

Б21.7  
169

3124

1675327



Министерство образования  
Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

---

Кафедра «Машины и технология обработки  
металлов давлением»

**М.В. Логачев**  
**Н.И. Иванецкий**  
**А.М. Давидович**

# **РАСЧЕТЫ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ**

**Часть 1**

**Минск 2007**

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра «Машины и технология обработки металлов давлением»

М.В. Логачев  
Н.И. Иваницкий  
Л.М. Давидович

**РАСЧЕТЫ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ**

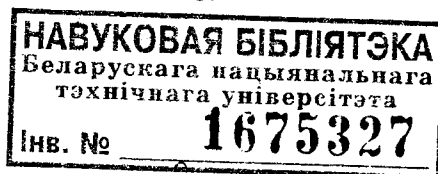
Учебно-методическое пособие  
для студентов специальностей  
1-36 01 05 «Машины и технология  
обработки материалов давлением»,  
1-36 01 02 «Материаловедение в машиностроении»

**В 3 частях**

**Часть 1**

**РАСЧЕТ ПЛАМЕННЫХ ПЕЧЕЙ**

*Рекомендовано учебно-методическим объединением  
высших учебных заведений Республики Беларусь  
по металлургическому оборудованию и технологиям*



Минск 2007

УДК 621.783.2.001.63 (075.8)

ББК 31.391я7

Л 69

Рецензенты:

чл.-корр. НАН Республики Беларусь,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой  
«Порошковая металлургия,  
сварка и технология материалов» *Ф.И. Пантелеенко*;  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Машины и технология литейного производства» *А.Н. Крутилин*

**Логачев, М.В.**

Л 69 Расчеты нагревательных устройств: учебно-метод. пособие для студентов специальностей 1-36 01 05 «Машины и технология обработки материалов давлением», 1-36 01 02 «Материаловедение в машиностроении». В 3 ч. Ч. 1. Расчет пламенных печей / М.В. Логачев, Н.И. Иваницкий, Л.М. Давидович. – Мн.: БНТУ, 2007. – 160 с.

ISBN 978-985-479-552-2 (Ч.1).

В учебно-методическом пособии рассмотрены вопросы расчета нагревательных и термических печей. Большое внимание уделено расчету горения топлива, интенсивности теплообмена в зонах рабочего пространства, расчету нагрева металла, составлению теплового баланса и определению технико-экономических показателей эффективности работы пламенных печей.

Приведены особенности расчета печей безокислительного нагрева открытым пламенем. Даны необходимые сведения о теплофизических характеристиках нагреваемого материала и других параметров, необходимых для выполнения расчетов. Приведены примеры расчета отдельных этапов проектирования.

Пособие предназначено для студентов энергетических, металлургических и машиностроительных специальностей, а также работников промышленности.

УДК 621.783.2.001.63 (075.8)

ББК 31.391я7

ISBN 978-985-479-552-2 (Ч. 1)

ISBN 978-985-479-553-9

© Логачев М.В., Иваницкий Н.И.,  
Давидович Л.М., 2007

© БНТУ, 2007

## Введение

Машиностроительные и металлургические производства имеют энергоемкие и достаточно сложные технологии, включающие в качестве основного и вспомогательного оборудования нагревательные, термические печи, печи-агрегаты, в которых осуществляется тепловая обработка различных материалов. Это создает необходимость подготовки в вузах специалистов, способных решать вопросы энергетики теплотехнологий машиностроительного и металлургического промышленного производства. Цель комплексного учебно-методического пособия «Расчеты нагревательных устройств» – оказание помощи студентам в закреплении и расширении знаний, полученных после изучения курсов «Металлургическая теплотехника», «Расчеты и конструкции нагревательных устройств», а также приобретение опыта самостоятельного решения вопросов, связанных с расчетом и проектированием нагревательных и термических печей и установок.

В 1-й части учебно-методического пособия «Расчет пламенных печей» изложены общие сведения по проектированию пламенных печей, перечень основных этапов проектирования и методические указания по их выполнению и оформлению. Во 2-й части «Расчеты электрических печей и установок» большое внимание уделяется методике расчета электрических печей, индукционных установок для нагрева металла и поверхностной закалки, соляных ванн и т.д., в 3-й части «Основы расчета и выбора механического оборудования нагревательных и термических печей» – вопросам механизации и автоматизации основных операций нагрева, расчетам основного и вспомогательного механического оборудования печей и печных установок.

При выполнении курсовой работы (проекта) студенту следует руководствоваться данным учебно-методическим пособием и выполнять изложенные в нем требования, предъявляемые в соответствии с требованиями стандарта БНГУ. Настоящее пособие не заменяет специальную литературу, используемую при проектировании.

# 1. СОДЕРЖАНИЕ, ОБЪЕМ И ОФОРМЛЕНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ (ПРОЕКТА)

Курсовую работу (проект) по проектированию нагревательных печей выполняют на основании технического задания, включающего следующие данные:

- а) характеристика нагреваемого изделия (марка материала, размеры, вес, форма и т.д.);
- б) технологический процесс, для которого предназначается печь (нагрев изделий под обработку давлением либо вид термической обработки), и основные параметры нагрева;
- в) тип и конструкция печи;
- г) источник тепловой энергии (электроэнергия, газ или мазут, его состав, марка);
- д) производительность печи;
- е) степень механизации.

Курсовая работа (проект) состоит из:

- а) пояснительной записки объемом 30–50 страниц рукописного текста с необходимыми эскизами, схемами и таблицами;
- б) графической части в объеме: для курсовой работы – 1,5–2,0 листа чертежей формата А1 ГОСТ 2.301, проекта 2–3 листа.

Пояснительная записка включает следующие разделы, представляющие собой основные этапы проектирования:

1. Обоснование выбора типа печи (если он не задан).
2. Обоснование выбора тепловой энергии (если не задан).
3. Расчет горения топлива.
4. Расчет нагрева металла.
5. Определение основных размеров печи.
6. Выбор материалов для постройки и составление расчетного эскиза печи.
7. Определение теплового баланса печи и расхода топлива.
8. Определение технико-экономических показателей тепловой работы печи.
9. Расчет форсунок, горелок, радиационных труб (в зависимости от рода топлива).
10. Расчет движения газов, определение сечения каналов и дымоходов, отводящих продукты горения.

11. Расчет теплоиспользующего устройства (регенератора или рекуператора, если печь оборудована им).

12. Выбор контрольно-измерительных и регулирующих приборов, механизация и автоматизация основных операций печного нагрева.

13. Расчет отдельных механизмов и узлов печи (механизмов подъема заслонок, транспортировки материала (изделия) по печи и т. д.).

14. Техника безопасности и охрана труда.

Ниже приводятся методические указания по выполнению основных перечисленных этапов проектирования.

Пояснительная записка начинается титульным листом, форма которого приведена в ГОСТ 2.105-95, за титульным листом следуют техническое задание на курсовую работу (проект) и содержание.

Записка пишется разборчиво на одной стороне листа размером 210x297 мм (формат А4). Оформлять ее необходимо по ГОСТ 2.105-95. Каждый лист пояснительной записки имеет основную надпись (ГОСТ 2.104). Страницы записки нумеруются. Все материалы, приводимые в записке, должны быть четко и аккуратно оформлены, произвольное сокращение слов не допускается.

Справочные данные, содержащиеся в пояснительной записке, должны иметь ссылки на использованную литературу с указанием номеров страницы, таблицы, графика, приложения. Ссылки делают в виде цифр, заключенных в квадратные скобки, согласно списку используемой литературы. В конце пояснительной записки приводится список используемой литературы.

Графическая часть курсовой работы (проекта) представляется чертежами, включающими:

1. Общий вид печи с необходимыми разрезами (продольным, поперечным), раскрывающими конструктивное исполнение печи, и план с указанием основных размеров рабочего пространства, толщины стен, свода, пода, размера рабочих окон, каналов, а также габаритных размеров печи (один лист формата А1).

2. Отдельные узлы печи, схему или приспособление (по заданию руководителя), например, механизмы вращения или выдвижения пода, подъема заслонки, толкатель, поддон и направляющие, рекуператор или регенератор, кладка отдельных узлов, схема автоматического регулирования температуры печи, работающей на газе, мазуте, схема разводки мазутопровода, газопровода, форсунка, горелка и др. (0,5–1 лист формата А1).

При оформлении чертежей необходимо выполнять все требования, предъявляемые межгосударственными стандартами. Чертежи выполняются карандашом. Каждый лист должен иметь основную надпись установленной формы (ГОСТ 2.104).

Спецификация деталей к чертежам выполняется на листах формата А4. Заполнение первого и последующих листов спецификаций должно быть выполнено по ГОСТ 2.106-96, чертежной и текстовой документации – в соответствии с «Единой системой конструкторской документации» (ЕСКД).

Различные материалы кладки печи обозначаются штриховкой, которая указывается в условных обозначениях. На чертеже общего вида приводится также краткая техническая характеристика печи.

## **2. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА ПЕЧИ**

### *2.1. Обоснование выбора типа печи*

Обычно в техническом задании на курсовую работу (проект) указывается тип печи, однако в некоторых заданиях необходимо выбрать и обосновать выбор печи самому проектанту. В этом случае учитываются особенности технологического процесса, серийность производства, характер нагрева металла (простой – в камерных печах либо методический), вид нагреваемого материала – марка, размер деталей (изделий) и форма их сечений.

Отсюда следуют общие рекомендации для выбора печи.

При единичном и мелкосерийном производстве для различного вида термической обработки деталей печь должна обладать универсальностью, так как в данном случае приходится обрабатывать большое количество деталей, разнообразных по форме, размерам, маркам стали и режимам термической обработки. В таких случаях наиболее удобными являются камерные печи периодического действия. Загрузку и выгрузку мелких деталей в этих печах обычно производят вручную. Загрузка и выгрузка крупных деталей осуществляется средствами внешней механизации (подвесные на монорельсе клещи, пневматические загрузочно-разгрузочные устройства, загрузочные машины и др.). Под этих печей часто снабжают шаровыми или роликовыми направляющими для облегчения загрузки тяжелых деталей или изделий на поддонах.

