/с$;

l – толщина излучающего слоя, м;

B – коэффициент, соответствующий виду топлива. Значения коэффициента B для ряда топлив приведены в таблице А;

T – температура, К;

d – усредненный диаметр частиц, мкм;

ρ – плотность пыли, $г/м^3$.

Таблица А – Значение коэффициента B в формуле 7.49

Вид топлива	B	
	Золовая пыль	Угольная пыль
Печорский уголь	0,20	0,08
Подмосковный бурый уголь	0,15	-
Донецкий газовый уголь	0,15	0,06
Эстонский сланец	0,15	-
Тощий уголь	0,12	-
Антрацитовый штыб	0,08	0,14

Исследования [52-55] показали, что для условий использования пылеугольного топлива (ПУТ) степень черноты газового объема фурменной зоны доменной печи, заполненного ПУТ и частицами золы сгоревшего ПУТ, составляет $\varepsilon_г = 0{,}8 \div 1{,}0$. (Следует

отметить, что исследование теплообмена излучением в фурменной зоне позволило выявить влияние ПУТ на нагрев продуктов доменной плавки – чугуна шлака).

7.3 Методы расчета нестационарного внутреннего теплообмена

Одной из задач печной теплотехники является определение продолжительности теплового процесса, например, нагрева стальных заготовок в нагревательных печах перед прокаткой, или охлаждения металла при термообработке. При этом часто требуется также информация о динамике распределения температур по объему нагреваемых (охлаждаемых) тел для определения характера возникающих температурных напряжений, и т.д. Такие задачи являются задачами *нестационарного внутреннего теплообмена*, методы решения которых приводятся ниже.

7.3.1 Постановка задачи. Обзор методов решения

Нестационарное температурное поле в трехмерной постановке описывается дифференциальным уравнением Фурье

$$c\rho\frac{\partial t}{\partial \tau}=\left(\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial z}\right)\right)+\frac{q_v}{c\rho}, \qquad (7.51)$$

или

$$c\rho\frac{\partial t}{\partial \tau}=\mathrm{div}(\lambda\,\mathrm{grad}t)+\frac{q_v}{c\rho}, \qquad (7.52)$$

где переменные теплофизические свойства $\lambda\,(x, y, z, t)$, $c\,(x, y, z, t)$, $\rho\,(x, y, z, t)$ зависит от пространственных координат и температуры. Если принять теплофизические свойства постоянными и ввести коэффициент температуропроводности $a = \lambda/(c \cdot \rho)$, то уравнение (7.51) примет вид

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right) + \frac{q_v}{c\rho}; \qquad (7.53)$$

для одномерных задач уравнение Фурье может быть представлено в идее

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a\left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{k_1 - 1}{r}\frac{\partial t}{\partial r}\right) + \frac{q_v}{c\rho}, \qquad (7.54)$$

где $k_1 = 1$ для бесконечной плиты, $k_1 = 2$ для бесконечного цилиндра, $k_1 = 3$ для шара. В уравнениях (7.53) и (7.54)

t – температура, ℃;

τ – время, с;

x, y, z – координаты, м;

a – коэффициент температуропроводности, м^2/с;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);

ρ – плотность, кг/м^3;

q_v – тепловыделение внутренних источников тепла, Дж/(м^3·с);

r – линейная координата одномерных тел, м.

Дифференциальные уравнения Фурье имеют бесконечное множество решений. Для получения единственного решения применительно к конкретному случаю необходимо кроме основного уравнения задать дополнительные характерные *условия однозначности:* геометрические (форма и размеры),

теплофизические свойства, начальные и граничные условия. Совокупность двух последних называется *краевыми условиями*, а отыскание решений с учетом этих условий – *краевой задачей математической физики*.

Начальные условия задают распределение температур в теле в начальный момент времени

$$t(x, y, z)|_{\tau=0} = f(x, y, z).$$

Например, наиболее простой случай, имеющий практическое значение – одинаковое распределение температур по всему объему

$$t(x, y, z)|_{\tau=0} = t_0 = \text{const}.$$

В некоторых случаях это может быть параболическое распределение температур (как результат предыдущих тепловых операций):

$$t(r)|_{\tau=0} = t_{ц} + \Delta t\left(\frac{r}{r_0}\right)^2.$$

Граничные условия (ГУ) характеризуют тепловое взаимодействие поверхности тела с окружающей средой. Известны четыре рода ГУ.

ГУ I рода состоят в задании изменения температур на поверхности тела как функции координат и времени

$$t_{пов}(\tau) = f(x, y, z, \tau).$$

Например, постоянство температур поверхности

$$t_{пов}(\tau) = t_{пов} = \text{const},$$

или линейное изменение температуры

$$t_{пов}(\tau) = t_0 + C_н \cdot \tau,$$

где $C_н$ – скорость изменения температуры.

ГУ II рода состоят в задании изменения плотности теплового потока на поверхности как функции координат и времени:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial r}|_{r=r_0} = f(x, y, z, \tau).$$

Например, постоянство теплового потока:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial r}|_{r=r_0} = q_{пов} = const.$$

Или, условие адиабатности, когда одна из поверхностей теплоизолирована:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial r}|_{r=0} = 0.$$

ГУ III рода задают температуру греющей (или охлаждающей) среды как функцию времени и условия теплообмена (радиационный и (или) конвективный):

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial r}|_{r=r_0} = \pm\sigma_{пр}\left(T_{ср}^4 - T_{пов}^4\right) \pm \alpha\left(t_{ср} - t_{пов}\right),$$

$$t_{ср} = f(\tau).$$

В частности – постоянство температуры:

$$t_{ср} \neq f(\tau) = const.$$

ГУ IV рода состоят в задании на границе двух идеально соприкасающихся тел равенства температур и тепловых потоков на границе раздела (рис. 7.1)

$$t_{п1} = t_{п2},$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t}{\partial n}|_1 = \lambda_2 \frac{\partial t}{\partial n}|_2.$$

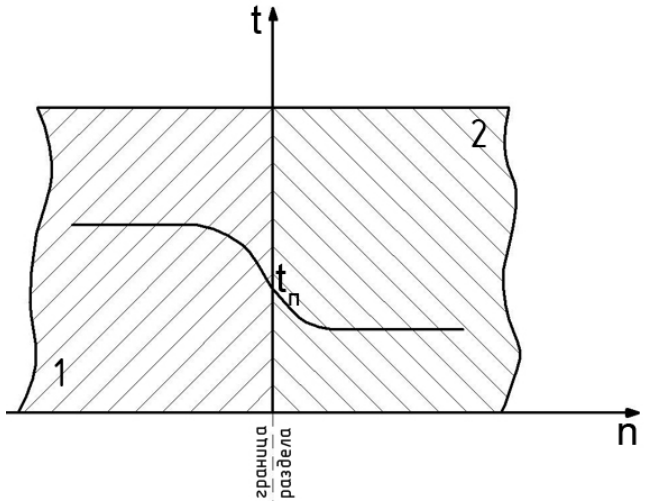


Рисунок 7.1 – Граничные условия IV рода

Краевые задачи теплопроводности подразделяются на линейные и нелинейные. Источниками нелинейности являются зависимости теплофизических свойств от температуры и координат.

Граничные условия III рода, т.е. закон изменения температуры среды во времени, могут быть неизвестными. Температура среды в этом случае определяется в процессе расчета, при этом необходимо вводить ещё одно уравнение в виде теплового баланса. Задачи, требующие совместного решения систем, описывающих внутренний и внешний теплообмены, называются *сопряженными*. Они близки к

реальным процессам и поэтому получают всё большее распространение.

Методы решения краевых задач теплопроводности можно разделить на точные (классические), аналоговые, приближенные инженерные (метод тепловой диаграммы И.Д.Семикина), численные.

К классическим методам относятся: метод разделения переменных (метод Фурье), операционные методы, к которым относятся метод интегральных преобразований (метод Н.С. Кошлякова) и метод бесконечных интегральных преобразований (метод преобразования Лапласа). Наиболее простым и применимым является метод Фурье, удобный для практического пользования тем, что в специальной литературе (работы Н.Ю.Тайца, А.В.Лыкова, В.А.Кривандина и др.) решения приводятся в виде критериальных графиков

$$\theta \equiv \frac{t_{ср} - t_{(r,\tau)}}{t_{ср} - t_{\tau=0}} = f\left(Fo, Bi, \frac{r}{r_0}\right).$$

Классические методы обладают рядом недостатков: 1) решение возможно только для тел простой формы (плита, цилиндр, шар); 2) допускается только одинаковая по объему начальная температура тела; 3) граничные условия II или III рода должны быть постоянными в течении всего нестационарного процесса; 4) теплофизические свойства тела не должны зависеть от температуры и координат , т.е. допускается только линейная постановка задачи.

К *аналоговым* относятся методы, основанные на гидравлическом, электрическом, механическом и акустическом подобии тепловых процессов. С развитием вычислительной техники они уступили место более современным численным методам.

Приближенные инженерные методы (тепловой диаграммы) достаточно просты, не требуют программирования и применения компьютеров, но дают лишь частичную информацию о температурном поле. Более подробно методы разобраны в разделе 7.3.2.

Численные методы более универсальны, допускают любые начальные и переменные граничные условия, переменные теплофизические свойства, нестандартную и произвольную форму тела с возможной деформацией. Ниже рассмотрены варианты численных методов: метод конечных разностей (МКР) и метод конечных элементов (МКЭ). Численные методы достаточно универсальны, однако имеют недостатки: 1) требуется выполнять большой объем вычислений (хотя и простейших), поскольку для определения температуры в заданный момент времени в заданной точке нужно рассчитать полное температурное для всех предыдущих моментов времени; 2) температура определяется лишь в избранных узлах сетки, а не в любой произвольной точке. Указанные недостатки невелики в условиях применения современных компьютеров с большим быстродействием и объемом памяти.

7.3.2 Приближенные инженерные методы тепловой диаграммы И.Д.Семикина

Основа метода. Математический аппарат метода прост и не требует обязательного программирования и применения компьютера. В тоже время с помощью этого метода можно получить информацию о продолжительности тепловой обработки тела и частичную информацию о температурном поле: определяется температура лишь в характерных точках (поверхность, ось тела, среднемассовая). Применение метода тепловой диаграммы возможно для тел простейшей формы

(пластина, цилиндр, шар) и при допущении, что теплофизические свойства (теплоемкость, теплопроводность, плотность, температуропроводность) постоянны в заданном интервале температуры или времени.

В основу метода тепловой диаграммы положено составление теплового баланса для подвергаемого тепловой обработке тела

$$q_{ср} \cdot F \cdot \tau = G \cdot c\left(\bar{t}_к - \bar{t}_н\right), \qquad Дж, \qquad (7.55)$$

где $q_{ср}$ – средняя плотность теплового потока, Вт/м^2;

F – тепловоспринимающая поверхность тела, м^2;

τ – время (продолжительность) тепловой обработки, с.

G – масса тела, кг;

$\bar{t}_н, \bar{t}_к$ – среднемассовая температура тела в начале и в конце тепловой обработки, °С, К;

c – удельная теплоемкость материала, средняя в интервале температуры $\left(\bar{t}_к - \bar{t}_н\right)$, Дж/(кг·К).

В левой части уравнения записано количество тепла, которое передано телу за время τ, в правой – количество тепла, необходимое для изменения температуры тела. Время тепловой обработки может быть определено из (7.55):

$$\tau = \frac{G \cdot c\left(\bar{t}_к - \bar{t}_н\right)}{q_{ср} \cdot F}, \frac{Дж}{Вт} = с, \qquad (7.56)$$

т.е. продолжительность тепловой обработки равно отношению изменения теплосодержания тела в Дж к интенсивности подвода (отвода) тепла в Вт. В формуле (7.56) отношение G/F – относительная масса:

для плиты толщиной r_0

$$\frac{G}{F} = \frac{r_0 \cdot F \cdot \rho}{F} = \frac{r_0 \cdot \rho}{1},$$

для цилиндра

$$\frac{G}{F} = \frac{\pi \cdot r_0^2 \cdot l \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot l} = \frac{r_0 \cdot \rho}{2},$$

для шара

$$\frac{G}{F} = \frac{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_0^3 \cdot \rho}{4 \cdot \pi \cdot r_0^2} = \frac{r_0 \cdot \rho}{3}.$$

Для всех тел простейшей формы

$$\frac{G}{F} = \frac{r_0 \cdot \rho}{k_1},$$

где k_1 - коэффициент материальной нагрузки, равный:
- для плиты $- k_1 = 1$;
- для цилиндра $- k_1 = 2$;
- для шара $- k_1 = 3$.

Тогда выражение (7.56) приобретает вид

$$\tau = \frac{r_0 \cdot \rho \cdot c}{k_1 \cdot q_{ср}} \left(\bar{t}_к - \bar{t}_н\right), \qquad (7.57)$$

здесь r_0 – толщина прогреваемого слоя, равная радиусу цилиндра и шара, а для плиты толщиной S $r_0 = S$ при одностороннем нагреве, $r_0 = 0{,}5 \cdot S$ – при двустороннем нагреве, и $r_0 = \mu \cdot S$ – при несимметричном нагреве, где μ – коэффициент несимметричности.

Скорость нагрева тела зависит от интенсивности подвода тепла и формы тела. Если (7.55) записать в дифференциальной форме

$$q_{ср} \cdot F \cdot d\tau = G \cdot c \cdot dt, \qquad (7.58)$$

то скорость нагрева

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{q \cdot F}{G \cdot c} = \frac{k_1 \cdot q}{r_0 \cdot \rho \cdot c}.$$

Это значит, что при одинаковой плотности теплового потока шар ($k_1 = 3$) нагревается в три раза быстрее, чем плита ($k_1 = 1$). Естественно также, что чем меньше толщина прогреваемого слоя то, тем выше скорость нагрева.

При рассмотрении динамики нагрева различают термически тонкие и термически массивные тела. В процессе нагрева по сечению тела формируется перепад температур между поверхностью и центром $\Delta t = t_к - t_ц$, и если этот перепад пренебрежимо мал, тело принимают как термически тонкое.

Термически тонким считают тело, при нагреве которого критерий Био

$$Bi = \frac{\alpha \cdot r_0}{\lambda} \leq 0{,}3, \qquad (7.59)$$

где $\alpha -$ коэффициент теплоотдачи от источника тепла к поверхности тела, Вт/(м^2·К);

$\lambda -$ коэффициент теплопроводности тела, Вт/(м·К).

Если $Bi > 0{,}3$, то тело массивное, и нужно учитывать перепад температур.

Нагрев массивного тела при постоянных граничных условиях II рода $q_n = const$ (тепловой поток на поверхность тела является постоянным в течение всего времени).

Начальные условия: в момент времени $\tau = 0 \quad t_r = t_н = const$.
Условия однозначности: форма тела – плита, толщина прогреваемого слоя r_0, теплофизические свойства λ, c, ρ, a.
Динамика нагрева может быть представлена графически в координатах $t = f(\tau), q_п = f(\tau), t = f(r), \ q = f(r)$ (рис.7.2).

На рисунке 7.2в показана тепловая диаграмма $q_п = f(\tau)$. Заштрихованная площадь равна $q_п \cdot F \cdot \tau_к$ – это количество тепла, переданное за время процесса $\tau_к$ (индекс «к» - конец процесса). На рисунке 7.2а – показано изменение характерных температур – поверхности $t_п$, центра $t_ц$, среднемассовой $\bar{t}$. Наиболее представительной, отображающей теплосодержание тела, является среднемассовая температура – $\bar{t}$, зависимость которой от времени – прямая линия, т.к. $q_п = const$, а значит за одинаковые промежутки времени $\Delta\tau$ среднемассовая температура повышается на одинаковые приращения Δt.

Начальный участок времени τ' называется инерционным периодом – это время, за которое тепловой поток достигает центра тела. В этом периоде считается, что температура центра остается неизменной, а температура поверхности повышается с уменьшающейся скоростью. К концу инерционного периода формируется перепад температур $\Delta t = t_п - t_ц$, который остается неизменным в последующее время, которое называется регулярным режимом, и рассчитывается по формуле

$$\Delta t = \frac{q_п \cdot r_0}{k_2 \cdot \lambda}, \qquad (7.60)$$

где $k_2 = 2$ для тел любой простейшей формы и называется коэффициентом усреднения температуры по сечению тела.

Для обеспечения условия $q = const$ температура среды (например, температура печи) (рис.7.2а) должна увеличиваться во времени. Изменение теплового потока по сечению тела показано

на рисунке 7.2г. Это прямая линия: на поверхности тела тепловой поток $q_к$, на тепловой оси равен нулю (т.е. всё тепло усвоено), средний по сечению

$$\bar{q} = \frac{q_к}{2} = \frac{q_п}{k_2}.$$

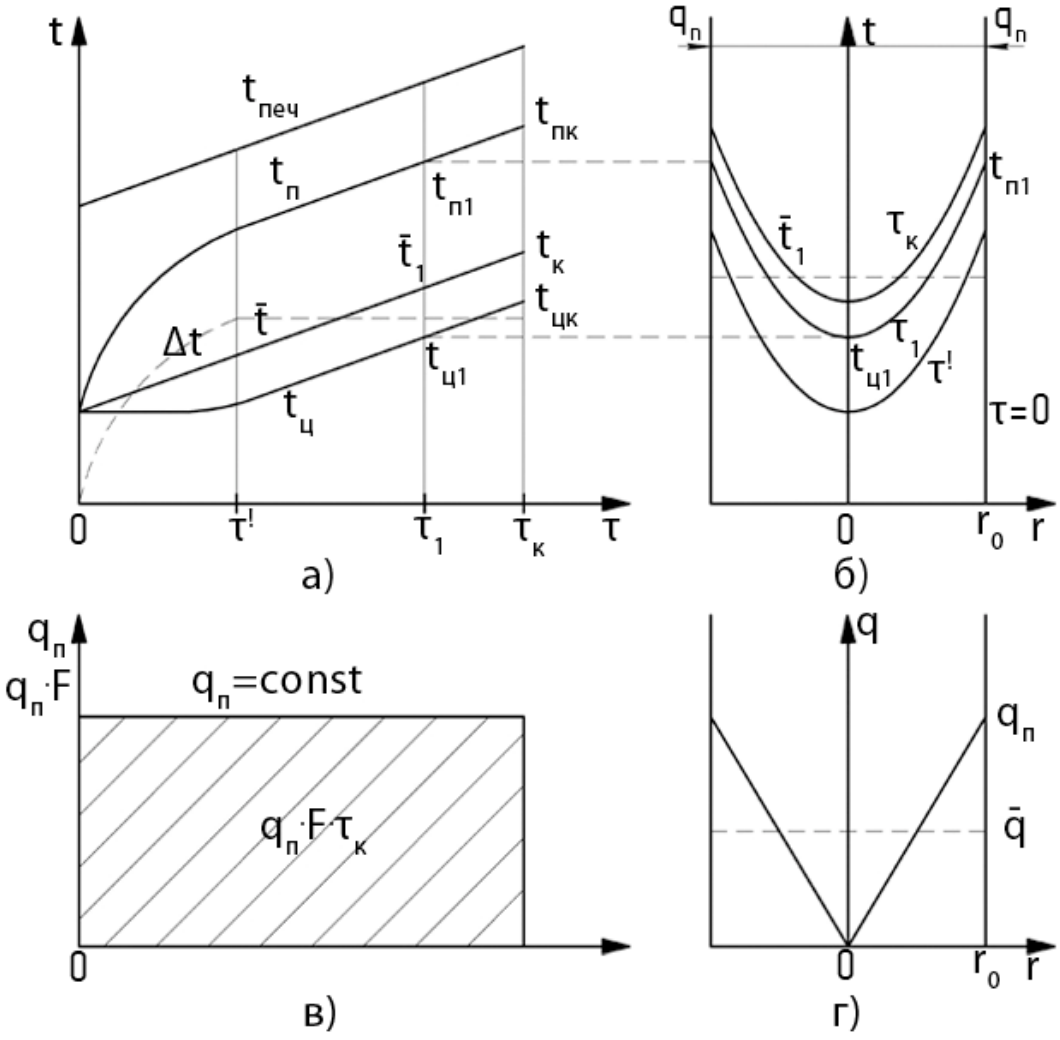


Рисунок 7.2 – Динамика нагрева массивного тела при $q_п = \text{const}$

Изменение температуры по сечению тела показано на рисунке 7.3б. В конце инерционного периода устанавливается параболическое распределение температур по сечению тела, которое остается неизменным в течение всего регулярного режима. Среднемассовая температура тела в момент, например,

τ_1 рассчитывается по формуле (результат интегрирование квадратной параболы)

$$\bar{t}_1 = t_{ц_1} + \frac{\Delta t_1}{k_3}, \qquad (7.61)$$

где k_3 – коэффициент усреднения температур по сечению тела. Применяемые в методе тепловой диаграммы коэффициенты могут быть сведены в таблицу 7.2.

Таблица 7.2 – Коэффициенты k_1, k_2, k_3, k

Коэффициенты	Плита	Цилиндр	Шар
k_1	1	2	3
k_2	2	2	2
k_3	3	2	5/3
k	6	8	10

Коэффициент $k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$ – называется коэффициентом формы, который используют для определения инерционного периода

$$\tau' = \frac{r_0^2}{k \cdot a}. \qquad (7.62)$$

Продолжительность процесса нагрева определяется по формуле И.Д.Семикина

$$\tau_к = \frac{r_0 \cdot \rho \cdot c}{k_1 \cdot q_п}\left(\bar{t}_к - \bar{t}_н\right).$$

Определение времени предполагает, что задана температура на поверхности в конце нагрева $t_{пк}$. Тогда расчет $\bar{t}_к$ производится по формуле (7.61)

$$\bar{t}_к = t_{ц_к} + \frac{\Delta t_к}{k_3},$$

где конечный перепад температур определяется по формуле (7.60)

$$\Delta t_к = \frac{q_п \cdot r_0}{k_2 \cdot \lambda},$$

а температура центра

$$t_{ц_к} = t_п - \Delta t_к.$$

Режим нагрева при $q_п = \text{const}$, как правило применяется в комбинации с другими, например с режимом нагрева при $t_{печ} = \text{const}$.

Нагрев массивных тел при постоянных граничных условиях III рода $t_{печ} = const$. Динамика нагрева массивного тела (плиты) при граничных условиях III рода $t_{печ} = \text{const}$ представлена на рисунке 7.3.

Основой анализа является тепловая диаграмма (рис.7.3в). Т.к. тело нагревается, то температура поверхности увеличивается, а температура печи остается постоянной, и значит тепловой поток, поступающий, на поверхность тела уменьшается:

$$q_п \downarrow = \alpha(t_{печ} - t_п \uparrow).$$

Т.к. тело массивное, то имеется инерционный период τ', в котором формируется и достигает максимума перепад температур $\Delta t = t_п - t_ц$, но в регулярном режиме перепад температур зависит от теплового потока

$$\Delta t = \frac{q_п \cdot r_0}{k_2 \cdot \lambda},$$

и уменьшается во времени, следовательно, центр тела нагревается быстрее, чем поверхность, и температуры поверхности и центра сближаются. Это происходит потому, что вследствие тепловой инерционности массивного тела в данный момент времени центр находится под воздействием теплового потока, который был τ' времени тому назад, т.е. большим, чем в данный момент.

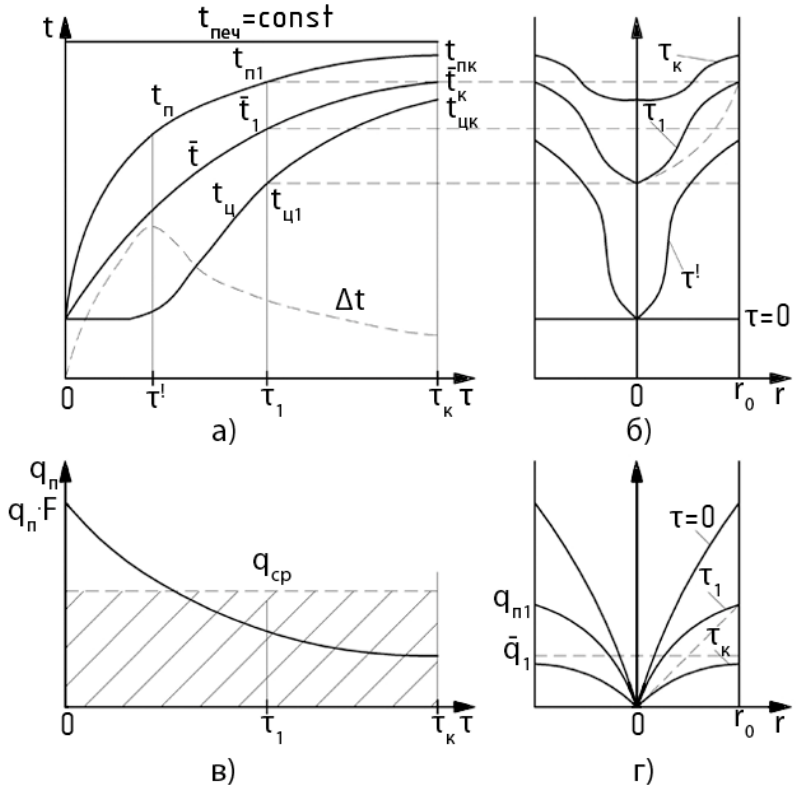


Рисунок 7.3 – Динамика нагрева массивных тел при граничных условиях III рода $t_{печ} = const$

На рисунке 7.3а показано изменение температур поверхности, центра и среднемассовой во времени, а также перепада температур по сечению тела. Изменение температур по сечению тела (рис. 7.3б) имеет вид искаженной квадратной параболы с коэффициентом усреднения температур $k_3 < 3$. На рисунке 7.3г

показано изменение теплового потока по сечению тела. Тепловой поток изменяется по кривой, лежащей выше прямой (как при $q = const$), и поэтому коэффициент усреднения тепловых потоков $k_2 < 2$.

$$\bar{q} = \frac{q_п}{k_2}.$$

Продолжительность нагрева (охлаждения) рассчитывается по формулам И.Д.Семикина

$$\tau = \frac{r_0 \cdot \rho \cdot c}{k_1 \cdot q_{ср}} (\bar{t}_к - \bar{t}_н);$$

$$\bar{t}_к = t_{ц_к} + \frac{\Delta t_к}{k_3} = t_{пк} - \frac{k_3 - 1}{k_3} \Delta t_к;$$

$$\Delta t_к = \frac{q_к \cdot r_0}{k_2 \cdot \lambda};$$

$$q_к = \alpha(t_{печ} - t_{пк}),$$

или

$$q_к = C_{пр} \left[\left(\frac{t_{печ} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{пк} + 273}{100} \right)^4 \right].$$

Температура на поверхности тела в конце нагрева $t_{пк}$, а также приведенный коэффициент излучения $C_{пр}$ или коэффициент теплоотдачи α должны быть заданы или рассчитаны предварительно. Коэффициенты усреднения k_2 и k_3 зависят от формы тела и критерия Био, приведены в таблице 7.4.

Таблица 7.4 – Коэффициенты усреднения k_2 и k_3

Bi	Плита		Цилиндр		Шар	
$q = const$ $Bi = 0$	2	3	2	2	2	1,67
0,5	1,928	2,955	1,89	1,963	1,864	1,634
5,0	1,703	2,827	1,449	1,835	1,340	1,511
100,0	1,579	2,757	1,263	1,764	1,01	1,440

Расчеты нагрева термически тонких тел значительно упрощаются, т.к. не нужно определять перепад температур и среднемассовую температуру. Расчеты можно выполнить как по формуле И.Д.Семикина

$$\tau_к = \frac{r_0 \cdot \rho \cdot c}{k_1 \cdot q_п}(\bar{t}_к - \bar{t}_н),$$

а также по так называемой «конвективной формуле» для режима $t_{печ} = const$:

$$\tau_к = \frac{r_0 \cdot \rho \cdot c}{k_1 \cdot \alpha} \ln \frac{t_{печ} - t_н}{t_{печ} - t_к},$$

где α – средний за период нагрева коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·К).

Комбинированный режим нагрева $q_{опт} = const + t_{печ} = const$. Применение на практике приведенных выше режимов $q_п = const$ и $t_{печ} = const$ в чистом виде экономически нецелесообразно. Если нагревать тело при $q = const$, который соответствует заданному конечному качеству нагрева ($t_{пк}$, $\Delta t_к$), то длительность нагрева будет излишне высока, а производительность печи – низка. Если нагревать тело при $t_{печ} = const$, то потребуется большая тепловая мощность печи в

самом начале нагрева, а затем такая мощность будет не нужна и поэтому сооружение такой мощной печи экономически нецелесообразно. На практике применяют комбинированный режим:

1 период: $q_{опт} = (0{,}4 \div 0{,}6)q_{max}$;

2 период: $t_{печ.к} = const$.

Динамика комбинированного режима представлена на рисунке 7.4.

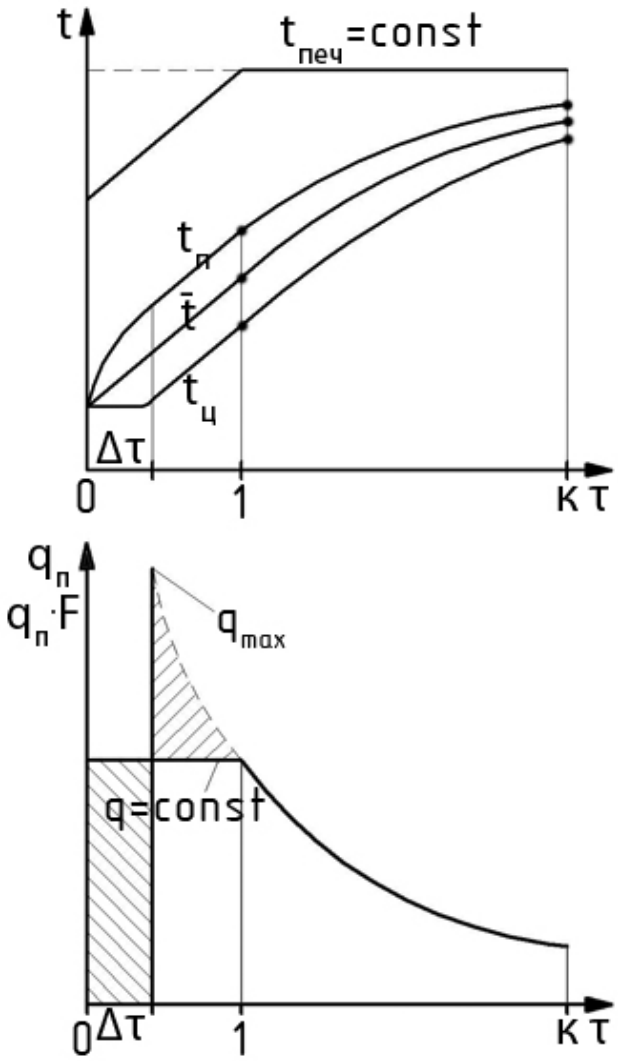


Рисунок 7.4 – Динамика комбинированного режима нагрева

В первом периоде изменение во времени температур и теплового потока соответствует режиму $q = const$; во втором периоде тепловой поток снижается, а перепад температур $\Delta t = t_п - t_ц$ уменьшается, что соответствует режиму $t_{печ} = const$. В

комбинированном режиме общая длительность процесса увеличивается на $\Delta\tau$ для компенсации уменьшенной подачи тепла (заштрихованные площади на тепловой диаграмме эквивалентны), но это экономически целесообразно, т.к. уменьшаются капитальные затраты на оборудование, обеспечивающее высокую и практически не используемую тепловую мощность.

При разработке комбинированного режима задают начальное температурное состояние тела $t_н = f(r) = const$ и конечное: $t_{пк}, \bar{t}_к, t_{цк}, \Delta t_к$, теплофизические свойства тела λ, c, ρ, a.

Определение расчетных величин ведется в следующей последовательности:

1) Конечный тепловой поток

$$q_к = \frac{k_2 \cdot \lambda \cdot \Delta t_к}{r_0}.$$

2) Температура печи в конце нагрева, которая потом принимается постоянной в режиме $t_{печ} = const$

$$q_к = C_{пр}\left[\left(\frac{t_{печ.к} + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_{пк} + 273}{100}\right)^4\right] => t_{печ.к}.$$

Максимальный тепловой поток, который соответствует режиму $t_{печ} = const$ с самого начала нагрева

$$q_{max} = C_{пр}\left[\left(\frac{t_{печ.к} + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_н + 273}{100}\right)^4\right].$$

3) Оптимальный тепловой поток

$$q_{опт} = (0{,}4 \div 0{,}6) \cdot q_{max}.$$

4) Температура поверхности тела в точке «1» - момент перехода режимов

$$q_{опт} = C_{пр}\left[\left(\frac{t_{печ.к} + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_{п.1} + 273}{100}\right)^4\right] => t_{п.1}.$$

5) Перепад температур в точке «1» и среднемассовая температура

$$\Delta t_1 = \frac{q_{опт} \cdot r_0}{k_2 \cdot \lambda},$$

$$\bar{t}_1 = t_{п.1} - \frac{k_3 - 1}{k_3}\Delta t_1.$$

6) Продолжительность первого периода «0-1»

$$\tau_1 = \frac{r_0 \cdot \rho \cdot c}{k_1 \cdot q_{опт}}(\bar{t}_1 - \bar{t}_н).$$

7) Продолжительность второго периода «1-к»

$$\tau_2 = \frac{r_0 \cdot \rho \cdot c}{k_1 \cdot q_{ср}}(\bar{t}_к - \bar{t}_1),$$

$$q_{ср} = \frac{q_{опт} - q_к}{\ln\frac{q_{опт}}{q_к}}.$$

8) Общая продолжительность процесса

$$\tau_\Sigma = \tau_1 + \tau_2.$$

Комбинированный режим нагрева массивных тел с учетом температурных напряжений. При нагреве (охлаждении) массивных тел наблюдается значительный перепад температур по толщине (Δt), что является причиной возникновения механических напряжений как следствие различного расширения материала при разной температуре. Если Δt излишне велик, возникающие напряжения могут превзойти допустимые и материал (металл) разрушается, и появляются трещины, приводящие к потерям или к браку. Следует отметить, что если по технологии материал (металл) охлаждается, а затем нагревается, то остаточные напряжения охлаждения и нагрева суммируются. Перепад температур Δt, вызывающий напряжения σ, тепловой поток q связаны следующими зависимостями [8]

$$\sigma = \frac{\beta \cdot E \cdot \Delta t}{A};$$

$$q = \frac{2 \cdot \lambda \cdot \Delta t}{r_0},$$

где σ – напряжение, возникающее при нагреве;

A – коэффициент, зависящий от формы тела: цилиндр – 1,4; прямоугольник – 1,2; плита – 1,05;

β – коэффициент линейного расширения;

E – модуль упругости материала.

При разработке технологии нагрева следует проверять, не превышает ли начальный тепловой поток ($q_{опт}$) допустимый по тепловым напряжениям.

Исходными данными для расчета режима являются: форма тела (k_1, A), расчетная толщина r_0, марка стали и свойства $\left(E, \sigma_{доп}, t_{пласт}, \beta, \lambda, c, \rho\right)$, начальная температура металла $t_н$,

конечное температурное состояние ($t_{п.к}$, $\Delta t_к$), приведенный коэффициент излучения $C_{пр}$ или коэффициент теплоотдачи α.

Последовательность решения:

1) Определение допустимого перепада температур в начальном периоде нагрева до достижения пластичности, после чего упругие напряжения не опасны:

$$\Delta t_{доп} = \frac{A \cdot \sigma_{доп}}{\beta \cdot E}, ℃;$$

и допустимого теплового потока

$$q_{доп} = \frac{k_2 \cdot \lambda \cdot \Delta t_{доп}}{r_0}, \frac{Вт}{м^2}.$$

2) Определение теплового потока в конце нагрева, соответствующего конечному перепаду температур

$$q_к = \frac{k_2 \cdot \lambda \cdot \Delta t_к}{r_0}, \frac{Вт}{м^2},$$

и температуры печи в конце нагрева

$$t_{печ.к} = 100 \sqrt[4]{\frac{q_к}{C_{пр}} + \left(\frac{t_{п.к} + 273}{100}\right)^4} - 273, ℃.$$

3) Расчет максимального и оптимального тепловых потоков

$$q_{max} = C_{пр} \left[\left(\frac{t_{печ.к} + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_н + 273}{100}\right)^4\right], \frac{Вт}{м^2};$$

$$q_{опт} = (0{,}4 \div 0{,}6) q_{max}.$$

4) Принятие решения:

а) если $q_{доп} > q_{опт}$, следует разрабатывать двухстадийный комбинированный режим $q_{опт} = const$, $t_{печ.к} = const$.

б) если $q_{доп} < q_{опт}$, следует разрабатывать трехстадийный режим

- нагрев при $q_{доп} = const$ до достижения температуры пластичности в центре тела;
- нагрев при $q_{опт} = const$ до достижения температуры печи значения $t_{печ.к}$;
- нагрев $t_{печ.к} = const$ до достижения заданного конечного температурного состояния $t_{п.к}, \Delta t_к$.

5) Расчет продолжительности первого периода $q_{доп} = const$ производится по формуле И.Д.Семикина

$$\tau_{1-2} = \frac{r_0 \cdot \rho \cdot c}{k_1 \cdot q_{доп}} \left(\bar{t}_2 - \bar{t}_н\right), с,$$

$$\bar{t}_2 = t_{ц2} + \frac{\Delta t_{доп}}{k_3} = t_{пласт} - \frac{\Delta t_{доп}}{k_3}, °C,$$

$$t_{п2} = t_{ц2} - \Delta t_{доп}.$$

Длительность инерционного периода

$$\tau_1^{'} = \frac{r_0^2}{k \cdot a_1}.$$

Коэффициент температуропроводности a_1 следует выбирать для начальной температуры металла.

6) Определение продолжительности второго периода $q_{опт} = const$*).