Для нагрева под ковку, прокатку прессование и термическую обработку тяжелых крупногабаритных деталей широкое распространение получили камерные печи с выдвигным подом. В них возможна загрузка и выгрузка деталей вне рабочего пространства печи. Это позволяет использовать общецеховые подъемно-транспортные средства, что в значительной степени ускоряет процесс загрузки и выгрузки и увеличивает пропускную способность печи. При нагреве заготовок ( $D > 100$  мм) для ответственных изделий целесообразно применять конструкцию камерной печи с выносной форкамерой, что исключает возможность нагрева металла непосредственно факелом.

Для нагрева длинных изделий (валы, оси, стержни, толстостенные трубы, направляющие станин) используют вертикальные печи (например, шахтные с подвесным конвейером), в которых изделия нагреваются в подвешенном положении, что обеспечивает их минимальную деформацию.

В шахтных печах можно обрабатывать и небольшие детали, размещая их на специальных приспособлениях или в корзинах. Шахтные печи также широко применяются для химико-термической обработки (газовой цементации, азотирования, газового цианирования).

Для нагрева высоколегированной стали, например, инструмента из быстрорежущей стали до высоких температур во избежание образования трещин часто рядом с высокотемпературными печами устанавливают печи для предварительного подогрева до температуры 650–850 °С.

Для нагрева деталей с предварительным подогревом целесообразнее применять двухкамерные печи, у которых одна камера служит для предварительного подогрева и нагревается за счет отходящих газов, а вторая высокотемпературная камера – для окончательного нагрева.

Для безокислительного нагрева мелких изделий с острыми кромками (фрезы, сверла, метчики и др.) применяются печи-ванны. В зависимости от процесса термической обработки и требуемой температуры детали в печах-ваннах нагревают в различных жидких средах.

Крупносерийное и массовое производство характеризуется обработкой большого количества однотипных, одинаково обрабатываемых деталей разных марок стали, различного профиля и размера. В данных условиях открываются большие возможности для применения



различных конструкций печей непрерывного действия (камерных и методических – толкательных, карусельных, конвейерных, барабанных, печей с пульсирующим подом и т.д.).

В толкательных печах передвижение деталей осуществляется толкателем. Мелкие детали и детали сложной формы загружают на поддоны. Поддоны (или детали) перемещаются по направляющим балкам или охлаждаемым водой трубам, уложенным на поду печи. Толкательные печи широко применяют для различных видов термической и химико-термической обработки.

Для передвижения изделий цилиндрической формы под действием силы тяжести целесообразно применять печи с наклонным подом.

Для различных видов термической обработки мелких и средних деталей из стали и цветных металлов широко используют конвейерные печи, в которых детали передвигаются конвейером.

При недостаточной площади цеха целесообразно применение карусельных печей с вращающимся подом (тарельчатым или кольцевым).

Для нагрева мелких цилиндрических или сферических деталей (роликов, шариков и др.) применяют барабанные печи, представляющие собой цилиндрический муфель, вращающийся вокруг горизонтальной оси.

Печи с пульсирующим подом применяют для термической обработки мелких деталей. Передвижение деталей производится по вибрирующей подине, которая выполняется в виде лотка, трубы, муфеля. Периодическое встряхивание осуществляется кулачковым или другим механизмом пульсации.

Особо следует отметить печи камерные механизированные. Эти печи периодического действия, обладая необходимой для мелкосерийного производства универсальностью, отличаются также полностью механизированным перемещением обрабатываемых изделий при автоматизированном управлении производственным циклом, что обуславливает их эффективное применение в крупносерийном производстве.

Классификация заготовок и рекомендации по выбору нагревательного оборудования в зависимости от характеристики заготовок, вида формообразования и типа производства представлена в табл. 2.1.

Приведенные рекомендации по выбору типа печи, конечно, не являются исчерпывающими. Для более подробного изучения данного вопроса следует обратиться к специальной технической литературе [1–4].

### Классификация заготовок для штамповки и выбор нагревательного оборудования

Область применения (группа заготовок)	Вид формообразования	Тип печи* в зависимости от типа производства				
		Единичное	Мелкосерийное	Среднесерийное	Крупносерийное	Массовое
		3	4	5	6	7
1	2	3	4	5	6	7
Однократный нагрев одного конца (изготовление деталей вагонов, автомобилей и т. д.)	Высадка на горизонтально-ковочных машинах (ГКМ), а также гибка на ГКМ и специальных машинах	-	1, 2, 3, 5, 6	1, 2, 3, 5, 6	4, 5, 7, 8	8, 5, 7
	Свободная ковка	2, 3	2, 3	-	-	-
	Высадка на ГКМ, а также изготовление поковок на ГКМ и других специальных машинах	-	1, 2, 3, 5	1, 2, 3, 5	1, 2, 3, 5	-
	Свободная ковка	2, 3	2, 3	-	-	-
Многократный нагрев одного конца (штамповка колец подшипников)	Высадка на ГКМ, штамповка на специмашинах	-	1, 2, 3, 5, 6	8, 1, 2, 3, 5, 6	8, 1, 3, 2, 5, 6	8, 1, 2, 3, 5, 6
	Свободная ковка	2, 3	2, 3	-	-	-

1	2	3	4	5	6	7
Однократный нагрев обожженных концов (ресорсы и другие автомобильные детали)	Высадка, гибка, прошивка и т. д.	1, 2, 3	1, 2, 3	8, 1, 2, 3, 4, 6, 7	8, 1, 2, 3, 4, 6, 7	8, 1, 2, 3, 4, 6, 7
Нагрев средней части заготовки	То же	2, 3	2, 3	2, 3, 4, 6, 7	2, 3, 4, 6, 7	2, 3, 4, 6, 7
	Гибка на ГKM, штамповка на специальном оборудовании	-	2, 3, 7	2, 3, 7	2, 3, 7	2, 3, 7
	То же	-	2, 3, 7	2, 3, 7	2, 3, 7	2, 3, 7
Нагрев заготовки целиком (основной тип заготовок для кузнечных цехов)	Штамповка на молотах и прессах	-	3, 4, 9, 10	3, 4, 6, 7, 9, 10	3, 4, 6, 7, 9, 10	8, 3, 4, 6, 7, 9, 10
	Штамповка на молотах и прессах	-	-	-	4, 7, 10	4, 7, 10
	Штамповка на вочных автоматах	-	-	-	8, 10	8, 10

\*1. Пламенные (с открытым пламенем) печи очкового типа. 2. Пламенные целевые печи. 3. Пламенные камерные печи. 4. Пламенные печи проходного типа. 5. Камерные печи скоростного безокислительного нагрева с кипящим слоем дисперсного теплоносителя. 6. Камерные печи скоростного нагрева с радиационными горелками или излучателями на основе пористой керамики. 7. Проходные печи скоростного нагрева. 8. Индукционные нагреватели. 9. Пламенные печи с вращающимся подом. 10. Проходные печи безокислительного нагрева.

## **2.2. Обоснование выбора источника тепловой энергии**

Вид источника тепловой энергии (энергоносителя) определяется на стадии проектного задания. В настоящее время в качестве основного служит топливно-воздушный энергоноситель (реже топливно-кислородный), а также электрическая энергия. Причем в пламенных печах применяют преимущественно газообразное топливо (генераторный, природный и другие газы), реже – жидкое (мазут). Твердое топливо используется только для получения генераторного газа.

Выбор источника тепловой энергии зависит от предъявляемых технологических и экономических требований.

В большинстве случаев затраты на нагрев или термообработку в электрических печах выше, чем в пламенных главным образом из-за более высокой стоимости источника тепла и оборудования. В то же время электронагрев широко применяют при термической и химико-термической обработке, а также в кузнечном производстве. В пользу электронагрева можно привести следующие доводы:

1. Легкость регулирования количества выделяемой энергии.
2. Исключение влияния источника тепла на химический состав среды, где происходит нагрев.
3. Возможность обеспечения максимальной точности и воспроизводимости процесса и стабильности качественных результатов обработки.
4. Гигиеничность и безопасность.
5. Высокое качество нагрева и, следовательно, меньший объем смежных операций, включая правку после термообработки, благодаря равномерности температуры в рабочем пространстве, точности и стабильности температурного режима.
6. Универсальность при получении и применении (для освещения, использования в двигателях, нагревательных, химических и других процессах).

Следует также иметь в виду, что электрические печи имеют меньшие размеры и больший КПД (30–70 %) по сравнению с пламенными (12–25 %) и легко включаются и выключаются, что позволяет устанавливать их в любом месте цеха.

Все перечисленные выше преимущества электроэнергии как источника получения тепла служат доказательством того, что электропечи

и установки для нагрева, термической и химико-термической обработки следует считать прогрессивным и развивающимся видом оборудования.

В то же время имеет место тенденция роста парка пламенных (особенно газовых) печей и повышение их удельного веса. Это обусловливается следующим:

1. Газ – дешевое топливо.
2. Обслуживание газовых печей более простое и дешевое.
3. Более низкие затраты на ремонт.
4. Качество нагрева не уступает электрическому.
5. Более высокая скорость нагрева и производительность по сравнению с электропечами сопротивления.
6. Применение более дешевых огнеупоров.

В ряде случаев эти доводы являются решающими, и тогда, безусловно, применение газовых печей экономически целесообразно. Но абсолютизировать вышеуказанные преимущества газового нагрева, так же как и электрического нельзя. Вопрос о выборе источника получения тепла предельно конкретен, и его решение зависит от:

- а) топливно-энергетического баланса района расположения завода;
- б) типа и объема производства и характера производственного процесса;
- в) требований к качеству нагрева (термообработки);
- г) марок нагреваемых материалов и других факторов.

Не следует, однако, забывать, что важным критерием для выбора источника тепла для каждого отдельного процесса должно быть наименьшее число затрат на единицу продукции. Расчет себестоимости нагрева и термической обработки приведен в литературе [1, 5, 6].

### **3. РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА**

Расчет горения топлива сводится к определению:

- а) теплотворности топлива (низшей теплоты сгорания);
- б) теоретически и фактически необходимого количества воздуха для сжигания единицы топлива;
- в) количества, состава и плотности продуктов горения, образующихся при сгорании единицы топлива;
- г) температуры горения топлива.

Расчет горения топлива производится по рабочей массе топлива, поэтому заданный **состав жидкого топлива** (табл. 3.1) пересчитывается на рабочую массу. Это выполняется умножением процентного содержания компонентов заданного состава на коэффициент, значения которого рассчитывают по формулам, приведенным в табл. 3.2.