При переходе от $q_{доп}$ к $q_{опт}$ возникает второй инерционный период τ_2', смысл которого следует трактовать следующим образом:

-центр тела нагревается по инерции со скоростью, соответствующей тепловому потоку $q_{доп}$ в 1-м периоде:

$$C_{н1} = \frac{k_1 \cdot q_{доп}}{r_0 \cdot \rho \cdot c};$$

-среднемассовая температура изменяется со скоростью, соответствующей тепловому потоку $q_{опт}$ во 2-ом периоде:

$$C_{н2} = \frac{k_1 \cdot q_{опт}}{r_0 \cdot \rho \cdot c}.$$

Расчет периода $q_{опт} = const$ следует вести в следующей последовательности определения величин:

- температура поверхности в конце периода $t_{п3}$ определяется из формулы внешнего теплообмена в точке 3:

$$q_{опт} = C_{пр}\left[\left(\frac{t_{печ.к} + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_{п3} + 273}{100}\right)^4\right],$$

откуда

$$t_{п3} = 100\sqrt[4]{\left(\frac{t_{печ.к} + 273}{100}\right)^4 - \frac{q_{опт}}{C_{пр}}} - 273, °C;$$

*) Авторская разработка Ю.Л.Курбатова

- продолжительность второго инерционного периода $\tau_2^{'}$

$$\tau_2' = \frac{r_0^2}{k \cdot a},$$

(коэффициент температуропроводности принимается при температуре $\bar{t}_3^{'}$, которая определяется путем последовательных приближений). Окончательно

$$\bar{t}_3' = \bar{t}_2 + \tau_2' \cdot C_{н2};$$

- температура поверхности в конце инерционного периода

$$t_{п3}^{'} = \bar{t}_3^{'} + \Delta t_3^{'} \cdot \frac{k_3 - 1}{k_3},$$

где

$$\Delta t_3^{'} = \frac{q_{опт} \cdot r_0}{k_2 \cdot \lambda};$$

- если $t_{п3} < t_{п3}^{'}$, то продолжительность второго периода меньше инерционного

$$\tau_{2-3} < \tau_2^{'}.$$

Для определения τ_{2-3} в этом случае нужно знать зависимость $t_п = f(\tau)$ в инерционном периоде. А.В.Лыков [59] предложил приближенное решение для температуры поверхности цилиндра в инерционном периоде (рис. 7.5)

$$t_п \approx t_0 + \frac{q \cdot r_0}{2\lambda}\left(4\sqrt{\frac{a \cdot \tau}{r_0^2 \cdot \pi}} + \frac{a \cdot \tau}{r_0^2}\right),$$

или

$$\frac{t_п - t_0}{\frac{q \cdot r}{2\lambda}} \equiv \frac{\Delta t}{\Delta t_{рег}} = \left(4 \cdot \sqrt{\frac{Fo}{\pi}} + Fo\right),$$

где значения критерия Фурье находятся в пределах 0÷0,12. При таких значениях вторым слагаемым в скобках можно пренебречь (по нашим исследованиям с ошибкой не более 6%), и тогда можно считать, что

$$\frac{\Delta t}{\Delta t_{рег}} \approx \sqrt{\frac{\tau}{\tau'}}.$$

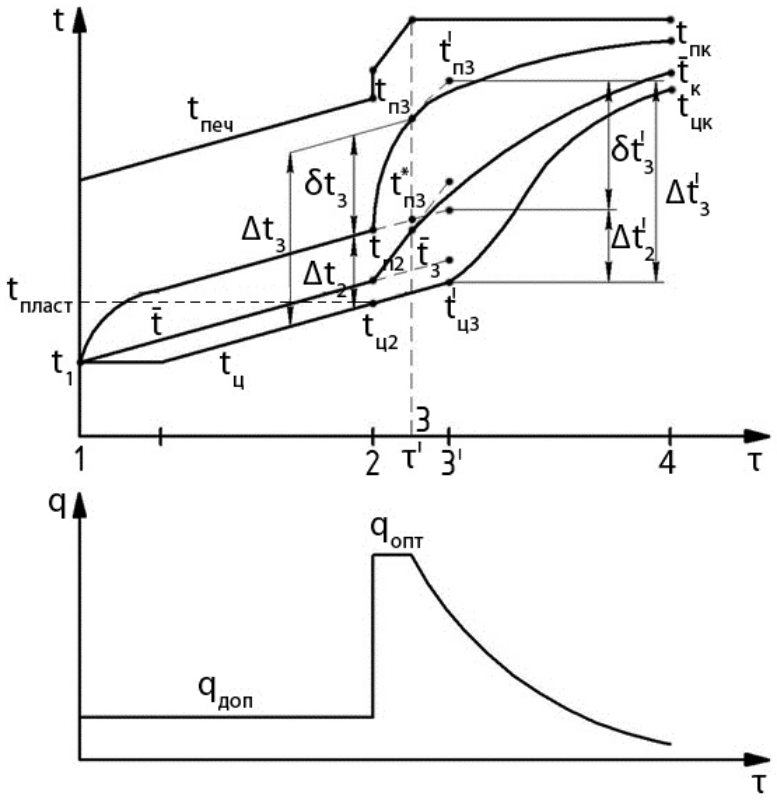


Рисунок 7.5 – Тепловая и температурная диаграммы

Если обозначить приращение температуры поверхности во втором инерционном периоде δt (за счет разницы тепловых потоков $q_{опт} - q_{доп}$, то приращение в конце периода $q_{опт} = const - \delta t_3$, а в конце инерционного периода $- \delta t_3'$. Время нагрева τ_{2-3} определяется из системы уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{\delta t_3}{\delta t_3'} = \sqrt{\dfrac{\tau_{2-3}}{\tau_2'}} \\ \delta t_3 = t_{п3} - (t_{п2} + C_{н1} \cdot \tau_{2-3}), \end{cases}$$

где $C_{н1}$ – скорость нагрева в периоде $q_{доп} = const$.
Среднемассовая температура в конце периода $q_{опт} = const$

$$\bar{t}_3 = \bar{t}_2 + C_{н2} \cdot \tau_{2-3},$$

где $C_{н2}$ – скорость нагрева в периоде $q_{опт} = const$.
Температура в центре

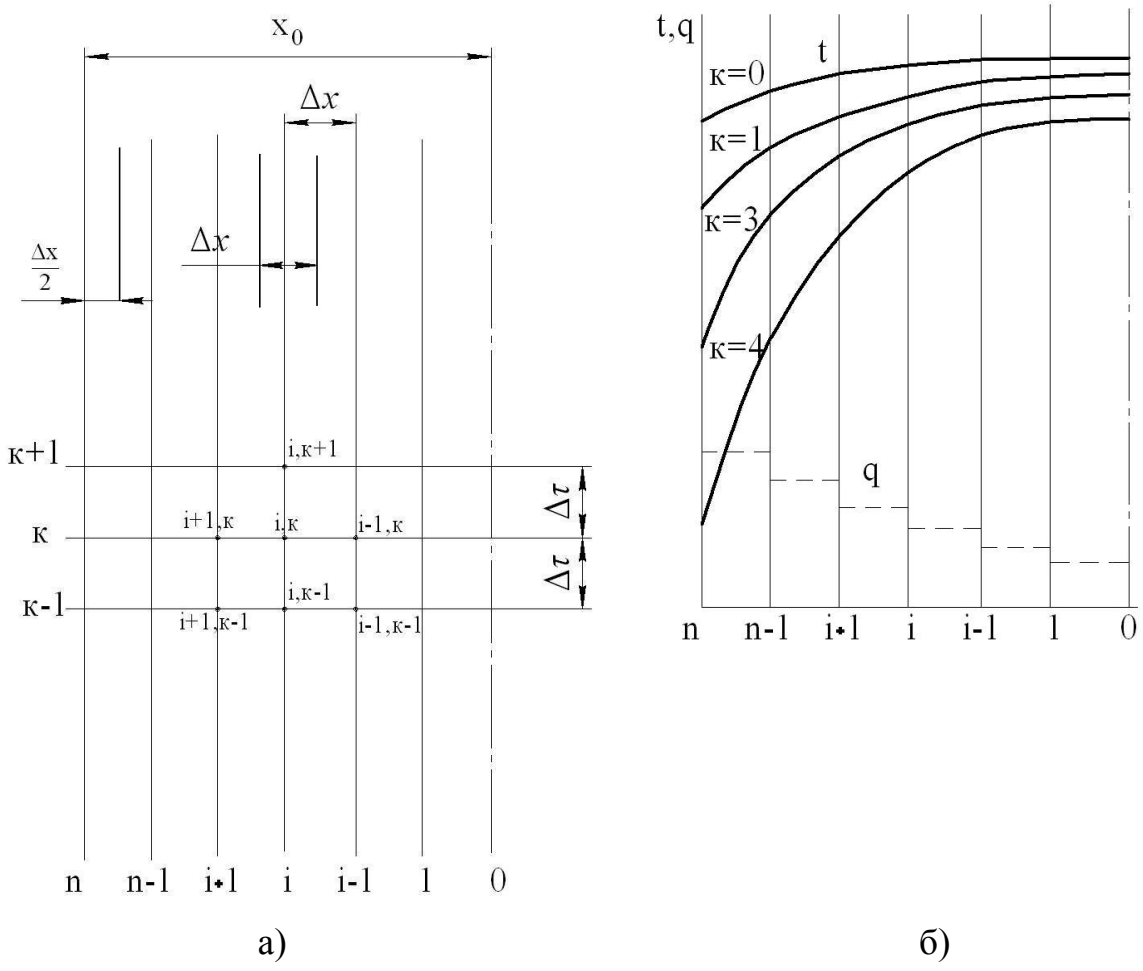
$$t_{ц3} = t_{ц2} + C_{н1} \cdot \tau_{2-3}.$$

Длительность нагрева при $t_{печ.к} = const$ определяется, как показано выше, по формуле И.Д.Семикина. Пример расчета приведен в [49].

7.3.3 Методы конечных разностей (МКР)

Метод конечных разностей заключается в следующем: все тело (или его половина при симметричном нагреве или охлаждении) толщиной x_0 разбивается на элементарные слои толщиной Δx (рис. 7.6 а), Δx – шаг по координате. Время также

разделяется на шаги $\Delta\tau$. В результате получается пространственно-временная сетка. Непрерывная функция $f(\tau)$ заменяется дискретной, плавное изменение температуры по сечению $f(x)$ – ломаной линией, температуры определяются не в любой, а лишь в выбранных точках сетки. Физическая сущность метода конечных разностей заключается в том, что тепловая емкость слоя толщиной Δx, примыкающего к узлу, сосредоточена в одной точке. В поверхностном узле сосредоточена тепловая емкость слоя толщиной $\Delta x/2$ поэтому происходит скачкообразное изменение теплового потока в узлах (рис. 7.6 б), а в пределах слоя толщиной Δx температура изменяется линейно, как при стационарном состоянии, поэтому плавная кривая $t(x)$ заметается ломаной линией.



а) б)

Рисунок 7.6 – К методу конечных разностей

Построение разностных схем производят обычно путем некоторого преобразования исходной дифференциальной задачи теплопроводности. Это преобразование может быть выполнено двумя способами. *Первый* способ называется *методом разностной аппроксимации* и приводится ниже. *Второй* способ называется *методом элементарных тепловых балансов* (приводится в разделе 7.3.4).

Метод разностной аппроксимации заключается в следующем. Дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$$

заменяется эквивалентным соотношением в конечных разностях (явная схема):

$$\frac{t_i^{k+1} - t_i^k}{\Delta\tau} = a\frac{\left(t_{i+1}^k - t_i^k\right) - \left(t_i^k - t_{i-1}^k\right)}{\Delta x^2},$$

откуда температура в i-й точке в последующий момент времени k+1 определяется как функция температур на предыдущем, k-м шаге по времени. Расчетная формула получается путем выполнения несложных алгебраических операций:

$$t_i^{k+1} = t_i^k\left(1 - 2\frac{a\cdot\Delta\tau}{\Delta x^2}\right) + \frac{a\cdot\Delta\tau}{\Delta x^2}\left(t_{i+1}^k - t_{i-1}^k\right).$$

Для поверхностных узлов сетки температура определяется с учетом граничных условий. Например, для граничных условий 2-ого рода

$$t_i^{k+1} = \left(1 - 2\frac{a\cdot\Delta\tau}{\Delta x^2}\right)t_n^k + 2\frac{a\cdot\Delta\tau}{\Delta x^2}\left(t_{n-1}^k + q_n^k\frac{\Delta x}{\lambda}\right).$$

для граничных условий 3рода тепловой поток на поверхности

$$q_n^k = \alpha^k \cdot \left(t_{cp}^k - t_n^k\right),$$

где α^k – суммарный коэффициент теплоотдачи в k-тый момент времени, Вт/(м^2·К);

t_{cp}^k – температура среды в k-тый момент времени, ℃.

Комплекс

$$\frac{a \cdot \Delta\tau}{\Delta x^2}$$

можно обозначить ΔFo – «шаг по Фурье». Для явной схемы МКР значение ΔFo выбирают из соображений устойчивости конечно-разностных схем, под которой понимают явление затухания малых погрешностей (например, округления), а также обеспечение монотонности изменения температур [45,47]. Шаг по времени $\Delta\tau$ выбирается таким образом, чтобы выполнялось условие для одномерной задачи

$$\Delta Fo \leq \frac{0{,}4}{1 + \frac{\alpha \cdot \Delta x}{\lambda}},$$

для двухмерной задачи

$$\Delta Fo \leq \frac{0{,}2}{1 + \frac{\alpha \cdot h}{\lambda}},$$

для трехмерной задачи

$$\Delta Fo \leq \frac{0{,}13}{1 + \frac{\alpha \cdot h}{\lambda}}.$$

Вывод формул для двух- и трехмерных задач методом элементарных тепловых балансов, приведен в разделе 7.3.4.

Аппроксимация уравнения Фурье возможна по неявной схеме (рис. 7.6а):

$$\frac{t_i^{k+1} - t_i^k}{\Delta\tau} = a\frac{\left(t_{i+1}^{k+1} - t_i^{k+1}\right) - \left(t_i^{k+1} - t_{i-1}^{k+1}\right)}{\Delta x^2}. \qquad (7.63)$$

Решение системы неявных конечно-разностных уравнений. Система (7.63) состоящая из «n» уравнений, абсолютно устойчива, но процедура решения неявных разностных уравнений осложняется тем, что каждое из них (за исключением уравнений для границ) содержит три неизвестных температуры: $t_{i+1,}^{k+1}$ t_i^{k+1}, t_{i-1}^{k+1}. Все n уравнений должны решаться совместно. При большом числе уравнений решение такой системы классическими методами оказалось бы слишком громоздким и трудоемким.

Однако поскольку каждое из уравнений содержит не более трех неизвестных функций, здесь применим следующий метод, наиболее эффективный в рассматриваемых условиях.

Представим неявное разностное уравнение (7.63) в следующем виде:

$$-A_i t_{i+1}^{k+1} + B_i t_i^{k+1} - C_i t_{i-1}^{k+1} = D_{i.} \qquad (7.64)$$

Линейная зависимость t_i^{k+1} от t_{i+1}^{k+1} может быть выражена соотношением

$$t_i^{k+1} = E_i t_{i+1}^{k+1} + F_i, \qquad (7.65)$$

где E_i и F_i – некоторые пока неизвестные коэффициенты.

Аналогично зависимости (7.65),

$$t_{i-1}^{k+1} = E_{i-1} t_i^{k+1} + F_{i-1}.$$

Подставим полученное значение t_{i-1}^{k+1} в (7.64) и проведем ряд элементарных преобразований, в результате получим

$$t_i^{k+1} = \frac{A_i}{B_i - C_i E_{i-1}} t_{i-1}^{k+1} + \frac{D_i + C_i F_{i-1}}{B_i - C_i E_{i-1}}. \qquad (7.66)$$

Сравнение выражений (7.65) и (7.66) показывает, что на роли коэффициентов E_i, F_i соотношении (7.66) состоят величины, зависящие от A_i, B_i, C_i и D_i, т.е.

$$E_i = \frac{A_i}{B_i - C_i E_{i-1}},$$

$$F_i = \frac{D_i + C_i F_{i-1}}{B_i - C_i E_{i-1}}. \qquad (7.67)$$

Следовательно, процедура решения состоит в последовательном вычислении коэффициентов E_i и F_i, начиная с i=1 и кончая i=n. Неизвестные температуры определяются по уравнению (7.65) в обратном порядке.

Например, если необходимо вычислить температурное поле в неограниченной плоской стенке (рис. 7.7), состоящей из слоя теплоизоляции и тонкого металлического слоя при переменных граничных условиях III рода, система неявных разностных уравнений может быть записана в следующем виде:

$$\frac{t_1^{k+1}-t_i^k}{\Delta\tau}=\frac{2}{c\rho\Delta x}\left(\alpha_1^{k+1}\cdot\left(t_{cp1}^{k+1}-t_1^{k+1}\right)+\frac{\lambda}{\Delta x}\left(t_2^{k+1}-t_1^{k+1}\right)\right);\ (7.68)$$

$$\frac{\left(t_2^{k+1}-t_2^k\right)}{\Delta\tau}=\frac{a\left(t_3^{k+1}-2\cdot t_2^{k+1}+t_1^{k+1}\right)}{(\Delta x)^2};\qquad(7.69)$$

$$\frac{\left(t_3^{k+1}-t_3^k\right)}{\Delta\tau}=\frac{a\left(t_4^{k+1}-2\cdot t_3^{k+1}+t_2^{k+1}\right)}{(\Delta x)^2};\qquad(7.70)$$

……

$$\frac{t_n^{k+1}-t_i^k}{\Delta\tau}=\frac{2}{c\rho\omega\Delta x}\left(\frac{\lambda}{\Delta x}\left(t_{n-1}^{k+1}-t_n^{k+1}\right)+\alpha_2^{k+1}\cdot\left(t_{cp2}^{k+1}-t_n^{k+1}\right)+\right),\ (7.71)$$

где α_1 и t_{cp1} – коэффициент теплоотдачи и температура среды (жидкости или газа) со стороны слоя теплоизоляции;

α_2 и t_{cp2} – коэффициент теплоотдачи и температура среды со стороны металлического слоя. Законы изменения α_1, t_{cp1}, α_2 и t_{cp2} со временем заданы (аналитически, графически, таблично) или определяются на каждом шаге по времени в случае решения сопряженной задачи;

c, ρ, λ, a – удельная теплоемкость, плотность, коэффициент теплопроводности и коэффициент температуропроводности слоя теплоизоляции соответственно;

$$\omega=1+\frac{2\cdot c_м\cdot\delta_м\cdot\rho_м}{c\rho\Delta x};$$

δ – толщина слоя теплоизоляции; величины с индексом «м» относятся к металлическому слою;

n –число узлов.

Распределение температур в стенке в начальный момент времени задано.

Разностные уравнения (7.68), (7.71), соответствующие граничным узлам сетки, составлены исходя из условий теплового баланса. При составлении балансового уравнения (7.71) к узлу n относились масса слоя изоляции толщиной $\Delta x/2$ и масса металлического слоя толщиной $\delta_м$.

Полагая, что не требуется высокой точности, для простоты разбиваем стенку на четыре узла (рис. 7.7). На рисунке 1, 2, 3, 4 – номера узлов. Кроме того, будем считать, что для тонкого металлического слоя выполняется условие

$$Bi = \frac{\alpha_м \cdot \delta_м}{\lambda_м} < 0{,}1$$

и, следовательно, $t_3 \approx t_4$.

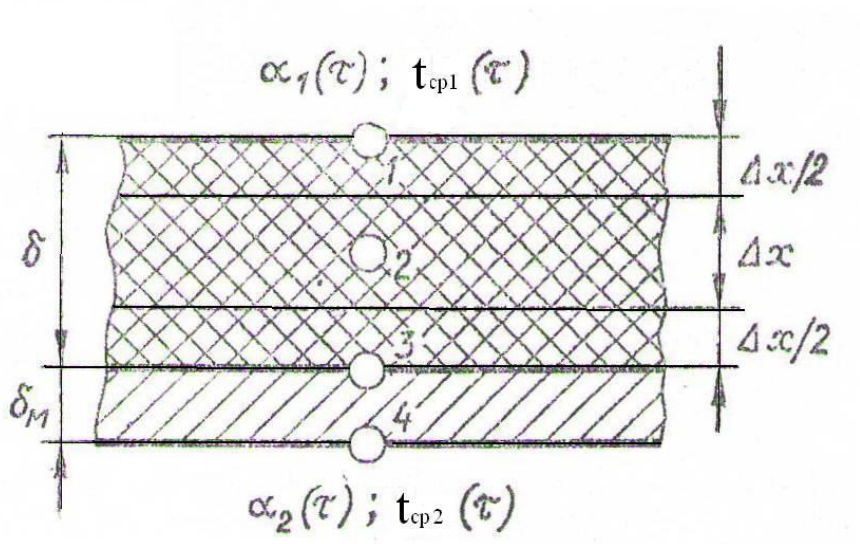


Рисунок 7.7 – Нестационарный нагрев плоской двухслойной пластины

Это означает, что разностные уравнения нужно составить только для узлов 1, 2 и 3 (n=3).

Приводя систему (7.68)-(7.71) к виду (7.64) и учитывая, что n=3, получаем:

$$-2kht_2^{k+1} + (1 + 2hp_1)t_1^{k+1} = t_1^k + 2hQ_1;$$

$$-kht_3^{k+1} + (1 + 2kh)t_2^{k+1} - kht_1^{k+1} = t_2^k;$$

$$\left(1 + \frac{2h}{\omega}p_2\right)t_3^{k+1} - \frac{2kh}{\omega}t_2^{k+1} = t_3^k + \frac{2h}{\omega}Q_2.$$

где

$$k = \frac{\lambda}{\Delta x}; \qquad h = \frac{\Delta\tau}{c\rho\Delta x}; \qquad p_1 = \alpha_1 + k; \qquad p_2 = \alpha_2 + k;$$

$$Q_1 = \alpha_1 \cdot t_{cp1}; \quad Q_2 = \alpha_2 \cdot t_{cp2}.$$

Из полученных уравнений видно, чему равны коэффициенты A_i, B_i, C_i и D_i (табл. 7.5).

Таблица 7.5 – Значения коэффициентов уравнения (7.64)

i	A_i	B_i	C_i	D_i
1	2kh	$1+2hp_1$	0	$t_1^k + 2hQ_1$
2	kh	1+2kh	kh	t_2^k
3	0	$1+2hp_2/\omega$	2kh/ ω	$t_3^k + \frac{2h}{\omega}Q_2$

По формулам (7.67) находим коэффициенты E_i и F_i с первого по последний:

$$E_1 = \frac{2kh}{1 + 2hp_1}; \; F_1 = \frac{t_1^k + 2hQ_1}{1 + 2hp_1}; \; E_2 = \frac{kh}{1 + kh(2 - E_1)};$$

$$F_2 = \frac{t_2^k + khF_1}{1 + kh(2 - E_1)};\ E_2 = 0;\ F_3 = \frac{t_3 + \frac{2h}{\omega}(Q_2 + kF_2)}{1 + \frac{2h}{\omega}(p_2 + kE_2)}.$$

В обратном порядке вычисляем неизвестные температуры t_3^{k+1}, t_2^{k+1} и t_1^{k+1} в узлах сетки для $(k+1)$-го момента времени: $t_3^{k+1} = F_3;\ t_2^{k+1} = E_2 t_3^{k+1} + F_2;\ t_1^{k+1} = E_1 t_2^{k+1} + F_1$.

Эти однотипные операции выполняются для каждого последующего шага (слоя) по времени до тех пор, пока не будут вычислены температуры в узлах сетки в заданный момент времени. Так же, как и в явных схемах при выполнении первого шага по времени значения температур t_1^k, t_2^k и t_3^k, входящих в D_i, берутся из начальных условий. При выполнении последующих шагов значения температур с верхним индексом k берутся из предыдущего слоя по времени.

Этот эффективный метод известный под названием *метода разностной факторизации или прогонки* устойчивый относительно погрешности округления, применим и при численном решении двухмерных задач теплопроводности по неявным схемам. Однако это возможно лишь при условии, что каждое разностное уравнение будет содержать не более трех неизвестных функций, т.е. когда матрица, составленная из коэффициентов при неизвестных, окажется трехдиагональной.

Сложные многомерные задачи в процессе разностного решения можно заменить последовательностью более простых одномерных задач, например, случаи трехмерной задачи теплопроводности метод расщепления (или *метод дробных шагов*, или метод *переменных направлений*) приводит к следующей, безусловно, устойчивой локально-одномерной схеме:

$$\frac{t_{i,j,e}^{k+\frac{1}{3}} - t_{i,j,e}^{k}}{\Delta\tau} = \frac{1}{3}a\frac{t_{i+1,j,e}^{k+\frac{1}{3}} - 2t_{i,j,e}^{k+\frac{1}{3}} + t_{i-1,j,e}^{k+\frac{1}{3}}}{(\Delta x)^2};$$

$$\frac{t_{i,j,e}^{k+\frac{2}{3}} - t_{i,j,e}^{k+\frac{1}{3}}}{\Delta\tau} = \frac{1}{3}a\frac{t_{i,j+1,e}^{k+\frac{2}{3}} - 2t_{i,j,e}^{k+\frac{2}{3}} + t_{i,j-1,e}^{k+\frac{2}{3}}}{(\Delta y)^2};$$

$$\frac{t_{i,j,e}^{k+1} - t_{i,j,e}^{k+\frac{2}{3}}}{\Delta\tau} = \frac{1}{3}a\frac{t_{i,j,e+1}^{k+1} - 2t_{i,j,e}^{k+1} + t_{i,j,e-1}^{k+1}}{(\Delta z)^2};$$

Здесь в каждом из разностных уравнений члены, аппроксимирующие вторые производные по двум из координат, полностью опущены, причем при каждом решении системы разностных уравнений продвижение по времени происходит на 1/3 временного шага. Благодаря такому подходу эффективный *метод прогонки становится применимым и при решении* многомерных задач.

7.3.4 Метод элементарных тепловых балансов

В основе *метода элементарных тепловых балансов* находится очевидное положение о том, что количество тепла, поступившего в контрольный объем за время $\Delta\tau$, идет на изменение энтальпии массы этого контрольного объема

$$\sum q \cdot F \cdot \Delta\tau = m \cdot c \cdot \left(t^{k+1} - t^{k}\right).$$

Это же положение находится и в основе вывода дифференциального уравнения теплопроводности, которое аппроксимируется конечно-разностным аналогом. Однако, метод элементарных балансов более нагляден и особенно удобен для получения расчетных уравнений для поверхностных узлов, а также для двух- и трехмерных задач.

В качестве примера *двухмерной задачи* рассмотрим бесконечную призму прямоугольного сечения (рис. 7.8). Разделим длину грани в направлении оси «x» на m шагов Δx, длину грани в направлении оси «y» - на n шагов Δy. В полученной сетке характерным являются: 1) внутренние узлы (i,j); 2) поверхностные узлы, лежащие на гранях $(0, j;\ i, 0;\ i, n;\ m, j)$ и 3) поверхностные узлы, лежащие на ребрах $(0,0;\ 0, n;\ m, 0;\ m, n)$.

Внутренние узлы (рис. 7.8) представляют собой элементарные призмы размером $\Delta x \cdot \Delta y \cdot L$. В направлении оси «x» подводится тепловой поток мощностью $q_{i-1}^{k} \cdot \Delta y \cdot L$, отводится $q_{i+1}^{k} \cdot \Delta y \cdot L$; в направлении оси «y» подводится $q_{j-1}^{k} \cdot \Delta x \cdot L$, отводится $q_{j+1}^{k} \cdot \Delta x \cdot L$. Суммарное количество тепла, подведенного к элементарной призме за шаг по времени $\Delta\tau$

$$\Delta Q_{\Sigma} = \left(\left(q_{i-1}^{k} - q_{i+1}^{k}\right) \cdot \Delta y \cdot L + \left(q_{j-1}^{k} - q_{j+1}^{k}\right) \cdot \Delta x \cdot L\right) \cdot \Delta\tau, \text{Дж}. \quad (7.72)$$

Это количество тепла равно изменению энтальпии элементарного призмы ΔI

$$\Delta Q_{\Sigma} = \Delta I = m \cdot c \cdot \Delta t = \\ = \Delta x \cdot \Delta y \cdot L \cdot \rho \cdot c_{i,j}^{k} \cdot \left(t_{i,j}^{k+1} - t_{i,j}^{k}\right), \text{Дж}. \quad (7.73)$$

После приравнивания правых частей двух последних выражений и сокращения на длину призмы L, получили

$$\left(\left(q_{i-1}^{k}-q_{i+1}^{k}\right)\cdot\Delta y+\left(q_{j-1}^{k}-q_{j+1}^{k}\right)\cdot\Delta x\right)\cdot\Delta\tau=$$
$$=\Delta x\cdot\Delta y\cdot L\cdot\rho\cdot c_{i,j}^{k}\cdot\left(t_{i,j}^{k+1}-t_{i,j}^{k}\right). \qquad (7.74)$$

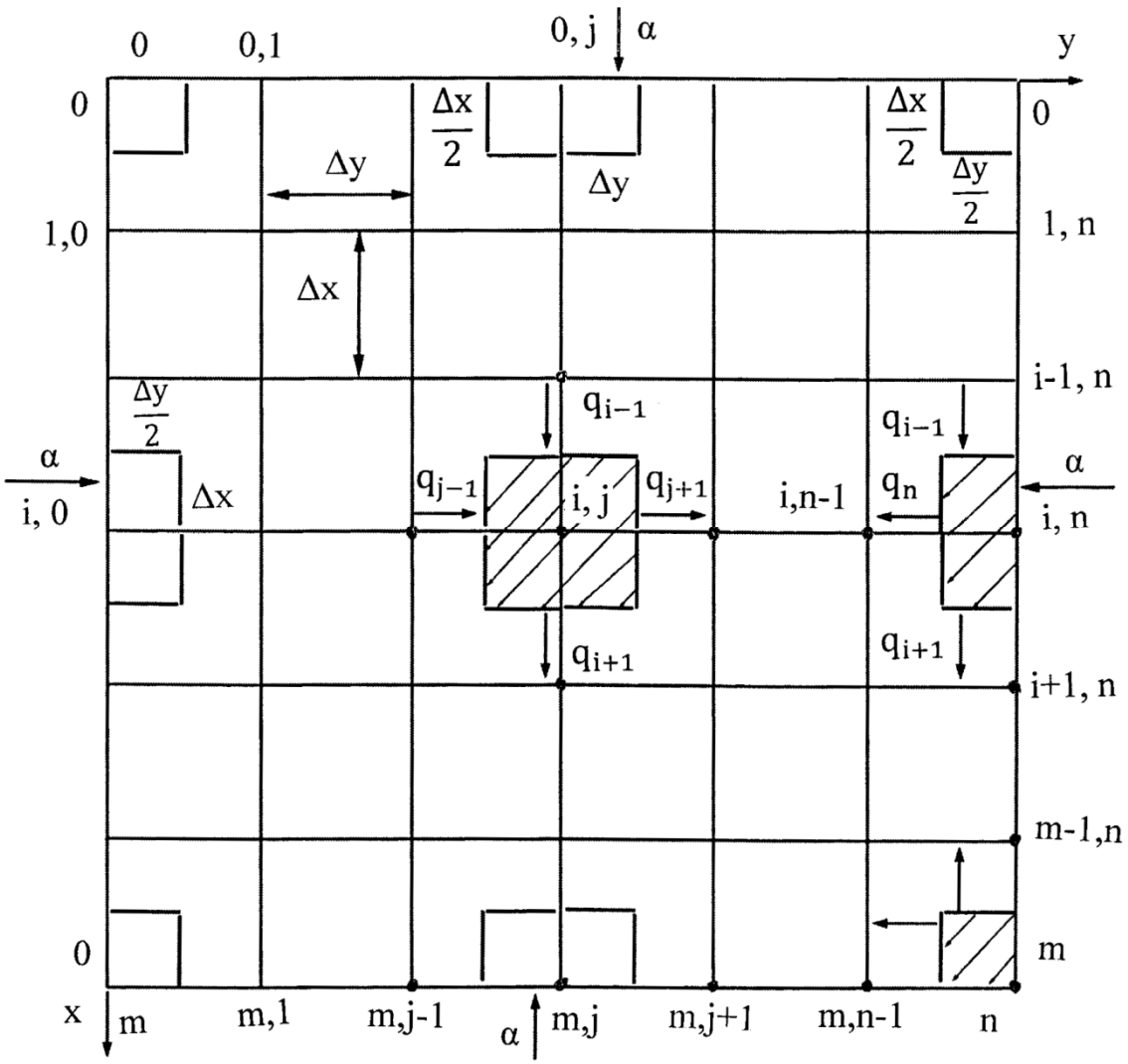


Рисунок 7.8 – К методу элементарных балансов (двухмерная задача)

Плотности тепловых потоков определяются по формулам стационарной теплопроводности в элементарном слое на k-том шаге по времени:

$$q_{i-1}^{k}=\frac{\lambda_{i,j}^{k}}{\Delta x}\left(t_{i-1,j}^{k}-t_{i,j}^{k}\right),$$

$$q_{i+1}^{k} = \frac{\lambda_{i,j}^{k}}{\Delta x}\left(t_{i,j}^{k} - t_{i+1,j}^{k}\right),$$

$$q_{j-1}^{k} = \frac{\lambda_{i,j}^{k}}{\Delta y}\left(t_{i,j-1}^{k} - t_{i,j}^{k}\right), \qquad (7.75)$$

$$q_{j+1}^{k} = \frac{\lambda_{i,j}^{k}}{\Delta y}\left(t_{i,j}^{k} - t_{i,j+1}^{k}\right).$$

После подстановки (7.75) в (7.74) и решения относительно $t_{i,j}^{k+1}$, получим

$$t_{i,j}^{k+1} = \left(1 - 2\sigma_x^k - 2\sigma_y^k\right) \cdot t_{i,j}^{k} + \sigma_x^k\left(t_{i+1,j}^{k} + t_{i-1,j}^{k}\right) + \\ + \sigma_y^k\left(t_{i,j+1}^{k} + t_{i,j-1}^{k}\right), \qquad (7.76)$$

где

$$\sigma_x^k = \frac{a_{i,j}^{k} \cdot \Delta\tau}{\Delta x^2};\ a_{i,j}^{k} = \frac{\lambda_{i,j}^{k}}{c_{i,j}^{k} \cdot \rho_{i,j}^{k}};$$

$$\sigma_y^k = \frac{a_{i,j}^{k} \cdot \Delta\tau}{\Delta y^2},$$

σ_x^k – шаг по критерию Фурье в направлении «x»,

σ_y^k – шаг по критерию Фурье в направлении «y»,

λ, c, ρ, a – соответственно теплопроводность, теплоемкость, плотность и температуропроводность в узле i, j в k-ый момент времени.

Если принять шаги по координате одинаковыми, т.е. $\Delta x = \Delta y = h$, тогда

$$\sigma_x^k = \sigma_y^k = \sigma^k = \frac{a_{i,j}^k \cdot \Delta\tau}{h^2},$$

а выражение (7.76) примет вид

$$t_{i,j}^{k+1} = \left(1 - 4\sigma^k\right) \cdot t_{i,j}^k + \sigma^k\left(t_{i+1,j}^k + t_{i-1,j}^k + t_{i,j+1}^k + t_{i,j-1}^k\right). \quad (7.77)$$

В поверхностных узлах (грани, ребра) при выводе расчетных выражений учитывается внешний теплообмен как результат теплового взаимодействия среды и поверхности, а также внутренний теплообмен теплопроводностью.

Для грани (узел i, n, рис. 7.8) на элементарную призму $\Delta x \cdot \Delta y/2 \cdot L$ по внешнему теплообмену через поверхность теплообмена $F = \Delta x \cdot L$ поступает тепловой поток мощностью

$$Q'_{i,n} = q_{i,n} \cdot F = \alpha_{i,n}^k \cdot \left(t_{cp}^k - t_{i,n}^k\right)\Delta x \cdot L, \quad (7.78)$$

($\alpha_{i,n}^k$ – суммарный коэффициент теплоотдачи излучением и конвекцией, t_{cp}^k – температура среды в k-ый момент времени). По внутреннему теплообмену теплопроводностью через грань $\Delta y/2 \cdot L$ в направлении оси «x» мощность суммарного теплового потока (рис. 7.8)

$$\Delta Q'_x = (q_{i-1} - q_{i+1})\frac{\Delta y}{2} \cdot L =$$

$$= \left(\frac{\lambda}{\Delta x}\left(t_{i-1,n}^k - t_{i,n}^k\right) - \frac{\lambda}{\Delta x}\left(t_{i,n}^k - t_{i+1,n}^k\right)\right)\frac{\Delta y}{2} \cdot L. \quad (7.79)$$

По внутреннему теплообмену теплопроводностью через грань $\Delta x \cdot L$ в направлении оси «y» мощность суммарного теплового потока (рис. 7.8)

$$\Delta Q'_y = q_n \cdot \Delta x \cdot L = \frac{\lambda}{\Delta y}\left(t^k_{i,n} - t^k_{i,n-1}\right)\Delta x \cdot L. \qquad (7.80)$$

Суммарное количество тепла, подведенное за шаг по времени $\Delta\tau$

$$\Delta Q_\Sigma = \left(\Delta Q'_{i,n} + \Delta Q'_x + \Delta Q'_y\right) \cdot \Delta\tau \qquad (7.81)$$

равно изменению энтальпии контрольного объема в виде элементарной призмы $\Delta x \cdot \Delta y/2 \cdot L$

$$\Delta Q_\Sigma = \Delta I = m \cdot c \cdot \Delta t = \Delta x \cdot \frac{\Delta y}{2} \cdot L \cdot \rho \cdot c^k_{i,n} \cdot \left(t^{k+1}_{i,n} - t^k_{i,n}\right). \quad (7.82)$$

Для $\Delta x = \Delta y = h$ после преобразований получаем расчетное выражение

$$t^{k+1}_{i,n} = \left(1 - 4\sigma^k - 2\sigma^k \frac{\alpha^k_{i,n} \cdot h}{\lambda^k_{i,n}}\right) t^k_{i,n} +$$

$$+\sigma^k \left(t^k_{i-1,n} + t^k_{i+1,n} + 2t^k_{i,n-1} + \frac{\alpha^k_{i,n} \cdot h}{\lambda^k_{i,n}} t^k_{cp}\right). \qquad (7.83)$$

Аналогично получают расчетные выражения для других граней (узлы $0, j;\ i, 0;\ m, j$, рис. 7.8).

Для ребер на контрольный объем в виде элементарной призмы $\Delta x/2 \cdot \Delta y/2 \cdot L$ тепловой поток по внешнему теплообмену поступает через поверхность теплообмена

$$F = \left(\frac{\Delta x}{2} + \frac{\Delta y}{2}\right) \cdot L.$$

Для ребра (узел m, n, рис. 7.8) расчетное выражение имеет вид

$$t_{m,n}^{k+1} = \left(1 - 4\sigma^k - 4\sigma^k \frac{\alpha_{m,n}^k \cdot h}{\lambda}\right) t_{m,n}^k +$$
$$+2\sigma^k \left(t_{m,n-1}^k + t_{m-1,n}^k + 2\frac{\alpha_{m,n}^k \cdot h}{\lambda} t_{ср}^k\right). \qquad (7.84)$$

Наименее устойчивыми в двухмерной задаче являются ребра, поэтому условием устойчивости будет неравенство [44]

$$1 - 4\sigma - 4\sigma\frac{\alpha h}{\lambda} \geq 0,$$

откуда

$$\sigma_{доп} = \frac{1}{4(1 + \frac{\alpha h}{\lambda})}, \qquad (7.85)$$

а шаг по времени

$$\Delta\tau \leq \sigma_{доп} \frac{h^2}{a_{max}},$$

где a_{max} – максимальное значение коэффициента температуропроводности в диапазоне температур, известном по постановке задачи.

При решении *трехмерной задачи* рассматривается прямоугольный параллелепипед с координатами узлов: в направление оси «x» $0 \leq i \leq m$, шаг по координате Δx; в направлении оси «y» $0 \leq j \leq n$, шаг по координате Δy; в направлении оси «z» $0 \leq e \leq S$, шаг по координате Δz. В полученной сетке характерными являются: 1) внутренние узлы;

2) поверхностные узлы лежащие на гранях; 3) поверхностные узлы, лежащие на ребрах; 4) поверхностные узлы – вершины. Расчетные выражения имеют вид: *внутренние узлы*

$$t_{i,j,e}^{k+1} = \left(1 - 2\sigma_x - 2\sigma_y - 2\sigma_z\right)t_{i,j,e}^{k} + \sigma_x^k\left(t_{i+1,j,e}^{k} + t_{i-1,j,e}^{k}\right) + \\ + \sigma_y^k\left(t_{i,j+1,e}^{k} + t_{i,j-1,e}^{k}\right) + \sigma_z^k\left(t_{i,j,e+1}^{k} + t_{i,j,e-1}^{k}\right).$$

Если $\Delta x = \Delta y = \Delta z = h$, то

$$\sigma_x^k = \sigma_y^k = \sigma_z^k = \sigma^k = \frac{a_{i,j,e}^{k} \cdot \Delta\tau}{h^2},$$

а расчетное выражение принимает вид

$$t_{i,j,e}^{k+1} = \left(1 - 6 \cdot \sigma^k\right)t_{i,j,e}^{k} + \\ + \sigma^k(t_{i-1,j,e}^{k} + t_{i+1,j,e}^{k} + t_{i,j-1,e}^{k} + t_{i,j+1,e}^{k} + t_{i,j,e-1}^{k} + t_{i,j,e+1}^{k}); \quad (7.86)$$

грани (например, с координатами узлов m, j, e)

$$t_{m,j,e}^{k+1} = \left(1 - 6 \cdot \sigma^k - 2\sigma^k \frac{\alpha_{m,j,e}^{k} \cdot h}{\lambda}\right)t_{m,j,e}^{k} + \\ + \sigma^k\left(2t_{m-1,j,e}^{k} + t_{m,j+1,e}^{k} + t_{m,j-1,e}^{k} + t_{m,j,e-1}^{k} + t_{m,j,e+1}^{k} \right. \\ \left. + 2\frac{\alpha_{m,j,e}^{k} \cdot h}{\lambda} t_{cp}^{k}\right); \quad (7.87)$$

ребра (например, ребро с координатами узлов m, n, e)

$$t_{m,n,e}^{k+1} = \left(1 - 6\sigma - 4\sigma\frac{\alpha \cdot h}{\lambda}\right) t_{m,n,e}^{k} +$$
$$+\sigma\left(t_{m,n-1,e}^{k} + 2t_{m-1,n,e}^{k} + t_{m,n,e+1}^{k} + 4\frac{\alpha \cdot h}{\lambda} t_{ср}\right); \quad (7.88)$$

вершины (например, вершина с координатой m, n, s)

$$t_{m,n,s}^{k+1} = \left(1 - 6\sigma - 6\sigma\frac{\alpha \cdot h}{\lambda}\right) t_{m,n,s}^{k} +$$
$$+2\sigma\left(t_{m-1,n,s}^{k} + t_{m,n-1,s}^{k} + t_{m,n,s-1}^{k} + 3\frac{\alpha \cdot h}{\lambda} t_{ср}\right). \quad (7.89)$$

Наименее устойчивыми в трехмерной задаче являются вершины, поэтому условием устойчивости будет неравенство

$$1 - 6\sigma - 6\sigma\frac{\alpha \cdot h}{\lambda} \geq 0,$$

откуда

$$\sigma_{доп} = \frac{1}{6\left(1 + \frac{\alpha h}{\lambda}\right)}. \quad (7.90)$$

7.3.5 Метод конечных элементов (МКЭ)

Метод конечных элементов – это численный метод решения задач прикладной физики. Метод стал широко использоваться для задач механики деформируемого тела, теплообмена, гидродинамики и электродинамики. В науке и технике постоянно приходится сталкиваться с проблемой расчета систем, имеющих *сложную геометрическую конфигурацию и нерегулярную*

физическую структуру. Такие проблемы успешно решаются с помощью МКЭ.

МКЭ был предложен как метод Галеркина-Бубнова в 1915 г. [36], теоретически разработан в 50-х годах в связи с началом практической космонавтики М.Келдышем, получил развитие в 70-90-х годах в работах А.А. Розина [37], Г. Стренга [38], Л. Сегерлинда [39], О.Зинкевича [43], стал широко использоваться по мере развития вычислительной техники с 80-х годов прошлого столетия. Применение МКЭ предполагает наличие или разработку сложного программного обеспечения.

Главным достоинством МКЭ является возможность решать нестационарные задачи теплопроводности *для тел любой формы*. МКЭ позволяет аппроксимировать поперечное сечение тела сеткой, состоящей из отдельных *элементов*, т.е. любого вида многоугольников, самым простым и удобным из которых является треугольник. Размеры и формы *элемента* могут, как угодно изменяться по сечению, что делает возможным с высокой точностью представлять нестандартную поверхность тела (рис. 7.9), а также более тщательно исследовать участки, представляющие наибольший интерес (рис. 7.10).

При использовании численных методов (МКР, МКЭ и др) температура тела вычисляется *в узлах сетки.* Если тело неправильной формы аппроксимируется в МКР прямоугольной сеткой, то *граничные узлы* (точки 1, 2, 3 на рис. 7.9) как правило, не совпадают с контуром реальной поверхности. Поэтому расчетные температуры в точке 1 – плоскость, 2 – выступ, 3 – впадина будут существенно отличаться, что противоречит сути процесса: ближайшие точки на реальной поверхности находятся в схожих краевых условиях, а значит, температура должна отличаться несущественно. Если тело неправильной формы аппроксимируется в МКЭ сеткой из треугольных элементов, то граничные узлы сетки точно совпадают с контуром реальной поверхности, а значит расчетные и фактические температуры

практически совпадают, причем, чем мельче элемент у поверхности, тем выше совпадение температур. Эффективность МКЭ может быть повышена, если использовать для разбивки элементы с *криволинейными* сторонами, что может более точно повторить криволинейную поверхность тела.

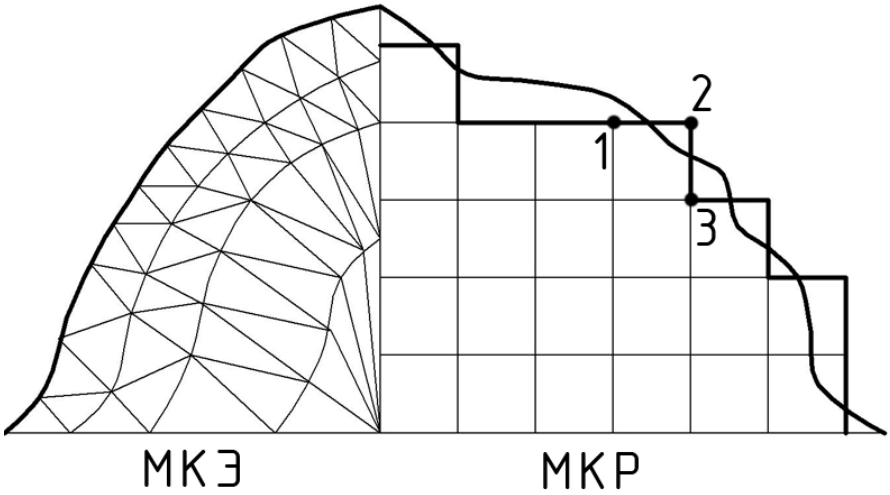


Рисунок 7.9 – Аппроксимация при МКЭ и МКР

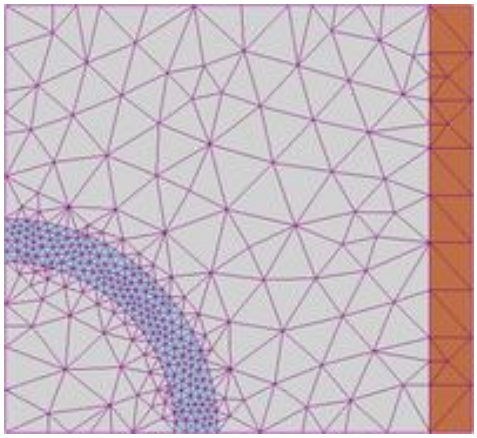


Рисунок 7.10 – Пример разбиения на конечные элементы

МКЭ имеет следующие достоинства:

- возможность расчета температурного поля тела формы любой сложности;

- решаются нелинейные задачи, т.е. теплофизические свойства материала (теплопроводность, теплоемкость, плотность, температуропроводность) пересчитываются в зависимости от температуры на каждом шаге во времени;

- решение возможно для любых сложных начальных и граничных условий; последние могут быть, как заданы заранее в виде функций времени, так и формироваться в процессе решения (сопряженные задачи);

- метод дает возможность рассчитывать температурное поле тела в процессе деформации, например в процессе обработки металлов давлением.

К недостаткам МКЭ следует отнести необходимость большой предварительной проработки и созданием (или приобретением и использованием имеющихся) компьютерных программ. Применение МКЭ связано с большим объемом вычислительной работы, однако, этот недостаток нивелируется наличием мощной современной вычислительной техники.

Ниже приводится метод конечных элементов для двухмерной задачи нестационарной теплопроводности.

Математическая постановка [40] задачи имеет вид:

$$c(t) \cdot \rho(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda(t)\frac{\partial t}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda(t)\frac{\partial t}{\partial y}\right],$$

где

начальные условия:

$$t(x, y, 0) = f(x, y);$$

граничные условия третьего рода:

$$-\lambda\left(\frac{\partial t}{\partial n}\right) = \alpha(t) \cdot \left(t_г - t_{ср}\right),$$

где α – коэффициент теплоотдачи.

Задача может быть решена определением температурного поля МКЭ на основе интегрирования по контрольному объему.

Дискретизация рассматриваемой области проводится треугольными элементами. Контрольные объемы образуются линиями, соединяющими центры масс каждого треугольника с серединами его сторон (рис. 7.11). Построенные контрольные объемы окружают каждую узловую точку в области и на границе.

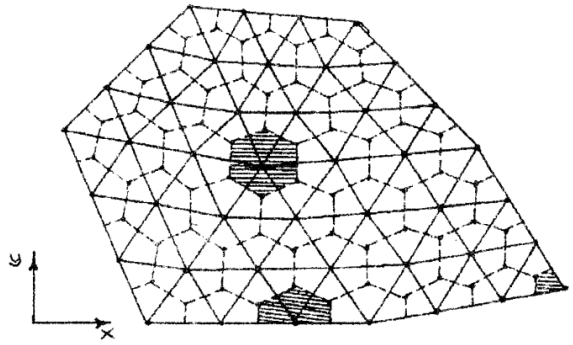


Рисунок 7.11 – Область расчета тела неправильной формы и ее дискретизация на треугольные элементы и контрольные объемы

Дискретные аналоги дифференциального уравнения теплопроводности, составляемые для каждого контрольного объема, находятся путем сложения вкладов от треугольных элементов, обращающих данный контрольный объем в интегральный баланс для объема в целом. В нестационарном состоянии в каждой узловой точке происходит не только подвод или отвод тепла, но и изменение внутренней энергии. Узловая точка *i* может быть внутренней (рис. 7.12 а) или граничной (рис. 7.12 б, в).

Неизвестная температура определяется из уравнения теплового баланса для каждого контрольного объема отрезка единичной длины области за время $\Delta\tau$:

$$\Delta\tau \cdot \oint \vec{\Theta} \cdot \vec{n} \cdot dl = \left(T_i^{k+1} - T_i^k\right) \cdot c_i \cdot \rho_i \cdot \sum_{j=1}^{N} V_j, \qquad (7.91)$$

где в левой части – интеграл по замкнутому контуру – сумма всех входящих и выходящих тепловых потоков (Θ) для данного контрольного объема; в правой части уравнения отражено изменение внутренней энергии контрольного объема за время $\Delta\tau$;

T_i – температура центральной узловой точки;

k – шаг по времени;

c_i - теплоемкость контрольного объема;

ρ_i – плотность контрольного объема;

$\sum_{j=1}^{N} V_j$ – сумма всех частей контрольного объема, входящих в составляющие контрольный объем треугольники;

N – число треугольников элементов, образующих контрольный объем.

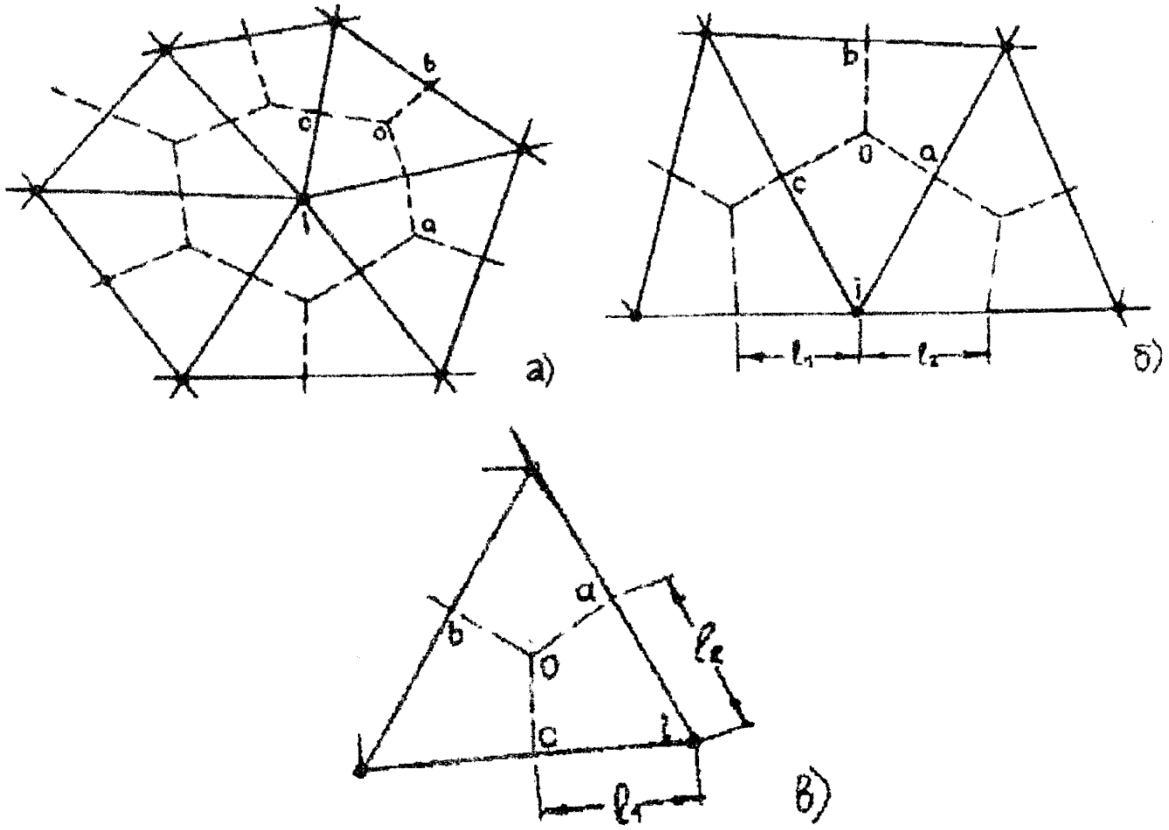


Рисунок 7.12 – Построение контрольного объема с внутренней узловой точкой (а), граничной узловой точкой с тремя соседними элементами (б), граничной узловой точкой с одним элементом (в)

Для отдельно взятого треугольника элемента 123 (рис. 7.13) интеграл по замкнутому контуру при обходе против часовой стрелки имеет вид:

$$\oint \vec{\Theta} \cdot \vec{n} \cdot dl = \int_a^c \left(\Theta_x dy - \Theta_y dx\right), \qquad (7.92)$$

где Θ_x, Θ_y – проекции вектора теплового потока в прямоугольной системе координат; $\vec{n}$ – нормаль к элементарному отрезку dl по границе контрольного объема; dx, dy – проекции элементарного отрезка dl.

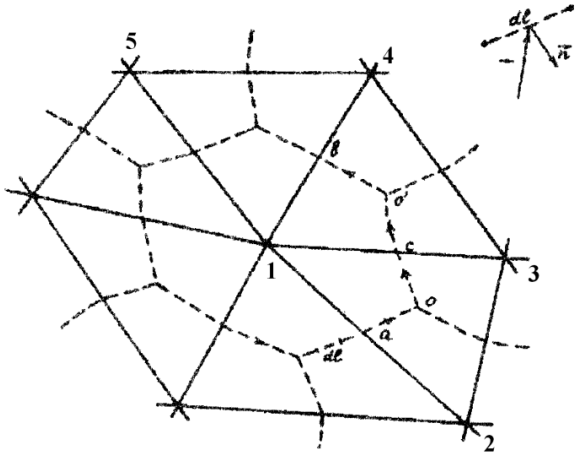


Рисунок 7.13 – Отдельно взятый контрольный объем

Проекции вектора теплового потока представим в виде:

$$\Theta_x = \lambda_0 \cdot A, \qquad \Theta_y = \lambda_0 \cdot B,$$

где

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}{3} -$$

усредненный коэффициент теплопроводности треугольника 123 (коэффициент теплопроводности в точке 0).

$$A = \frac{\partial T}{\partial x}; \quad B = \frac{\partial T}{\partial y}.$$

Тогда уравнение (7.91) приобретает вид:

$$\int_a^c \left(\Theta_x dy - \Theta_y dx\right) = \int_a^c \Theta_x dy - \int_a^c \Theta_y dx = \\ = \lambda_0 \cdot A(y_c - y_a) - \lambda_0 \cdot B(x_c - x_a), \qquad (7.93)$$

где x_c, y_c, x_a, y_a – соответственно координаты точек c и a.

Для расчета тепловых потоков, входящих и выходящих из контрольного объема, применяются обычные функции формы, описывающие изменение независимой переменной на элементе. В данном случае полином представляет собой функцию формы для двухмерного треугольного элемента и имеет вид:

$$T = Ax + By + C. \qquad (7.94)$$

Для нахождения неизвестных коэффициентов A, B, C воспользуемся начальными условиями, когда предполагается, что в начальный момент задано распределение температур по всей области. Тогда, составив систему уравнений в соответствии с (7.94):

$$\begin{cases} T_1 = Ax_1 + By_1 + C; \\ T_2 = Ax_2 + By_2 + C; \\ T_3 = Ax_3 + By_3 + C. \end{cases}$$

Получим значения коэффициентов A, B, C:

$$\begin{cases} A = T_1 a_1 + T_2 a_2 + T_3 a_3; \\ B = T_1 b_1 + T_2 b_2 + T_3 b_3; \\ C = T_1 c_1 + T_2 c_2 + T_3 c_3. \end{cases}$$

где a, b, c – некоторые коэффициенты, зависящие от координат узлов 1,2,3.

Подставив найденные значения коэффициентов в (7.94), получим:

$$\int_a^c \vec{\Theta} \cdot \vec{n} \cdot dl = \int_a^c \left(\Theta_x dy - \Theta_y dx\right) =$$
$$= \lambda_0 \cdot (y_c - y_a)(T_1 a_1 + (T_2 a_2 + T_3 a_3)) -$$
$$-\lambda_0 \cdot (x_c - x_a)\left(T_1 b_1 + (T_2 b_2 + T_3 b_3)\right). \qquad (7.95)$$

После преобразований уравнение (7.95) можно записать:

$$\int_a^c \vec{\Theta} \cdot \vec{n} \cdot dl = T_1 d_1 + (T_2 d_2 + T_3 d_3), \qquad (7.96)$$

где

$$d_1 = f(\lambda_0, y_c, y_a, x_c, x_a, a_1, b_1),$$
$$d_2 = f(\lambda_0, y_c, y_a, x_c, x_a, a_2, b_2),$$
$$d_3 = f(\lambda_0, y_c, y_a, x_c, x_a, a_3, b_3).$$

Выражение (7.96) представляет собой интеграл тепловых потоков по части замкнутого контура, а именно по границе $a - c$ контрольного объема, приходящейся на треугольник 123. Иначе говоря, выражение (7.96) количественно определяет вклад «куска» контрольного объема, «лежащего» в треугольнике 123, зависящий от алгебраической суммы входящих и выходящих через его границу тепловых потоков, в уравнение теплового баланса для всего объема.

Если продолжить обход против часовой стрелки по контуру, то для следующего «куска» общего контрольного объема, «лежащего» в треугольнике 134, интеграл по контуру запишется так:

$$\oint \vec{\Theta} \cdot \vec{n} \cdot dl = \int \left(\Theta_x dy - \Theta_y dx\right) =$$
$$= \lambda_0 \cdot A(y_b - y_c) - \lambda_0 \cdot B(x_b - x_c). \qquad (7.97)$$

Проводя аналогичные треугольнику 123 вычисления и преобразования для треугольника 134, выражение (7.96) в конечном счете примет вид:

$$\int_a^b \vec{\Theta} \cdot \vec{n} \cdot dl = T_1 d_1' + (T_3 d_3 + T_4 d_4), \qquad (7.98)$$

где d_1', d_3, d_4 – соответствующие коэффициенты при температурах T_1, T_{12}, T_3.
Причем:

$$d_1' = f(\lambda_0, y_b, y_c, x_b, x_c, a_1', b_1'),$$
$$d_2 = f(\lambda_0, y_b, y_c, x_b, x_c, a_3, b_3),$$
$$d_3 = f(\lambda_0, y_b, y_c, x_b, x_c, a_4, b_4),$$

т.е. коэффициенты зависят от усредненного значения коэффициента теплопроводности в точке O', координат вершин (коэффициенты $a_1', a_3, a_4, b_1', b_3, b_4$) и середин сторон ($y_b, y_c, x_b, x_c$) следующего и предыдущего треугольных элементов.

Таких уравнений для «кусков» контрольного объема будет столько, сколько треугольников составляют контрольный объем (окружают центральную узловую точку 1). Сравнив выражение (7.96) и (7.98), для данного контрольного объема с центральной узловой точкой 1 левую часть уравнения (7.92) можно представить в виде:

$$\oint \vec{\Theta} \cdot \vec{n} \cdot dl = T_1 \sum_{j=1}^{N} d_1^j + \sum_{j=1}^{N} T_s^j \cdot d_s^j,$$

где T_1 – температура в центральной узловой точке данного контрольного объема;

d_s^j – соответствующие коэффициенты при температуре T_1 в каждом из N треугольников-соседей, окружающих центральный узел 1;

$T_1 \sum_{j=1}^{N} d_1^j$ – сумма произведений температур в узлах треугольников-соседей на соответствующие каждому треугольному элементу коэффициенты d (индекс «s» обозначает соседи).

Выражение теплового баланса для конкретного контрольного объема вокруг центрального узла 1 имеет вид:

$$T_1^{k+1} \sum_{j=1}^{N} d_{1(j)}^k + \sum_{j=1}^{N} T_{s(j)}^k \cdot d_{s(j)}^k =$$

$$= \left(T_1^{k+1} - T_1^k\right) \cdot c_1^k \cdot \rho_1^k \sum_{j=1}^{N} V_j/\Delta\tau. \qquad (7.99)$$

Решением уравнения (7.99) относительно неизвестной температуры T_1^{k+1}, определяется температура в центральном узле конкретного объема (являющимся одновременно одним из текущих узлов всей области) в новый момент времени.

Для контрольных объемов с центральной узловой точкой, лежащей на границе (рис. 7.12 а, б, в), уравнение теплового баланса имеет вид:

$$T_i^{k+1} \sum_{j=1}^{N} d_{i(j)}^k + \sum_{j=1}^{N} T_{s(j)}^k \cdot d_{s(j)}^k = \left(T_i^{k+1} - T_i^k\right) \cdot c_i^k \cdot \rho_i^k \sum_{j=1}^{N} V_j/\Delta\tau \pm q_i,$$

где $q_i = \alpha_i\left(T_i^k - T_{ср}\right), Вт/м^2$ – тепловой поток на границе контрольного объема при граничных условиях 3 рода,

$T_{ср}$ – температура среды, К.

Аналогичным образом составлены уравнения тепловых балансов для каждого контрольного объема области, которые решены относительно неизвестной температуры в центральной точке, представляющей собой текущий узел, на новом шаге по времени.

Пример использования МКЭ для определения температурного поля садки туннельной печи[*)]. Печь, предназначенная для противофлокенной обработки стальных заготовок, имеет прямоугольное поперечное сечение (рис. 7.14). Заготовки располагаются на тележках (всего в печи длиной 192 м располагается 27 тележек), которые перемещаются по печи с помощью толкателя. Садка состоит из круглых заготовок диаметром от 50 до 200 мм и имеет поперечное сечение неправильной формы. Здесь приводятся результаты математического моделирования для одного из вариантов садки общей массой 45 т, состоящей из пакетов заготовок диаметром 80 мм из стали ШХ-15.

Садка аппроксимирована треугольными элементами (рис. 7.15). В соответствие с технологией противофлокенной обработки металл, имеющий после прокатки температуру ≈700°С, проходит в туннельной печи последовательно зоны: 1) технологического охлаждения при температуре печи 500°С; 2) нагрева и выдержки при температуре печи 680°С; 3) охлаждения перед разгрузкой в печи с переменной температурой от 600 до 100°С; 4) охлаждение садки с тележкой на воздухе. Результаты численного эксперимента с применением МКЭ представлена на рисунке 7.16 в виде динамики температур в некоторых узлах сетки, отмеченных на рисунке 7.15. Результаты математического моделирования хорошо совпадают с

[*)] Представлены результаты исследования, выполненные под руководством Ю.Л.Курбатова. В работе принимали участие Ермаченко Д.М., Сидоркин Д.П., Катасонов А.А., Волкова О.Г.

физическим экспериментом, выполненным путем измерения температур с помощью термопар [47]. Следует отметить, что на основе математического моделирования появляется возможность корректировать распределение температур по зонам печи в зависимости от сортамента, марки стали и размера заготовки. Например, на основе результатов приведенного моделирования удалось повысить производительность печи на 8-10% и снизить расход топлива на 5%.

Существует универсальная программная система анализа метода конечных элементов (МКЭ) – ANSYS. Она развивается на протяжении последних 30 лет и является довольно популярной у специалистов в сфере автоматизированных инженерных расчётов (CAE, Computer-Aided Engineering) и решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твёрдого тела и механики конструкций (включая нестационарные геометрически и физически нелинейные задачи контактного взаимодействия элементов конструкций), задач механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, электродинамики, акустики, а также механики связанных полей. Моделирование и анализ в некоторых областях промышленности позволяет избежать дорогостоящих и длительных циклов разработки типа «проектирование – изготовление – испытания». Для приобретения лицензии на право использования программных продуктов ANSYS и услуг по их технической поддержке необходимо: заключение договора с авторизованным партнером ANSYS, оформление предусмотренных правообладателем документов – Лицензионной формы и Сертификата конечного пользователя.

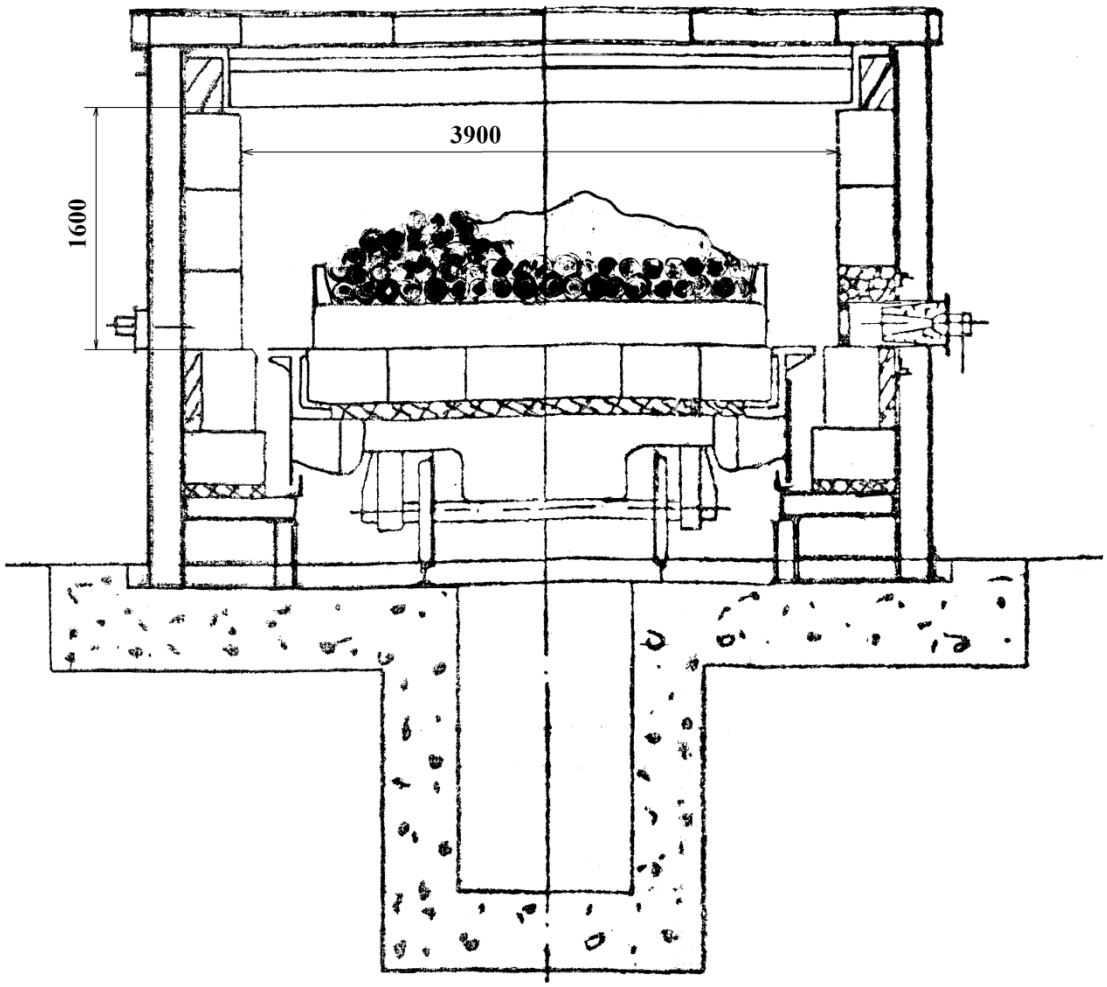


Рисунок 7.14 – Поперечное сечение туннельной печи. (На тележке – садка металла из пакетов заготовок круглого сечения)

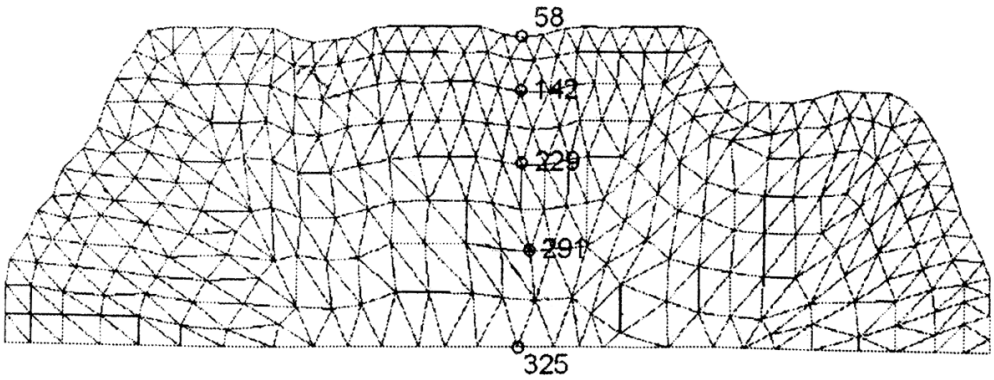


Рисунок 7.15 – Поперечное сечение садки туннельной печи, аппроксимированное треугольными элементами

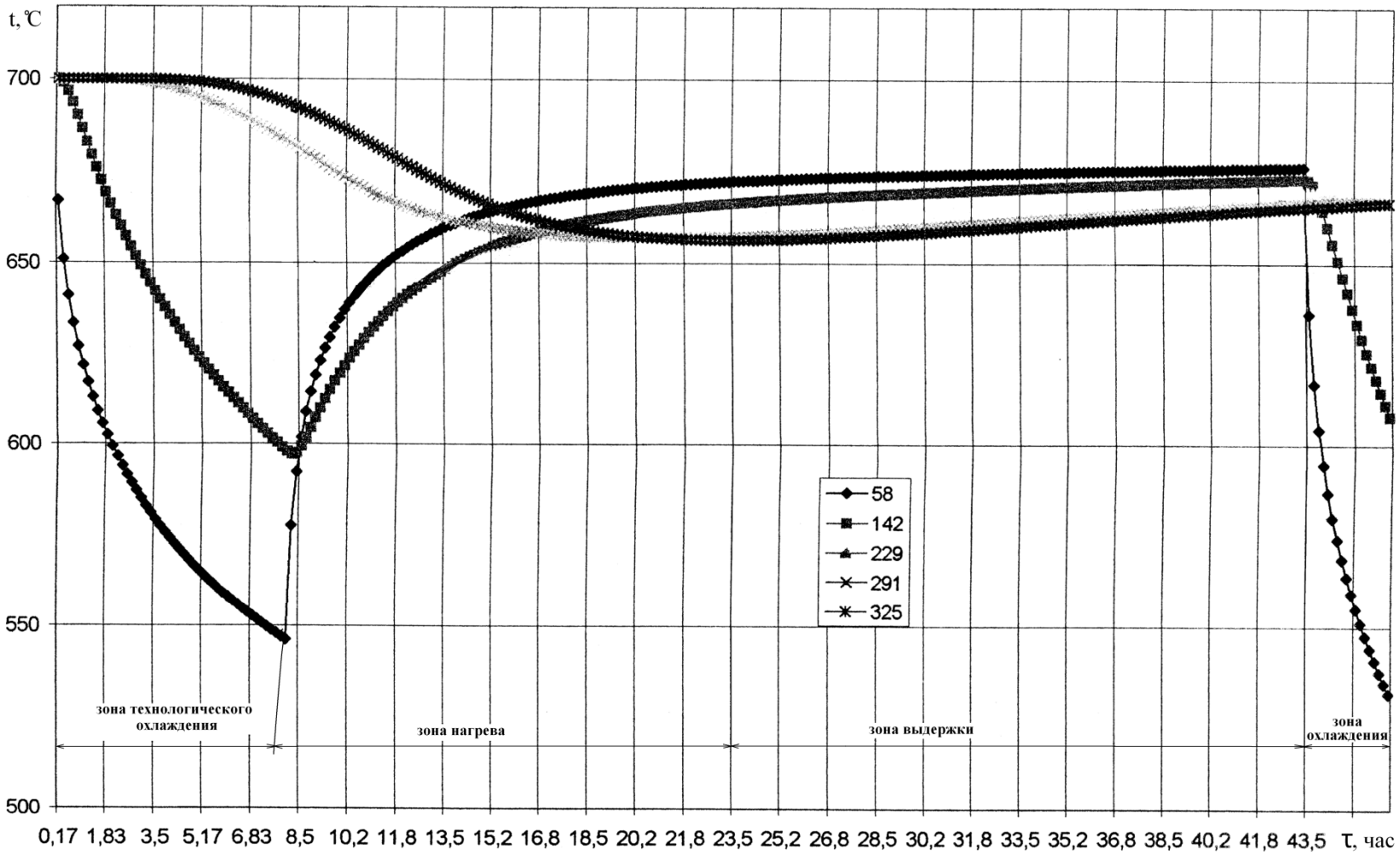


Рисунок 7.16 – Температура садки по зонам туннельной печи

7.3.6 Сопряженные и зональные модели

Решение задач нестационарной теплопроводности в металлургических печах предполагает задание граничных условий (ГУ). При ГУ III рода задается температура источника тепла (постоянная или переменная во времени) и закон внешнего теплообмена. Температурой источника тепла в топливной печи с преобладающим радиационным внешним теплообменом может быть: температура газов (продуктов сгорания) $t_г$, температура внутренней поверхности кладки $t_{кл}$ и температура печи $t_{печ}$ (температура печи – интегрированная температура условного абсолютно черного излучателя).