Таблица 3.1

**Характеристика искусственных видов жидкого топлива**

Виды и марки топлива	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Горючая масса				Рабочее топливо			
		C <sup>r</sup> , %	H <sup>r</sup> , %	S <sup>r</sup> , %	(O+N) <sup>r</sup> , %	Q <sub>H</sub> <sup>r</sup> , кДж/кг	A <sup>p</sup> , %	W <sup>p</sup> , %	Q <sub>H</sub> <sup>p</sup> , кДж/кг
Мазут марки 20	940 – 970	87,2	11,7	0,5	0,6	41 323	0,1	2,0	40 402
Мазут марки 40	950 – 990	87,4	11,2	0,5	0,9	40 821	0,1	2,0	39 899
Мазут марки 60	980 – 1000	87,6	10,7	0,7	1,0	40 612	0,2	3,0	39 355
Мазут марок 80 и 100	990 – 1000	87,6	10,6	0,7 – 1,0	1,0	40 486 – 40 360	0,2	3,0	39 146
Мазут высокосернистый марок 20 и 40	920 – 970	85,0	11,8	2,3 (1,3 – 4,0)	0,9	40 779	0,15	2,0	35 857

Таблица 3.2

**Формулы для определения состава топлива на заданную массу**

Заданный состав топлива	Состав топлива, на который ведется пересчет			
	Органическая масса, о	Горючая масса, г	Сухая масса, с	Рабочая масса, р
1	2	3	4	5
Органическая масса, о	1	$\frac{100 - S^r}{100}$	$\frac{100 - (S^c + A^c)}{100}$	$\frac{100 - (S^p + A^p + W^p)}{100}$
Горючая масса, г	$\frac{100}{100 - S^r}$	1	$\frac{100 - A^c}{100}$	$\frac{100 - (A^p + W^p)}{100}$

1	2	3	4	5
Сухая масса, с	$\frac{100}{100 - (S^c + A^c)}$	$\frac{100}{100 - A^c}$	1	$\frac{100 - W^p}{100}$
Рабочая масса, р	$\frac{100}{100 - (S^p + A^p + W^p)}$	$\frac{100}{100 - (A^p + W^p)}$	$\frac{100}{100 - W^p}$	1

**Пример 1.** Необходимо пересчитать на рабочую массу заданный состав мазута, %:  $85 C^r$ ,  $11,8 H^r$ ,  $0,2 O^r$ ,  $0,7 N^r$ ,  $2,3 S^r$ ,  $0,3 A^c$ ,  $10 W^p$ . Коэффициент  $k_1$  для пересчета с горючей массы на рабочую определяется по формуле

$$k_1 = \frac{100 - (A^p + W^p)}{100},$$

где  $A^p$  – содержание золы в рабочей массе, %;

$W^p$  – содержание влаги в рабочей массе мазута, %.

Для определения содержания золы в рабочей массе воспользуемся коэффициентом  $k_2$  для пересчета сухой массы в рабочую

$$k_2 = \frac{100 - W^p}{100}.$$

Содержание золы в рабочей массе мазута равно

$$A^p = A^c \cdot k_2 = 0,3 \cdot \frac{100 - 10}{100} = 0,3 \cdot 0,9 = 0,27 \text{ \%}.$$

Значение коэффициента  $k_1$  равно

$$k_1 = \frac{100 - (0,27 + 10)}{100} = 0,897.$$

Тогда составляющие мазута, пересчитанные на рабочую массу, будут равны

$$C^P = 85 \cdot 0,897 \approx 76,2 \text{ \%};$$

$$H^P = 11,8 \cdot 0,897 \approx 10,6 \text{ \%};$$

$$O^P = 0,2 \cdot 0,897 \approx 0,18 \text{ \%};$$

$$N^P = 0,7 \cdot 0,897 \approx 0,63 \text{ \%};$$

$$S^P = 2,3 \cdot 0,897 \approx 2,07 \text{ \%}.$$

Для пересчета элементарного состава при изменении влажности с  $W_1^P$  на  $W_2^P$  можно воспользоваться выражением

$$X_2^P = X_1^P \frac{100 - W_2^P}{100 - W_1^P}.$$

**Состав влажного газа** (рабочая масса газообразного топлива) (табл. 3.3) определяется умножением соответствующих компонентов сухого газа на коэффициент перерасчета, который определяется из следующего выражения:

$$k = \frac{100 - H_2O}{100}, \quad H_2O = \frac{100 W^c}{803,6 + W^c},$$

где  $H_2O$  – содержание влаги в газе по объему, %;

$W^c$  – содержание водяных паров в сухом газе, г/м<sup>3</sup>;

803,6 – плотность водяных паров при нормальных физических условиях, г/м<sup>3</sup>.

Содержание влаги в сухом газе принимается по температуре насыщения (табл. 3.4).



Примерный состав сухих природных газов различных месторождений

Месторождение	Объемный состав, %										Относительная масса (по отношению к воздуху)	Низшая теплота сгорания $Q_{н}^*$ , кДж/м <sup>3</sup>
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>m</sub> H <sub>n</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	N <sub>2</sub>				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
Елшанское (Саратовская обл.)	93,2	0,7	0,6	0,6	0,5	-	следы	4,4	0,60	35 169		
Курдюмовское (Саратовская обл.)	92,2	0,8	-	1,0	-	-	-	6,0	0,59	34 332		
Бугурусланское	77,8	4,4	1,7	0,8	0,6	0,2	1,0	13,5	0,69	34 122		
Газалинское (Бухара-Урал)	94,16	2,49	0,38	0,24	-	0,13	-	2,6	-	-		
Краснодарское	90,8	5,4	1,2	0,3	0,7	0,6	-	1,0	-	-		
Мирненское (Ставропольский край)	83,05	9,13	1,42	0,54	0,46	4,09	-	1,31	-	-		
Игримско-Березовское	94,66	1,81	0,41	0,17	0,1	0,57	*1)	2,26	-	-		
Карадагский газ	96,6	2,9	0,5	-	-	-	-	-	-	-		
Усть-Вилейское	94,8	2,3	0,9	0,5	0,3	0,2	-	1,0	-	-		
Медвежье	98,5	0,08	0,003	0,001	-	0,1	*2)	1,3	-	-		
Северо-Сахалинские	90,4	1,9	1,1	0,6	0,2	4,7	-	1,1	-	-		
Оренбургское	85,78	4,84	1,48	0,586	0,452	0,581	1,267	4,95*3)	-	-		
Мелитопольское	98,0	-	-	-	-	0,2	-	1,8	0,57	35 378		
Ухтинское	88,0	1,9	0,2	0,3	-	0,3	-	9,3	0,61	31 610		
Тульское (Краснодарский край)	97,8	0,4	-	0,3	-	0,2	следы	1,3	0,58	35 588		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Мельниково (Саратовская обл.):										
Западное поле	55,0	-	-	-	-	0,2	следы	44,8	0,72	19 887
Восточное поле	88,0	0,2	-	-	-	0,1	следы	11,7	0,62	31 401
Ставрополь Кавказский:										
Северное поле	97,7	-	-	-	-	0,7	-	1,6	0,57	35 169
Южное поле	60,0	-	-	-	-	-	-	40,0	0,70	21 771
Западная Украина:										
Калуш	95,7	-	-	-	-	0,1	-	4,2	0,58	34 332
Дашава	97,8	0,5	0,2	0,1	0,05	0,05	-	1,3	0,57	36 006
Косов	75,7	21,3	1,4	1,6	-	-	-	-	0,68	42 705

\*1) - 0,02 Н<sub>2</sub>  
 \*2) - 0,02 Не  
 \*3) - 0,06 Не

**НАВУКОВАЯ БІБЛІЯТЭКА**  
 Беларускага нацыянальнага  
 тэхнічнага ўніверсітэта

ІНВ. № **1675327**

**Влагосодержание воздуха  
при давлении 101,325 кН/м<sup>2</sup>**

Температура, °С	Влагосодержание			
	на 1 м <sup>3</sup> сухого газа		на 1 м <sup>3</sup> влажной смеси	
	г/м <sup>3</sup>	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	г/м <sup>3</sup>	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>
0	4,8	0,0060	4,8	0,0060
5	7,0	0,0087	6,9	0,0086
10	9,8	0,0122	9,7	0,0121
15	13,7	0,0170	13,5	0,0168
20	18,9	0,0235	18,5	0,0230
25	26,0	0,0323	25,2	0,0313
30	35,1	0,0436	33,6	0,0418
35	47,3	0,0587	44,6	0,0555
40	63,1	0,0785	58,5	0,0726
45	84,0	0,1043	76,0	0,0945
50	111,4	0,1385	97,9	0,1218
55	148,0	0,184	125,0	0,155
60	196,0	0,244	158,0	0,195
65	265,0	0,330	199,0	0,248
70	361,0	0,449	249,0	0,316
75	499,0	0,629	308,0	0,383
80	716,0	0,891	379,0	0,471
85	1092,0	1,358	463,0	0,576
90	1871,0	2,334	563,0	0,700
95	4381,0	5,450	679,0	0,845
100	—	—	816,0	1,000

Пересчет состава сухого газа на влажный можно производить исходя из следующих соображений:

1 кмоль пара составляет 18 кг и занимает объем 22,4 м<sup>3</sup>, следовательно, 1 кг водяного пара занимает объем

$$V = \frac{22,4}{18} = 1,242 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Количество водяного пара  $W^c$  будет занимать объем, равный  $\frac{1,242 \cdot W^c}{1000}$ , и в перерасчете на 100 м<sup>3</sup> газа объем содержащегося пара составляет

$$\frac{100 \cdot 0,1242}{1000} W^c = 0,1242 W^c.$$

Исходя из этого состав влажного газа можно получить следующим образом:

$$X^{\text{вл}} = X^{\text{сух}} \frac{100}{100 + 0,1242 W^c},$$

где  $X^{\text{вл}}$  – содержание какого-либо компонента во влажном газе, %.