Температура источника тепла может быть задана по постановке задачи как функция времени, но может определяться и как результат совместного решения внутренней и внешней задачи и теплового баланса на каждом шаге по времени $\Delta\tau$. В последнем случае решается *сопряженная* задача, и граничные условия формируются на каждом временном шаге. Вариантом сопряженной задачи является определение требуемого расхода топлива в каждый момент времени, если граничные условия заданы заранее как функция времени. Математическое моделирование теплового режима печи с решением сопряженных задач является наиболее современным подходом, наилучшим образом отображает реальные тепловые процессы в печах, и вполне осуществимо при наличии современной вычислительной техники.

Сопряженная задача включает решение системы следующих групп задач для k-того момента времени:

- теплового баланса

$$B^k \cdot Q_н^p = \varepsilon_{гкм} \cdot \sigma_0 \left(T_{г,k}^4 - T_{м,k}^4\right) F_м + \varepsilon_{гмк} \cdot \sigma_0 \left(T_{г,k}^4 - T_{кл,k}^4\right) F_{кл} + \\ + B^k \cdot V_г \cdot c_г \cdot t_{г,k}(1 - r), \text{Вт},$$

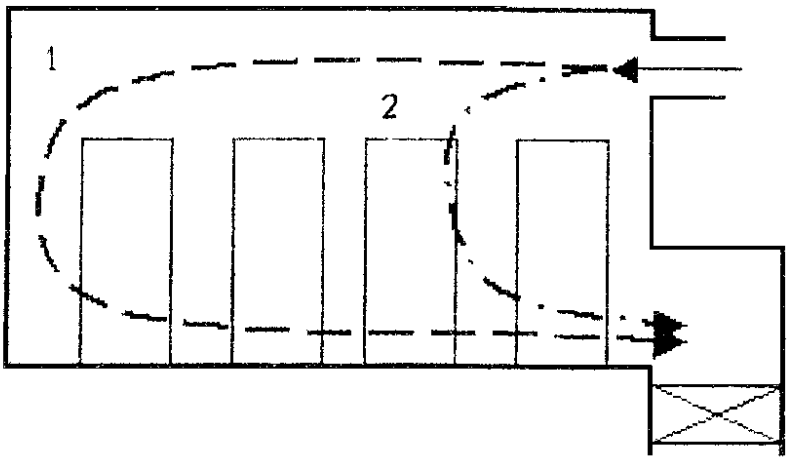
откуда в зависимости от постановки задачи определяется или расход топлива $B, м^3/с$, или температура источника тепла $t_г$, °С. ($Q_н^р, Дж/м^3$ – теплота сгорания топлива; $\varepsilon_{гкм}, \varepsilon_{гмк}$ – приведенные степени черноты систем «газ-кладка-металл» и «газ-металл-кладка»; $\sigma_0 = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ $Вт/(м^2 \cdot К^4)$ –коэффициент излучения абсолютно черного тела; $F_м, F_{кл}, м^2$ – площадь тепловоспринимающих поверхностей металла и кладки; $t_{м,k} = T_{м,k} - 273, °С$ – температура тепловоспринимающей поверхности металла; $t_{кл,k} = T_{кл,k} - 273, °С$ – температура тепловоспринимающей поверхности кладки; $V_г, м^3/м^3$ – выход газов (продуктов горения) на 1 $м^3$ топлива; $c_г, Дж/(м^3 \cdot К)$ – удельная теплоемкость газов; r – коэффициент рекуперации);

- задача нестационарной теплопроводности нагреваемого металла, в результате решения которой численным методом (МКР или МКЭ) определяется поле температур в металле, в т.ч. температура поверхности металла $t_{м,k}$;

- задача нестационарной теплопроводности кладки, в результате решения которой численным методом (МКР или МКЭ) определяется поле температур в кладке, в т.ч. температура внутренней поверхности кладки $t_{кл,k}$.

Зональные модели. В металлургии имеется большая группа печей с неравномерным полем температур и с несимметричным расположением зон источника тепла, тепловосприятия металла и тепловосприятия кладки, а также неравномерным тепловыделением. Особенно актуальной является эта проблема для печей периодического действия, работающих по камерному режиму, в которых тепловой режим изменяется в каждый момент времени. Примером может быть нагревательный колодец с одной верхней горелкой (ОВГ) для нагрева слитков перед обжимным станом (рис. 7.17). Эта печь имеет сильно вытянутую форму; в передней торцевой стенке расположена вверху горелка и

отверстия для отвода продуктов сгорания внизу. По высоте зона горения (факел) расположена в верхней половине рабочей камеры, а нагреваемые слитки в нижней. В печах такого типа представляется целесообразным при составлении модели разделить рабочую камеру на *зоны*, в каждой из которой можно принять одинаковые тепловые условия: равномерное поле температур, известное тепловыделение источника тепла, характеристики внешнего теплообмена. *Зона* печи может быть представлена самостоятельным участком печи со своим тепловым балансом. В зональной модели требуется обязательный учет теплового взаимодействия между зонами.



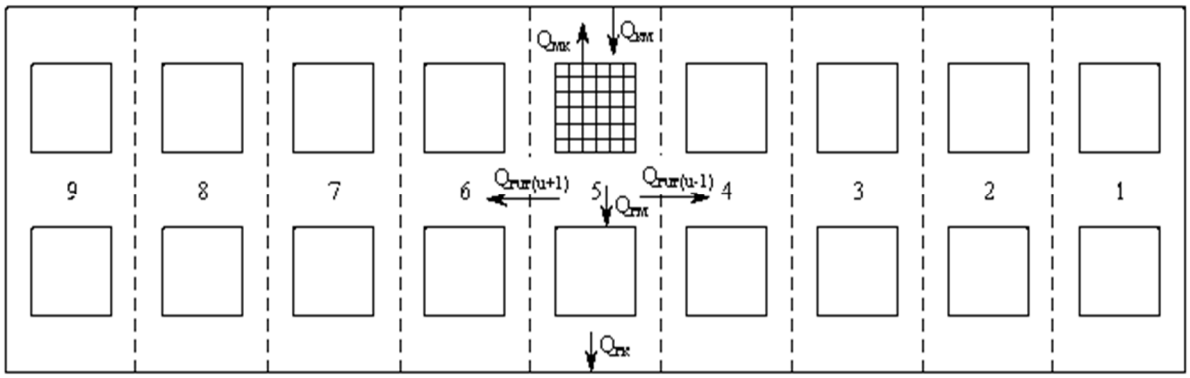
1 – газовые потоки при расходе газа B_{max}; 2 – газовые потоки при расходе газа B_{min}

Рисунок 7.17 – Схема газовых потоков

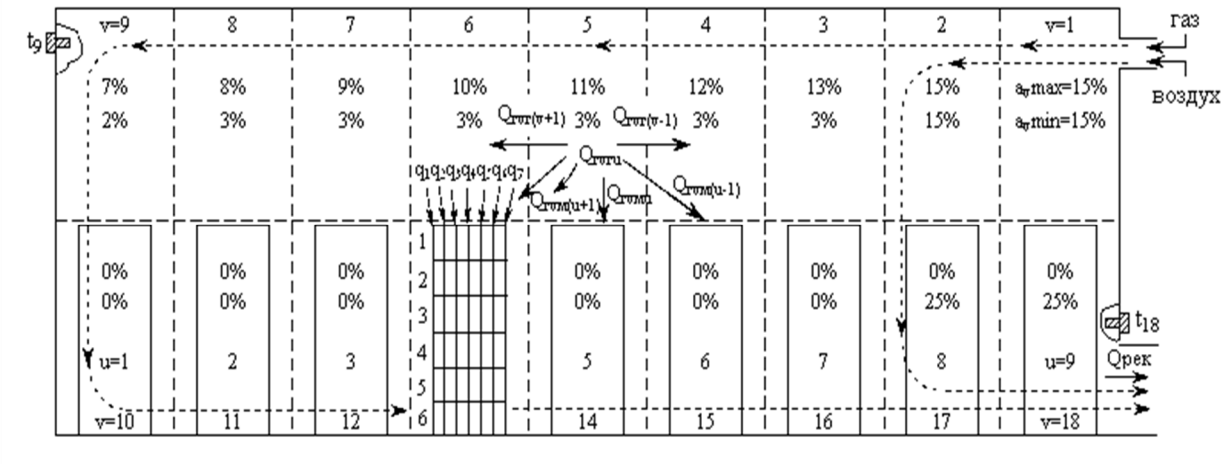
Зональную сопряженную модель рассмотрим на примере*) нагревательной печи для нагрева слитков (ОВГ). На рисунке 7.18 представлена схема разбиения печи на расчетные зоны. Печь представляет собой (упрощенный) прямоугольный параллелепипед L x B x H = 9,6 x 2,7 x 4,2 м. Слитки (в плане)

*)Представлены результаты исследования, выполненного группой магистров под руководством автора Ю.Л.Курбатова.

располагаются в нижней части в 2 ряда по 9 слитков размером 2,0х0,7х0,7м. Поток факела, а затем продуктов сгорания (газы) проходит в верхней части камеры от передней до задней стенки, излучая (расходуя) тепло, затем поворачивает у задней стенки вниз и, омывая слитки и отдавая им тепло, движется к передней стенке, где расположено выходное отверстие, через которое газы отводятся в рекуператор.



а)



б)

а) план; б) вертикальный продольный разрез

Рисунок 7.18 – Схема разбиения нагревательного колодца ОВГ на расчетные зоны

При таком расположении металла и зоны горения рациональным представляется разбиение рабочей камеры печи на 18 зон: девять

верхних и девять нижних (рис. 7.18). В каждой нижней зоне 10-18 расположено симметрично по 2 слитка. Все зоны находятся в тепловом взаимодействии с соседними. В зонах 9 и 18 имеются термопары t_9 и t_{18}, включенные в систему автоматического регулирования теплового режима. В верхней части передней стенки расположена диффузионная горелка (с внешним перемешиванием), через которую в камеру печи подается природный газ и воздух. Выгорание топлива происходит постепенно в каждой зоне, доля выгоревшего топлива в зоне «а» в процентах показана на рисунке 7.18.

Ниже приводится сопряженная зональная математическая модель печи ОВГ, составленной для отработки теплового режима импульсного отопления. Такой режим заключается в поочередной подаче максимального и минимального расхода топлива с целью выравнивания температурного поля.

Тепловой баланс i-ой зоны имеет вид:

а) для режима B_{max}:

i=1:

$$a_{max\,1} B_{max} Q_н^р + \alpha B_{max} L_о c_в t_в =$$
$$= \left(a_{max\,1} B_{max} V_о c_д + (1 - a_{max\,1})(c_т + L_о c_в) B_{max} + (\alpha - 1) L_о c_в B_{max}\right) t_{г1} + \sum Q_{изл\,1}$$

i=2...9:

$$a_{max\,i} B_{max} Q_н^р + W_{(i-1)} t_{г\,(i-1)} =$$
$$= \left(\sum_1^i a_{max\,i} B_{max} V_о c_д + (1 - \sum_1^i a_{max\,i})(c_т + L_о c_в) B_{max} + (\alpha - 1) L_о c_в B_{max}\right) t_{г\,i} + \sum Q_{изл\,i}$$

i=10...18:

$$W_{(i-1)} t_{г\,(i-1)} = \left(B_{max} V_о c_д + (\alpha - 1) L_о c_в B_{max}\right) t_{г\,i} + \sum Q_{изл\,i}$$

где: i – номер зоны;

$a_{max\,i}$ - коэффициент выгорания топлива в i-й зоне при B_{max};

$a_{max\,i}B_{max}Q_н^p$ - химическая теплота сгорания топлива, которая сгорает в i-й зоне, Вт;

$\alpha B_{max}L_o c_в t_в$ - физическое тепло топлива, которое поступает к горелке, Вт;

$W_{(i-1)}t_{г\,(i-1)}$ - физическое тепло продуктов сгорания, которое пришло из предыдущей зоны, Вт;

$$W_i = \sum_1^i a_{max\,i}B_{max}V_o c_д + (1 - \sum_1^i a_{max\,i})(c_т + L_o c_в)B_{max} + (\alpha - 1)L_o c_в B_{max}$$

- водяное число смеси продуктов сгорания топлива и воздуха, Вт,

где: $\sum_1^i a_{max\,i}B_{max}V_o c_д$ - водяное число продуктов сгорания, переходящие к следующей зоне, Вт;

$(1 - \sum_1^i a_{max\,i})(c_т + L_o c_в)B_{max}$ - водяное число топлива и воздуха, переходящие к следующей зоне, Вт;

$(\alpha - 1)L_o c_в B_{max}$ - водяное число избыточного воздуха, Вт.

б) для режима B_{min}:

i=1:

$$a_{max\,1}B_{max}Q_н^p + \alpha B_{max}L_o c_в t_в =$$
$$= \left(a_{max\,1}B_{max}V_o c_д + (1 - a_{max\,1})(c_т + L_o c_в)B_{max} + (\alpha - 1)L_o c_в B_{max}\right)t_{г\,i} + \sum Q_{изл\,1}$$

i=2:

$$a_{min\,2}B_{min}Q_н^р + W_1 t_{г1} =$$
$$= \begin{pmatrix} (a_{min\,1} + a_{min\,2})B_{min}V_o c_д + (1-(a_{min\,1} + a_{min\,2}))(c_т + L_o c_в)B_{min} + \\ + (\alpha - 1)L_o c_в B_{min} \end{pmatrix} t_{г\,2} + \sum Q_{iзл\ 2}$$

i=3...9:

$$a_{min\,i}B_{min}Q_н^р + \begin{pmatrix} b(a_{min\,1} + a_{min\,2}) + \sum_{3}^{(i-1)} a_{min\,i})B_{min}V_o c_д + (1-(\sum_{1}^{(i-1)} a_{min\,i} + a_{min\,17} + a_{min\,18}))\times \\ \times (c_т + L_o c_в)B_{min} + b(\alpha - 1)L_o c_в B_{min} \end{pmatrix} t_{г(i-1)} =$$
$$= \begin{pmatrix} (b(a_{min\,1} + a_{min\,2}) + \sum_{3}^{i} a_{min\,i})B_{min}V_o c_д + (1-(\sum_{1}^{i} a_{min\,i} + a_{min\,17} + a_{min\,18}))\times \\ \times (c_т + L_o c_в)B_{min} + b(\alpha - 1)L_o c_в B_{min} \end{pmatrix} t_{г\,i} + \sum Q_{iзл\ i}$$

i=10...16:

$$W_{(i-1)}t_{г(i-1)} = \left((b(a_{min\,1} + a_{min\,2}) + \sum_{3}^{i} a_{min\,i})B_{min}V_o c_д + b(\alpha - 1)L_o c_в B_{min} \right) t_{г\,i} + \sum Q_{iзл\ i}$$

i=17:

$$a_{min\,17}B_{min}Q_н^р + W_9 t_{г16} + \begin{pmatrix} (1-b)(a_{min\,1} + a_{min\,2})B_{min}V_o c_д + (1-\sum_{1}^{9} a_{min\,i})(c_т + L_o c_в)B_{min} + \\ + (1-b)(\alpha - 1)L_o c_в B_{min} \end{pmatrix} t_{г\,2} =$$
$$= \begin{pmatrix} W_9 + a_{min\,17}B_{min}V_o c_д + (1-(\sum_{1}^{9} a_{min\,i} + a_{min\,17}))(c_т + L_o c_в)B_{min} + \\ + (1-b)(a_{min\,1} + a_{min\,2})B_{min}V_o c_д + (1-b)(\alpha - 1)L_o c_в B_{min} \end{pmatrix} t_{г17} + \sum Q_{iзл\ 17}$$

i=18:

$$a_{min\,18}B_{min}Q_н^р + W_{17}t_{г17} = \begin{pmatrix} W_9 + a_{min\,17}B_{min}V_o c_д + a_{min\,18}B_{min}V_o c_д + (1-b)\times \\ \times (a_{min\,1} + a_{min\,2})B_{min}V_o c_д + (1-b)(\alpha - 1)L_o c_в B \end{pmatrix} t_{г18} + \sum Q_{iзл\ 18}$$

где $a_{min\,i}$ – коэффициент выгорания топлива в i-й зоне при B_{min};

$$b = \frac{\sum_{3}^{9} a_{min}}{\sum_{3}^{9} a_{min} + \sum_{17}^{18} a_{min}}$$

b – доля продуктов сгорания и воздуха, которая перешла до 3-ей зоны;

(1-b) – доля продуктов сгорания и воздуха, которая перешла до 17-ой зоны.

Распишем расходные составные баланса:

$$Q_{вт} = Q_{м} + Q_{к} + Q_{рек}.$$

А) Расход тепла на нагрев металла, Вт:

$$Q_{мi} = \varepsilon_{гмi}\sigma_{о}\left(T_{гi}^{4} - T_{пмi}^{4}\right)\cdot F_{мi} + \varepsilon_{гм(i-1)}\sigma_{о}\left(T_{гi}^{4} - T_{пм(i-1)}^{4}\right)\cdot F_{м(i-1)} + \\ + \varepsilon_{гм(i+1)}\sigma_{о}\left(T_{гi}^{4} - T_{пм(i+1)}^{4}\right)\cdot F_{м(i+1)}$$

Б) Расход тепла на нагрев кладки, Вт:

$$Q_{кi} = \varepsilon_{гкi}\sigma_{о}\left(T_{гi}^{4} - T_{пкi}^{4}\right)\cdot F_{кi} + \varepsilon_{гк(i-1)}\sigma_{о}\left(T_{гi}^{4} - T_{пк(i-1)}^{4}\right)\cdot F_{к(i-1)} + \\ + \varepsilon_{гк(i+1)}\sigma_{о}\left(T_{гi}^{4} - T_{пк(i+1)}^{4}\right)\cdot F_{к(i+1)}$$

В) Расход тепла излучением в рекуператоре, Вт:

$$Q_{рек} = \sigma_{о}\left(T_{гi}^{4} - T_{рек}^{4}\right)\cdot F_{рек}\cdot \Phi,$$

где $\varepsilon_{гмi}$ – приведенная степень черноты газ-металл в i-ой зоне;

$\varepsilon_{гкi}$ – приведенная степень черноты газ-кладка в i-ой зоне;

$\varepsilon_{гi}$ – степень черноты газу с верхней зоны в нижнюю;

$\sigma_{о}$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела,

$\sigma_{о}=5{,}67\cdot 10^{-8}$ Вт/(м^{2}К^4);

$T_{гi}$ – температура газа в i-ой зоне;

$T_{пмi}$ – средняя по поверхности температура металла в i-ой зоне;

$T_{пкi}$ – средняя по поверхности температура кладки в i-ой зоне;

$T_{гn}$ – температура газа в 18-ій зоне;

$T_{рек}$ – температура в рекуператоре, принимается на 100˚С ниже газа в 18-ий зоне;

$F_{мi}$ – поверхность теплообмена металла (для i = 1..9: $F_{мi} = 0$)

$F_{кi}$ – поверхность теплообмена кладки,

$F_{рек}$ – поверхность теплообмена рекуператора;

Ф – коэффициент диафрагмирования.

Таким образом, для каждой зоны колодца тепловой баланс: количество тепла, которое поступило в зону, равняется теплу, которое вышло из этой зоны. Это нужно учитывать во время работы колодца при импульсном отоплении, для которого выделяют два периода. Первый – нагревание, когда изменяется температура печных газов и кладки, растут потери теплоты рабочего пространства печи через стены и происходит аккумуляция тепла кладкой. Второй период – томление металла, характеризует снижение тепловой мощности при постоянной температуре кладки.

После определения всех прибыльных и расходных составляющих теплового баланса из него на каждом шагу по времени определяется температура газа (смеси продуктов сгорания и воздуха) в каждой зоне $t_{гi}$, которая используется дальше как предельное условие для решения нестационарного задания для слитка и огнеупорной кладки:

а) для режима B_{max}:

i=1:

$$t_{г1} = \frac{a_{max\,1} B_{max} Q_н^р + \alpha B_{max} L_о c_в t_в - \sum Q_{изл\,1}}{a_{max\,1} B_{max} V_о c_д + (1 - a_{max\,1})(c_т + L_о c_в) B_{max} + (\alpha - 1) L_о c_в B_{max}}$$

i=2...9:

$$t_{г\,i} = \frac{a_{max\,i} B_{max} Q_{н}^{р} + W_{(i-1)} t_{г\,(i-1)} - \sum Q_{изл\,i}}{\sum_{1}^{i} a_{max\,i} B_{max} V_{о} c_{д} + (1 - \sum_{1}^{i} a_{max\,i})(c_{т} + L_{о} c_{в}) B_{max} + (\alpha - 1) L_{о} c_{в} B_{max}}$$

i=10...18:

$$t_{г\,i} = \frac{W_{(i-1)} t_{г\,(i-1)} - \sum Q_{изл\,i}}{B_{max} V_{о} c_{д} + (\alpha - 1) L_{о} c_{в} B_{max}}$$

б) для режима B_{min}:

i =1:

$$t_{г1} = \frac{a_{min\,1} B_{min} Q_{н}^{р} + \alpha B_{min} L_{о} c_{в} t_{в} - \sum Q_{изл\,1}}{a_{min\,1} B_{min} V_{о} c_{д} + (1 - a_{min\,1})(c_{т} + L_{о} c_{в}) B_{min} + (\alpha - 1) L_{о} c_{в} B_{min}}$$

i =2:

$$t_{г2} = \frac{a_{min\,2} B_{min} Q_{н}^{р} + W_{1} t_{1} - \sum Q_{изл\,2}}{(a_{min\,1} + a_{min\,2}) B_{min} V_{о} c_{д} + (1 - (a_{min\,1} + a_{min\,2}))(c_{т} + L_{о} c_{в}) B_{min} + (\alpha - 1) L_{о} c_{в} B_{min}}$$

i =3...9:

$$t_{г\,i} = \frac{\left(\begin{array}{l} a_{min\,i} B_{min} Q_{н}^{р} + (b(a_{min\,1} + a_{min\,2}) + \sum_{3}^{i-1} a_{min\,i}) B_{min} V_{о} c_{д} + (1 - (\sum_{1}^{i-1} a_{min\,i} + a_{min\,17} + a_{min\,18})) \times \\ \times (c_{т} + L_{о} c_{в}) B_{min} + b(\alpha - 1) L_{о} c_{в} B_{min}) t_{(i-1)} - \sum Q_{изл\,i} \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{l} (b(a_{min\,1} + a_{min\,2}) + \sum_{3}^{i} a_{min\,i}) B_{min} V_{о} c_{д} + (1 - (\sum_{1}^{i} a_{min\,i} + a_{min\,17} + a_{min\,18})) \times \\ \times (c_{т} + L_{о} c_{в}) B_{min} + b(\alpha - 1) L_{о} c_{в} B_{min} \end{array} \right)}$$

i = 10...16:

$$t_{г\,i} = \frac{W_9 t_{(i-1)} - \sum Q_{изл\ i}}{W_9}$$

i = 17:

$$t_{г17} = \frac{\left(\begin{array}{l} a_{min\,17} B_{min} Q_н^р + W_9 t_{16} + ((1-b)(a_{min\,1} + a_{min\,2}) B_{min} V_o c_д + (1 - \sum_1^9 a_{min\,i}) \times \\ \times (c_т + L_o c_в) B_{min} + (1-b)(\alpha - 1) L_o c_в B_{min}) t_2 - \sum Q_{изл\ 17} \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{l} W_9 + a_{min\,17} B_{min} V_o c_д + (1 - (\sum_1^9 a_{min\,i} + a_{min\,17}))(c_т + L_o c_в) B_{min} + \\ + (1-b)(a_{min\,1} + a_{min\,2}) B_{min} V_o c_д + (1-b)(\alpha - 1) L_o c_в B_{min} \end{array} \right)}$$

i = 18:

$$t_{г18} = \frac{a_{min\,18} B_{min} Q_н^р + W_{17} t_{17} - \sum Q_{изл\ 18}}{\left(\begin{array}{l} W_9 + a_{min\,17} B_{min} V_o c_д + a_{min\,18} B_{min} V_o c_д + (1-b)(a_{min\,1} + a_{min\,2}) B_{min} V_o c_д + \\ + (1-b)(\alpha - 1) L_o c_в B_{min} \end{array} \right)}$$

Поскольку измерение температуры газов в колодце весьма затруднительно, то обычно в производственных условиях с помощью термопары в рабочем просторные печи измеряется температура в печи. Температура, которая фиксируется, горячим спаем такой термопары, дает промежуточное значение между температурами газов, кладки и металла, и называется температурой печи ($t_{печ}$).

Перерасчет на температуру печи проводится по формуле Стефана-Больцмана:

$$\varepsilon_{печ.м} \left(T_{печ}^4 - T_м^4 \right) = \varepsilon_{гкм} (T_г^4 - T_м^4) .$$

– в верхних зонах (i=1…9):

$$t_{\text{печі}} = \sqrt[4]{\frac{\varepsilon_{\text{гкмі}}}{\varepsilon_{\text{печ.кі}}}(T_{\text{гі}}^4 - T_{\text{кі}}^4) + T_{\text{кі}}^4} - 273,°C$$

– в нижних зонах (i=10…18):

$$t_{\text{печі}} = \sqrt[4]{\frac{\varepsilon_{\text{гкмі}}}{\varepsilon_{\text{печ.мі}}}(T_{\text{гі}}^4 - T_{\text{мі}}^4) + T_{\text{мі}}^4} - 273,°C$$

Для определения температуры печи необходимы следующие данные: $\varepsilon_{\text{гкм}}, \varepsilon_{\text{печ.м}}, \varepsilon_{\text{печ.к}}$.

Степень черноты в системе «газ - кладка - металл» определяется из выражения[24]:

$$\varepsilon_{\text{ткм}} = \frac{\varepsilon_{\text{т}} \cdot \varepsilon_{\text{м}}}{\varepsilon_{\text{т}} + \varphi_{\text{км}}\, \varepsilon_{\text{м}}(1 - \varepsilon_{\text{т}})}.$$

Степень черноты в системе «печь - металл», «печь - кладка» определяется по формулам:

$$\varepsilon_{\text{печ.м}} = \frac{\varepsilon_{\text{м}} \cdot \varphi_{\text{мк}}}{1 - \varphi_{\text{мм}}(1 - \varepsilon_{\text{м}})},$$

$$\varepsilon_{\text{печ.к}} = \frac{\varepsilon_{\text{к}} \cdot \varphi_{\text{кк}}}{1 - \varphi_{\text{кк}}(1 - \varepsilon_{\text{к}})}.$$

Угловые коэффициенты определяются для каждой зоны индивидуально для каждого случая, допуская, что взаимодействуют только две соседних зоны, учитывая габаритные размеры смежных зон, металла, кладки. Определение углового коэффициента $\varphi_{\text{мм}}$ излучения с металла на металл для частного случая изображено на рисунке 7.19.

Угловые коэффициенты при передаче газа из верхней части расчетной зоны к ее нижней части, к нижней части смежной зоны и излучения к верхней части следующей зоны определяются методами „соотношения проекций”, „натянутых нитей”, и др.

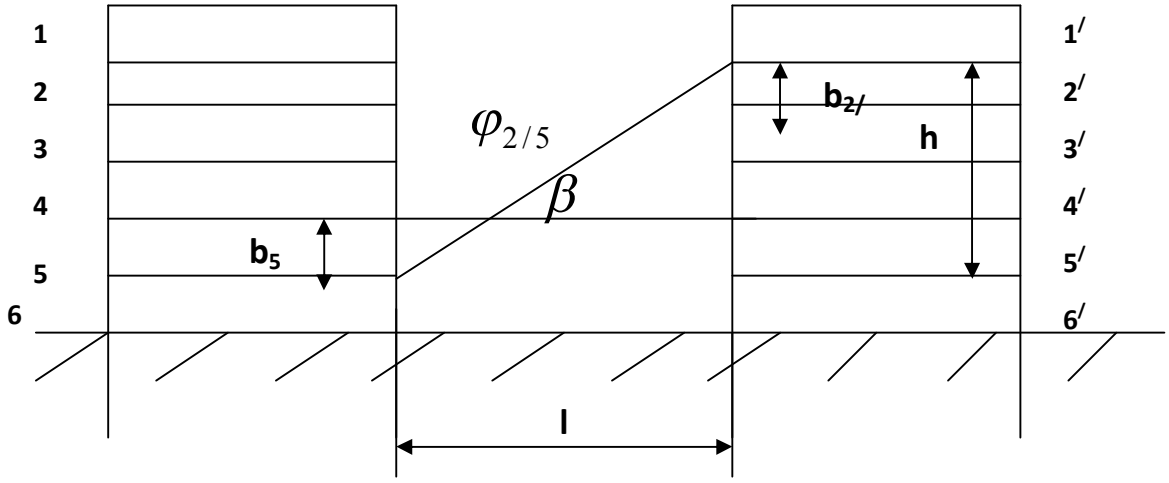


Рисунок 7.19 – Определение угловых коэффициентов $\varphi_{мм}$

На рисунке 7.20, 7.21 и 7.22 представлены блок-схемы сопряженной зональной модели. На рисунке 7.22 показаны результаты математического моделирования одного из вариантов импульсного отопления: представлены изменение температурного поля печи и слитка (7.23а), а также изменение расхода топлива и тепловых потоков на металл и кладку (7.23б).

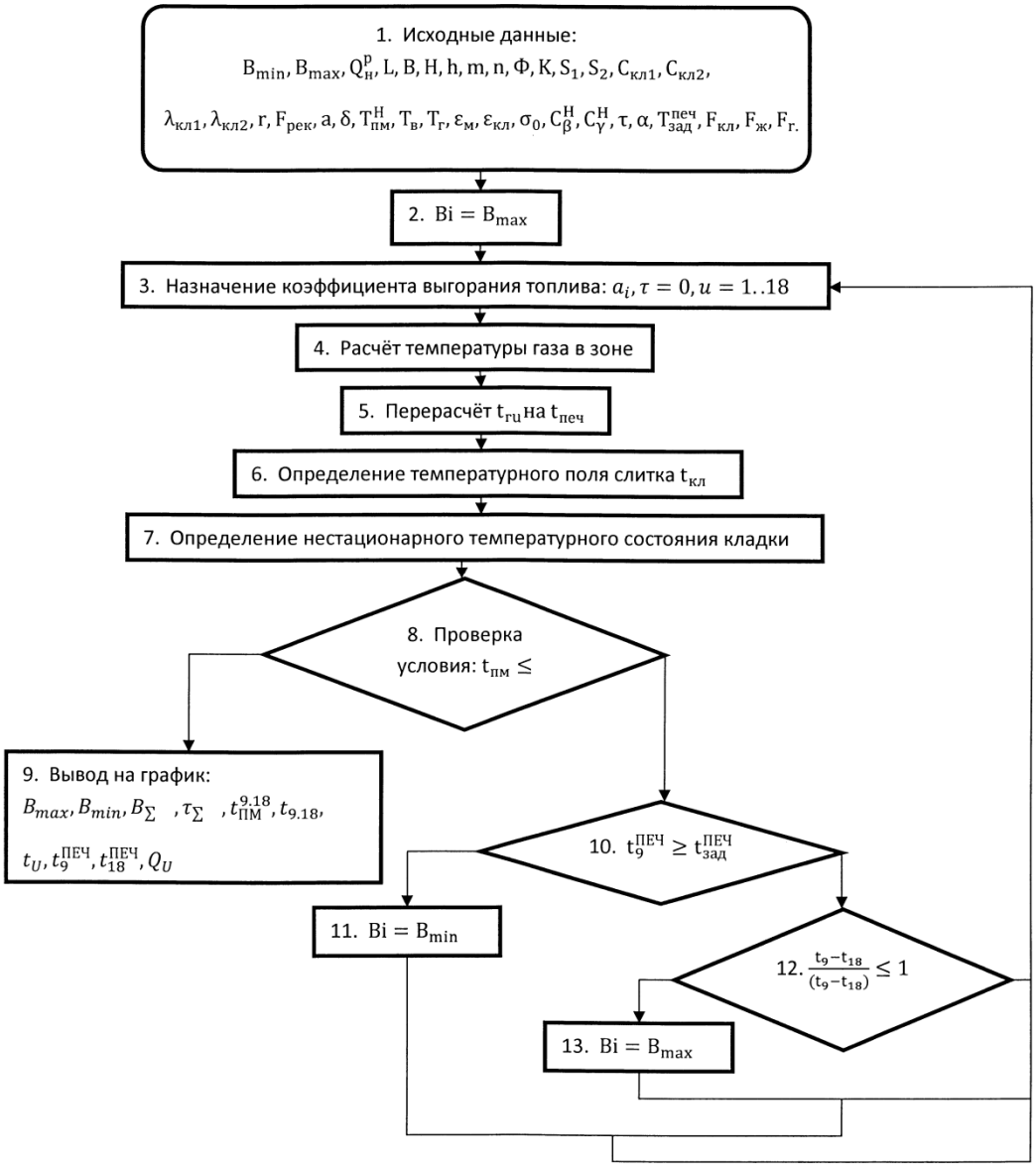


Рисунок 7.20 – Общая блок-схема зональной модели

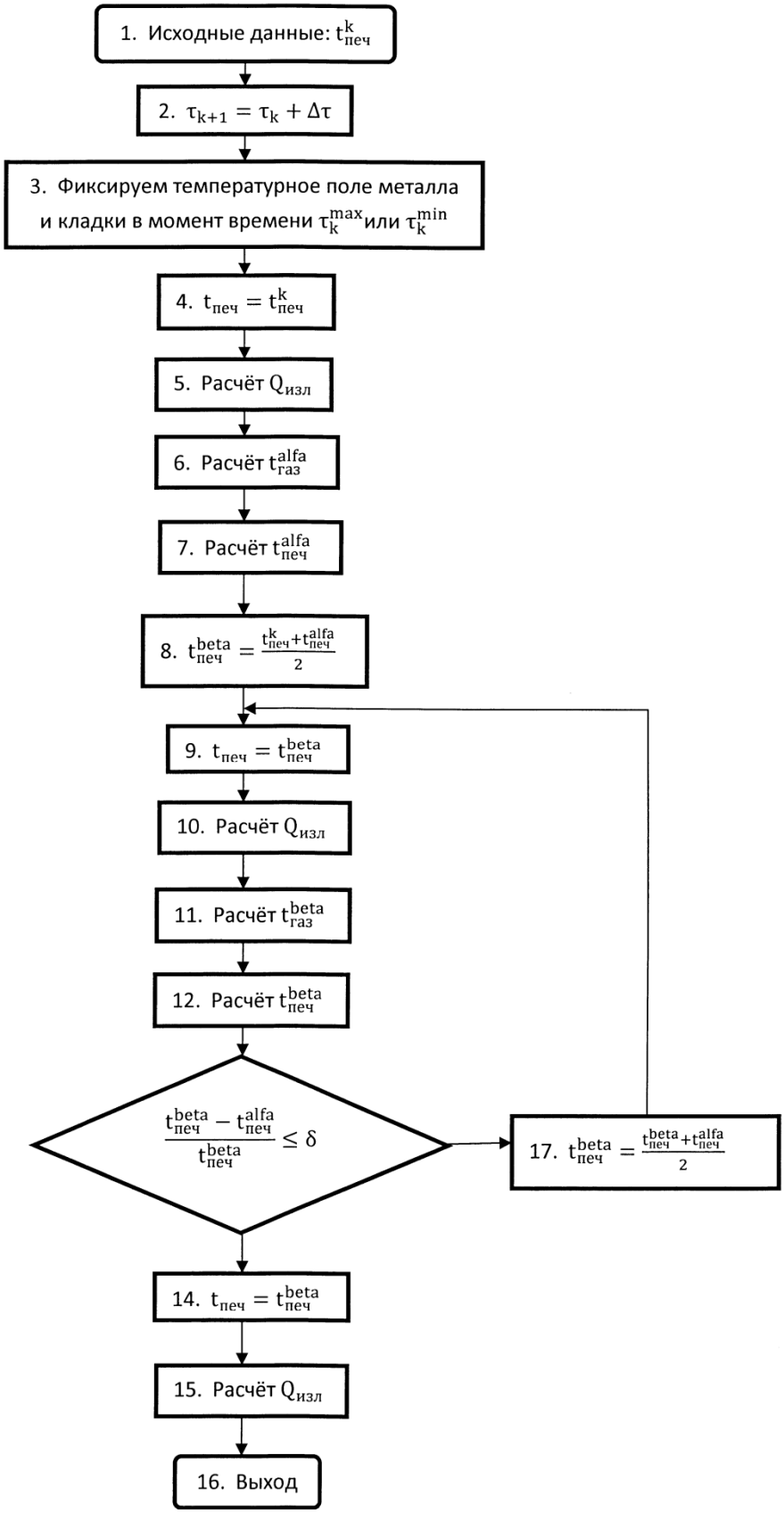


Рисунок 7.21 – Блок-схема стабилизации температур печи

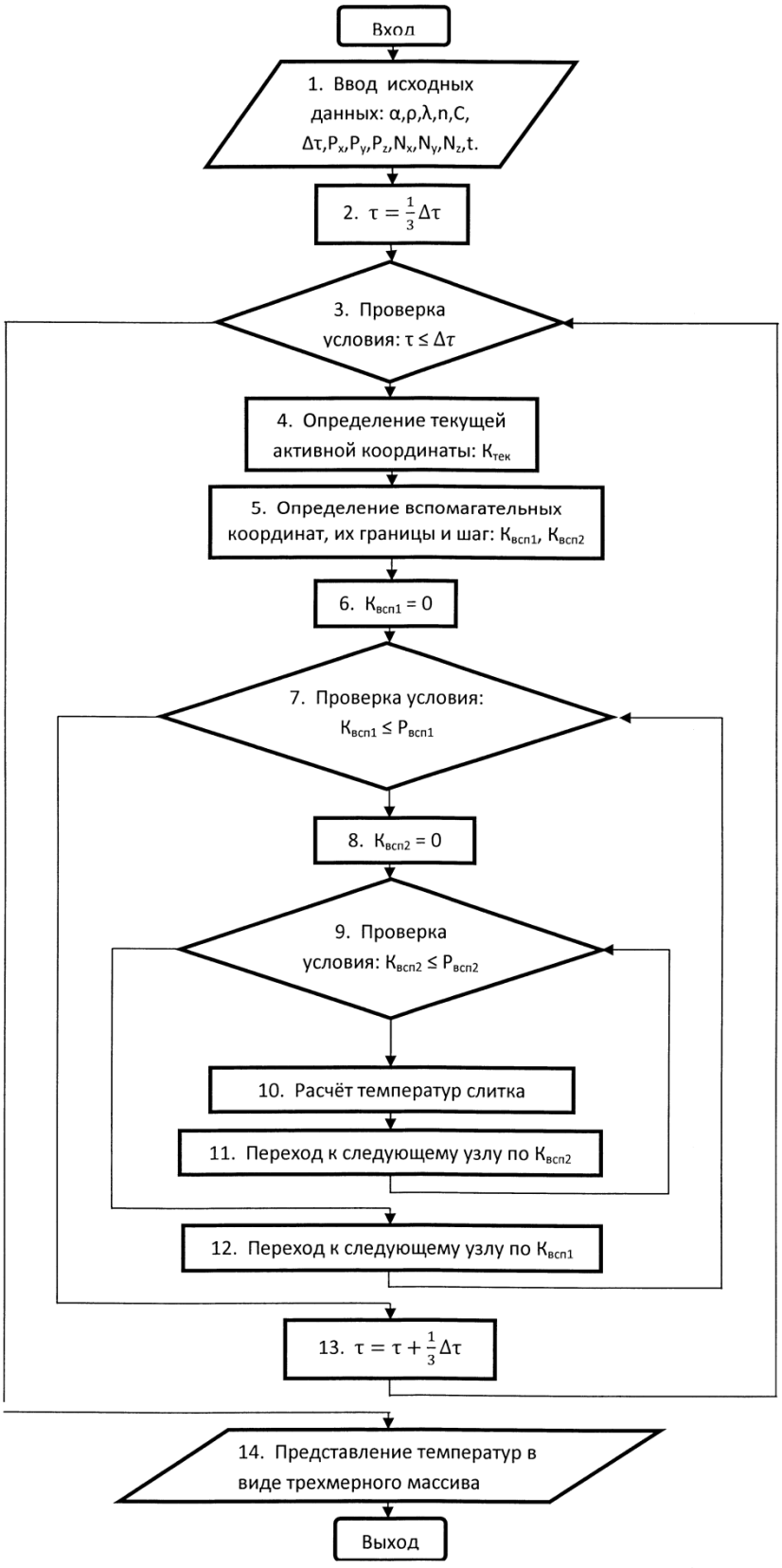
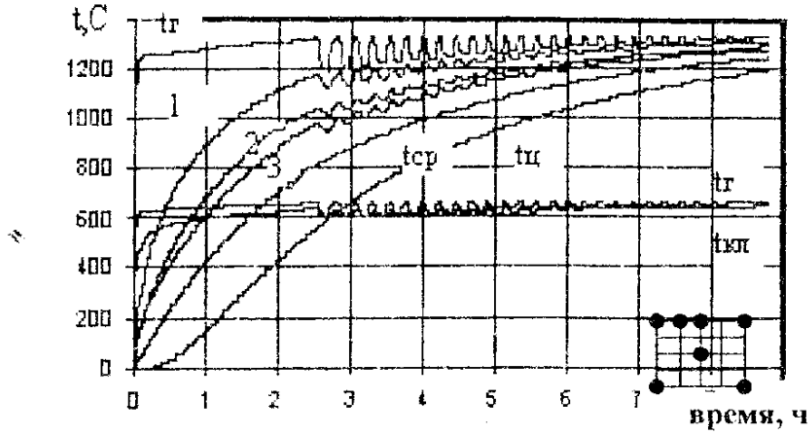
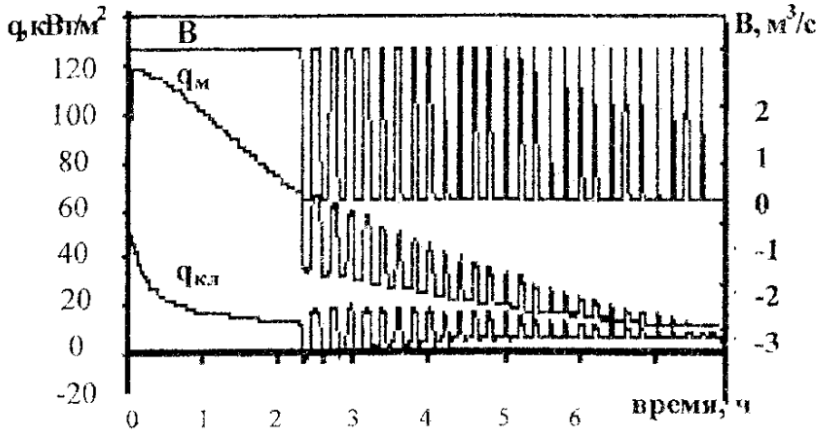


Рисунок 7.22 – Блок-схема расчета температурного поля слитка



а



б

а) температурное поле слитка; б) тепловые потоки и расход топлива. 1 – температура ребра поверхности слитка, °С; 2 – температура между ребром и центром поверхности слитка, °С; 3 – температура центра поверхности слитка, °С; 4 – температура центра слитка, °С; $t_г$ – температура газа, °С; $t_{кл}$ – температура внутренней поверхности кладки, °С; $t_{срм}$ – среднемассовая температура слитка, °С; В – расход топлива, $м^3/с$; $q_м$ – тепловой поток на металл, $кВт/м^2$; $q_{кл}$ – тепловой поток на кладку, $кВт/м^2$

Рисунок 7.23 – Пример импульсного отопления

7.4 Определение тепловой мощности топливных печей

Общей тепловой мощностью топливной печи называют количество тепла, вносимое в печь с химической энергией топлива за единицу времени

$$М_{общ} = В \cdot Q_н^р, Вт.$$

(В – расход топлива $кг/с, м^3/с$; $Q_н^р$ – теплота сгорания топлива $Дж/кг$, $Дж/м^3$).

Определенная при проектировании тепловая мощность дает возможность:

- обеспечить заданную производительность печи;
- определить расходы топлива, воздуха горения, продуктов сгорания;
- выбрать необходимое энергетическое оборудование (горелки, газопроводы, топливопроводы, воздуховоды, вентиляторы, дымососы, дымовые трубы).

Проектный расчет тепловой мощности по коэффициенту использования тепла топлива (КИТ). На рисунке 7.24 представлена диаграмма укрупненного теплового баланса. В рабочую камеру поступает химическое тепло топлива ($В \cdot Q_н^р$) (общая тепловая мощность) и физическое тепло топлива и воздуха ($Q'_ф$), полученное в результате использования тепла уходящих продуктов сгорания ($Q'_{ух}$). В рабочей камере тепло ($В \cdot Q_н^р + Q'_ф$) распределяется по трём направлениям: ($Q'_{усв}$) – тепло, полезно усвоенное на процесс тепловой обработки металла; ($Q'_{пот}$) – тепло, потерянное в окружающую среду через кладку, излучением через отверстия и неплотности, с охлаждающей среды и т.д., и тепло, уходящее из рабочей камеры ($Q'_{ух}$) с продуктами сгорания.

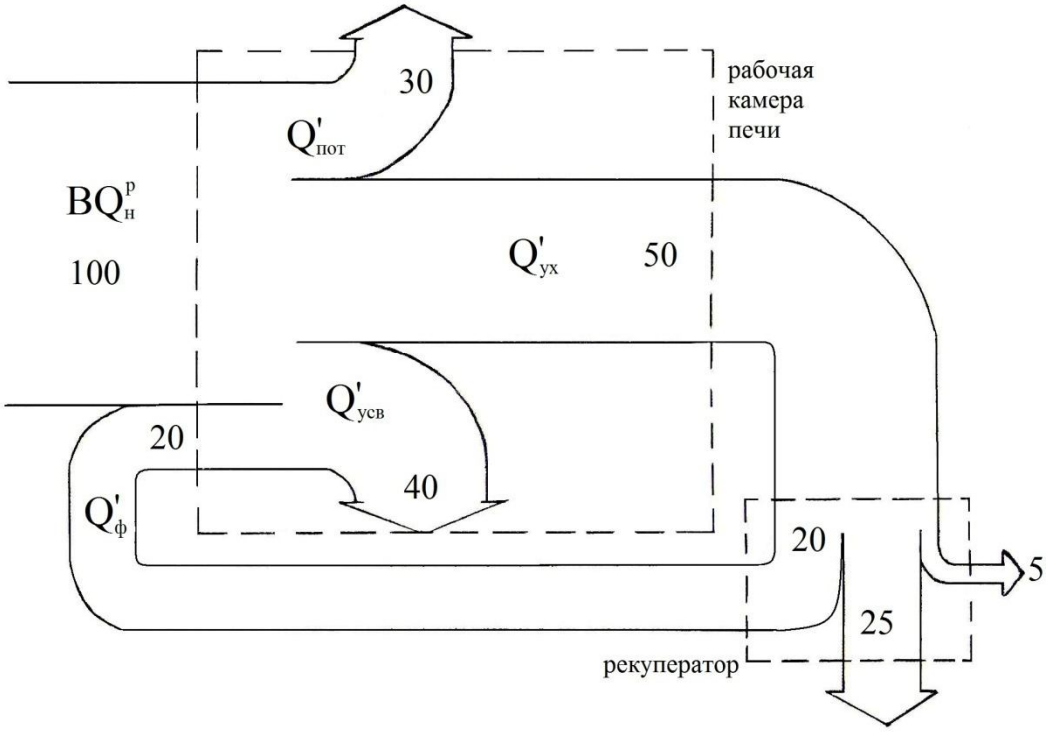


Рисунок 7.24 – Диаграмма теплового баланса

Укрупненный тепловой баланс имеет вид:
- в единицах мощности,

$$B \cdot Q^p_н + Q'_ф = Q'_{усв} + Q'_{пот} + Q'_{ух}, Вт; \qquad (7.100)$$

- на единицу топлива

$$Q^p_н + Q_ф = Q_{усв} + Q_{пот} + Q_{ух}, Дж/м^3, (Дж/кг); \quad (7.101)$$

Коэффициентом использования тепла топлива (КИТ) называется отношение «тепла, оставшегося в печи» $(Q_{усв} + Q_{пот})$ к химическому теплу топлива:
из (7.101)

$$\eta = \frac{Q_{усв} + Q_{пот}}{Q^p_н}, \qquad (7.102)$$

из (7.100)

$$\eta = \frac{B \cdot (Q_{усв} + Q_{пот})}{B \cdot Q_н^р} = \frac{Q'_{усв} + Q'_{пот}}{B \cdot Q_н^р} = \frac{Q'_{усв} + Q'_{пот}}{M_{общ}}. \qquad (7.103)$$

Для численных значений теплового баланса, приведенных на рисунке 7.24, в рабочую камеру поступает 100 единиц тепла с химической энергией топлива и 20 единиц физического тепла с подогретыми в рекуператоре компонентами горения (топливо и воздух). В рабочей камере 40 единиц используются полезно, 30 – составляют потери в окружающую среду, 50 – отводятся с уходящими газами, из которых 20 передаются в рекуператорах компонентам горения, 5 – теряется в окружающую среду, 25 – направляется в дальнейшую утилизацию вне печи. Для примера на рисунке 7.24 КИТ печи

$$\eta = \frac{40 + 30}{100} = 0{,}7.$$

Тепловая работа печи оценивается также *термическим КПД*, под которым понимают долю полезно усвоенного тепла:

$$\eta_т = \frac{Q'_{усв}}{B \cdot Q_н^р}.$$

Для примера на рисунке 7.24

$$\eta_т = \frac{40}{100} = 0{,}4.$$

Из (7.103)

$$M_{общ} = \frac{Q'_{усв}}{\eta} + \frac{Q'_{пот}}{\eta}. \qquad (7.104)$$

Отношение

$$\frac{Q'_{усв}}{\eta} = M_{пол}$$ называется *полезной мощностью,*

отношение

$$\frac{Q'_{пот}}{\eta} = M_{хх} -$$ *мощностью холостого хода.*

Таким образом

$$M_{общ} = M_{пол} + M_{хх}. \qquad (7.105)$$

Физический смысл составляющих общей мощности:

$M_{пол}$ – полезная мощность, равная мощности печи при отсутствии тепловых потерь;

$M_{хх}$ – мощность холостого хода, равная мощности печи, работающей вхолостую, но в которой поддерживается заданный температурный режим.

Формула (7.102) является *смысловой*. Расчетную формулу для КИТ удобнее получить из (7.101):

$$Q_{усв} + Q_{пот} = Q_н^р + Q_ф - Q_{ух},$$

тогда

$$\eta = \frac{Q_н^р + Q_ф - Q_{ух}}{Q_н^р}. \qquad (7.106)$$

Если учесть, что физическое тепло $Q_ф$ является долей тепла уходящих газов $Q_{ух}$, т.е. $Q_ф = r \cdot Q_{ух}$, ($r -$ коэффициент рекуперации), то формула (7.106) примет вид

$$\eta = \frac{Q_н^р - (1 - r) \cdot Q_{ух}}{Q_р^н}. \qquad (7.107)$$

Формулы (7.106) и (7.107) являются *расчетными* потому, что КИТ здесь определяется из теплового режима, когда расход топлива еще не известен.

Проектный расчет тепловой мощности печи периодического действия. Для печей этого типа характерен переменный тепловой режим, т.е. температура печи и расход топлива изменяются во времени. Поэтому расчету тепловой мощности должна предшествовать разработка и анализ теплового режима.

В качестве примера рассмотрим тепловой режим печей для нагрева массивных заготовок перед прокаткой (нагревательные колодцы, камерные печи, печи с выкатным подом и др.). Как правило, режим принимается *комбинированным*, состоящим как минимум из двух периодов. На рисунке 7.25 предоставлен тепловой режим нагрева слитков в нагревательном колодце, состоящий из периодов: $I: q = const, II: t_{печ} = const$. На рисунке 7.25а показана динамика температур: продуктов сгорания (газа) $t_г$, печи $t_{печ}$, внутренней поверхности кладки $t_{кл}$, поверхности и центра нагреваемого слитка $t_п, t_ц$, и средней по массе слитка $\bar{t}$. На рисунке 7.25б показано изменение плотности теплового потока q, общей тепловой мощности M и коэффициента использования тепла топлива η. Характерными моментами режима являются: точка A – начало нагрева, точка B – переход от первого периода ко второму, точка C – окончание нагрева, когда достигается требуемая температурное состояние слитка ($t_{пк}$, $\Delta t_к$). Началу

первого периода предшествует участок времени С-А, в течение которого происходит выгрузка предыдущей садки, а также загрузка новой; при этом температуры источников тепла: $t_г, t_{печ}$ и $t_{кл}$ – снижаются. В периоде А-В осуществляется нагрев при постоянном тепловом потоке, когда происходит возрастание всех анализируемых температур (рис. 7.25а), в т.ч. и температуры уходящих газов $t_{ух} = t_г$, а значит, КИТ печи снижается (рис. 7.25б), а тепловая мощность возрастает. В периоде В-С нагрев осуществляется при постоянной температуре печи, а так как температура поверхности возрастает, то тепловой поток уменьшается до значения $q_к$, которое соответствует заданному конечному перепаду температур по сечению слитка $\Delta t_к$. Анализ теплового режима позволяет установить, что в момент «В» достигается максимальное значение тепловой мощности M_{max}, а в момент «С» - минимальное M_{min} . Определение M_{max} необходимо для расчета максимального расхода топлива B_{max}, на основе которого проектируется и выбирается энергетическое оборудование печи. Значение минимальной мощности M_{min} и минимального расхода топлива B_{min} необходимо для определения требуемого диапазона регулирования $(B_{max} - B_{min})$ и выбора горелок. Расчет среднеинтегрального значения $M_{ср}$ выполняется для определения годовой потребности в топливе, а также для анализа тепловой эффективности работы печи. Максимальная тепловая мощность рассчитывается по формуле (7.104):

$$M_{max} \equiv M_в = \frac{Q'_{усв.в}}{\eta_в} + \frac{Q'_{пот.в}}{\eta_в}, \qquad (7.108)$$

где $Q'_{усв.в}$ – усвоенная металлом тепловая мощность, равная произведению плотности теплового потока $q_в$, известного в результате разработки теплового режима, на

тепловоспринимающую поверхность F, известную по постановке задачи:

$$Q'_{усв.в} = q_в \cdot F, Вт; \qquad (7.109)$$

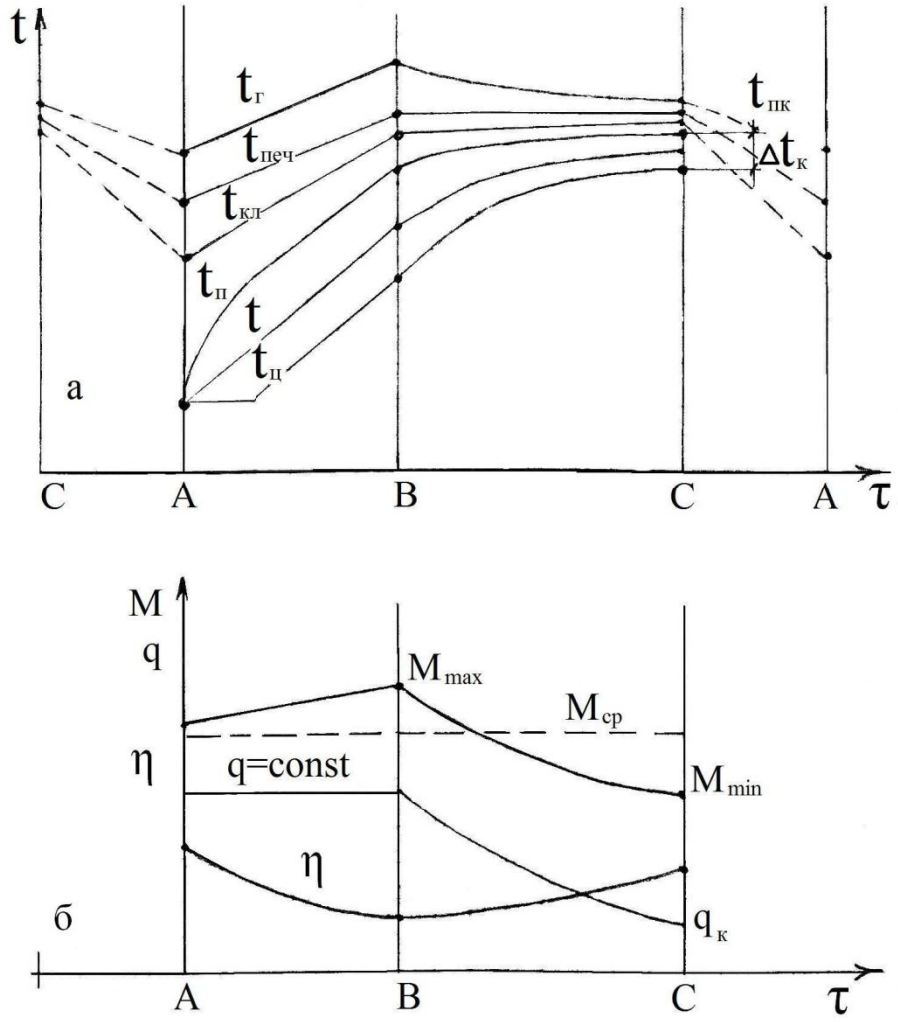


Рисунок 7.25 – Тепловой режим печи периодического действия

$Q'_{пот.в}$ – тепловые потери в печи, которые рассчитываются как сумма тепловых потерь теплопроводностью через кладку по температуре кладки ($t_{кл.в}$) и тепловых потерь излучением через отверстия, соединяющие рабочую камеру с рекуператором по

температуре печи ($t_{печ.в}$). (Расчет тепловых потерь – отдельный узел расчета в алгоритме расчета тепловой мощности);

$\eta_в$ – КИТ печи в мощности «В», определяемый по (7.107)

$$\eta_в = \frac{Q_н^р - (1 - r) \cdot V_д \cdot c_д \cdot t_{гв}}{Q_н^р}, \qquad (7.110)$$

где $V_д$ – выход продуктов сгорания (дымовых газов) на единицу топлива, $м^3/м^3$, $м^3/кг$ (из расчета горения топлива);

$c_д$ – теплоемкость дыма «средняя в интервале температур «0-$t_{гв}$», $Дж/(м^3 \cdot К)$;

$t_{гв}$ – температура газов в момент «В», определяемая в результате разработки теплового режима, ℃.

Минимальная тепловая мощность рассчитывается по(7.104):

$$M_{min} \equiv M_c = \frac{Q'_{усв.с}}{\eta_c} + \frac{Q'_{пот.с}}{\eta_c}, \qquad (7.111)$$

где $Q'_{усв.с}, Q'_{пот.с}$ и η_c определяются так же, как и для M_{max} по формулам (7.109-7.111) для температур и тепловых потоков в момент «С».

Средняя тепловая мощность $M_{ср}$ определяется из выражения (7.104):

$$M_{ср} = \frac{\overline{Q'}_{усв}}{\overline{\eta}} + \frac{\overline{Q'}_{пот}}{\overline{\eta}}, \qquad (7.112)$$

где средняя усвоенная тепловая мощность $\overline{Q'}_{усв}$ определяется из приращений теплосодержания (энтальпии металла) Δi и производительности печи

$$\overline{Q'}_{усв} = P \cdot \Delta i, \qquad (7.113)$$

P – производительность печи, кг/с,

$$P = \frac{G}{\tau}, \qquad (7.114)$$

G – масса металла в печи (садка), кг, известная по постановке задачи;

τ – общая продолжительность комбинированного нагрева, с, определяемая в результате разработки теплового режима, $\tau = \tau_{A-B} + \tau_{B-C}$;

$\overline{Q'}_{пот}$ – средняя мощность тепловых потерь

$$\overline{Q'}_{пот} = \frac{Q'_{пот.A} + Q'_{пот.в} + Q'_{пот.с}}{3}; \qquad (7.115)$$

$\overline{\eta}$ – средний КИТ,

$$\overline{\eta} = \frac{\eta_A + \eta_B + \eta_C}{3}. \qquad (7.116)$$

Проектный расчет тепловой мощности печи непрерывного действия. Для печей этого типа характерен постоянный во времени тепловой режим. Как правило, в печах имеется несколько температурных и отопительных зон, т.е. общий расход топлива распределяется по зонам. Расчет тепловой мощности может производиться двумя способами:

1) с использованием КИТ. Этот расчет аналогичен расчету средней тепловой мощности печи периодического действия

$$M = \frac{P \cdot \Delta i}{\eta} + \frac{Q'_{пот}}{\eta}, Вт \qquad (7.117)$$

где P – заданная производительность печи;

Δi – известное по постановке задачи приращение теплосодержание;

$Q'_{пот}$ – суммарные тепловые потери печи;

η – КИТ печи, определяемый по температуре газов, уходящих из печи $t_{ух}$ на основании предварительно разработанного режима (например рис.7.25):

$$\eta = \frac{Q^p_н - (1 - r) \cdot V_д \cdot c_д \cdot t_{ух}}{Q^p_н}, \qquad (7.118)$$

2) *путем составления уравнения теплового баланса* как для всей печи в целом, так и по зонам.

Уравнение теплового баланса для печи в целом имеет вид:

$$B \cdot Q^p_н + B \cdot c_т \cdot t_т + B \cdot L_д \cdot c_в \cdot t_в =$$

$$= P \cdot \Delta i + Q_{пот} + B \cdot V_д \cdot c_д \cdot t_{ух}, \qquad (7.119)$$

где B – расход топлива на печь в целом, $м^3/с$, $кг/с$;

$c_т, c_в, c_{ух}$ – удельные теплоемкости соответственно топлива, воздуха горения, уходящих дымовых газов, $Дж/(м^3 \cdot К)$, определяется по химическому составу и справочникам;

$L_д, V_д$ – соответственно действительное количество воздуха горения и дымовых газов, приходящихся на единицу топлива, $м^3/м^3$, $м^3/кг$;

$t_т, t_в$ – температуры подогрева топлива и воздуха в теплоутилизирующих установках печи (рекуператор арах, регенераторах), °С;

$t_{ух}$ – температура дымовых газов, уходящих из печи, °С.

Из уравнения (7.119) определяется расход топлива B, и общая тепловая мощность печи в целом $M = B \cdot Q_н^p$.

Распределение тепловой мощности и расхода топлива по зонам производится путем составления теплового баланса по всем зонам. Так, для j-той зоны (рис. 7.26) тепловой баланс имеет вид:

$$B_j \cdot Q_н^p + B_j \cdot c_т \cdot t_т + B_j \cdot L_д \cdot c_в \cdot t_в + \sum_{k=1}^{j-1} B_k \cdot V_д \cdot c_д \cdot t_{ух.j-1} =$$

$$= P \cdot \Delta i_j + Q_{потj} + \sum_{k=1}^{j-1} B_k \cdot V_д \cdot c_д \cdot t_{ух.j} +$$

$$+ B_j \cdot V_д \cdot c_д \cdot t_{ух.j}, Вт, \qquad (7.120)$$

Из этого уравнения определяется расход топлива в j-той зоне B_j.

В левой, приходной части уравнения (7.120):

- первое слагаемое $B_j \cdot Q_н^p$ – тепловая мощность j-той зоны;
- второе – физическое тепло топлива, поступающего в зону;
- третье – физическое тепло воздуха горения;
- четвертое – физическое тепло дымовых газов,

поступающих из предыдущей, j-1-й зоны.

В правой, расходной части уравнения (7.120):

- первое слагаемое – тепло, усвоенное металлом; Δi_j – приращение теплосодержания металла в j-той зоне, определяемое по приращению среднемассовой температуры металла из ранее разработанного теплового режима, представленного на рисунке 7.26;

-второе – тепловые потери;

-третье – тепло дымовых газов, образовавшихся в результате сжигания топлива до j-той зоны;

-четвертое – тепло дымовых газов, образовавшихся в результате сжигания топлива в j-той зоне.

По уравнению (7.120) рассчитывается последовательно расходы топлива от 1-й до n-ой зоны.

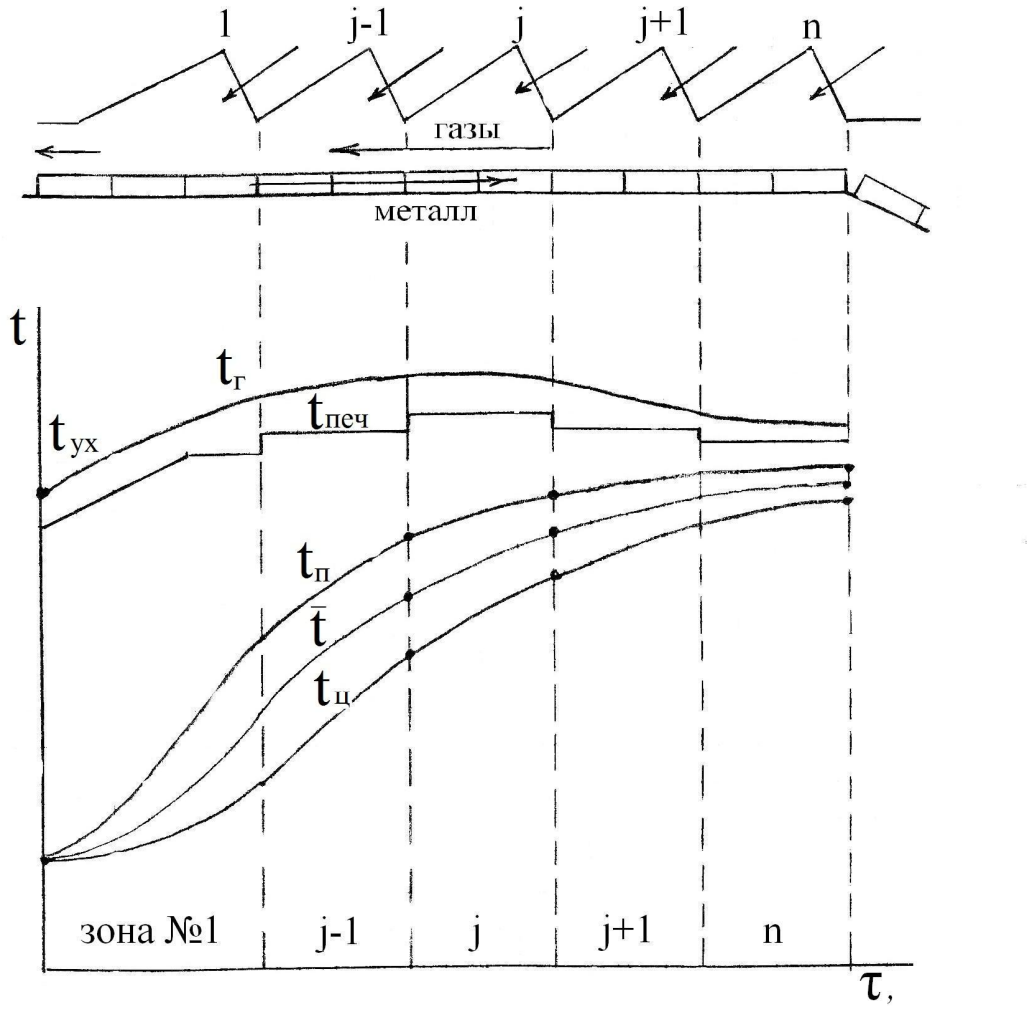


Рисунок 7.26 – Тепловой режим печи непрерывного действия

7.5 Гидрогазодинамические расчеты, выбор тягодутьевых средств

В основе аэродинамических расчетов печей лежит уравнение Д.Бернули. Наиболее удобно применять в практических расчетах его в виде

$$p_1^{изб} + \frac{w_1^2 \rho}{2} = p_2^{изб} + \frac{w_2^2 \rho}{2} + \Delta p_{пот}, \qquad (7.121)$$

где $p_1^{изб}, p_2^{изб}$ – избыточное статическое давление в сечениях «1» и «2» газового канала, Па;

w_1, w_2 – скорости газа в сечениях «1» и «2», м/с;

$\Delta p_{пот}$ – потери давления на участке между сечениями «1» и «2», Па, или аэродинамические сопротивления. Общие потери складываются из потерь на трение, потерь в местных сопротивлениях, и гидростатических потерь:

$$\Delta p_{пот} = \Delta p_{тр} + \Delta p_{м.с} + \Delta p_{г}. \qquad (7.122)$$

Потери давления на трение возникают при движении жидкости (газа) в трубопроводах (каналах), связаны с действием силы трения и представляют собой работу этой силы, отнесенную к единице объема жидкости. Часть механической энергии преобразуется в тепловую и рассеивается, т.е. теряется безвозвратно. Расчет потерь на трение производится для прямых участков трубопроводов постоянного сечения.

Потери давления на трение в потоке несжимаемой жидкости (p=const) определяют как величину, пропорциональную динамическому давлению (формула Д′Арси):

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{D_г} p_{дин} = \lambda \frac{l}{D_г} \frac{w^2 \cdot \rho}{2}. \qquad (7.123)$$

Если скорость и плотность газа привести к нормальным физическим условиям (Н.Ф.У.):

$$w = w_0 \frac{T}{273} \frac{101.3}{B + p^{изб}}; \qquad (7.124)$$

$$\rho = \rho_0 \frac{273}{T} \frac{B + p^{изб}}{101.3}, \qquad (7.125)$$

то выражение для динамического давления примет вид:

$$p_{дин} = \frac{w^2 \cdot \rho}{2} = \frac{w_0^2 \cdot \rho_0}{2} \frac{T}{273} \frac{101.3}{B + p^{изб}}, \qquad (7.126)$$

а рабочая формула для расчета потерь на трение в *потоке газа* запишется в виде

$$\Delta p_{тр} = \lambda \frac{l}{D_г} \frac{w_0^2 \cdot \rho_0}{2} \frac{T}{273} \frac{101.3}{B + p^{изб}}, \qquad (7.127)$$

В выражении (7.127):

w_0 – средняя скорость газа при н.ф.у., м/с;

ρ_0 – плотность газа при н.ф.у., кг/м^3;

Т – температура газа, К;

В – барометрическое давление (атмосферы), кПа;

$p^{изб}$ – избыточное статическое давление в газопроводе, кПа;

l – длина прямого участка трубопровода, м;

$D_г$ – гидравлический диаметр поперечного сечения трубопровода, м; для круглого сечения $D_г = D$, для сечения

другой формы $D_г = 4F/П$ где F – площадь сечения, м, П – периметр сечения, м^2;

λ – гидравлический коэффициент трения.

Значение коэффициента трения λ зависит от режима течения, состояния внутренней поверхности стенки трубопровода, диаметра канала [49].

Потери на местные сопротивления. Потери энергии на местные сопротивления появляются тогда, когда изменяется скорость или направление движения потока вследствие изменения сечения или изгиба канала, а также загромождения канала какими-либо предметами (регулирующие и измерительные приборы, пучки труб теплообменных поверхностей паровых котлов и рекуператоров, насадки регенераторов, засыпки и др.). Эти потери энергии или обусловлены действием сил инерции, когда изменяется величина или направление скорости, или являются результатом образования зон вихревого движения. Вблизи мест поворота и изменения сечения возникают застойные зоны и различного рода вторичные течения, а местные скорости здесь превышают средние значения, определяемые путем деления расхода жидкости на сечение канала. Например, при резком повороте под углом 90° (рис. 7.27а) у внутренней стенки после поворота образуется вихрь, сужающий поперечное сечение канала. Кроме того, в канале возникают еще и поперечные циркуляции. Закругление поворота (рис. 7.27б) способствует уменьшению вихревых зон, а следовательно, и потерь энергии. Аналогичные явления наблюдаются при изменении сечения потока (рис. 7.27в). Работа трения, совершающаяся в местных сопротивлениях значительно больше, чем на прямых участках постоянного сечения, следовательно, больше и количество энергии движущейся жидкости, рассеивающейся в теплоту.

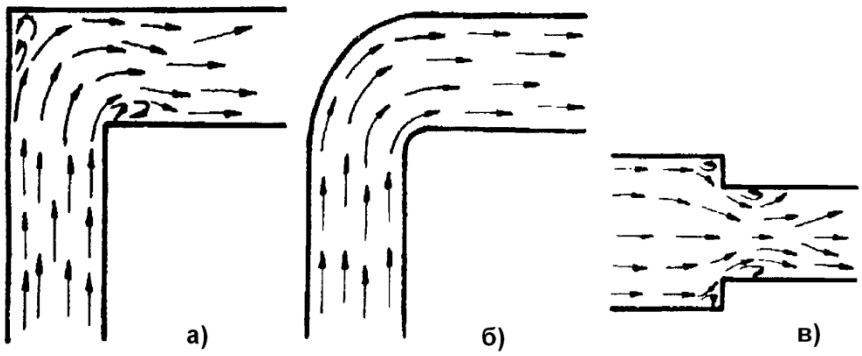


Рисунок 7.27 – Структура потока в местных сопротивлениях

В общем случае потери давления, или энергии, отнесенной к единице объема жидкости, рассчитываются в долях динамического давления:

$$\Delta p_{м.с.} = k_{м.с.} \cdot p_{дин} = k_{м.с.} \frac{w^2 \cdot \rho}{2}; \qquad (7.128)$$

для газов

$$\Delta p_{м.с.} = k_{м.с.} \cdot \frac{w_0^2 \cdot \rho_0}{2} \frac{T}{273} \frac{101.3}{B + p^{изб}}, \qquad (7.129)$$

где $k_{м.с.}$ – коэффициент местного сопротивления, зависящий от вида местного сопротивления; экспериментально определяемые значения $k_{м.с.}$ приводятся в справочниках.

Множество местных сопротивлений, которые встречаются в промтеплоэнергетике, можно объединить в следующие группы [44]:

1. Вход потока в канал или трубопровод.
2. Изменение сечения канала.
3. Изменение направления потока.
4. Слияние и разделение потоков.

5.Движение потока по сложным елементам трубопроводов (задвижки, дроссели, диафрагмы, вентили, клапаны).

6.Движение потока через препятствия, равномерно распределенные по сечению (насадки, пучки, параллельные каналы).

7.Виход потока из канала.

Гидростатические потери энергии возникают тогда, когда канал изменяет положение по высоте, а плотность движущейся по каналу жидкости отличается от плотности окружающей среды. Расчет потерь производится по формуле

$$\Delta p_г = \pm hg(\rho_{ср} - \rho_ж), Па, \qquad (7.130)$$

где h – разница высот между сечениями 1–1 и 2–2 (рис. 7.28), м;

$\rho_{ср}$ – плотность окружающей среды, кг/м^3;

$\rho_ж$ – плотность жидкости, протекающей по каналу, кг/м^3.