$X^{\text{сух}}$  – содержание какого-либо компонента в сухом газе, %;

Содержание влаги в газе по объему

$$H_2O^{\text{вл}} = \frac{0,1242 W^c \cdot 100}{100 + 0,1242 W^c}, \%$$

В некоторых случаях сжигается смесь газов известного состава, причем теплота сгорания смеси задана. В этом случае состав смеси находится по формуле

$$X^{\text{см}} = X^I \cdot a + X^{II} (1 - a),$$

где  $X^{\text{см}}$  – содержание компонента в смеси, %;

$X^I$  – содержание компонента в первом газе, %;

$a$  – доля первого газа в смеси;

$X^{II}$  – содержание компонента во втором газе, %.

Доля первого газа в смеси находится следующим образом:

$$a = \frac{Q_H^{p//} - Q_H^{pсм}}{Q_H^{p//} - Q_H^{p/}},$$

где  $Q_H^{p//}$ ,  $Q_H^{pсм}$ ,  $Q_H^{p/}$  – соответственно низшие теплоты сгорания смеси, первого и второго газов.

Часто этилен ( $C_2H_4$ ), ацетилен, а также другие непредельные углеводороды, входящие в состав газообразного топлива, обозначают общей формулой  $C_mH_n$ .

В состав горючего газа входят углеводороды метанового ряда с формулой  $C_mH_{2m+2}$ . Они находятся в перегретом состоянии, поэтому к ним можно применить законы идеальных газов.

Молекулярная масса любого углеводорода метанового ряда

$$M = 14m + 2,$$

где  $m$  – число атомов углерода в одной молекуле углеводорода.

Тогда плотность газа метанового ряда

$$\rho_0 = \frac{M}{22,4} = 0,624m + 0,089, \text{ кг/м}^3.$$

Теплота сгорания топлива  $Q_H^P = 27\,628m + 8163$ , кДж/м<sup>3</sup>.

Углеродное число  $m$  является характеристикой, определяющей его основные свойства.

Углеродное число рабочего состава природного газа можно определить по выражению

$$m = \frac{CH_4 + 2C_2H_6 + 3C_3H_8 + \dots}{100 - CO_2 - N_2},$$

где  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_3H_8$  – процентное содержание компонентов природного газа.

**Пример 2.** Необходимо определить состав влажного газа. Сухой природный газ состоит из, %: 89,9  $CH_4$ , 3,1  $C_2H_6$ , 1,3  $C_3H_8$ , 5,7  $N_2$ . Температура газов 40 °С, в сухом газе содержится влаги  $W^c = 63,1$  г/м<sup>3</sup>.

Содержание влаги в газе по объему определяется:

$$H_2O = \frac{100 W^c}{803,6 + W^c} = \frac{100 \cdot 63,1}{803,6 + 63,1} = \frac{6310}{866,7} = 7,28 \% .$$

Коэффициент пересчета сухой массы газа во влажную равен

$$k = \frac{100 - H_2O}{100} = \frac{100 - 7,28}{100} = 0,9272.$$

Во влажном газе содержатся следующие составляющие:

$$CH_4^p = 89,9 \cdot 0,9272 = 83,3 \%;$$

$$C_2H_6^p = 3,1 \cdot 0,9272 = 2,9 \%;$$

$$C_3H_8^p = 1,3 \cdot 0,9272 = 1,2 \%;$$

$$N_2^p = 5,7 \cdot 0,9272 = 5,3 \%.$$

### 3.1. Определение теплотворной способности топлива ( $Q_H^p$ )

осуществляют на основании его химического состава и рассчитывают на  $1 \text{ м}^3$  для газообразного топлива или на  $1 \text{ кг}$  жидкого топлива. Расчет ведется на базе данных о тепловых эффектах реакции окисления горючих составляющих топлива [7, 8, 9]. Для определения теплотворной способности топлива также можно использовать эмпирические формулы (для приближенных расчетов). Так, для жидкого топлива достаточно точные результаты дает формула Д.И. Менделеева

$$Q_H^p = 339,1 \cdot C^p + 1256 \cdot H^p + 108,8 \cdot (S^p - O^p) - 25(9 \cdot H^p + W^p) = \\ = 339,1 \cdot C^p + 1030H^p + 108,8 \cdot (S^p - O^p) - 25W^p, \text{ кДж / кг.}$$

Для газообразного топлива

$$Q_H^p = 126,4 \cdot CO + 107,8 \cdot H_2 + 358,5 \cdot CH_4 + \\ + 234 \cdot H_2S + \sum Q \frac{C_m H_n}{100}, \text{ кДж/м}^3,$$

где  $C^p$ ,  $H^p$ ,  $CO$ ,  $H_2$  и т.д. – процентное содержание соответствующих компонентов в топливе, %.

$\sum Q \frac{C_m H_n}{100}$  – сумма произведений теплот сгорания непредельных углеводородов ( $Q$ ) (табл. 3.5) на их процентное содержание в газе ( $C_m H_n$ ).

Тепловые эффекты реакций горения углеводородов

Наименование	Уравнение реакций	H <sub>2</sub> O (пар)			H <sub>2</sub> O (жидкость) кДж/моль
		кДж/м <sup>3</sup>	кДж/моль	кДж/кг	
1	2	3	4	5	6
Метан	CH <sub>4</sub> + 2O <sub>2</sub> = CO <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O	35 818	803 112	50 062	891 202
Этан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> + 3,5O <sub>2</sub> = 2CO <sub>2</sub> + 3H <sub>2</sub> O	63 748	1 429 290	47 533	1 561 425
n-Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> + 5O <sub>2</sub> = 3CO <sub>2</sub> + 4H <sub>2</sub> O	91 255	2 046 047	46 402	2 222 186
n-Бутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> + 6,5O <sub>2</sub> = 4CO <sub>2</sub> + 5H <sub>2</sub> O	118 646	2 660 083	45 770	2 880 309
n-Пентан	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> + 8O <sub>2</sub> = 5CO <sub>2</sub> + 6H <sub>2</sub> O	146 077	—	—	—
Бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> + 7,5O <sub>2</sub> = 6CO <sub>2</sub> + 3H <sub>2</sub> O	140 375	3 147 008	40 294	3 279 144
Метилбензол	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> + 9O <sub>2</sub> = 7CO <sub>2</sub> + 4H <sub>2</sub> O	168 393	—	—	—
Этилбензол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> + 10,5O <sub>2</sub> = 8CO <sub>2</sub> + 5H <sub>2</sub> O	195 850	—	—	—
Пропилбензол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> + 12O <sub>2</sub> = 9CO <sub>2</sub> + 6H <sub>2</sub> O	223 232	—	—	—
Этилен	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> + 3O <sub>2</sub> = 2CO <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O	59 063	1 324 096	47 202	1 412 166
Пропилен	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> + 4,5O <sub>2</sub> = 3CO <sub>2</sub> + 3H <sub>2</sub> O	86 001	—	—	—
Бутилен	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> + 6O <sub>2</sub> = 4CO <sub>2</sub> + 4H <sub>2</sub> O	113 508	2 544 695	45 356	2 720 876
Пентилен	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> + 7,5O <sub>2</sub> = 5CO <sub>2</sub> + 5H <sub>2</sub> O	140 885	—	—	—
Ацетилен	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> + 2,5O <sub>2</sub> = 2CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	56 053	1 256 207	48 249	1 300 253
Метилацетилен	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> + 4O <sub>2</sub> = 3CO <sub>2</sub> + 3H <sub>2</sub> O	100 140	—	—	—
Этилацетилен	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> + 5,5O <sub>2</sub> = 4CO <sub>2</sub> + 3H <sub>2</sub> O	110 075	—	—	—
Пентин	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> + 7O <sub>2</sub> = 5CO <sub>2</sub> + 4H <sub>2</sub> O	137 390	—	—	—



1	2	3	4	5	6
Циклопентан	$C_5H_{10} + 7,5O_2 = 5CO_2 + 5H_2O$	138 374	-	-	-
Метициклопентан	$C_6H_{12} + 9O_2 = 6CO_2 + 6H_2O$	165 420	-	-	-
Пропициклопентан	$C_8H_{16} + 12O_2 = 8CO_2 + 8H_2O$	220 301	-	-	-
Циклогексан	$C_6H_{12} + 9O_2 = 6CO_2 + 6H_2O$	164 688	-	-	-
Метициклогексан	$C_7H_{14} + 10,5O_2 = 7CO_2 + 7H_2O$	191 638	-	-	-
Этициклогексан	$C_8H_{16} + 12O_2 = 8CO_2 + 8H_2O$	219 242	-	-	-
Пропициклогексан	$C_9H_{18} + 13,5O_2 = 9CO_2 + 9H_2O$	246 644	-	-	-

При содержании в топливе небольшого количества (до 3 %) непредельных углеводородов неизвестного состава их принимают как состоящие из этилена ( $C_2H_4$ ) с теплотой сгорания, равной  $596 \text{ кДж/м}^3$ , тогда

$$\sum Q \frac{C_m H_n}{100} = 596 C_m H_n, \text{ кДж/м}^3.$$

В случае содержания в газообразном топливе значительного количества непредельных углеводородов теплота сгорания  $Q_H^P$  определяется по формуле

$$Q_H^P = 126,4 \cdot CO + 107,8 \cdot H_2 + 358 \cdot CH_4 + 590 \cdot C_2H_4 + 637 \cdot C_2H_6 + \\ + 912 \cdot C_3H_8 + 1185 \cdot C_4H_{10} + 234 \cdot H_2S + 1403 \cdot C_6H_6.$$

**Пример 3.** Необходимо вычислить теплоту сгорания мазута, имеющего следующий состав, %:  $76,2 C^P$ ,  $10,6 H^P$ ,  $0,2 O^P$ ,  $0,6 N^P$ ,  $2,1 S^P$ ,  $10 W^P$ .

$$Q_H^P = 339 \cdot C^P + 1030 \cdot H^P - 109 \cdot (O^P - S^P) - 25 \cdot W^P = \\ = 339 \cdot 76,2 + 1030 \cdot 10,6 - 109 \cdot (0,2 - 2,1) - 25 \cdot 10 = 36\,707 \text{ кДж/кг}.$$

**Пример 4.** Вычислите теплоту сгорания природного газа, состоящего из, %:  $89,9 CH_4$ ,  $3,1 C_2H_6$ ,  $0,9 C_3H_8$ ,  $0,4 C_4H_{10}$ ,  $0,3 CO_2$ ,  $0,2 O_2$ ,  $5,2 N_2$ . В топливе отсутствуют оксид углерода, водорода и другие горючие составляющие, поэтому формула имеет следующий вид:

$$Q_H^P = 358 \cdot CH_4 + 637 \cdot C_2H_6 + 912 \cdot C_3H_8 + 1185 \cdot C_4H_{10} = \\ = 358 \cdot 89,9 + 637 \cdot 3,1 + 912 \cdot 0,9 + 1185 \cdot 0,4 = 35\,466 \text{ кДж/м}^3.$$

**3.2. Определение теоретического количества воздуха** для полного сжигания единицы твердого, жидкого и газообразного топлива следует осуществлять методом молекулярных объемов или по объемным количествам, которые основаны на соотношениях реакций горения и дают наиболее точные результаты [9, 10]. Для этого состав топлива, данный в процентах, переводится в молекулярные объемы (делением на молекулярный вес соответствующих компонентов топлива).