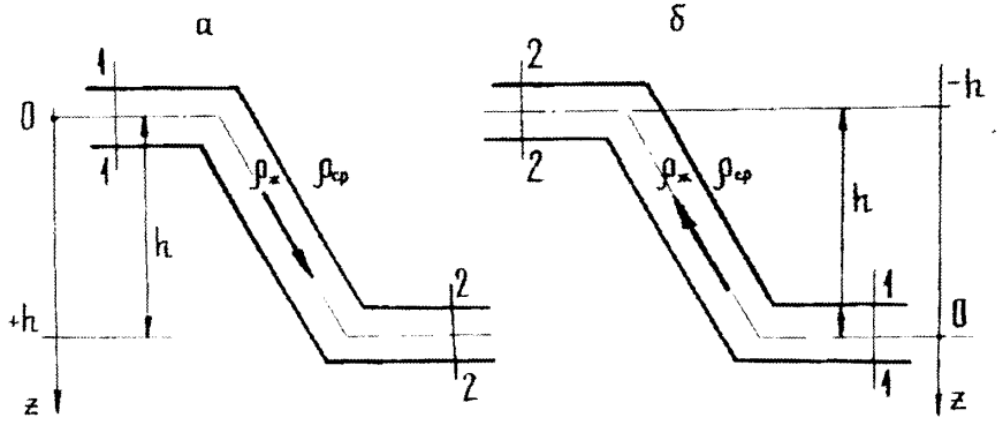


Рисунок 7.28 – К расчету гидростатических потерь

При расчете высот принимают начало координатной оси 0Z на уровне первого по ходу жидкости сечения и ось направлена вниз. Тогда если жидкость движется вниз по каналу (рис. 7.28 а), то h>0, если жидкость движется вверх (рис. 7.28 б), то h<0. Если по каналу движется "легкая" жидкость, то $\rho_{ср}>\rho_ж$, а $\rho_{ср}-\rho_ж>0$, если же движется "тяжелая" жидкость, то $\rho_{ср}<\rho_ж$, а $\rho_{ср}-\rho_ж<0$. В

зависимости от направления движения жидкости (вверх-вниз), а также соотношения между плотностями жидкости и окружающей среды гидростатические потери могут быть положительными или отрицательными. Потери имеют положительный знак, если движение противоестественно, т.е. если легкая жидкость ($\rho_{ср}-\rho_{ж}>0$) движется вниз ($h>0$), или тяжелая жидкость ($\rho_{ср}-\rho_{ж}<0$) движется вверх ($h<0$); потери имеют отрицательный знак, если легкая жидкость ($\rho_{ср}-\rho_{ж}>0$) движется вверх ($h<0$), или тяжелая жидкость ($\rho_{ср}-\rho_{ж}<0$) движется вниз ($h>0$). Ошибка в расчете станет маловероятной, если представлять себе физический смысл гидростатических потерь: энергия затрачивается (т.е. $\Delta p>0$) в том случае, если приходится перемещать вверх тяжелую жидкость или вниз легкую жидкость; в противном случае энергию затрачивать не нужно (т.е. $\Delta p<0$), энергия «приобретается», т.е. потенциальная энергия положения переходит или в потенциальную (статическую) энергию давления потока, или в кинетическую энергию потока.

Расчеты аэродинамических потерь являются основанием для выбора тягодутьевых средств: дымовой трубы, вентилятора, дымососа. Дымовая труба (ДТ) как средство тяги рассчитывается по суммарному аэродинамическому сопротивлению дымового тракта и расходу дымовых газов. Расчетные параметры ДТ [44]

- высота ориентировочная

$$H' = \frac{\Delta p_{\Sigma}}{g(\rho_{в} - \rho_{г})}, м \qquad (7.131)$$

- высота уточненная

$$H = \frac{\Delta p_{\Sigma} + \frac{\rho_{г.0}}{2 \cdot 273}(w_{2.0}^2 T_2 - w_{1.0}^2 T_1)}{q \cdot 273\left(\frac{\rho_{в.0}}{T_{в}} - \frac{\rho_{г.0}}{T_{г}}\right) - \frac{\lambda \cdot \rho_{г.0}}{2 \cdot 273 \cdot d_{ср}}(w_{2.0}^2 T_2 + w_{1.0}^2 T_1)}; \qquad (7.132)$$

- диаметр устья ДТ

$$D_у = \sqrt{\frac{4 \cdot V_г}{\pi \cdot w_{г.0}}}, м; \qquad (7.133)$$

- диаметр основания

$$D_{осн} = 1{,}5 \cdot D_у, м; \qquad (7.134)$$

где $\Delta p_\sum -$ суммарное сопротивление дымового тракта, Па,

$$\Delta p_\sum = k_{зап}\left(\sum \Delta p_{тр} + \sum \Delta p_{м.с} + \sum \Delta p_г\right), \qquad (7.135)$$

$k_{зап} -$ коэффициент запаса, учитывающий засорение дымового тракта, а также возможность форсирования работы печи, $k_{зап} = 1{,}1 - 1{,}5$;

$\rho_в -$ плотность атмосферного воздуха при наиболее высокой летней температуре, кг/м^3;

$\rho_г -$ плотность дымовых газов при ДФУ, кг/м^3;

$\rho_{в.0}, \rho_{г.0} -$ плотность воздуха и дымовых газов при НФУ, кг/м^3;

$V_г -$ суммарный расход дымовых газов при НФУ, м^3/с;

$w_{г.0} -$ скорость газов на выходе из ДТ, принимается в пределах 4-5 м/с при НФУ;

$T_в = T_{в1} - 0{,}007 \cdot H' -$ средняя по высоте трубы температура внутреннего воздуха, К;

$T_{в1}$ – температура воздуха у основания трубы, К;

T_2 – температура продуктов сгорания у устья трубы, К;

$T_2 = T_1 - \delta \cdot H'$, де δ =1°С/м – падение температуры продуктов сгорания на один метр высоты трубы;

T_1 – температура продуктов сгорания у основания трубы, К

$T_г = 0{,}5\ (T_1 + T_2)$;

$d_{ср}$ – средний диаметр дымовой трубы, $d_{ср} = 0{,}5\ (d_{осн} + d_{уст})$; диаметр устья рассчитывается по скорости газов на выходе из трубы;

$w_{2.0} = 4 - 5$ м/с, из соображений удобства обслуживания; $d_{уст} \geq 800$ мм;

$w_{1.0}$ – скорость продуктов сгорания у основания трубы, м/с.

Дутьевые вентиляторы и дымососы выбирают по справочникам на основе *характеристики* (рис. 7.29). Характеристикой называется зависимость полного давления, развиваемого вентилятором, от производительности $P_{полн} = f(Q)$. При выборе вентилятора (дымососа) должны быть выполнены требования:

$$P_{полн} \geq \Delta p_{\Sigma} \quad ; \qquad (7.136)$$

$$Q \geq V_г. \qquad (7.137)$$

$$\eta \cong \eta_{max}, \qquad (7.138)$$

(η – КПД вентилятора).

Расчет *истечения* необходим для определения размеров топливосжигающих устройств. Истечение несжимаемых сред (капельной жидкости, газа низкого давления) представляет собой процесс перехода потенциальной энергии в кинетическую. Скорость истечения определяется по формуле [44]

$$w_2 = \varphi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho} + w_1^2}, \qquad (7.139)$$

где p_1, p_2 – давление до и после истечения, Па;

ρ – плотность среды при ДФУ, кг/м^3;

w_1 – скорость перед соплом при ДФУ, м/с;

w_2 – скорость на выходе из сопла при ДФУ, м/с;

φ –коэффициент, учитывающий потери при истечении.

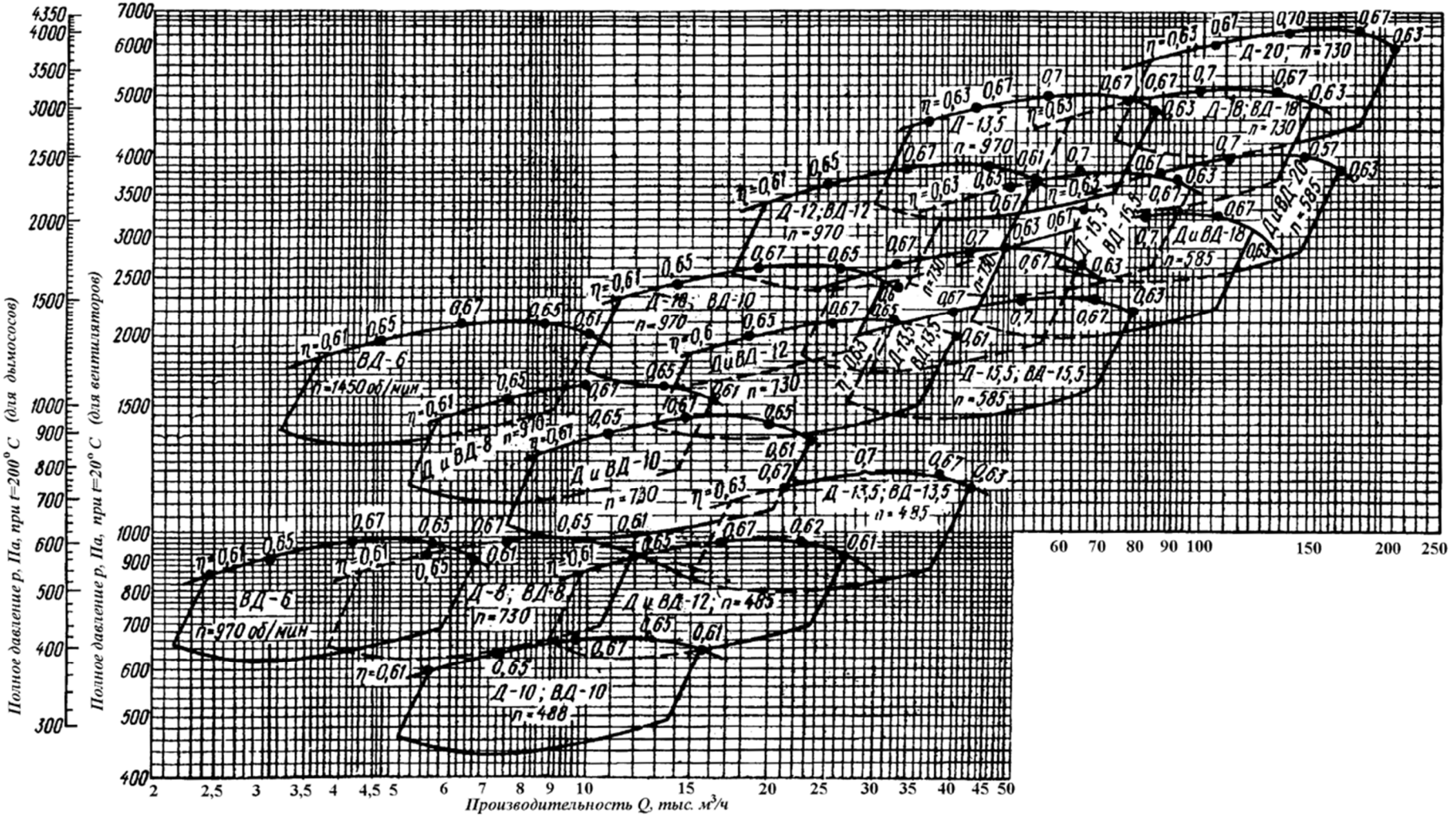


Рисунок 7.29 – Сводные характеристики дымососов и дутьевых вентиляторов

8 Оценка эффективности работы топливных печей и направления интенсификации

Тепловая работа топливных печей оценивается следующими показателями:

1) производительность печи в кг/с, или в т/ч. Этот показатель может быть определен:

а) за фактическое время работы («горячий час»);

б) как средняя за год или за «кампанию» (период между двумя большими холодными ремонтами). В этом случае учитываются простои на текущих ремонтах, организационные задержки, и др;

2) *удельная производительность*, или производительность, отнесенная к 1м^2 площади пода в печах с открытым подом, или к 1м^3 объема печи в слоевых печах, в $кг/(м^2 \cdot с)$, $т/(м^2 \cdot ч), т/(м^2 \cdot сутки), т/(м^3 \cdot сутки)$;

3) удельный расход тепла, в $Дж/кг, Дж/т$;

4) удельный расход условного топлива

$$b_{усл} = \frac{b}{(Q_н^р)_{усл}}, \frac{кг\ усл.\ топлива}{т}, \qquad (8.1)$$

где $(Q_н^р)_{усл} = 29{,}3 \cdot 10^6$ Дж/кг – теплота сгорания условного топлива;

5) коэффициент использования тепла топлива (КИТ)

$$\eta = \frac{Q_н^р + Q_ф^т + Q_ф^в - Q_{ух}}{Q_н^р}, \qquad (8.2)$$

или

$$\eta = \frac{Q_н^р - (1 - r) \cdot Q_{ух}}{Q_н^р}, \qquad (8.3)$$

где $Q_н^р$ – теплота сгорания топлива;

$Q_ф^т, Q_ф^в$ – физическое тепло компонентов горения (топлива и воздуха), подогретых за счет использования тепла уходящих газов $Q_{ух}$;

r – коэффициент рекуперации

$$r = \frac{Q_ф^т + Q_ф^в}{Q_{ух}}. \quad (8.4)$$

КИТ может быть определен также как отношение суммы мощностей полезно усвоенной тепловой мощности $Q_{усв}$ и тепловой мощности тепловых потерь $Q_{пот}$ к общей тепловой мощности печи $M = B \cdot Q_н^р$ (B – расход топлива):

$$\eta = \frac{Q_{усв} + Q_{пот}}{B \cdot Q_н^р}; \quad (8.5)$$

6) *термический КПД*

$$\eta_{КПД} = \frac{Q_{усв}}{B \cdot Q_н^р} = \eta - \frac{Q_{пот}}{B \cdot Q_н^р}, \quad (8.6)$$

– это доля тепла, полезно усвоенного в технологическом процессе, от тепла, выделяющегося при сжигании топлива.

Анализ удельного расхода тепла. Эта величина может быть представлена как отношение средней тепловой мощности печи к производительности

$$b = \frac{\overline{M}}{P}, \frac{Дж}{с}. \quad (8.7)$$

Средняя мощность равна сумме полезной мощности и мощности холостого хода

$$\overline{\mathrm{M}} = \overline{\mathrm{M}}_{\text{пол}} + \overline{\mathrm{M}}_{\text{хх}}, \tag{8.8}$$

или

$$\overline{\mathrm{M}} = \frac{\overline{\mathrm{Q}}_{\text{усв}}}{\eta} + \frac{\overline{\mathrm{Q}}_{\text{пот}}}{\eta}, \tag{8.9}$$

или

$$\overline{\mathrm{M}} = \frac{\mathrm{P} \cdot \Delta i}{\eta} + \frac{\mathrm{Q}_{\text{пот}}}{\eta}, \tag{8.10}$$

где Δi – повышение энтальпии, или потребность в тепле на производство единицы продукции, Дж/кг;
удельный расход тепла

$$\mathrm{b} = \left(\frac{\mathrm{P} \cdot \Delta i}{\eta} + \frac{\mathrm{Q}_{\text{пот}}}{\eta}\right) : \mathrm{P}, \tag{8.11}$$

или

$$\mathrm{b} = \frac{\Delta i}{\eta} + \frac{\mathrm{Q}_{\text{пот}}}{\eta \cdot \mathrm{P}}. \tag{8.12}$$

Снижение удельного расхода тепла возможно за счет всех величин, входящих в выражение (8.12):

- понижение потребности в тепле Δi; это может быть сделано путем сохранения тепла предыдущих операций. Например, повышение температуры посада слитков путем уменьшения времени транспортировки от участка разливки стали до нагревательных колодцев (организационные мероприятия) или

путем теплоизоляции транспортируемых слитков (теплотехнические мероприятия);

- снижение тепловых потерь $Q_{пот}$, что возможно за счет теплоизоляции обмуровки, уменьшения потерь с выбивающимися газами, изучения тепла через открытые отверстия, окна загрузки – выгрузки и т.д.;

- увеличения производительности P, что возможно за счет уменьшения организационных простоев и простоев печи на ремонтах, а также интенсификации, т.е. снижение длительности процесса и др.;

- способы увеличения КИТ печи η следует из анализа расчетной формулы 8.2. Влияние теплоты сгорания топлива $Q_н^р$ можно выявить для случая работы печи без подогрева компонентов горения.

Тогда

$$\eta = \frac{Q_н^р - Q_{ух}}{Q_н^р} = 1 - \frac{V_д \cdot c_д \cdot t_{ух}}{Q_н^р}, \qquad (8.13)$$

КИТ увеличивается, если повышение $Q_н^р$ сопровождается уменьшением выхода дымовых газов на единицу тепла $V_д/Q_н^р$. Например, при сжигании коксового газа, в состав которого входит $\sim 50\% H_2$ объем дымовых газов меньше, чем объем компонентов горения:

$$H_2 + 0{,}5O_2 \rightarrow H_2O, \qquad (8.14)$$

т.е. на полтора объема компонентов горения приходится один объем продуктов сгорания. Значит, повышение теплоты сгорания топлива за счет увеличение доли коксового газа, будет сопровождаться увеличением КИТ. Влияние повышения физического тепла топлива и воздуха $Q_ф^т = c_т \cdot t_т$ и

$Q_{ф}^{в} = L_{д} \cdot c_{в} \cdot t_{в}$ за счет увеличения температур $t_{т}$ и $t_{в}$ несомненно, однако требует экономической оценки: если затраты на сооружение рекуператоров и регенераторов не компенсируется экономией топлива, повышение $t_{т}$ и $t_{в}$ нецелесообразно, т.е. должна решаться задача *оптимизации*. Влияние тепла уходящих дымовых газов возможно за счет, как температуры, так и за счет их количества:

$$Q_{ух} = (V_0 + (\alpha - 1)L_0)c_{д} \cdot t_{ух}. \qquad (8.15)$$

Снижение температуры $t_{ух}$ ограничено технологическими условиями. Снижение коэффициента расхода воздуха α возможно путем совершенствования топливосжигающих устройств в направлении улучшения перемешивания топлива с воздухом. Уменьшение теоретических расходов воздуха L_0 и дымовых газов V_0 возможно за счет обогащения воздуха кислородом, но в этом случае требуется экономическая оценка, т.к. увеличиваются расходы дорогостоящего кислорода.

Направления интенсификации работы топливных печей. Интенсифицировать работу печи – это значит повысить её производительность без снижения качества готового продукта. Производительность можно представить как отношение *садки*, или массы материала, одновременно находящегося в печи, или массы выгружаемого готового продукта Е ко времени процесса тепловой обработки τ:

$$P = \frac{E}{\tau}, \frac{кг}{с}, \frac{т}{ч}. \qquad (8.16)$$

Из выражения (8.16) следует, что для повышения производительности нужно увеличивать садку и (или) уменьшать время. Увеличение садки возможно на капитальных или больших

холодных ремонтах печей путем увеличения площади пода или полезного объема, а также путем увеличения массы отдельных штучных заготовок в камерных печах периодического действия. Увеличение садки имеет смысл в том случае, если время процесса при этом увеличивается в меньшей степени, чем садка.

Снижение длительности процесса τ возможно за счет величин, входящих в выражение

$$\tau = \frac{r_0 \cdot \rho \cdot \Delta i}{k_1 \cdot q}. \qquad (8.17)$$

Здесь r_0 – расчетный геометрический размер материала, подвергаемого тепловой обработке. Эта величина может быть уменьшена, если, например, от одностороннего подвода тепла перейти к двух-трех- или всестороннему. При тепловой обработке сыпучих материалов, если это позволяют требования к готовому продукту, возможен переход от обработки кусковых материалов ($r_0 = 20 \div 100$мм) к обработке зернистых ($r_0 = 0{,}5 \div 10$мм) и пылевидных материалов ($r_0 < 0{,}5$ мм) (например, печи с кипящим или взвешенным слоем для получения металлургической извести). В формуле (8.17) уменьшение приращения энтальпии Δi возможно, как указывалось выше, путем сохранения тепла предыдущих технологических операций (нагрева слитков горячего посада в нагревательных колодцах, нагрев металла в термических печах с сохранением тепла прокатного нагрева, и т.п.).

Увеличение плотности усвоенного теплового потока излучением

$$q = \varepsilon_{пр} \cdot \sigma_0 (T_{печ}^4 - T_м^4) \qquad (8.18)$$

или конвекцией

$$q = \alpha(t_т - t_в), \qquad (8.19)$$

возможно, прежде всего, путем повышения температуры источника тепла (температура печи или температура продуктов сгорания (газов) $t_г$). Температуру источника тепла можно повысить, увеличивая калориметрическую температуру горения

$$t_к = \frac{Q_н^р + Q_ф^т + Q_ф^в}{c \cdot V_д} \qquad (8.20)$$

путем повышения температуры подогрева компонентов горения (как указывалось выше – если это экономически целесообразно), а также снижая выход дымовых газов $V_д$ за счет обогащения воздуха кислородом и снижения избытка воздуха. Повышение температуры источника тепла может быть ограничено:

-тепловой мощностью, для увеличения которой потребуется увеличить пропускную способность топливосжигающего устройства, топливных, воздушных и дымовых трактов;

-стойкостью огнеупорных материалов в высокотемпературных печах. Для снятия этого ограничения потребуется применение более стойких и дорогих огнеупорных материалов (например, перевод сталеплавильных агрегатов с кислой динасовой футеровки свода на основную магнезитохромитовую позволило резко поднять уровень температур и производительность).

Увеличение плотности теплового потока излучением (8.18) возможно также путем повышения приведенной степени черноты системы $\varepsilon_{пр}$ за счет *карбюризации* факела (например, добавкой мазута к газообразному топливу в сталеплавильных печах, или подачи пылеугольного топлива в фурменную зону доменной печи, использование твердой поверхности кладки как основного источника лучистого тепла при использовании плоско-

пламенных горелок). Увеличение плотности теплового потока конвекцией (8.19) возможно путем повышения коэффициента теплоотдачи α за счет увеличения скорости и угла атаки печных газов у поверхности нагрева (например, печи на газовой подушке, применение высокоскоростных горелок в нагревательных печах скоростного нагрева).

Следует заметить, что увеличение плотности теплового потока имеет смысл, если это не сдерживается внутренней задачей, т.е. передачей тепла теплопроводностью в глубь обрабатываемого материала.

Интенсификация работы некоторых камерных печей с неравномерным температурным полем возможна за счет мероприятий, уменьшающих эту неравномерность. В печах с большой неравномерностью температур время тепловой обработки разных частей садки может значительно отличаться, что приводит к замедлению процесса в целом. Для улучшения равномерности поля температур применяют качающиеся горелки, качающийся факел, импульсную подачу топлива (например, в нагревательных колодцах с одной верхней горелкой).

Повышение эффективности работы печей за счет разных факторов должно всегда сопровождаться экономической оценкой, а также с привлечением математических методов *оптимизации* тепловых режимов.

Вопросы для самоконтроля

для учебного пособия «Металлургические печи»

К главе 1:

1. Что собой представляет металлургическая печь?
2. Как делят печи по виду внешнего теплообмена?
3. Как классифицируют печи по назначению?
4. Что относится к основным элементам топливной печи?
5. Что является основной функцией ТСУ?
6. Что входит в состав дымового тракта?

К главе 2:

1. Что такое теплогенерация?
2. Сколько стадий имеет процесс горения?
3. Какие теплотехнические процессы присутствуют в теплогенерации?
4. Как формулируется понятие «температура печи»?
5. Что используют в качестве охлаждающей среды при охлаждении конструкций?
6. Что такое ВЭР?

К главе 3:

1. Что такое огнеупоры и по каким признакам их классифицируют?
2. Что является физическими свойствами огнеупоров?
3. Что относится к рабочим свойствам огнеупоров?
4. Что такое усадка огнеупоров и как она рассчитывается?
5. Где применяются волокнистые огнеупорные материалы?

К главе 4:

1. Как делят фундаменты по форме конструкции?
2. Какие функции выполняет каркас?

3. Какие есть разновидности каркасов?
4. Какие требования предъявляют к ограждениям печей?
5. Что такое разгрузочный пояс?

К главе 5:

1. Что представляет собой горелка?
2. В чем сущность амплитудно-модулированного сжигания?
3. Какие особенности импульсного горения?
4. В чем основные недостатки технологии отопления печей с использованием импульсных горелок?
5. Какие возможные варианты решения вопроса об использовании физической теплоты уходящих продуктов сгорания?
6. В чем заключаются особенности использования рекуперативных горелок?
7. В чем заключаются особенности использования регенеративных горелок?
8. Какие факторы влияют на решение технико-экономической задачи о целесообразности выбора горелок?

К главе 6:

1. Что такое кокс?
2. В чем основной принцип работы УСТК?
3. Что такое кипящий слой?
4. Какие особенности теплообменных процессов в доменной печи?
5. В чем главные недостатки мартеновских печей?
6. Какие преимущества использования кислородных конверторов?
7. Какие печи относятся к нагревательным?
8. Какие требования предъявляют к нагревательным колодцам?
9. В чем недостатки сухого шлакоудаления?

10. Как называются печи, в которых температура по длине печи переменна?
11. В чем заключается использование методического температурного режима работы печей?
12. Какие особенности теплового и температурного режима работы печей с шагающим подом и шагающими балками?
13. Какие есть виды термообработки?
14. В чем особенности садочных и проходных печей, их преимущества и недостатки?
15. Что собой представляет агломерация?
16. Какое назначение шахтных печей?
17. Какое применение плавильных пламенных печей?
18. В чем достоинства и недостатки отражательной плавки?

К главе 7:

1. Для определения каких величин производится расчет горения топлива?
2. Какие бывают температуры горения топлива?
3. Какие основные характеристики радиационного теплообмена?
4. Для каких условий актуально применение метода тепловой диаграммы?
5. От каких величин зависит продолжительность тепловой обработки?
6. В чем заключается метод МКР?
7. Какие достоинства и недостатки МКЭ?
8. Для чего применяются сопряженные и зональные модели?
9. Какая формулировка понятия «общая тепловая мощность»?
10. Какие основные составляющие теплового баланса печи?
11. Что характеризуют КИТ и КПД печи?
12. Какой физический смысл составляющих общей мощности?
13. Что лежит в основе аэродинамический расчетов?
14. Какие составляющие общих потерь давления?

15. На основе каких характеристик производится выбор тягодутьевых средств?

К главе 8:

1. Какими показателями оценивается тепловая работа топливных печей?
2. За счет чего возможно снижение удельного расхода тепла?
3. Что значит понятие «интенсифицировать работу печи»?
4. Чем может быть ограничено повышение температуры источника тепла?
5. За счет чего возможно увеличение плотности теплового потока излучением?

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тринкс, В.** Промышленные печи. Т. 1. / В. Тринкс, М. Г. Моугинней ; пер.с англ. Г. Л. Фридман ; под ред. В. Н. Григорьева. – М. : Металлургия, 1966. – 499 с.
2. **Теплотехнические расчеты металлургических печей** / Б. И. Китаев [и др.] ; под ред. А. С. Телегина. – М. : Металлургия, 1970. – 528 с.
3. **Гусовский, В. Л.** Газогорелочные устройства и системы отопления нагревательных и термических печей / В. Л. Гусовский, А. Е. Лифшиц, В. М. Тымчак. – М. : Металлургия, 1967. – 262 с.
4. **Свенчанский, А. Д.** Электрические промышленные печи : учеб. для вузов : в 2 ч. Ч. 1. Электрические промышленные печи / А. Д. Свенчанский. – М. : Энергия, 1975. – 384 с.
5. **Свенчанский, А. Д.** Электрические промышленные печи : учеб. для вузов : в 2 ч. Ч. 2. Дуговые печи / А. Д. Свенчанский, М. Я. Смелянский. – М. : Энергия, 1970. – 264 с.
6. **Щукин, А. А.** Промышленные печи и газовое хозяйство заводов : учеб. для вузов / А. А. Щукин. – М. : Энергия, 1973. – 224 с.
7. **Флоров, С. Ф.** Тепловые расчеты топок и печей / С. Ф. Флоров. – М. : Гос. техн. изд., 1928. – 96 с.
8. **Грум-Гржимайло, В. Е.** Элементарная теория построения металлургических печей / В. Е. Грум-Гржимайло // Горный журнал. – Екатеринбург. – 1905. – Т. 2, № 6. – С. 287.
9. **Грум-Гржимайло, В. Е.** Гидравлический метод расчета пламенных печей / В. Е. Грум-Гржимайло. – СПб. : Типография Шредера, 1911. – 49 с.
10. **Грум-Гржимайло, В. Е.** Пламенные печи : в 3 т. / В. Е. Грум-Гржимайло. – М. : Изд. Теплотехнического института, 1925. – 3 т.

11. **Глинков, М. А.** Основы общей теории тепловой работы печей / М. А. Глинков. – М. : Металлургиздат, 1959. – 416 с.
12. **Глинков, М. А.** Общая теория печей / М. А. Глинков, Г. М. Глинков. – М. : Металлургия, 1978. – 264 с.
13. **Капустин, Е. А.** Движение газов в мартеновских печах / Е. А. Капустин, Г. М. Глинков. – М. : Металлургиздат, 1963. – 271 с.
14. **Григорьев, В. Н.** Кольцевые печи для нагрева металла / В. Н. Григорьев. – М. : Металлургиздат, 1958. – 292 с.
15. **Тебеньков, Б. П.** Рекуператоры для промышленных печей / Б. П. Тебеньков. – М. : Металлругиздат, 1958. – 404 с.
16. **Казанцев Е. И.** Промышленные печи : справ. рук. для расчетов и проектирование : учеб. пособие для металлург. специальностей вузов / Е. И. Казанцев. – М. : Металлургия, 1975. – 367 с.
17. **Скворцов, А. А.** Нагревательные устройства : учеб. пособие для вузов / А. А. Скворцов, А. Д. Акименко, М. Я. Кузелев. – М. : Высш. шк., 1965. – 443 с.
18. **Глинков, М. А.** Металлургические печи : учеб. для вузов / М. А. Глинков. – М. : Металлургиздат, 1951. – 976 с.
19. **Металлургические печи** : учеб. для вузов : в 3 ч. Ч. 2. Общие принципы конструирования, оборудование и элементы печей, печи заводов черной металлургии / А. И. Ващенко [и др.] ; под науч. ред. М. А. Глинкова. – М. : Металлургия, 1964. – 343 с.
20. **Арутюнов, В. А.** Металлургическая теплотехника : учеб. для вузов : в 2 т. / В. А. Арутюнов, В. И. Миткалинный, С. Б. Старк ; под ред. М. А. Глинкова. – М. : Металлургия, 1974. – 2 т.
21. **Кривандин, В. А.** Металлургические печи : учеб. пособие для металлург. специальностей вузов / В. А. Кривандин, Б. Л. Марков. – М. : Металлургия, 1977. – 463 с.

22. **Металлургическая теплотехника** : учеб. для вузов : в 2 т. / В. А. Кривандин [и др.]. – М. : Металлургия, 1986.
Т. 1 : Теоретические основы / В. А. Кривандин [и др.]. – 422 с.

Т. 2 : Конструкция и работа печей / В. А. Кривандин [и др.]. – 422 с.

23. **Теплотехника металлургического производства** : учеб. пособие для вузов : в 2 т. / под науч. ред. В. А. Кривандина. – М. : МИСИС, 2002.
Т. 1 : Теоретические основы / В. А. Кривандин [и др.]. – 2002. – 608 с.
Т. 2 : Конструкция и работа печей / В. А. Кривандин [и др.]. – 2002. – 736 с.
24. **Тайц, Н. Ю.** Методические нагревательные печи / Н. Ю. Тайц, Ю. И. Розенгарт. – М. : Металлургиздат, 1964. – 408 с.
25. **Расчеты нагревательных печей** / С. И. Аверин [и др.] ; под ред. Н. Ю. Тайца. – Киев : Техніка, 1969. – 539 с.
26. **Кривандин, В. А.** Теория, конструкция и расчеты металлургических печей : учеб. пособие для техникумов : т. 1. Теория и конструкции металлургических печей / В. А. Кривандин, Ю. П. Филимонов. – М. : Металлургия, 1978. – 359 с.
27. **Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах** / Ю. И. Розенгарт [и др.]. – Киев. : Вищ. шк., 1986. – 296 с.
28. **Филипьев, О. В.** Промышленные печи и газовое хозяйство заводов : учеб. пособие для энергетических специальностей вузов / О. В. Филипьев. – Киев : Вищ. шк., 1976. – 240 с.
29. **Корнфельд, В. Н.** Исследование и наладка тепловой работы мартеновских печей / В. Н. Корнфельд, А. О. Войтов, Л. С. Штейнберг. – М. : Металлургия, 1971. – 456 с.
30. **Арутюнов, В. А.** Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей / В. А. Арутюнов, В. В.

Бухмиров, С. А. Крупенников. – М. : Металлургия, 1990. – 239 с.
31. **Троянкин, Ю. В.** Проектирование и эксплуатация огнетехнических установок : учеб. пособие / Ю. В. Троянкин. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 256 с.
32. **Ярошенко, Ю. Г.** Тепловая работа и автоматизация печей : учеб. пособие / Ю. Г. Ярошенко. – М. : Металлургия, 1984. – 208 с.
33. **Диомидовский, Д. А.** Металлургические печи цветной металлургии : учеб. пособие / Д. А Диомидовский. – М. : Металлургиздат, 1961. – 728 с.
34. **Диомидовский, Д. А.** Вращающиеся печи для спекания глиноземистых шихт / Д. А Диомидовский. – М. : Металлургиздат, 1964.
35. **Ходоров, Е. И.** Печи цементной промышленности / Е. И. Ходоров. – Л. : Стройиздат, 1968. – 456 с.
36. **Флетчер, К.** Численные методы на основе метода Галеркина : пер. с англ. / К. Флетчер. – М. : Мир, 1988. – 352 с.
37. **Розин, А. А.** Метод конечных элементов / А. А. Розин. – СПб. : Изд. СПГТУ, 2000.
38. **Стренг, Г.** Теория метода конечных элементов / Г Стренг, Дж. Фикс. – М. : Мир, 1977. – 349 с.
39. **Сегерлинд, Л. Дж.** Применение метода конечных элементов / Дж. Л. Сегерлинд ; пер. с англ. А. А. Шестакова ; под ред. Б. Е. Победри. – М. : Мир, 1979. – 392 с.
40. **Ермаченко, Д. М.** Применение метода конечных элементов в решении задачи нестационарной теплопроводности садки туннельной печи / Д. М. Ермаченко [и др.] // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2004. – № 2. – С. 77–79.
41. **Волкова, О. Г.** Исследование температурного поля садки неправильной формы в туннельной печи методом конечных элементов / О. Г. Волкова, Ю. Л. Курбатов // Наукові праці

ДонНТУ. – Донецьк. – 2001. – Вип. 31. – С. 160–165. – (Серія “Металургія”).
42. **Волкова, О. Г.** Разработка и исследование теплового режима проходной туннельной печи для противофлокенной обработки стали / О. Г. Волкова, Ю. Л. Курбатов // Проблемы печной теплотехники. К 100-летию И.Д. Семикина : тр. науч.-техн. конф. – Днепропетровск, 1999.
43. **Зенкевич, О**. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган ; пер. с англ. Б. И. Квасова ; под ред. Н. С. Бахвалова. – М. : Мир, 1986. – 318 с.
44. **Гідрогазодинаміка у теплотехніці** : навч. посіб. / Ю. Л. Курбатов [та ін.]. – Донецьк : Норд-Прес, 2009. – 234 с.
45. **Леонтьев, А. И.** Теория тепломассообмена : учебник / А. И. Леонтьев. – М. : Высш. шк., 1979. – 495 с.
46. **Автоматизированное проектирование теплотехнических установок** / С. И. Гинкул [и др.]. – Севастополь : Вебер, 2003. – 141 с.
47. **Курбатов, Ю. Л.** Экспериментальное исследование температуры металла в туннельной печи для противофлокенной обработки сталей / Ю. Л. Курбатов [и др.]. – Донецк, 1983. – 9 с. – Деп. УкрНИИТИ 20.02.84, № 279.
48. **Арутюнов, В. А.** Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей : учеб. для вузов / В. А. Арутюнов [и др.] ; под науч. ред. В. А. Арутюнова. – М. : Металлургия, 1990. – 232 с.
49. **Теплотехника металлургического производства** : учеб. пособие / Ю. Л. Курбатов [и др.]. – Донецк : Ноулидж, 2011. – 216 с.
50. **Китаев, Б. И.** Теплотехника доменного процесса / Б. И. Китаев [и др.]. – М. : Металлургия, 1978. – 248 с.
51. **Белов, В. С.** Высокотемпературные секционные печи / В. С. Белов. – М. : Металлургия, 1977. – 104 с.

52. **Курбатов, Ю. Л**. Математична модель теплового балансу нижньої зони доменної печі / Ю. Л. Курбатов, С. Л. Ярошевський, І. В. Мішин // Металознавство та обробка металів. – 2012. – № 2. – С. 54–59.
53. **Мишин, И. В.** Методика расчета температуры продуктов плавки на выпуске при вдувании в горн дополнительных топлив / И. В. Мишин, Ю. Л. Курбатов, С. Л. Ярошевский // Теория и практика тепловых процессов в металлургии : тр. междунар. науч.-практической конф., 18-21 сент. / Уральский федеральный университет. – Екатеринбург, 2012. – С. 7.
54. **Мишин, И. В.** Анализ теплового режима горна на основе математической модели нижней зоны теплообмена доменной печи / И. В. Мишин, Ю. Л. Курбатов, З. К. Афанасьева // Металлургические процессы и оборудование. – Донецк, 2012 – № 2. – С. 29–25.
55. **Ярошевский, С. Л.** Теплообмен в фурменной зоне доменной печи / С. Л. Ярошевский, Ю. Л. Курбатов, И. В. Мишин // Стратегия качества в промышленности и образовании : сб. тр. VIII междунар. конф., 8-15 июня 2012 г. – Варна, 2012. – С. 197–199.
56. **Кутателадзе, С. С.** Справочник по теплопередаче / С. С. Кутателадзе, В. М. Боришанский. – М. : Госэнергоиздат, 1958. – 414 с.
57. **Троянкин, Ю. В.** Проектирование и эксплуатация огнетехнических установок : учеб. пособие / Ю. В. Троянкин. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 256 с.
58. **Ключников, А. Д.** Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах : учеб. пособие / А. Д. Ключников, В. Н. Кузьмин, С. К. Попов. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 176 с.
59. **Лыков, А. В.** Теория теплопроводности : учеб. пособие для теплотехн. специальностей вузов / А. В. Лыков. – М. : Высш. шк., 1967. – 599 с.

60. **Redr, M.** Tepelne vypocty a optimalizace vyzdivek prumys lovych peri / M. Redr [et al.]. – Praha : SNTL, 1975. – 352 p.
61. **Redr, M.** Vyuziti odpadniho tepla v hutnictvi zelesa / M. Redr, M. Gottwald. – Praha : SNTL, 1971. – 278 p.
62. **Trinks, W.** Indusnrial furnases / W. Trinks, M. H. Mawhinney.– New-York ; London : John Wiley& Sous, ing., 1961.

Приложение 1

Этапы проектирования печей

Проектирование печи включает расчеты и конструирование. Под расчетом печи понимают совокупность расчетных операций, выполняемых в целях определения всех величин, необходимых для конструирования печи. Расчет печи вместе с необходимыми пояснениями и графической частью составляют проект печи.

В расчет печи входят тепловые, механические, строительные и технико-экономические расчеты. Так как практически невозможно точно рассчитать процессы, происходящие в печах, прибегают к выбору упрощенной расчетной модели печи, дающей, однако, возможность отразить все главные особенности этих процессов.

Точность различных тепловых расчетов сильно колеблется. В тех случаях, когда при выборе расчетной модели предполагают равновесное состояние или когда рассчитывают установившиеся процессы, точность выше, чем при расчете кинетики процессов, особенно в неустановившемся состоянии. Например, расчеты полного сгорания топлива и теплопередачи при установившемся состоянии дают большую точность, чем расчеты процессов неполного сгорания и теплопередачи в неустановившемся состоянии. На точность расчетов сильно влияет правильность выбора констант, используемых при расчете. В тех случаях, когда теоретический расчет не может быть выполнен, прибегают к применению формул или таблиц, основанных на эмпирических данных. При этом очень важно проверить применимость этих формул или таблиц к рассматриваемому случаю, поскольку всякие опытные данные справедливы только в некоторых границах, определяемых условиями опыта. Таким образом, осуществляется выбор всех необходимых для проектирования печи величин, которые не могут быть определены теоретическим расчетом. Итоговые

данные по расчету печей следует обязательно контролировать по данным передовой, прогрессивной практики.

Любую печь проектируют с известным резервом по тепловой мощности, что обеспечивает возможность повышать ее производительность, но удельная расчетная производительность печей, по которой определяют размеры и число печей, не должна выходить за пределы средне-прогрессивной нормы для данного времени.

Исходными данными для проектирования печей являются:

а) технологический процесс, для которого предназначена, печь;

б) характеристика материалов, подвергающихся тепловой обработке;

в) источник тепловой энергии;

г) производительность в единицу времени или за операцию.

Технологический процесс, для которого предназначена печь, а также характеристика материалов, подвергающихся тепловой обработке (анализ, форма, размеры и т.д.), задаются конструктору печи технологами, разрабатывающими технологию того или иного производства.

Производительность печи или печей в сутки, час или за операцию задается конструктору печи в соответствии с данными технологии производства. Однако одна и та же производительность может быть обеспечена одной или несколькими печами, работающими параллельно. Во время службы кладка печи постепенно разрушается и приходит в полную или частичную негодность, что обусловливает необходимость проведения горячего ремонта (с частичной заменой кладки, без остановки печи) или холодного ремонта с более существенной заменой кладки в охлажденной печи, или восстановительного ремонта с заменой не только кладки, но также в какой-то мере крепления и оборудования печи.

Это обстоятельство, а также технологические соображения

кладут в основу при решении вопроса о числе печей, обеспечивающих заданную производительность. При этом надо учитывать, что в цехах, где печи являются вспомогательными агрегатами (прокатные, кузнечные и т. д.), производительность печей никогда не должна лимитировать работу основного оборудования (прокатных станов, прессов, молота и т. д.).

Отдельные элементы расчета печей изложены в соответствующих разделах и главах этой книги.

Целесообразно при расчете и конструировании топливных печей придерживаться следующей последовательности:

1. Тип печи и энергия:

а) выбор типа печи;

б) выбор топлива.

2. Расчет горения топлива.

3. Рабочее пространство печи:

а) выбор температурного режима печи;

б) определение производительности печи;

в) определение основных размеров рабочего пространства печи;

г) выбор огнеупорных материалов и толщины кладки;

д) составление эскиза печи;

е) составление теплового баланса и определение расхода топлива или электроэнергии.

4. Топочное (или электронагревательное) и вспомогательное оборудование печи:

а) выбор способа сжигания и определение производительности и размеров горелок, форсунок и топок;

б) выбор и определение размеров газо- и воздухопроводов, дымоходов, клапанов и перекидных устройств.

5. Оборудование для утилизации тепла отходящих газов:

а) выбор и расчет рекуператоров и регенераторов;

б) выбор и расчет котла-утилизатора.

6. Энергетическое оборудование печи:

а) расчеты механики газов;

б) выбор дутьевых вентиляторов и газодувок;

в) выбор и расчет дымовых труб, эксгаустеров и эжекторов;

г) расчет электрооборудования печи.

7. Арматура печи и механизмы:

а) выбор и расчет арматуры;

б) выбор и расчет механизмов.

8. Метрология и автоматика.

9.Графическое оформление проекта и составление спецификации.

10.Экологическое обеспечение:

а) анализ вредных выбросов;

б) выбор методов очистки газов;

11. Технико-экономические расчеты:

а) составление материальной и финансовой ометы на постройку или ремонт;

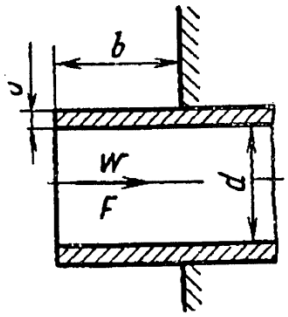
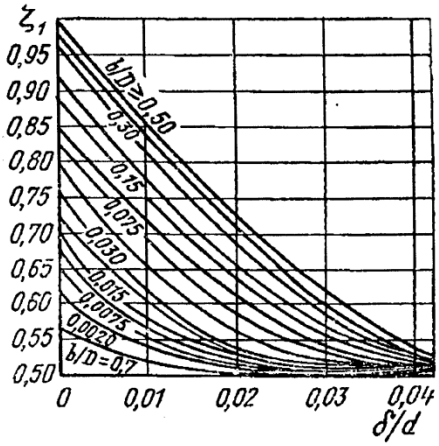
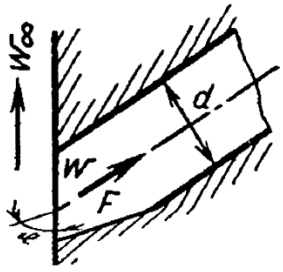
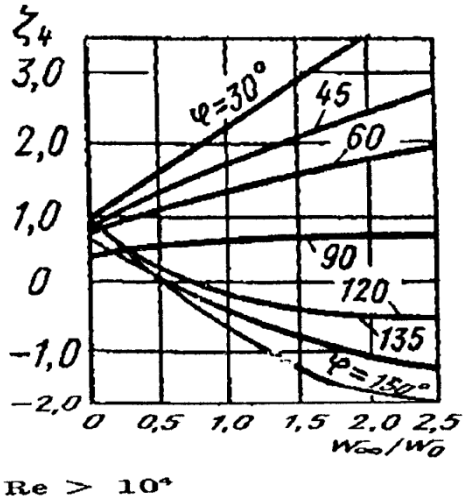
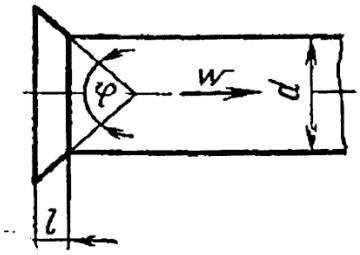
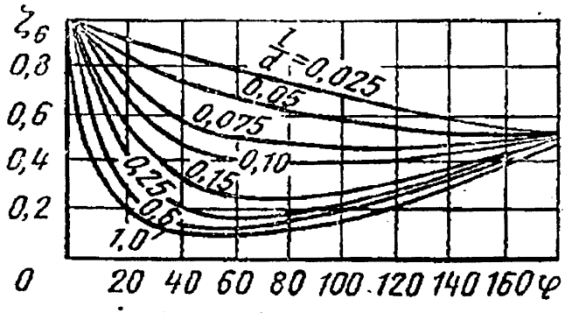
б) определение стоимости нагрева или плавления.

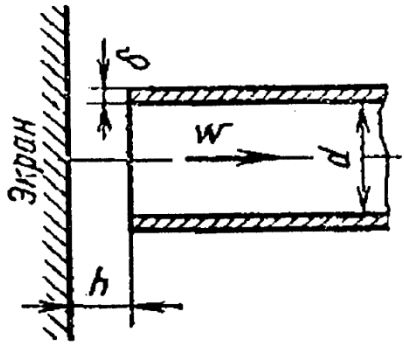
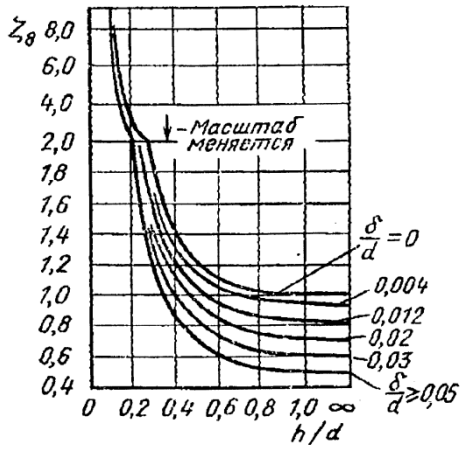
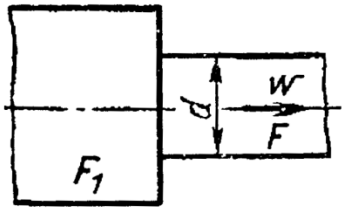
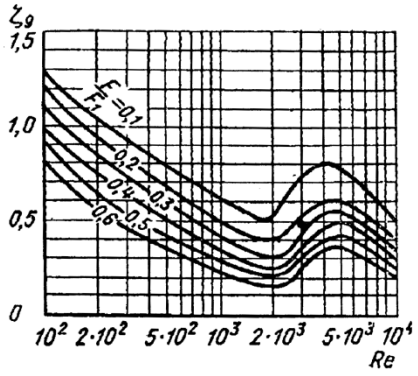
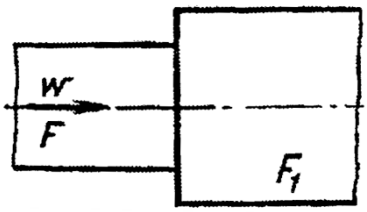
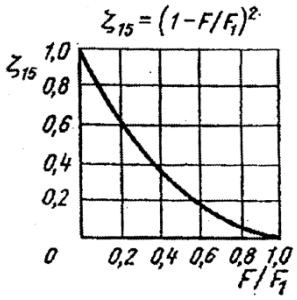
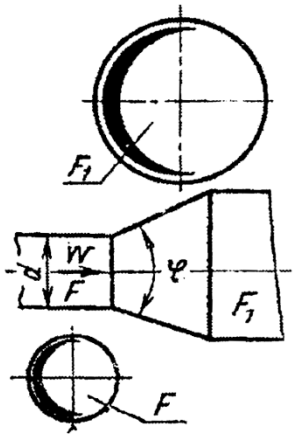
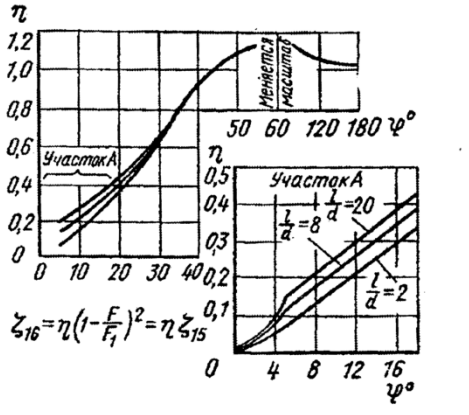
Чтобы построить печь, необходимо выполнить все необходимые расчеты и на этой основе разработать технический проект печи. Пользуясь техническим проектом, разрабатывают рабочие чертежи отдельных узлов, а также монтажные и сборочные чертежи.

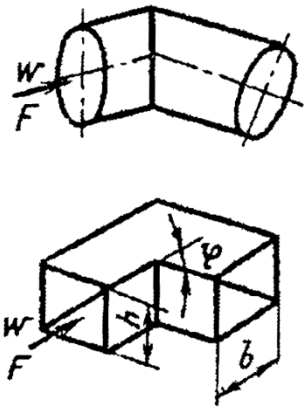
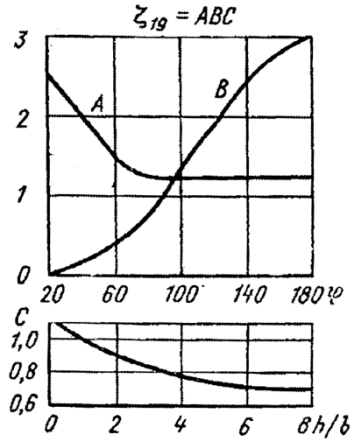
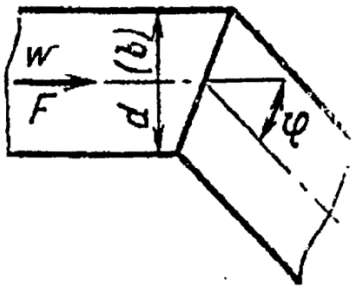
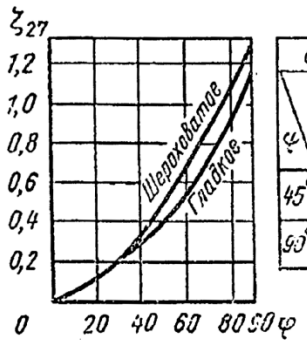
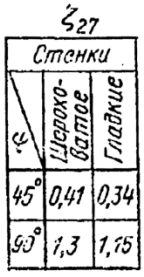
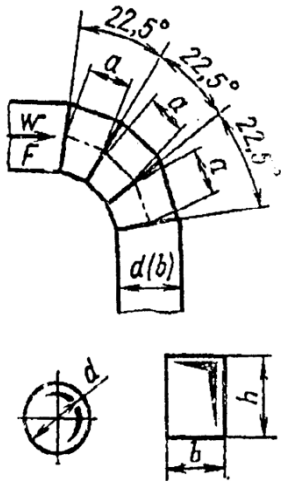
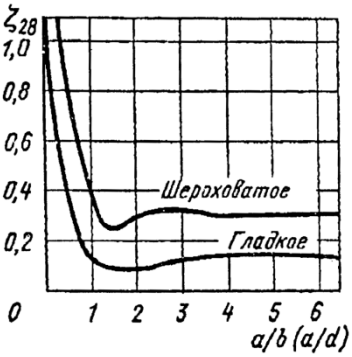
При разработке технического проекта печи необходимо предусмотреть выполнение требований техники безопасности и противопожарной техники.

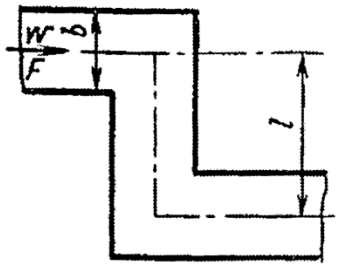
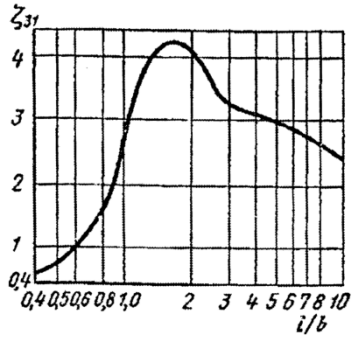
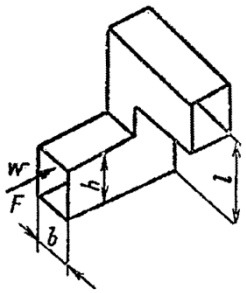
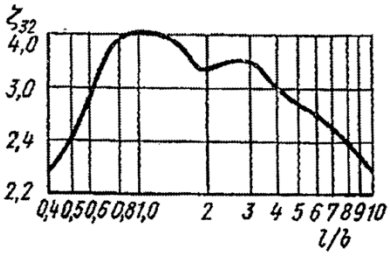
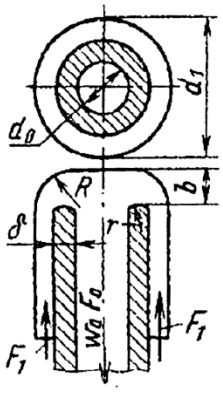
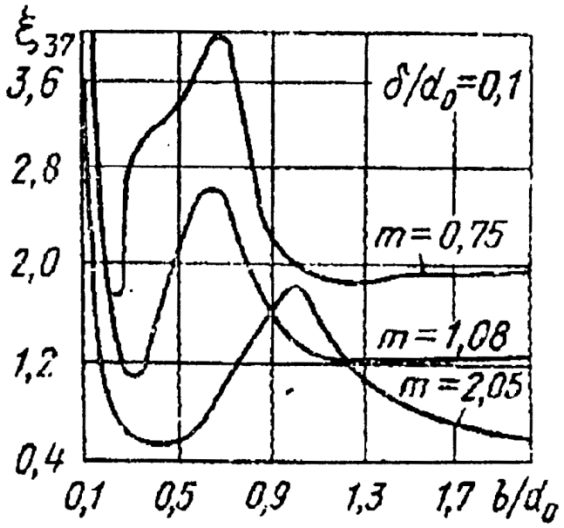
Приложение 2

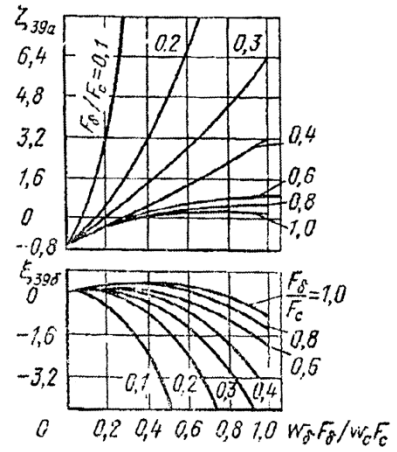
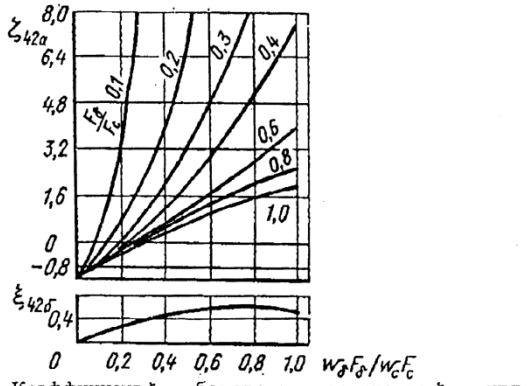
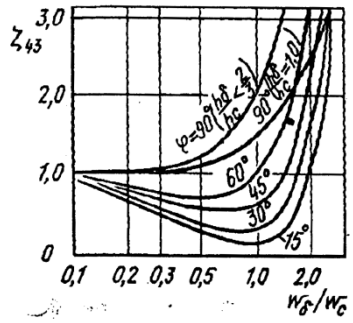
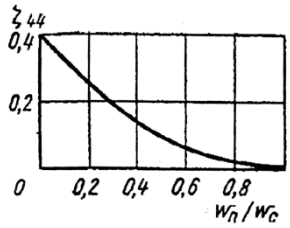
Коэффициенты сопротивления

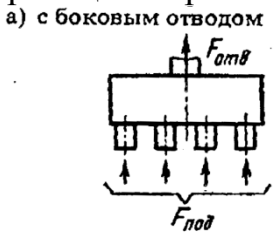
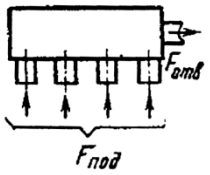
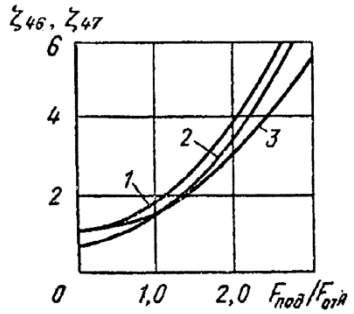
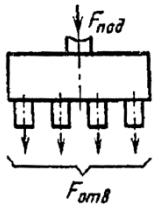
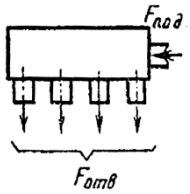
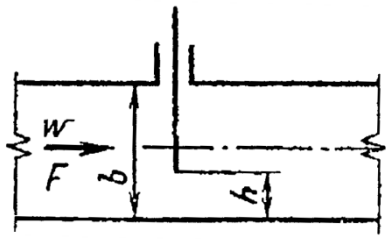
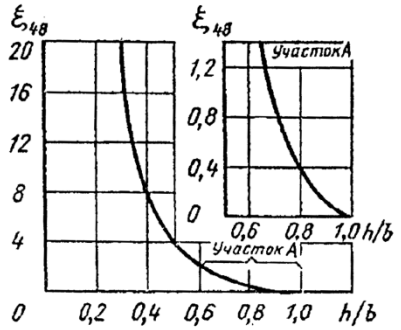
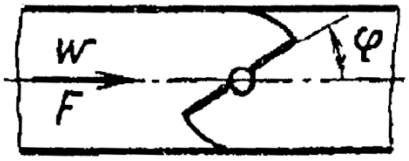
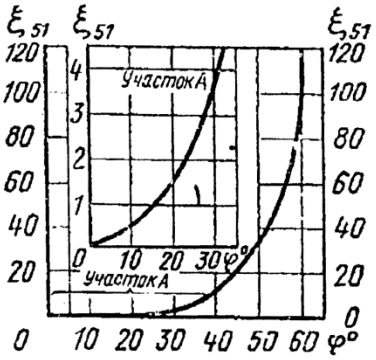
№п/п	Наименование и эскиз	Коэффициент сопротивления
1.Вход потока в канал		
1	Вход в трубу заделанную в стенку 	
2	Вход в трубу, заделанную заподлицо под любым углом при наличии проходящего потока 	 Re > 10^4
3	Вход в трубу с коническим раструбом 	

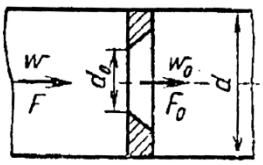
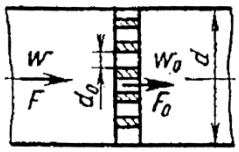
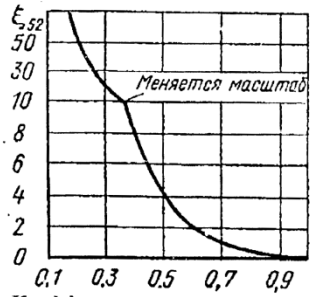
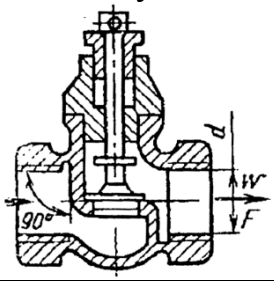
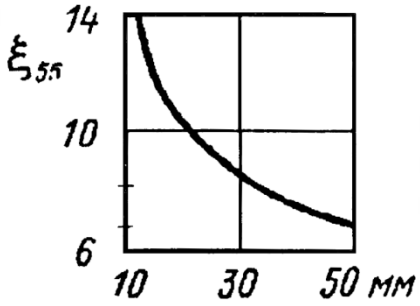
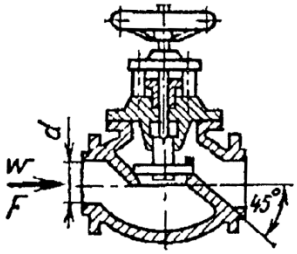
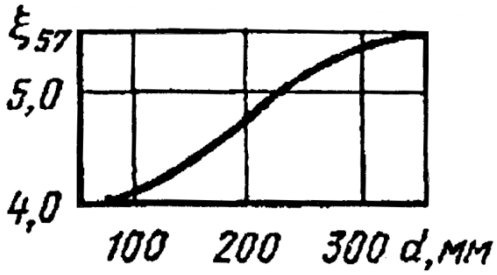
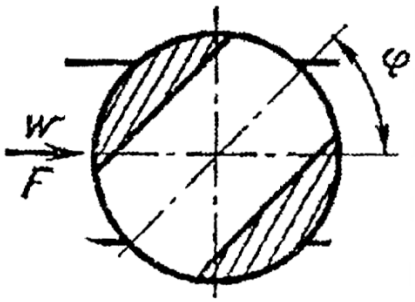
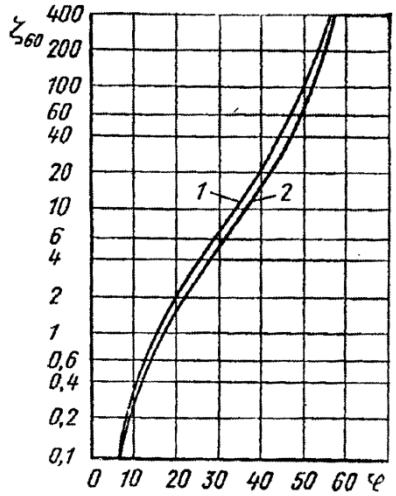
№п/п	Наименование и эскиз	Коэффициент сопротивления
4	Вход в трубу с экраном 	
2.Изменение сечения канала		
5		 При $Re > 10^4$ $\zeta_9 = 0{,}5\left(1-\frac{F}{F_1}\right)$
6		
7	Конический диффузор 	 $\zeta_{16}=\eta\left(1-\frac{F}{F_1}\right)^2=\eta\zeta_{15}$ l — длина прямого участка трубы до диффузора

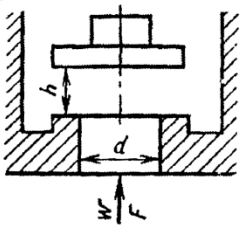
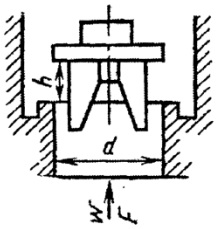
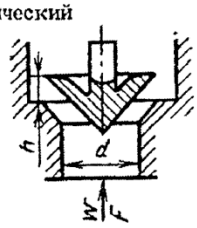
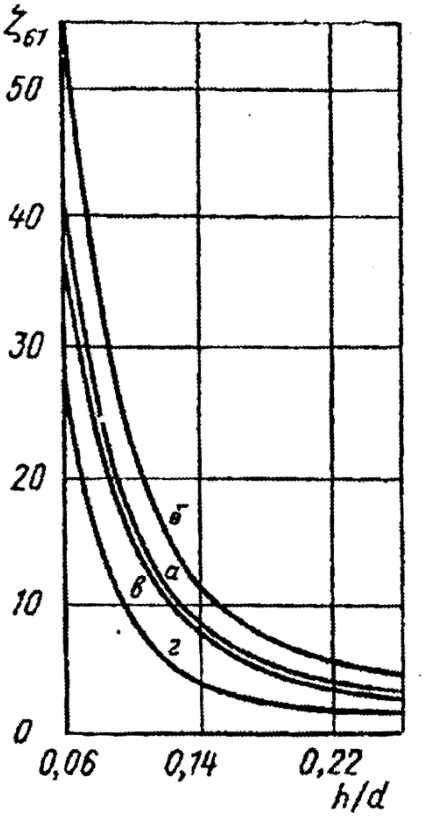
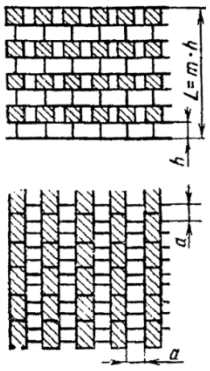
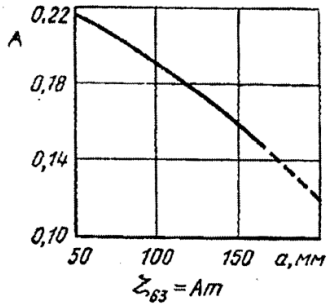
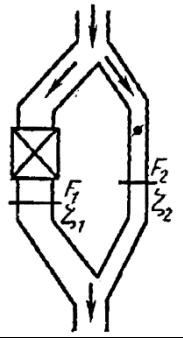
№п/п	Наименование и эскиз	Коэффициент сопротивления
3.Изменение направления потока		
8	Колена с острыми кромками на повороте 	 Re ⩾ 4 · 10⁴; для круглого и квадратного канала $C = 1{,}0$; стенки гладкие; φ — угол поворота канала
9	Колена круглого или квадратного сечения с острыми кромками на повороте 	  При прямоугольном сечении $(h \neq b)$ $\zeta'_{27} = \zeta_{27} C$; $C = f\ (h/b)$; C определяют по графику ζ_{22}; стенки гладкие $\epsilon \approx 0$, шероховатые $\epsilon \approx 0{,}006$
10	Составное колено 90º круглого или квадратного сечения, образованное из четырех звеньев по 22,5º 	 Re ⩾ 0,2 · 10⁶; стенки гладкие $\epsilon \approx 0$, шероховатые $\epsilon \approx 0{,}006$; при прямоугольном сечении $(h \neq b)$ $\zeta'_{28} = \zeta_{28} C$; $C = f\,(h/b)$; C определяют по графику ζ_{22}

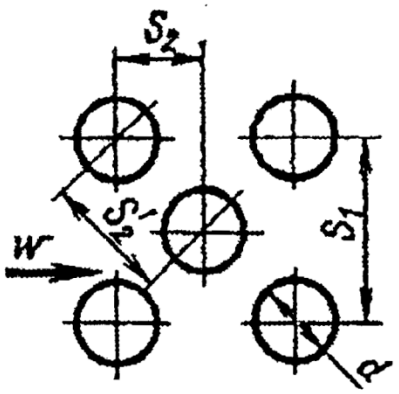
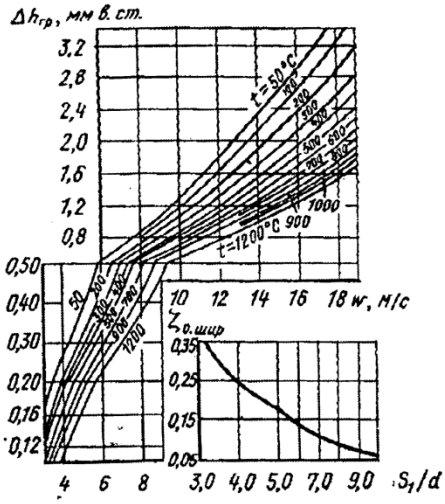
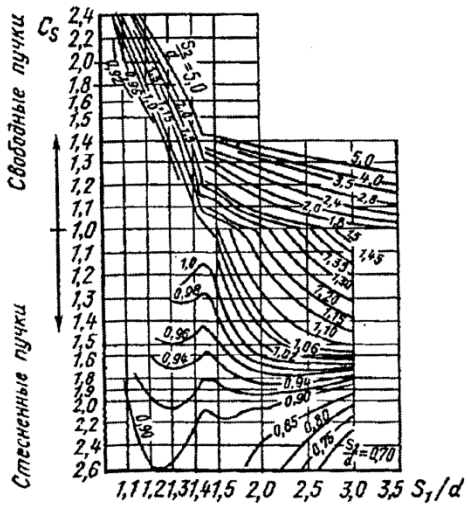
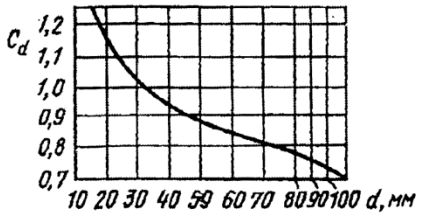
№п/п	Наименование и эскиз	Коэффициент сопротивления
11	Z-образное колено квадратного сечения 	 При прямоугольном сечении ($h \neq b$) $\zeta'_{31} \approx \zeta_{31} C$; C определяют по графику ζ_{22}; стенки гладкие $\epsilon \approx 0$
12	Составное колено квадратного сечения, образованное из двух колен по 90º, лежащих в разных плоскостях 	 При прямоугольном сечении ($h \neq b$) $\zeta'_{32} = \zeta_{32} C$; $C = f(h/b)$; C определяют по графику ζ_{22}; стенки гладкие, $\epsilon \approx 0$
13	Пространственный (кольцевой) поворот на 180º (при всасывании) 	

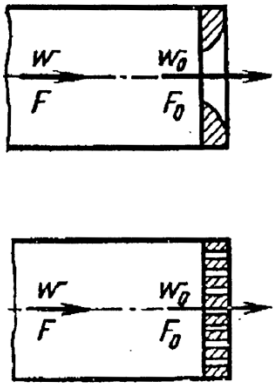
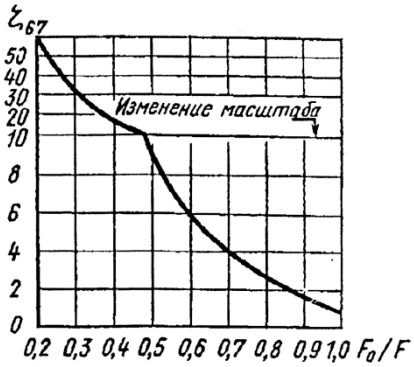
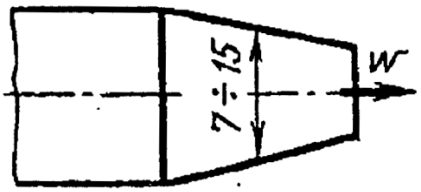
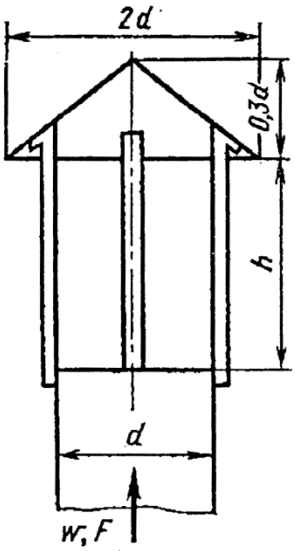
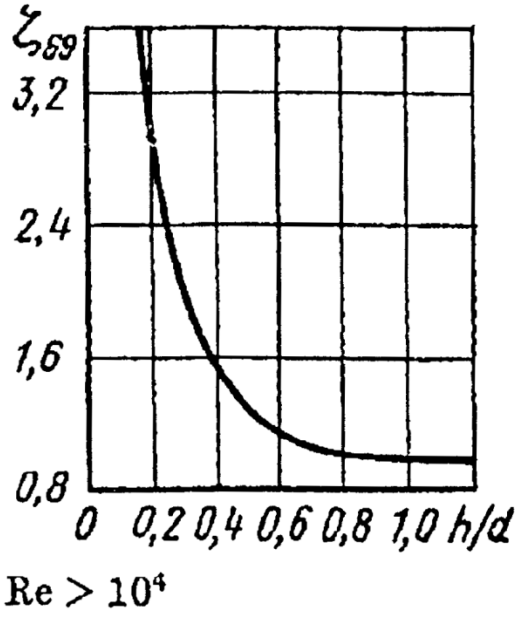
№п/п	Наименование и эскиз	Коэффициент сопротивления
4.Слияние и разделение потоков		
14	Слияние потоков под углом 30º	
15	Слияние потоков под углом 90º	 Коэффициент $\zeta_{42а}$ бокового ответвления и $\zeta_{42б}$ прямого потока отнесены к скоростному давлению в сборном канале; справедливо при $F_п = F_с$
16	Разделение потоков под углом 15-90º, боковое ответвление	 Коэффициент ζ_{43} бокового ответвления отнесен к скоростному давлению в подводящем канале; справедливо при $F_п = F_с$; $h_б$ — высота сечения бокового ответвления; $h_с$ — высота сечения сборного канала
17	Разделение потоков под углом 15-90º, проход	 Коэффициент ζ_{44} отнесен к скоростному давлению в подводящем канале; справедливо при $F_б + F_п \geq F_с$

№п/п	Наименование и эскиз	Коэффициент сопротивления
18	Собирающий короб: а) с боковым отводом  б) с торцевым отводом  	
19	Раздающий короб: а) с боковым подводом  б) с торцевым подводом  	*1* — раздающий (собирающий) короб при боковом подводе (отводе); *2* — раздающий короб при торцевом подводе; *3* — собирающий короб при торцевом отводе. Коэффициенты ζ_{46} и ζ_{47} отнесены к скоростному давлению в подводящем канале; равномерная раздача потока будет обеспечена при $F_к \geq 3F_{отв}$, где $F_к$ — площадь поперечного сечения короба
5.Движение потока по сложным элементам (задвижки, дроссели, диафрагмы, вентили, клапаны)		
20	Задвижка в прямоугольном канале  	
21	Дроссельный клапан в круглом канале  	

№п/п	Наименование и эскиз	Коэффициент сопротивления
22	Диафрагма с острыми краями  или решетка  	 Коэффициент сопротивления отнесен к скоростному давлению в трубе; $\mathrm{Re} = \frac{w_0 d_0}{\nu_0} \geqslant 2{,}5 \cdot 10^5$; F_0 — площадь отверстий решетки (диафрагмы); при приближенных расчетах потери давления на диафрагме — 50 % от перепада давления, измеряемого диафрагмой
23	Вентиль с делительными стенками под углом 90°  	
24	Вентиль с делительными стенками под углом 45°  	
25	Пробковый кран  	 1 — цилиндрическая труба; 2 — прямоугольная труба

№п/п	Наименование и эскиз	Коэффициент сопротивления
26	Клапаны: а) тарельчатый без нижней направляющей  б) тарельчатый с нижней направляющей  в) конический  	
6.Движение потока через препятствия, равномерно распределенные по сечению (насадки, пучки, параллельные каналы)		
27	Регенеративная насадка типа Сименса  	 Коэффициент сопротивления отнесен к скоростному давлению в насадке; m — число рядов насадки
28	Параллельные каналы  	$\zeta_{66} = \left(\frac{F_1 + F_2 + \ldots + F_n}{\frac{F_1}{\sqrt{\zeta_1}} + \frac{F_2}{\sqrt{\zeta_2}} + \ldots + \frac{F_n}{\sqrt{\zeta_n}}}\right)^2;$ $\zeta_1, \zeta_2, \ldots, \zeta_n$ — суммарные коэффициенты местных сопротивлений соответствующего канала; $F_1, F_2, \ldots, F_n$ — проходные сечения каналов, к скорости в которых отнесены соответственно $\zeta_1, \zeta_2, \ldots, \zeta_n$; коэффициент ζ_{66} отнесен к скоростному давлению при $w = \frac{V_{общ}}{F_1 + F_2 + \ldots + F_n}$.