Определение теоретически необходимого воздуха начинается расчетом количества кислорода для полного сжигания горючих составляющих топлива по формулам реакций окисления. По найденному количеству кислорода определяем количество поступающего с ним в печь азота исходя из соотношения их в воздухе (по объему):

$$\frac{N_2}{O_2} = \frac{79}{21} = 3,762 .$$

Далее по сумме  $O_2$  и  $N_2$  находится теоретическое количество необходимого для сгорания сухого воздуха.

Для определения действительно необходимого количества воздуха для полного сжигания топлива необходимо в зависимости от вида топлива, конструкции топливосжигающего устройства и температуры подогрева воздуха выбрать значение коэффициента избытка воздуха (табл. 3.6). Тогда  $L_d = \alpha_v \cdot L_T$ .

Таблица 3.6

### Значение коэффициента избытка воздуха

Вид топлива	Топливосжигающие устройства	Коэффициент избытка воздуха, $\alpha_v$
Твердое топливо	Горизонтальная колосниковая решетка	1,4–1,7
	Полугазовая топка	1,3–1,6
Жидкое топливо	Форсунка	1,15–1,35
Газообразное топливо	Горелка частичного и внешнего смешения	1,05–1,2
	Горелка внутреннего смешения	1,01–1,05

Расчет ведется в молекулярных объемах. Результаты же выражают в метрах кубических ( $\text{м}^3$ ) на одну единицу топлива.

Так как в воздухе, поступающем в печь, обычно содержится некоторое количество влаги, необходимо вычислить объем влаги воздуха, а затем уже с поправкой на влагу определить действительно необходимое количество воздуха.

**3.3. Определение состава и количества продуктов полного горения топлива**  $V_d$  осуществляется также исходя из стехиометрических соотношений реакций горения соответствующих компонентов топлива с учетом коэффициента избытка воздуха. Затем определяется процентный состав продуктов горения.

$$\text{CO}_2 = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_d} \cdot 100 \% \text{ и т. д.}$$

Результаты расчета состава продуктов горения должны быть сведены в таблицу.

Плотность продуктов полного горения определяется по формуле

$$\rho = \frac{44 \cdot \text{CO}_2 + 18 \cdot \text{H}_2\text{O} + 64 \cdot \text{SO}_2 + 32 \text{O}_2 + 28 \text{N}_2}{22,4 \cdot 100}, \text{ кг/м}^3,$$

где  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и т.д. – содержание соответствующих газов в продуктах горения, %.

Расчеты проверяют составлением материального баланса процесса горения, в приходной части которого указывается вес топлива, воздуха и влаги, а в расходной части – вес продуктов горения.

Для определения объема воздуха и продуктов полного горения можно пользоваться расчетными формулами, приведенными в табл. 3.7.

### Расчетные формулы для определения объемов воздуха и продуктов полного сгорания

Определяемые величины	Для жидкого топлива	Для газообразного топлива
Теоретически необходимое количество воздуха	$L_T = [0,0889(C^P + 0,375S^P) + 0,265H^P - 0,0333O^P] \times (1 + 0,00124d_b), \text{ м}^3/\text{кг}$	$L_T = 0,0476 [0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + 2CH_4 + \sum (m + \frac{n}{4}) C_m H_n - O_2] \times (1 + 0,00124d_b), \text{ м}^3/\text{м}^3$
Действительное количество воздуха	$L_d = \alpha_b \cdot L_T$	
Количество продуктов полного сгорания	$V_{CO_2} = 0,0187C^P, \text{ м}^3/\text{кг}$ $V_{H_2O} = 0,112H^P + 0,0124W^P + 0,00124L_d d_b, \text{ м}^3/\text{кг}$ $V_{SO_2} = 0,007S^P, \text{ м}^3/\text{кг}$ $V_{O_2} = 0,21(\alpha_b - 1)L_T, \text{ м}^3/\text{кг}$ $V_{N_2} = 0,008N^P + 0,79L_d, \text{ м}^3/\text{кг}$	$V_{CO_2} = (CO + CO_2 + CH_4 + \sum m C_m H_n) \cdot 0,01, \text{ м}^3/\text{м}^3$ $V_{H_2O} = (H_2 + H_2S + 2CH_4 + \sum \frac{n}{2} C_m H_n + H_2O + 0,124L_d d_b) \cdot 0,01$ $V_{SO_2} = 0,01H_2S, \text{ м}^3/\text{м}^3$ $V_{O_2} = 0,21(\alpha_b - 1)L_T, \text{ м}^3/\text{м}^3$ $V_{N_2} = (N_2 + 79L_d) \cdot 0,01, \text{ м}^3/\text{м}^3$
	$V_d = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2} + V_{O_2} + V_{N_2}$	
Процентный состав продуктов сгорания	$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_d} \cdot 100\% \text{ и т. д.}$	

В этих формулах:

$C^P, H^P \dots, CO, H_2 \dots$  – содержание соответствующих компонентов в рабочем топливе, %;

$\alpha_b$  – коэффициент избытка воздуха;

$d_b$  – влагосодержание сухого воздуха,  $\text{г}/\text{м}^3$ .

Обычно в расчетах  $d_b$  принимается равным  $10 \text{ г}/\text{м}^3$  или подсчитывается как произведение относительной влажности для данных атмосферных условий на влагосодержание, соответствующее температуре насыщения.

Для ускоренных расчетов объемов воздуха и продуктов полного горения (только в качестве контроля точности расчетов по реакциям горения) можно использовать приближенные эмпирические формулы, выражающие зависимость между величиной низшей теплотворности  $Q_H^P$ , количеством воздуха  $L_T$  и действительным количеством продуктов горения  $V_d$  [7, 9, 10].

При обогащении дутья кислородом для определения теоретически необходимого количества воздуха значения  $L_T$  умножают на коэффициент  $\frac{21}{c}$ , где  $c$  – объемная концентрация кислорода в дутье.

Как уже отмечалось, основой полного горения топлива в воздухе или в дутье, обогащенном кислородом, являются стехиометрические реакции. Например, для метана  $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$ .

Из реакции видно, что для сжигания 1 моля  $CH_4$  требуется 2 моля  $O_2$  и продукты горения будут состоять из 1 моля  $CO_2$  и 2 молей  $H_2O$ . Поскольку моль любого газа занимает один и тот же объем, то вместо молей можно подставить кубические метры.

Если сжигание происходит в воздухе, то с каждым  $1\text{ м}^3$  кислорода ( $O_2$ ) воздуха поступает  $3,762\text{ м}^3$  азота ( $N_2$ ). Таким образом, для сжигания  $1\text{ м}^3$  метана ( $CH_4$ ) требуется  $2 + 2 \cdot 3,762 = 9,524\text{ м}^3$  воздуха, а продукты горения будут состоять из  $1\text{ м}^3$  двуокиси углерода ( $CO_2$ ),  $2\text{ м}^3$  водяного пара ( $H_2O$ ) и  $7,524\text{ м}^3$  азота ( $N_2$ ).

Если газ имеет более сложный состав, то стехиометрические реакции составляются так же для всех горючих элементов, и результаты подсчетов суммируются по кислороду и азоту воздуха и компонентам продуктов горения.

Для жидкого топлива аналогичный расчет проводится в единицах массы.

Расчет горения ведется на  $100\text{ кг}$  жидкого топлива или на  $100\text{ м}^3$  газообразного. Результаты расчетов удобно представить в виде таблиц, как это показано в примерах расчета горения топлива, приведенных ниже.

### 3.4. Определение температур горения

Калориметрическую температуру горения определяют по формуле

$$t_k = \frac{Q_H^p + q_{\phi} - q_H}{V_d \cdot c_0^{t_k}}, \quad ^\circ\text{C} \quad \text{или} \quad t_k = \frac{Q_H^p + q_{\phi} - q_H}{\sum_{i=1}^n V_i \cdot c_i^{t_k}}, \quad ^\circ\text{C},$$

где  $q_{\phi}$  – физическое тепло, вносимое с подогретым воздухом и газом,  $\text{кДж/м}^3$  или  $\text{кДж/кг}$  топлива;

$q_H$  – потери тепла от недожога топлива,  $\text{кДж/м}^3$  или  $\text{кДж/кг}$ ;

$V_d$  – объем продуктов горения,  $\text{м}^3/\text{м}^3$  или  $\text{м}^3/\text{кг}$ ;

$c_0^{t_k}$  – средняя теплоемкость продуктов горения в интервале температур  $0 - t_k$ ,  $\text{кДж/м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ ;

$n$  – число компонентов продуктов горения при  $\alpha_B > 1$   $n = 5$  ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ).

Если в рабочее пространство печи вводится дополнительное количество тепла, например, излучением от промежуточного свода, над которым осуществляется дожигание продуктов неполного горения (печи безокислительного нагрева), то это количество тепла следует отнести к единице сжигаемого топлива и при расчете  $t_k$  по вышеприведенной формуле его необходимо прибавить к числителю.

Величина  $t_k$  по этой формуле вычисляется методом последовательного приближения в связи с необходимостью определения теплоемкости по калориметрической температуре. С достаточной точностью калориметрическая температура может быть найдена по  $i - t$  диаграммам, калориметрическому теплосодержанию продуктов горения – энтальпии, представляющей собой произведение теплоемкости на температуру:

$$i_k = \frac{Q_H^p + q_{\phi} - q_H}{V_d}, \quad \text{кДж/м}^3.$$

Значения энтальпий воздуха и газов в зависимости от температуры приведены в табл. 3.8.