№п/п	Наименование и эскиз	Коэффициент сопротивления
29	Шахматные гладкотрубные пучки при поперечном омывании 	 При $0{,}1 < \frac{s_1 - d}{s_2' - d} < 1{,}7$, а также при $\frac{s_1}{d} \leqslant 3{,}0$ и $1{,}7 \leqslant \frac{s_1 - d}{s_2' - d} \leqslant 6{,}5$ $\Delta h = C_s C_d \Delta h_{гр} (z + 1)$; при $\frac{s_1 - d}{s_2' - d} > 1{,}7$ и $3{,}0 < \frac{s_1}{d} \leqslant 10$ $\Delta h = \zeta_{о.шир} \frac{w^2 \rho}{2} (z + 1)$; $s_2' = \sqrt{1/4(s_1^2 + s_2^2)}$; z — число рядов труб по глубине пучка; w — действительная скорость потока; стесненные пучки: $1{,}7 \leqslant \frac{s_1 - d}{s_2 - d} \leqslant 6{,}5$; свободные пучки: $0{,}1 < \frac{s_1' - d}{s_2 - d} < 1{,}7$  

№п/п	Наименование и эскиз	Коэффициент сопротивления
7.Выход потока из канала		
30	Выход из трубы через шайбу или плоскую решетку 	 Коэффициент сопротивления относится к скоростному давлению в трубе; F_0 — живое сечение шайбы или решетки; $\mathrm{Re} = \frac{w_1 d_1}{\nu} \geqslant 0{,}25$; d_1 — эквивалентный диаметр отверстия шайбы или решетки
31	Сопло 	$\zeta_{68} = 1{,}05$; при расчете горелок принимать $\zeta_{68} = 1{,}2$ Коэффициент сопротивления относится к скоростному давлению в устье сопла
32	Шахты (вытяжные, прямые) круглого сечения с зонтом 	 $\mathrm{Re} > 10^4$

Приложение 3

Физические свойства сухого воздуха при В=0,103 МПа

t, °С	ρ, кг/м^3	c_p, кДж/(кг·К)	$\lambda\cdot10^2$, Вт/(м·К)	$a\cdot10^6$, м^2/с	$\mu\cdot10^6$, Н·с/м^2	$\nu\cdot10^6$, м^2/с	Pr
-50	1,584	1,013	2,04	12,7	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	13,8	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	14,9	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	12,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,105	1,005	2.59	21,4	18,1	15,06	0.703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,0	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	163,4	41,8	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	188,8	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	216,2	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	245,9	49,0	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	276,2	51,2	199,3	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	316,5	53,5	233,7	0,724

Приложение 4

Физические свойства водяного пара на линии насыщения

t, °C	$p \cdot 10^5$, Па	ρ', кг/м^3	i', кДж/кг	r, КДж/кг	c_p, кДж/(кг·К)	λ, Вт/(м·К)	$a \cdot 10^6$, м^2/с	$\mu \cdot 10^6$, Н·с/м^2	$\nu \cdot 10^6$, м^2/с	Pr
100	1,013	0,598	2675,9	2256,8	2,135	2,372	18,58	11,97	20,02	1,08
110	1,43	0,826	2691,4	2230,0	2,177	2,489	13,83	12,46	15,07	1,09
120	1,98	1,121	2706,5	2202,8	2,206	2,593	10,50	12,85	11,46	1,09
130	2,70	1,496	2720,7	2174,3	2,257	2,686	7,972	13,24	8,85	1,11
140	3,61	1,966	2734,1	2145,0	2,315	2,791	6,130	13,54	6,89	1,12
150	4,76	2,547	2746,7	2114,3	2,395	2,884	4,728	13,93	5,47	1,16
160	6,18	3,258	2758,0	2082,6	2,479	3,012	3,722	14,32	4,39	1,18
170	7,92	4,122	2768,9	2049,5	2,583	3,128	2,939	14,72	3,57	1,21
180	10,03	5,157	2778,5	2015,2	2,709	3,268	2,339	15,11	2,93	1,25
190	12,55	6,397	2786,4	1978,8	2,856	3,419	1,872	15,60	2,44	1,30
200	15,55	7,862	2793,1	1940,7	3,023	3,547	1,492	15,99	2,03	1,36
210	19,08	9,588	2798,2	1900,5	3,199	3,722	1,214	16,38	1,71	1,41
220	23,20	11,62	2801,5	1857,8	3,408	3,896	0,983	16,87	1,45	1,47
230	27,98	13,99	2803,2	1813,0	3,634	4,094	0,806	17,36	1,24	1,54
240	33,48	16,76	2803	1766	3,881	4,290	0,658	17,75	1,06	1,61
250	39,78	19,98	2801	1716	4,157	4,515	0,544	18,24	0,913	1,68
260	46,94	23,72	2796	1661	4,467	4,800	0,453	18,83	0,794	1,75
270	55,05	28,09	2709	1604	4,815	5,115	0,378	19,32	0,688	1,82
280	64,19	33,19	2780	1543	5,234	5,490	0,317	19,91	0,600	1,90
290	74,45	39,15	2766	1476	5,694	5,830	0,261	20,59	0,526	2,01
300	85,92	46,21	2749	1404	6,280	6,270	0,216	21,28	0,461	2,13
310	98,70	54,58	2727	1325	7,118	6,840	0,176	21,97	0,403	2,29
320	112,90	64,72	2700	1238	8,206	7,510	0,141	22,85	0,353	2,50
330	128,65	77,10	2666	1140	9,881	8,260	0,108	23,93	0,310	2,86
340	146,08	92,76	2622	1027	12,35	9,300	0,0811	25,20	0,272	3,35
350	165,37	113,6	2564	893	16,24	10,700	0,0581	26,58	0,234	4,03
350	186,74	144,0	2481	719,7	23,03	12,790	0,0386	29,13	0,202	5,23
370	210,53	203,0	2331	438,4	56,52	17,100	0,0150	33,73	0,166	11,10

Приложение 5

Физические свойства продуктов сгорания (p = 0,1 МПа)

t, °C	ρ, кг/м^3	c_p, кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$a \cdot 10^6$, м^2/с	$\mu \cdot 10^6$, Н·с/м^2	$\nu \cdot 10^6$, м^2/с	Pr
0	1,295	1,042	2,28	16,9	15,8	12,20	0,72
100	0,950	1,068	3,13	30,8	20,4	21,54	0,69
200	0,748	1,097	4,01	48,9	24,5	32,80	0,67
300	0,617	1,122	4,84	69,9	28,2	45,81	0,65
400	0,525	1,151	5,70	94,3	31,7	60,38	0,64
500	0,457	1,185	6,56	121,1	34,8	76,30	0,63
600	0,405	1,214	7,42	150,9	37,9	93,61	0,62
700	0,363	1,239	8,27	183,8	40,7	112,1	0,61
800	0,330	1,264	9,15	219,7	43,4	131,8	0,60
900	0,301	1,290	10,0	258,0	45,9	152,5	0,59
1000	0,275	1,306	10,90	303,4	48,4	174,3	0,58
1100	0,257	1,323	11,75	345,5	50,7	197,1	0,57
1200	0,240	1,340	12,62	392,4	53,0	221,0	0,56

Приложение 6

Характеристика газообразного топлива

Вид топлива	Состав топлива (%объемных)									Теплота сгорания, количество воздуха и продуктов горения			Состав продуктов сгорания, % объемных				Жаро-производи-тельность, ºС
	H_2	CO	CH_4	C_nH_m	CO_2	H_2O	N_2	O_2	H_2S	$Q^p_н$, МДж/м^3 (МДж/кг)	L_0, м^3/м^3 (м^3/кг)	$V_д$, м^3/м^3 (м^3/кг)	CO_2	H_2O	N_2	SO_2	
Газообразное топливо																	
Доменный газ	3,3	27,4	0,9	-	10,0	-	58,4	-	-	4,18	0,82	1,67	23,0	3,0	74,0	-	1487
Коксовый газ	50,8	5,4	26,5	1,7	2,8	0,4	11,4	1,0	-	16,7	4,06	4,82	7,9	22,1	70,0	-	2070
Воздушный генераторный газ	0,9	33,4	0,5	-	0,6	-	64,2	-	0,4	4,6	0,893	1,71	20,1	1,3	78,4	0,20	1630
Водяной генераторный газ	50,0	40,0	0,5	-	4,5	-	5,0	-	-	10,7	2,19	2,74	16,6	18,4	65,0	-	2210
Смешанный генераторный газ:																	
из антрацита	13,5	27,5	0,5	-	5,5	-	52,6	0,2	0,2	5,16	1,03	1,82	18,4	8,1	73,4	0,1	1690
из газового угля	13,5	26,5	2,3	0,3	5,0	-	51,9	0,2	0,3	5,87	1,23	2,03	16,9	9,45	73,5	0,15	1740
из бурого угля	14,0	25,0	2,2	0,4	6,5	-	50,5	0,2	1,2	5,91	1,27	2,07	16,7	9,9	72,8	0,6	1730
из торфа	15,0	27,5	2,5	0,4	8,5	-	45,8	0,2	0,1	6,25	1,30	2,09	18,8	10,0	71,15	0,05	1760
из щепы	14,0	29,0	3,0	0,4	6,5	-	46,9	0,2	-	6,5	1,36	2,14	18,3	9,7	72,0	-	1800
Природный газ	2,0	0,6	93,0	0,4	0,3	-	3,0	0,5	0,2	34,1	8,93	9,93	9,54	19,03	71,4	0,03	2050
Попутный газ	3,0	-	57,5	38,0	1,5	-	-			56,0							

Приложение 7

Характеристика жидких и твердых видов топлива

Вид топлива	Состав топлива (% массовых)						Теплота сгорания, количество воздуха и продуктов сгорания			Состав продуктов сгорания, % объемных				Жаропроизводительность, ºС
	H_2	C	S	H_2O	O_2	Зола	$Q^p_н$, МДж/м^3 (МДж/кг)	L_0, м^3/м^3 (м^3/кг)	$V_д$, м^3/м^3 (м^3/кг)	CO_2	H_2O	N_2	SO_2	
Жидкое топливо														
Мазут малосернистый 10	12,3	85,6	0,5	1,0	0,5	0,1	41,7	10,9	11,6	13,7	11,95	74,32	0,03	2140
Мазут малосернистый 20	11,5	85,3	0,6	2,0	0,5	0,1	40,8	10,64	11,32	14,08	11,62	74,26	0,01	2120
Мазут малосернистый 40	10,5	85,0	0,6	3,0	0,7	0,2	39,7	10,37	11,01	14,42	11,02	74,52	0,04	2130
Мазут малосернистый 80	10,2	84,0	0,7	4,0	0,8	0,3	39,5	10,18	10,82	14,52	11,02	74,41	0,05	2160
Мазут сернистый 10	11,5	84,2	2,5	1,0	0,7	0,1	40,5	10,54	11,27	14,02	11,60	74,23	0,15	2140
Мазут сернистый 20	11,3	83,1	2,9	2,0	0,5	0,2	40,1	10,40	11,08	14,03	11,65	7412	0,20	2140
Мазут сернистый 40	10,6	82,6	3,1	3,0	0,4	0,3	39,3	10,16	10,84	14,34	11,30	74,16	0,20	2140
Твердое топливо														
Кокс	-	81,0	1,7	7,3	-	10,0	27,7	7,24	7,32	20,5	1,3	78,1	0,1	2200
Антрацит	1,8	86,3	1,9	3,5	1,7	4,8	31,5	7,28	7,62	21,0	3,0	75,9	0,1	2290
Газовый уголь	4,6	68,9	2,0	6,7	9,2	8,6	27,6	7,1	7,48	17,1	8,0	74,8	0,1	2180
Бурый уголь	3,0	62,0	-	11,0	18,0	6,0	17,2	4,9	5,2	19,0	6,5	74,5	-	1950
Дрова	4,5	40,0	-	22,0	32,5	1,0	13,0	3,8	4,5	16,6	16,0	67,4	-	1770
Торф	3,7	35,7	-	29,0	23,8	7,8	11,5	3,52	4,2	16,0	17,1	66,9	-	1600

Приложение 8

Теплосодержание железа и углеродистых сталей, кДж/кг

Температура, °С	Чистое железо	Содержание углерода, %										
		0,090	0,234	0,300	0,540	0,610	0,795	0,920	0,994	1,235	1,410	1,575
100	46,5	46,5	46,5	46,9	47,3	47,7	48,1	50,2	48,6	49,4	48,6	50,2
200	98,0	95,46	95,9	95,9	95,9	96,3	96,7	100,5	99,2	100,0	98,8	100,9
300	153,2	148,2	149,9	150,7	151,6	152,8	154,5	155,7	154,5	154,9	154,5	157,0
400	214,4	205,2	206,0	206,4	208,9	209,8	210,2	213,5	211,0	213,1	210,6	213,9
500	280,5	265,4	266,7	267,5	268,4	269,2	271,3	275,9	274,1	276,2	274,1	276,8
600	356,7	339,1	340,0	340,8	343,3	343,7	344,6	349,6	346,3	347,5	345,4	351,3
700	421,6	419,1	419,5	420,8	422,9	423,7	424,6	427,5	421,9	427,9	425,4	431,3
800	505,03	531,74	542,63	550,6	547,7	542,2	550,2	550,2	544,3	548,5	544,3	553,9
900	584,09	629,3	631,4	628,1	620,1	616,7	610,9	602,9	605,0	602,9	605,8	613,8
1000	675,24	704,2	701,7	698,8	689,2	686,7	679,1	653,6	670,7	661,1	673,3	670,9
1100	744,24	780,9	772,5	768,3	760,8	757,4	749,5	724,8	741,1	732,3	744,9	720,2
1200	815,50	850,4	844,5	841,6	831,5	820,6	821,1	791,3	804,3	795,5	813,1	783,0
1250	-	855,5	880,1	877,6	868,8	876,3	856,2	824,8	841,6	833,2	849,5	817,7

Приложение 9

Химический состав углеродистых сталей, %

Марка	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	As	Режим термической обработки: отжиг при t, °C
08кп	0,06	0,01	0,38	0,035	0,017	0,022	0,055	0,030	0,08	0,001	0,039	930
08	0,08	0,08	0,31	0,050	0,029	0,045	0,07	0,020	Следы	0,002	0,032	930
20	0,23	0,11	0,635	0,034	0,034	Следы	0,074	-	0,13	0,010	0,036	930
04	0,415	0,11	0,643	0,029	0,031	Следы	0,063	-	0,12	0,006	0,033	860
У8	0,80	0,13	0,32	0,009	0,008	0,11	0,13	0,01	0,070	0,004	0,021	800
У8’	0,84	0,13	0,24	0,014	0,014	Следы	Следы	-	0,020	0,004	0,008	-
У12	1,22	0,16	0,35	0,015	0,009	0,11	0,13	0,01	0,077	0,006	0,025	800

Приложение 10

Коэффициент теплопроводности, углеродистых сталей различных марок в зависимости от температуры, Вт/(м·К)

Температура, °С	Марки стали						
	08кп	08	20	40	У8	У8’	У12
0	65,1	59,5	51,9	51,9	49,8	51,1	45,2
50	62,8	58,6	51,5	51,5	49,4	50,2	45,2
100	60,2	57,7	51,1	50,6	48,1	48,9	44,8
150	57,7	55,2	49,9	49,8	46,9	47,7	42,4
200	55,6	53,5	48,5	48,1	45,1	46,1	42,7
250	53,0	51,5	46,5	46,9	43,0	43,9	41,1
300	50,9	49,4	44,4	45,6	41,4	41,9	40,2
350	48,5	47,7	43,6	44,3	40,2	40,2	38,5
400	46,5	44,8	42,7	41,9	38,1	37,6	37,2
450	43,5	42,3	41,1	40,0	36,4	36,9	36,1
500	41,1	40,2	39,3	38,1	35,2	35,6	34,7
550	39,4	38,1	37,7	36,1	33,9	34,4	33,5
600	37,4	36,1	35,6	33,6	32,7	33,3	31,9
650	36,1	33,9	33,9	31,9	31,4	31,9	30,0
700	33,9	31,9	31,9	30,0	30,1	30,7	28,3
750	31,9	29,8	28,5	26,9	26,9	27,3	26,9
800	30,1	28,5	25,9	24,8	24,3	24,3	23,7
850	27,7	27,2	25,9	24,8	24,3	24,3	23,7
900	27,2	26,7	26,4	25,7	25,7	25,2	24,8
950	27,2	27,2	27,2	26,1	26,5	26,1	25,7
1000	27,7	27,7	27,7	26,9	26,9	26,9	26,1
1050	28,0	28,0	28,0	27,2	27,7	27,7	26,9
1100	28,5	28,5	28,5	28,0	28,6	28,6	27,2
1150	29,3	29,3	29,3	28,7	29,4	28,7	28,0
1200	29,8	29,8	29,8	29,5	30,2	29,5	28,6

Приложение 11

Средняя теплоемкость $c_{ср}$, кДж/(кг·К), углеродистых сталей различных марок в интервале температур от 50 до t°C

Темпе-ратура, °C	Углеродистые стали							
	Чистое железо (99,99%)	08кп	08	20	40	У8	У8’	У12
100	0,469	0,486	0,486	0,486	0,486	0,486	0,502	0,486
150	0,47	0,594	0,494	0,494	0,494	0,502	0,511	0,502
200	0,489	0,502	0,502	0,502	0,498	0,515	0,523	0,515
250	0,498	0,511	0,511	0,511	0,507	0,523	0,523	0,523
300	0,511	0,519	0,519	0,519	0,515	0,532	0,519	0,532
350	0,519	0,528	0,528	0,528	0,523	0,540	0,544	0,540
400	0,528	0,536	0,540	0,540	0,532	0,548	0,553	0,544
450	0,536	0,548	0,548	0,548	0,544	0,557	0,565	0,557
500	0,553	0,561	0,561	0,561	0,557	0,589	0,574	0,565
550	0,561	0,574	0,578	0,574	0,569	0,582	0,586	0,578
600	0,578	0,593	0,590	0,590	0,582	0,595	0,503	0,586
650	0,595	0,611	0,607	0,607	0,595	0,603	0,615	0,599
700	0,615	0,628	0,628	0,628	0,607	0,619	0,632	0,615
750	0,641	0,645	0,662	0,669	0,678	0,724	0,745	0,720
800	0,657	0,678	0,682	0,703	0,674	0,716	0,737	0,716
850	0,666	0,682	0,695	0,703	0,662	0,712	0,729	0,712
900	0,666	0,695	0,703	0,703	0,657	0,708	0,724	0,708
950	0,682	0,691	0,609	0,699	0,653	0,703	0,716	0,703
1000	0,678	0,691	0,695	0,695	0,653	0,699	0,712	0,699
1050	0,669	0,691	0,695	0,691	0,653	0,695	0,708	0,695
1100	0,666	0,691	0,695	0,691	0,649	0,695	0,703	0,695
1150	0,666	0,687	0,691	0,691	0,649	0,691	0,707	0,691
1200	0,666	0,687	0,691	0,687	0,649	0,691	0,699	0,691
1250	0,662	0,687	0,691	0,687	0,653	0,691	0,699	0,691
1300	0,662	0,699	0,687	0,687	0,653	0,691	0,699	0,687

Приложение 12

Удельная энтальпия углеродистых сталей *i*, кДж/кг

Температура, °С	Углеродистые стали							
	Чистое железо (99,99%)	08кп	08	20	40	У8	У8’	У12
100	46,89	48,57	48,57	48,56	48,57	48,57	50,24	48,57
150	71,59	74,11	74,11	74,11	74,11	75,36	76,62	75,36
200	97,97	100,48	100,48	100,48	99,65	102,99	104,67	102,99
250	124,56	127,69	127,69	127,69	126,65	130,84	130,84	130,84
300	153,24	175,55	155,75	155,75	154,49	159,52	155,75	159,52
350	181,71	184,64	184,64	184,64	183,17	189,03	190,49	189,03
400	211,01	214,36	216,04	216,04	212,69	219,39	221,06	217,72
450	241,16	146,81	246,81	246,81	244,93	250,58	254,35	250,58
500	276,33	280,52	280,52	280,52	278,42	284,70	286,79	282,61
550	308,57	315,48	317,78	315,48	313,17	320,08	322,38	317,78
600	367,67	354,20	354,20	354,20	349,18	356,72	361,74	351,69
650	386,44	397,33	394,61	394,61	386,44	391,88	400,05	389,16
700	430,82	439,61	439,61	439,61	424,96	433,75	442,54	430,82
750	480,44	483,58	496,14	502,42	508,59	543,24	558,94	540,09
800	525,86	542,61	545,96	562,71	539,26	572,75	589,50	572,75
850	565,85	580,08	590,76	597,88	562,29	604,99	619,23	604,99
900	599,13	625,51	633,04	633,04	591,59	636,81	651,88	636,81
950	648,33	656,28	664,24	664,24	620,48	668,28	680,15	668,21
1000	678,6	690,82	729,76	695,00	653,14	699,19	711,76	699,19
1050	703,38	725,36	747,15	725,36	658,70	729,76	742,95	729,76
1100	732,27	709,90	764,51	759,90	713,85	764,51	773,72	764,51
1150	769,74	789,63	794,45	794,45	746,29	794,45	808,89	794,45
1200	798,84	823,96	828,99	823,96	778,74	828,99	839,03	828,99
1250	826,89	858,29	863,53	858,29	816,43	863,63	873,99	863,83
1300	859,94	908,95	892,63	892,63	849,08	898,07	908,95	892,63

Приложение 13

Плотность углеродистых сталей ρ, кг/м^3

Температура, °С	Марки стали					
	08кп	08	20	30	У8	У12
0	7876	7861	7863	7858	7855	7834
15	7871	7856	7859	7854	7851	7830
50	7861	7847	7849	7845	7842	7822
100	7846	7832	7834	7832	7829	7809
150	7830	7846	7819	7817	7815	7796
200	7814	7800	7803	7801	7800	7781
250	7798	7783	7787	7784	7784	7765
300	7781	7765	7770	7766	7767	7749
350	7763	7748	7753	7748	7749	7731
400	7745	7730	7736	7730	7731	7713
450	7727	7711	7718	7711	7713	7694
500	7708	7692	7699	7692	7694	7675
550	7688	7673	7679	7672	7675	7655
600	7668	7653	7659	7652	7655	7634
650	7648	7632	7635	7628	7632	7613
700	7628	7613	7617	7613	7612	7592
750	7610	7594	7620	7624	7604	7581
800	7598	7582	7624	7635	7594	7565
850	7601	7589	7616	7617	7565	7528
900	7602	7594	7600	7590	7533	7489
950	7580	7572	7574	7564	7509	7463
1000	7550	7543	7548	7538	7485	7438
1050	7523	7515	7522	7512	7460	7413
1100	7495	7488	7496	7486	7436	7388

Приложение 14

Теплофизические свойства огнеупорных изделий и материалов

Наименование огнеупора	Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м^3		Теплоемкость, с, кДж/(кг·К)	Коэффициент теплопроводности λ, Вт(м·К)	Удельное электросопротивление $\rho_э$, Ом·см, при температуре, ºС		
	с порами	без пор			800	1200	1600
Графитовые изделия	1,6	2,2	0,837	$162,8-40,7 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	-	-	-
Динасовый кирпич	1,9-1,93	2,38-2,5	$0,837+0,25 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	$0,93+0,69 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	200	9,14	1,5
Карборундовые изделия (карбофракс)	2,3-2,6	3,1-3,2	$0,96+0,147 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	$20,9-10,5 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	800	40	0-0,8
Корундовые (алундовые) изделия	2,6-2,9	3,7-3,9	$0,79+0,42 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	$2,1+1,9 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	1000	100	5,2-4,0
Рекристаллизованный корунд	3,75-3,85	3,8-3,9	-	$29,1^{*2}$, $5,8^{*2}$	-	-	-
Магнезитовый кирпич	2,6-2,8	3,0-3,2	$1,05+0,29 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	$4,7-1,7 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	1000	100-200	-
Изделия из плавленого муллита	2,1-2,4	3,0-3,3	$1,05+0,25 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	-	-	-	-
Плавленый магнезитовый кирпич	2,7-2,8	3,5-3,6	-	-	4000	100-200	1,0-2,0
Окись бериллия	-	3,0	$0,13+0,52 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	$1,9-3,7^{*3}$	-	10^9	-
Окись тория	-	10,0	$0,25^{*1}$	Очень низкий	-	10^7	-
Полукислый огнеупорный кирпич	1,85-1,95	2,5-2,6	$-0,88+0,23 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	$0,87+0,52 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	-	4-6	-
Строительный (красный) кирпич	1,4-1,6	2,5-2,6	0,92	$0,81+0,47 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	-	-	-
Силлиманитовые и муллитовые изделия	2,2-2,4	2,8-3,0	$0,84+0,25 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	$1,69-0,23 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	180	11,5	3,5
Угольные изделия	1,35-1,5	1,8-2,1	0,837	$23,3 \pm 34,9 \cdot 10^{-3} t_{ср}^{*4}$ до 1000ºС	-	-	-
Хромитовый кирпич	3,0-3,2	3,8-4,2	$0,84+0,29 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	$1,28+0,41 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	3,0	0,5-0,1	0,05-0,01
Хромомагнезитовый кирпич	2,8-2,9	3,7-3,8	-	$1,9-2,1^{*5}$	-	-	-
Термостойкий хромомагнезитовый кирпич	2,75-2,85	3,6-3,8	-	$4,1-1,11 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	-	-	-
Циркониевые изделия	3,3	4,5-5,0	$0,54+0,13 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	$1,3-0,64 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	1000-10000	10,0	-
Цирконовые изделия	3,2-3,3	4,0-4,5	$0,63+0,13 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	-	-	10,0	-
Шамотный кирпич	1,8-1,9	2,54-2,62	$0,88+0,23 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	$0,84+0,58 \cdot 10^{-3} t_{ср}$	7-15	1,0-1,5	0,6

*1 При 25ºС. *2 При 100ºС. *3 При 20ºС. *4 При 1000ºС. *5 От 0 до 70ºС.

Приложение 15

Степень черноты полного излучения различных материалов

Материал и характер поверхности	Температура, ºС	ε
1	2	3
Чистые и окисленные металлы		
Алюминий:		
полированный	225-575	0,039-0,057
шероховатый	26	0,055
окисленный при 600ºС	200-600	0,11-0,19
Покрытая алюминием поверхность:		
меди при нагреве до 600ºС	200-600	0,18-0,19
стали при нагреве до 600ºС	200-600	0,52-0,57
Вольфрам	230-2230	0,053-0,31
Вольфрамовая нить	3300	0,39
Вольфрамовая нить, бывшая в употреблении	25-3300	0,032-0,35
Железо:		
электролитное, тщательно полированное	175-225	0,052-0,064
сварочное, тщательно полированное	40-250	0,28
полированное	425-1020	0,144-0,377
свежеобработанное наждаком	20	0,242
окисленное гладкое	125-525	0,78-0,82
литое необработанное	925-1115	0,87-0,95
Стальное литье полированное	770-1040	0,52-0,56
Сталь:		
листовая шлифованная	940-1110	0,52-0,61
окисленная при 600ºС	200-600	0,79-0,69
листовая с плотным блестящим слоем окиси	25	0,82
окисленная шероховатая	40-370	0,94-0,97
мягкая расплавленная	1600-1800	0,28
Чугун:		
полированный	200	0,21
обточенный	830-990	0,60-0,70
окисленный при 600ºС	200-600	0,64-0,78
шероховатый, сильно окисленный	40-250	0,95
расплавленный	1300-1400	0,29
Золото, тщательно полированное	225-625	0,018-0,035
Латунь, тщательно полированная состава, % (вес):		
73,2% Cu, 26,7% Zn	245-355	0,028-0,031
62,4 % Cu, 36,8% Zn, 0,4% Pb, 0,3% Al	255-375	0,039-0,037
82,9 % Cu, 17,0% Zn	275	0,030
прокатанная с естественной поверхностью	22	0,06
прокатанная, тертая грубым наждаком	22	0,20
тусклая	50-350	0,22
окисленная при нагреве до 600ºС	200-600	0,61-0,59

1	2	3
Медь:		
тщательно полированная электролитная	80	0,018
полированная	115	0,023
шабреная до блеска, но не зеркальная	22	0,072
окисленная при нагреве до 600ºС	200-9600	0,57-0,55
продолжительно нагревавшаяся, покрытая толстым слоем окиси	25	0,78
расплавленная	1075-1272	0,11-0,13
Молибденовая нить	725-2600	0,096-0,292
Никель:		
нанесенный гальваническим способом на полированное железо и затем полированный	23	0,045
технически чистый полированный	225-375	0,07-0,087
окисленный при нагреве до 600ºС	200-600	0,11
Никелевая проволока	185-1000	0,096-0,186
Хромоникель	52-1035	0,64-0,76
Олово, блестящее луженое листовое железо	25	0,043-0,064
Платина чистая полированная	225-625	0,054-0,104
Платиновая лента	925-1115	0,12-0,17
Платиновая нить	25-1230	0,036-0,192
Платиновая проволока	225-1375	0,073-0,182
Ртуть очень чистая	0-100	0,09-0,12
Свинец:		
чистый неокисленный	125-225	0,057-0,075
серый окисленный	24	0,281
окисленный при 200ºС	200	0,63
Серебро:		
полированное чистое	225-625	0,0198-0,0324
полированное	38-370	0,0221-0,0312
Хром	38-538	0,088-0,26
Цинк:		
торговый (99,1) полированный	225-325	0,045-0,053
окисленный при нагреве до 400ºС	400	0,11
Оцинкованное листовое железо:		
очень блестящее	28	0,228
серое окисленное	24	0,276
Огнеупорные, строительные, термоизоляционные и другие материалы		
Асбестовый картон	24	0,96
Асбестовая бумага	40-370	0,93-0,95
Асбошифер	20	0,96
Динасовый кирпич:		
неглазурованный шероховатый	1000	0,8
глазурованный шероховатый	1100	0,85
Кирпич:		
шамотный глазурованный	1100	0,75
магнезитовый (80% MgO, 9% Al_2O_3)	1500	0,39
силикатный (95% SiO_2)	1230	0,66

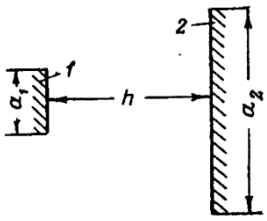
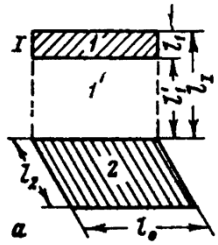
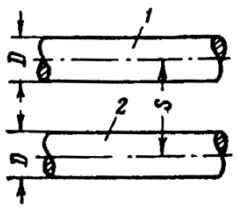
1	2	3
силлиманитовый (33% SiO_2, 64% Al_2O_3)	1500	0,29
красный шероховатый	20	0,93
шамот (55% SiO_2, 41% Al_2O_3)	1230	0,59
Фарфор глазурованный	22	0,92
Гипс	20	0,8-0,9
Штукатурка шероховатая известковая	10-90	0,91
Мрамор сероватый полированный	22	0,93
Кварц плавленый шероховатый	20	0,93
Стекло гладкое	22	0,94
Бумага	20	0,8-0,9
Вода	0-100	0,95-0,96
Дерево строганное	20	0,8-0,9
Ламповая сажа, слой 0,075 мм	40-370	0,95
Обмазка из жидкого стекла с ламповой сажей	100-225	0,96-0,95
Резина:		
твердая лощеная	23	0,95
мягкая серая шероховатая	24	0,86
Толь кровельный	20	0,93
Уголь очищенный (0,9% золы)	125-625	0,81-0,79
Угольная нить	1040-1405	0,53
Эмаль белая, приплавленная к железу	19	0,9
Лак:		
белый эмалевый на железной шероховатой пластине	23	0,91
черный блестящий, распыленный по железу	25	0,88
черный матовый	40-95	0,96-0,98
белый	40-95	0,80-0,95
Шеллак:		
черный блестящий на луженом железе	21	0,82
черный матовый	75-145	0,91
Масляные краски различных цветов	100	0,96-0,86
Алюминиевые краски:		
разной давности с переменным содержанием Al	100	0,27-0,67
после нагрева до 325ºС	150-315	0,35
Алюминиевый лак по шероховатой пластине	20	0,39

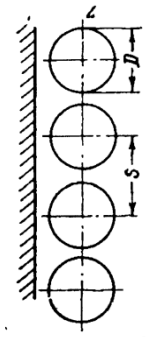
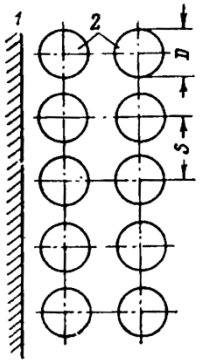
Примечания: 1. Степени черноты, приведенные в таблице, получены путем измерения яркости излучения в направлении нормали к поверхности тела.

2. Две температуры и две степени черноты, указанные для некоторых материалов, означают, что первая степень черноты относится к первой температуре, а вторая – ко второй, причем допускается линейная интерполяция.

Приложение 16

Формулы для расчета угловых коэффициентов и расчетных поверхностей

Взаимное расположение и форма поверхностей	Схема	Угловые коэффициенты и расчетные поверхности
1. Две бесконечные параллельные полосы разной ширины		$\varphi_{12}=\sqrt{\frac{1}{4}(\frac{a_2}{a_1}+1)^2+(\frac{\mathrm{h}}{a_1})}-$ $-\sqrt{\frac{1}{4}(\frac{a_2}{a_1}-1)^2+(\frac{\mathrm{h}}{a_1})^2};$ $\varphi_{21}=\sqrt{\frac{1}{4}(\frac{a_1}{a_2}+1)^2+(\frac{\mathrm{h}}{a_2})^2}-$ $-\sqrt{\frac{1}{4}(\frac{a_1}{a_2}-1)^2+(\frac{\mathrm{h}}{a_2})^2};$ $\mathrm{F}_{12}=\sqrt{\frac{1}{4}(a_2+a_1)^2+(\mathrm{h})^2}-$ $-\sqrt{\frac{1}{4}(a_2-a_1)^2+(\mathrm{h})^2}.$ Поверхность F_{12} отнесена к 1 м длину полос
2. Два прямоугольника, расположенных в перпендикулярных плоскостях и не имеющих общей грани		$\mathrm{F}_{12}=\mathrm{FI}_2-\mathrm{F}_{1'2};\ \mathrm{I}=1+1';$ $\varphi_{12}=\frac{\mathrm{F}_{12}}{l_1\cdot l_2}=\varphi_{12}\frac{l_1+l_1'}{l_1}-$ $-\varphi_{1'2}\frac{l_1'}{l_1}.$
3. Два параллельных цилиндра одинакового диаметра		$\varphi_{12}=\frac{1}{\pi}(\arcsin\frac{\mathrm{D}}{\mathrm{S}}+$ $+\sqrt{\left(\frac{\mathrm{S}}{\mathrm{D}}\right)^2-1}-\frac{\mathrm{S}}{\mathrm{D}});$ $\mathrm{F}_{12}=\sqrt{\mathrm{S}^2-\mathrm{D}^2}+$ $+\mathrm{D}\arcsin\frac{\mathrm{D}}{\mathrm{S}}-\mathrm{S}.$ Поверхность F_{12} отнесена к 1м длины цилиндров

<table>
<tr><th>Взаимное расположение и форма поверхностей</th><th>Схема</th><th>Угловые коэффициенты и расчетные поверхности</th></tr>
<tr><td>4. Неограниченная плоскость и ряд труб в параллельной плоскости</td><td>  </td><td>$$\varphi_{12} = 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{D}{S}\right)^2} +$$
$$+\frac{D}{S}\operatorname{arctg}\sqrt{\left(\frac{S}{D}\right)^2 - 1}\,;$$
$$\varphi_{21} = \frac{1}{\pi}\left(\frac{S}{D} - \sqrt{\left(\frac{S}{D}\right)^2 - 1} + \right.$$
$$\left. + \operatorname{arctg}\sqrt{\left(\frac{S}{D}\right)^2 - 1}\right).$$
$F_{12} = F_{21} = \varphi_{12}S = \varphi_{21}D\pi$.
Поверхность F_{12} отнесена к одной трубе и 1 м длины трубы.</td></tr>
<tr><td>5. Неограниченная плоскость и два ряда труб в параллельных плоскостях</td><td>  </td><td>$$\varphi_{12} = 1 - (1 - \varphi'_{12})^2;$$
$$F_{12} = \varphi_{12}S;$$
φ'_{12} –угловой коэффициент для одного ряда труб.
<table><tr><td>S/D</td><td>1</td><td>1,5</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>10</td></tr><tr><td>φ_{12}</td><td>1</td><td>0,977</td><td>0,883</td><td>0,715</td><td>0,590</td><td>0,500</td><td>0,279</td></tr></table>Для n рядов труб
$$\varphi_{12} = 1 - (1 - \varphi'_{12})^n.$$</td></tr>
</table>

Научное издание

Курбатов Юрий Леонидович
Бирюков Алексей Борисович
Рубан Юлия Евгеньевна

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПЕЧИ

Учебное пособие

(на русском языке)

Корректор Дробышевская И.П.