Энтальпия (кДж/м<sup>3</sup>) воздуха и газов при различных температурах  
и постоянном давлении 101,3 кН/м<sup>2</sup> (760 мм.рт.ст.)

Температура, К	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Воздух сухой	CO	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	CH <sub>4</sub>
773	1001,78	664,58	700,17	791,55	672,01	672,01	653,17	841,59	984,78
873	1236,76	805,06	851,64	964,68	814,96	816,46	786,41	1032,51	1071,84
973	1475,41	940,36	1005,24	1143,64	960,75	961,33	920,30	1230,98	1667,68
1073	1718,95	1094,65	1162,32	1328,11	1109,05	1112,06	1055,12	1436,98	1996,36
1173	1972,43	1243,55	1319,67	1517,87	1259,36	1262,38	1190,78	1646,75	2336,35
1273	2226,75	1393,86	1480,11	1713,32	1411,86	1415,20	1327,28	1863,21	2696,43
1373	2485,34	1546,14	1641,02	1913,67	1565,94	1570,54	1469,22	2081,77	3062,79
1473	2746,44	1699,76	1802,76	2118,78	1721,36	1728,39	1612,83	2306,20	3446,74
1573	3010,58	1857,74	1966,06	2328,01	1879,27	1883,31	1758,12	2531,04	
1673	3276,75	2012,36	2129,93	2540,25	2036,87	2045,76	1905,08	2760,91	
1773	3545,34	2170,55	2296,78	2758,39	2196,19	2200,26	2011,85	2995,80	
1873	3815,86	2328,65	2463,97	2979,13	2356,68	2364,82	2204,04		
1973	4087,10	2486,28	2632,09	3200,05	2517,60	2526,85	2356,02		
2073	4360,67	2646,74	280,48	3429,96	2680,01	2690,56	2509,69		
2173	4634,76	2808,22	2971,30	3657,85	2841,43	2848,00	2657,07		
2273	4910,51	2970,25	3142,76	3889,72	3006,26	3014,64	2813,66		
2373	5186,81	3131,96	3314,85	4121,79	3169,77	3174,16	2971,93		
2473	5464,20	3295,84	3487,44	4358,83	3338,21	3343,73	3131,88		
2573	5746,30	3457,20	3662,33	4485,34	3500,54	3505,36	3293,49		
2673	6023,25	3620,58	3837,64	4724,37	3665,80	3666,82	3456,79		
2773	6303,53	3786,09	4014,29	5076,74	3835,29	3840,58	3620,76		



При определении  $t_k$  методом последовательного приближения зададим возможное значение температуры горения  $t'_k$  и при этой температуре найдем энтальпию продуктов сгорания  $i_{t'_k}$ . Если  $i_k < i_{t'_k}$ , то истинная калориметрическая температура ниже, чем  $t'_k$ . Поэтому зададим температуру  $t''_k = t'_k - 100$  и снова найдем энтальпию продуктов сгорания. Если  $i_k > i_{t''_k}$ , то действительная калориметрическая температура продуктов сгорания находится в интервале  $t''_k - t'_k$  и может быть найдена по формуле

$$t_k = t''_k + \frac{i_k - i_{t''_k}}{i_{t'_k} - i_{t''_k}} 100.$$

Значение максимальной действительной температуры горения  $t_d$ , которое может быть достигнуто в рабочем пространстве печи, можно определить по пирометрическому коэффициенту  $\eta_{\text{пир}}$ , представляющему собой отношение действительной температуры горения к калориметрической:

$$\eta_{\text{пир}} = \frac{t_d}{t_k}, \text{ откуда } t_d = \eta_{\text{пир}} t_k.$$

Величина пирометрического коэффициента зависит от конструкции, размеров печи, типа топливосжигающих устройств и т. д. В среднем она составляет 0,65–0,9 (табл. 3.9).

**Значения пирометрического коэффициента  $\eta_{\text{пир}}$   
для различных типов пламенных печей**

Тип печи	$\eta_{\text{пир}}$
Камерная периодического действия большой емкости с плотной садкой	0,8–0,9
с редкой садкой	0,75–0,85
Методическая	0,7–0,75
Проходная термическая	0,7–0,82
Кузнечная шелевая	0,65–0,7

**Теоретическая температура горения** отличается от калориметрической учетом расхода тепла на диссоциацию  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Однако потери тепла на диссоциацию при температурах, развивающихся в рабочем пространстве печи (до  $1500^\circ\text{C}$ ), невелики. Поэтому теоретическую температуру при практических расчетах можно считать равной калориметрической.

После определения температур горения топлива необходимо провести анализ соотношения действительной и требуемой температуры печного пространства, на основании которого делают вывод о пригодности выбранного топлива либо намечают меры по повышению калориметрической температуры.

Требуемая температура печного пространства должна устанавливаться исходя из конечной температуры нагрева металла под ковку, штамповку, прокатку, термообработку и температурного напора, т. е.

$$t_{\text{III}}^{\text{TP}} = t_{\text{M}}^{\text{K}} + \Delta t, \quad ^\circ\text{C},$$

где  $t_{\text{M}}^{\text{K}}$  – конечная температура нагрева металла,  $^\circ\text{C}$ ;

$\Delta t$  – температурный напор между  $t_{\text{III}}$  и поверхностью садки.

Величина температурного напора при обычном нагреве составляет  $50\text{--}150^\circ\text{C}$ .

Максимальная температура рабочего пространства печи  $t_{\text{пн}}^{\text{max}}$  определяется стойкостью футеровки, типом печи, технологией нагрева металла и не может быть выше действительной температуры горения топлива. Для ориентировочных расчетов температурный напор (перепад)  $\Delta t = t_{\text{пн}} - t_{\text{пов. мет}}^{\text{к}}$  может быть принят следующим:

для термических печей – 50–70 °С;

для кузнечных печей – 50–100 °С;

для прокатных печей – 100–150 °С;

для печей скоростного нагрева – 150–300 °С и выше;

для томильных зон проходных печей – 30–50 °С.

Максимальная температура нагрева стали под горячее формообразование, исключая излишнее окалинообразование, пережог и обезуглероживание, выбирается в зависимости от вида формообразования (ковка, штамповка, прокатка) и марки стали (табл. 3.10–3.13). Температура, при которой происходит термическая и химико-термическая обработка (ХТО), выбирается в зависимости от марки стали и вида операции термической обработки в соответствии со справочными данными. Так, при нагреве металла под все виды заковки температуру операции определяют по выражению

$$t_{\text{м}} = t_{\text{Ac}_3} + (20 - 30),$$

где  $t_{\text{м}}$  – температура середины садки на выдаче из печи, °С;

$t_{\text{Ac}_3}$  – температура верхней критической точки, °С (табл. 3.14).

Таблица 3.10

### Температурные интервалы горячего формообразования углеродистых и легированных сталей

Марка стали	Температура началаковки (максимальная), °С	Рекомендуемый интервал температурковки, °С
1	2	3
Ст. 0, 1, 2, 3	1300	1280–750
Ст. 4, 5, 6	1250	1200–800
Ст. 7	1200	1170–780

1	2	3
10, 15	1300	1280–750
20, 25, 30, 35	1280	1250–800
40, 45, 50	1260	1200–800
55, 60	1240	1190–800
65, 70	1220	1180–800
15Г, 20Г, 25Г, 30Г	1250	1230–800
40Г, 45Г, 50Г	1220	1200–800
60Г, 65Г	1200	1180–800
15Х, 15ХА, 20Х	1250	1200–800
30Х, 38ХА	1230	1180–820
40Х, 45Х, 50Х	1200	1180–830
10Г2, 35Г2	1220	1200–800
40Г2, 45Г2, 50Г2	1200	1180–830
18ХГ	1230	1200–840
18ХГГ	1200	1180–800
40ХГ	1200	1180–830
35ХГ2	1200	1200–850
35ХС	1240	1160–820
38ХС, 40ХС	1200	1150–830
27СГ, 35СГ	1260	1230–800
15ХМ	1230	1200–800
30ХМ, 30ХМА, 35ХМ	1200	1180–850
15ХФ	1250	1230–850
30ХМ, 30ХМА, 35ХМ	1200	1180–850
15ХФ	1250	1230–850
20ХФ, 40ХФА	1240	1200–800
15НМ, 20НМ	1250	1230–830
20ХН	1250	1200–800
40ХН, 45ХН, 50ХН	1200	1180–830
12ХН2, 12ХН3А	1200	1180–800
20ХН3А	1200	1170–800
20Х2НЧА	1180	1150–780
30ХН3А	1180	1160–850
20ХГСА, 25ХГСА	1200	1160–830
30ХГС, 30ХГСА, 35ХГСА	1180	1140–830
38ХГН	1200	1180–800
30ХНВА	1200	1180–850
40ХНМА	1180	1160–850
20ХНЧФА	1200	1180–870
38ХЮ, 38ВФЮ	1180	1180–850

1	2	3
38ХВФЮА	1180	1150–850
38ХМЮА	1180	1160–880
ШХ6, ШХ9	1200	1150–870
ШХ15	1180	1130–850
ШХ15СГ	1180	1150–850

Таблица 3.11

**Температурные интервалы горячего формообразования  
высоколегированных сталей**

Марка стали	Температура начала ковки (максимальная), °С	Рекомендуемый интервал ковки, °С
X5M	1200	1180–850
X6CM	1180	1150–870
4X9B2	1200	1180–900
1X13, 2X13, 3X13	1180	1150–900
4X13	1200	1180–820
3X13H7C2	1150	1130–870
1X17H2	1150	1130–870
X17	1120	1080–750
X28	1150	1120–680
X17H13M2T	1180	1150–900
4X14H14B2M	1160	1140–900
X18H9T	1180	1150–900
2X18H9	1150	1130–870
0X18H12Б	1150	1130–870
X23H18	1180	1150–820

Таблица 3.12

**Температура горячего формообразования  
инструментальных сталей**

Марка стали	Температура ковки, °С	
	слитков	заготовок
1	2	3
У7, У8, У7А, У8А	1160–1180	1100–1125
У9, У10, У11, У12, У13, У9А, У10А, У11А, У12А, У13А	1100–1130	1075–1100

1	2	3
XB5	1100-1130	1100-1125
X, B1, XBГ, 9X	1170-1190	1120-1150
9XC	1150-1180	1000-1140
X12	1120-1150	1140-1160
X12M	1140-1180	1160-1180
X12Φ1	1160-1190	1160-1190
4X8B2	1180-1200	1160-1180
7X3, 8X3	1160-1180	1160-1180
5XHM, 5XГM	1180-1200	1180-1200
5XHB	1180-1200	1170-1200
5XHCВ	1180-1200	1180-1220
4XC	1200-1220	1160-1180
12XC	1180-1200	1160-1180
4XB2C, 5XBC2	1180-1200	1160-1180
6XB2C	1170-1200	1150-1170
6XBГ	1180-1200	1160-1180
P18, P9	1150-1200	1150-1200

Таблица 3.13

### Температура прокатки некоторых марок сталей

Марка стали		Максимальная температура начала операции, °C	Температура конца операции, °C
по ГОСТу	заводская		
1	2	3	4
15		1260	850
12XНЗА		1260	800
18XНВА		1220	850
30XГСА		1240	850
60C2		1140	800
У7		1220	750-900
У12А		1200	800-850
	ЭИ366	1150	900
X12M		1170	850

1	2	3	4
P9		1190	900
P18		1230	900
XX9C2	ЭСХФ	1240	900
3X13H7C2	ЭМ72	1280	850
X17	ЭЖ17	1100	не ограничена
X28	ЭЖ27 (ЭИ349)	1100	750–800
1X25H25TP	ЭИ813	1100	800
1X18H9	ЭЯ1	1250	850
1X18H9T	ЭЯТ1	1250	850
X18H12M2T	ЭИ488	1180	900
X18H25C2	ЭЯ33С	1180	850
X23H18	ЭИ417	1200	900
X13H4Г9	ЭИ100	1180	900

*Примечание.* В таблицах и тексте, согласно стандартам, химические элементы М – молибден; Н – никель; Р – бор; С – кремний; Т – титан; А – алюминий; Ф – ванадий; Х – хром; Ц – цирконий.

Буква А в конце марки стали указывает, что содержание серы и фосфора не превышает 0,03 % (У12А, 30ХГСА).

Буквы в отечественных заводских марках стали обозначают: Ж – хромистая нержавеющая сталь; Я – хромоникелевая нержавеющая сталь; Р – быстрорежущая сталь; Э – сталь завода «Электросталь»; Н и П – опытная сталь.

Таблица 3.14

### Температура $t_{AC_3}$ и $t_{AC_1}$ для некоторых сталей

Марка стали		Температура, °С		Марка стали		Температура, °С	
стандартная	заводская	$t_{AC_3}$	$t_{AC_1}$	стандартная	заводская	$t_{AC_3}$	$t_{AC_1}$
1	2	3	4	5	6	7	8
08		874	732		ЭИ415	900	800
10		874	732	21H5		771	675
20		854	735	20XH		804	733
25		840	735	30XH		793	730
30		813	732	50XH		750	735
35		802	730	12XH2		794	732

1	2	3	4	5	6	7	8
40		790	730	12ХНЗ		830	715
45		770	725	20ХНЗ		760	700
50		760	725	30ХНЗ		775	715
55		774	727	40ХНЗ		770	710
60		766	727	12Х2Н4А		820	710
70		743	730	35ХН2М		800	725
У8		730	–	35ХН3М		790	720
А12		866	–	35ХН4М		775	710
У12		780	730	30ХН4М		775	710
У7		770	730	55С2		840	–
20Г		854	735	60С2		820	–
30Г		812	734	50ХГ		775	750
30Г2		–	730	12Х2ФБ		1000	875
Р2		840	770	30ХА и		782	747
	ЭИ723	870	780				
35ХМФА		835	755	35ХМ		820	745
ШХ15		900	727	30Н		820	710
Х9С2		970	900	12Х2Н4		810	700
4Х10С2	ЭИ107	950	850	18ХНВ		720	700
20ХГС		840	755	ШХ9		875	730
25ГС		880	750	25ХГС		835	750
35ГС		830	750	40Н		–	655
55ГС		830	750	40ХН34ХН		790	720
50С2Г		790	–	35ХН3МФ		775	725
40ХФ		790	754	50ХФА		788	752
30ХМ		807	757	60С2		860	750
35ХМ		820	745	38ХМЮА		940	800
35Х2М		766	715	Х13		855	820
38ХС		860	760	2Х13		870	825
40ХС		850	750	3Х13		835	825
35ХМФ		835	755	4Х13		835	800
25Н		820	730	40ХН		770	730

И если  $t_d \geq t_{\text{пш}}^{\text{ТР}}$ , то данное топливо пригодно, так как оно обеспечивает необходимую температуру печного пространства; в случае если  $t_d < t_{\text{пш}}^{\text{ТР}}$ , необходимо наметить пути повышения calorиметрической



температуры (выбрать топливо с большей теплотворной способностью, ввести подогрев воздуха или топлива, сжечь топливо с наименьшим коэффициентом избытка воздуха).

Расчет максимальной действительной температуры продуктов сгорания и, соответственно, печи тесно связан с выбором температуры подогрева воздуха и топлива.

Методика выбора температуры подогрева воздуха и топлива заключается в следующем. Если  $t_d \geq t_{\text{III}}^{\text{TP}} = t_{\text{техн}}$ , то ограничиваются только подогревом воздуха (как правило, за счет теплоты уходящих из печи дымовых газов). Температуру подогрева выбирают по технико-экономическим критериям эффективности. Если это условие не выполняется при максимально возможном подогреве воздуха, то калориметрическую температуру рассчитывают при максимальных температурах подогрева воздуха и топлива. Если и после этого не достигается необходимый температурный уровень процесса, то следует выбрать более высококалорийное топливо. Важно только указать, что пределы подогрева воздуха и топлива обычно ограничивают температурой соответственно 800 и 400 °С.

Изложенный метод определения действительной температуры продуктов сгорания и температуры подогрева компонентов рабочей смеси предназначен для условий, когда  $\alpha_B \geq 1$ . При безокислительном нагреве стали в открытом пламени температуру продуктов сгорания в зоне неполного горения топлива  $t_{\text{к}}^{\text{HG}}$  определяют с учетом теплоты химического недожога топлива  $q_{\text{ХН}}$ :

$$t_{\text{к}}^{\text{HG}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{p}} + q_{\text{ф}} - q_{\text{ХН}}}{\sum V_i c_{\text{ух.г}}^{\text{HG}}}$$

где  $q_{\text{ХН}}$  определяют по составу и теплоте продуктов сгорания топлива. Последовательность выбора температуры подогрева воздуха и топлива в этом случае та же, что и при  $\alpha_B > 1$ . Температуру подогрева воздуха для печей безокислительного нагрева принимают равной 550–700 °С, а подогрева топлива – до 200–400 °С.

Необходимо иметь в виду, что номинальные температуры печей регламентированы ГОСТ 26654-85 «Печи промышленные для нагрева и термической обработки». Номинальная температура печей всех конструкций должна соответствовать следующему ряду значений, °С: 100, 200, (250), 350, (400), 500, (650), 700, (750), 800, 900, (950), 1000 (1050), 1100, 1150, 1200, 1250, 1300, 1350, 1400, 1450, 1500, 1550, 1600.

Поэтому вычисленные значения температуры печи следует округлять до стандартных значений.

### ***3.5. Примеры расчетов горения топлива***

**Пример 1.** Необходимо рассчитать расход воздуха, количество и состав продуктов сгорания и calorиметрическую температуру горения мазута, содержащего, %: 86,5 C<sup>P</sup>, 10,5 H<sup>P</sup>, 0,3 N<sup>P</sup>, 0,3 O<sup>P</sup>, 0,3 S<sup>P</sup>, 1,8 W<sup>P</sup>, 0,3 A<sup>P</sup>.

Нужно найти количество воздуха, количество и состав продуктов сгорания при коэффициентах расхода воздуха 1,0, 1,1 и 1,25, определить calorиметрическую температуру сгорания при  $\alpha_{\text{в}} = 1$  и температурах подогрева воздуха 0 и 300 °С.

Количество воздуха, количество и состав продуктов сгорания определяем используя изложенные методы и табличную форму записи результатов (табл. 3.15, 3.16).

**Расход воздуха, состав и количество  
продуктов сгорания мазута при  $\alpha_B = 1$**

Участвуют в горении						Образуются при горении									
топливо						воздух			газообразные продукты, моль						
Состав	Содержание, %	Масса, кг	Молекулярная масса, кг	Количество, моль	O <sub>2</sub> , моль	N <sub>2</sub> , моль	Всего		CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Всего	
							моль	м <sup>3</sup>						моль	м <sup>3</sup>
C	86,5	86,5	12	7,21	7,21	9,835×3,762=36,999	9,835+36,999=46,844	46,844×22,4=1049,3	7,21	-	-	-	36,999	-	49,578×22,4=1110,54
H	10,5	10,5	2	5,25	2,625					5,25	-	-	-	-	
S	0,3	0,3	32	0,00938	0,00938					-	0,0094	-	-	-	
O	0,3	0,3	32	0,00938	0,00938					-	-	-	-	-	
N	0,3	0,3	28	0,0107	-					-	-	-	0,0107	-	
W	1,8	1,8	1,8	0,10	-					0,1	-	-	-	-	
A	0,3	0,3	-	-	-					-	-	-	-	-	
Всего, моль (%)	100	100	-	-	9,835 (21,0)	36,999 (79,0)	46,844 (100)	1049,3 (-)	7,21 (14,51)	5,35 (10,8)	0,0094 (0,19)	-	37,0097 (74,5)	49,578 (100)	1110,5 (-)

**Количество и состав продуктов сгорания  
при различных коэффициентах расхода воздуха**

$\alpha_b$	Воздух		Газообразные продукты, моль		Всего		Состав продуктов сгорания, %						
	O <sub>2</sub> , МОЛЬ	N <sub>2</sub> , МОЛЬ	CO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> +SO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> из воздуха	N <sub>2</sub> из воздуха и топлива	моль	м <sup>3</sup>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Σ
1,0	9,835	36,999	7,21 + 5,35 + + 0,0094 = = 12,569	-	36,999 + + 0,0107 = = 37,0097	49,5787	1110,54	14,51	10,8	0,19	-	74,5	100
1,1	10,82	40,7	12,569	10,82 - - 9,835 = = 0,985	40,7 + + 0,0107 = = 40,7107	54,2647	1215,51	13,3	9,82	0,17	1,81	74,9	100
1,25	12,294	46,26	12,569	12,294 - - 9,835 = = 2,459	46,25 + + 0,0107 = = 46,2607	61,2887	1372,85	11,53	8,72	0,15	4,0	75,6	100

Расчет производим на 100 кг топлива.

Проверяем расчет составлением материального баланса при  $\alpha_B = 1$ .

Поступило, кг		Получено, кг:	
Мазут	100	Продукты	сгорания:
Воздух:		CO <sub>2</sub>	7,21·44=317,3
O <sub>2</sub>	9,835·32 = 314,7	H <sub>2</sub> O	5,35·18 = 96,5
N <sub>2</sub>	37,0·28 = 1036,0	SO <sub>2</sub>	0,0094·64=0,6
<hr/>		N <sub>2</sub>	37,0097·28=1036,0
Всего	1450,7	Всего	1450,4
		Зола	0,3
		<hr/>	
		Всего	1450,7

Низшую теплоту сгорания мазута находим по формуле Менделеева

$$\begin{aligned}
 Q_H^P &= 339,1 C^P + 1256 H^P - 108,86(O^P - S^P) - 25(W^P + 9H^P) = \\
 &= 339,1 \cdot 86,5 + 1256 \cdot 10,5 - 108,86(0,3 - 0,3) - \\
 &\quad - 25(1,8 + 9 \cdot 10,5) = 40\,107 \text{ кДж/кг.}
 \end{aligned}$$

В соответствии с заданием определяем calorиметрическую температуру горения при коэффициенте расхода воздуха  $\alpha_B = 1$ , при температурах подогрева воздуха 0 и 300 °C  $t_B = 0^\circ\text{C}$ .

Начальная энтальпия продуктов сгорания

$$i_o = \frac{Q_H^P}{V_{п.г}} = \frac{40107}{11,1} = 3613 \text{ кДж/м}^3.$$

Зададим значение  $t'_k = 2100^\circ\text{C}$ . Энтальпия продуктов сгорания при такой температуре равна

$$i_{\text{CO}_2+\text{SO}_2} = 0,147 \cdot 5186,81 = 762,45;$$

$$i_{\text{H}_2\text{O}} = 0,108 \cdot 4121,79 = 455,15;$$

$$\underline{i_{N_2} = 0,745 \cdot 3131,96 = 2333,10}$$

$$i_{2100} = 3550,70 \text{ кДж/м}^3.$$

Так как  $i_{2100} < i_0$ , то искомая калориметрическая температура выше, чем  $t'_k = 2100^\circ\text{C}$ .

Задаемся  $t''_k = 2200^\circ\text{C}$ , в этом случае энтальпия продуктов сгорания равна

$$i_{\text{CO}_2 + \text{SO}_2} = 0,147 \cdot 5464,20 = 802,0;$$

$$i_{\text{H}_2\text{O}} = 0,108 \cdot 4358,83 = 472,0;$$

$$\underline{i_{N_2} = 0,75 \cdot 3995,84 = 2455,4}$$

$$i_{2200} = 3729,4 \text{ кДж/м}^3.$$

Так как  $i_{2200} > i_0$ , то искомая калориметрическая температура ниже  $t''_k = 2200^\circ\text{C}$  и равна

$$t_k = 2100 + \frac{3613,4 - 3550,7}{3729,4 - 3550,7} \cdot 100 = 2138^\circ\text{C}.$$

Если температура подогрева воздуха  $t_b = 300^\circ\text{C}$ , то

$$i_0 = \frac{Q_H^p + V_B \cdot c_B \cdot t_B}{V_{\text{п.г}}} = \frac{40107 + 10,49 \cdot 1,3181 \cdot 300}{11,1} = 3988 \text{ кДж/м}^3$$

$$t'_k = 2300^\circ\text{C}$$

$$t''_k = 2400^\circ\text{C}$$

$$i_{\text{CO}_2 + \text{SO}_2} = 0,147 \cdot 5746,39 = 842; \quad i_{\text{CO}_2 + \text{SO}_2} = 0,147 \cdot 6023,25 = 907;$$

$$i_{\text{H}_2\text{O}} = 0,108 \cdot 4485,34 = 495; \quad i_{\text{H}_2\text{O}} = 0,108 \cdot 4724,37 = 522;$$

$$i_{N_2} = 0,745 \cdot 3457,20 = 2575; \quad i_{N_2} = 0,745 \cdot 3786,09 = 2695$$

$$i_{2300} = 3912 \text{ кДж/м}^3$$

$$i_{2400} = 4124 \text{ кДж/м}^3$$

$$t_k = 2300 + \frac{3988 - 3912}{4124 - 3912} \cdot 100 = 2335 \text{ }^\circ\text{C}$$

Результаты расчета показывают, что увеличение коэффициента расхода воздуха приводит к увеличению количества образующихся продуктов сгорания, что снижает начальную энтальпию и calorиметрическую температуру горения.

Увеличение температуры подогрева воздуха приводит к увеличению calorиметрической температуры горения.

**Пример 2.** Для смешанного коксодоменного газа с теплотой сгорания  $Q_H^{p,cm} = 6,7 \text{ МДж/м}^3$  нужно определить расход воздуха, количество и состав продуктов сгорания и calorиметрическую температуру при горении с коэффициентом расхода воздуха  $\alpha_v = 1,1$ ; температура подогрева воздуха  $t_v = 400 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Принимаем следующий состав сухих газов, %: коксовый  $2,35 \text{ CO}_2^c$ ;  $7,44 \text{ CO}^c$ ;  $56,42 \text{ H}_2^c$ ;  $3,97 \text{ N}_2^c$ ;  $26,05 \text{ CH}_4^c$ ;  $3,14 \text{ C}_2\text{H}_2^c$ ;  $0,630 \text{ O}_2$ ; доменный  $10,7 \text{ CO}_2^c$ ;  $28,5 \text{ CO}^c$ ;  $2,5 \text{ H}_2^c$ ;  $58,2 \text{ N}_2^c$ ;  $0,1 \text{ CH}_4^c$ .

Принимая влажность коксового газа равной  $W_{\text{кокс}} = 25 \text{ г/м}^3$ , а влажность доменного газа  $W_{\text{дом}} = 30 \text{ г/м}^3$ , производим расчет состава влажных газов

$$x^{\text{вл}} = x^{\text{сух}} \cdot \frac{100}{100 + 0,1242 W},$$

$$\text{т. е.} \quad x_{\text{дом}}^{\text{вл}} = x_{\text{дом}}^{\text{сух}} \cdot \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 30} = 0,964 x_{\text{сух}}^{\text{дом}};$$

$$x_{\text{кокс}}^{\text{вл}} = x_{\text{кокс}}^{\text{сух}} \cdot \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 25} = 0,97 x_{\text{кокс}}^{\text{сух}}.$$

Тогда состав влажных газов, %: коксовый 2,28  $\text{CO}_2^{\text{ВЛ}}$ ; 7,21  $\text{CO}^{\text{ВЛ}}$ ; 54,72  $\text{H}_2^{\text{ВЛ}}$ ; 3,85  $\text{N}_2^{\text{ВЛ}}$ ; 25,27  $\text{CH}_4^{\text{ВЛ}}$ ; 3,04  $\text{C}_2\text{H}_2^{\text{ВЛ}}$ ; 0,61  $\text{O}_2^{\text{ВЛ}}$ ; 3,02  $\text{H}_2\text{O}$ ; доменный 10,3  $\text{CO}_2^{\text{ВЛ}}$ ; 27,5  $\text{CO}^{\text{ВЛ}}$ ; 2,41  $\text{H}_2^{\text{ВЛ}}$ ; 56,1  $\text{N}_2^{\text{ВЛ}}$ ; 0,09  $\text{CH}_4^{\text{ВЛ}}$ ; 3,6  $\text{H}_2\text{O}$ .

Определяем теплоту сгорания газов (см. табл. в п. 3.1).

$$Q_{\text{H}}^{\text{Р КОКС}} = 12\,645 \cdot 0,0721 + 10\,760 \cdot 0,5472 + 35\,800 \cdot 0,2527 + \\ + 59\,037 \cdot 0,00304 = 17\,610 \text{ кДж/м}^3.$$

$$Q_{\text{H}}^{\text{Р ДОМ}} = 12\,645 \cdot 0,275 + 10\,760 \cdot 0,00241 + \\ + 35\,800 \cdot 0,0009 = 3\,780 \text{ кДж/м}^3.$$

Доля доменного газа в смеси равна  $a = \frac{17610 - 6700}{17610 - 3780} \equiv 0,796$ .

Рассчитывая состав смеси  $x_{\text{см}} = x' a + x'' (1 - a)$ , находим состав смешанного газа:

$$\text{CO}_{2\text{см}} = 10,3 \cdot 0,796 + 2,28 \cdot 0,204 = 8,68 \%;$$

$$\text{CO}_{\text{см}} = 27,5 \cdot 0,796 + 7,21 \cdot 0,204 = 23,35 \%;$$

$$\text{N}_{2\text{см}} = 56,1 \cdot 0,796 + 3,85 \cdot 0,204 = 45,4 \%;$$

$$\text{H}_{2\text{см}} = 2,41 \cdot 0,796 + 54,72 \cdot 0,204 = 13,1 \%;$$

$$\text{CH}_{4\text{см}} = 0,09 \cdot 0,796 + 25,27 \cdot 0,204 = 5,23 \%;$$

$$\text{C}_2\text{H}_{4\text{см}} = 0 \cdot 0,796 + 3,04 \cdot 0,204 = 0,62 \%;$$

$$\text{O}_{2\text{см}} = 0 \cdot 0,796 + 0,61 \cdot 0,204 = 0,12 \%;$$

$$\text{H}_2\text{O}_{\text{см}} = 3,6 \cdot 0,796 + 3,02 \cdot 0,204 = 3,5 \%$$

$$\underline{\underline{\Sigma = 100 \%.}}$$

Расчет расхода воздуха, состава и количества продуктов сгорания производим в форме таблицы (табл. 3.17). Расчет ведем на  $100 \text{ м}^3$  газа.



Расход воздуха, состав и количество продуктов сгорания смешанного газа

смешанный газ		Участвуют в горении				Продукты горения, м <sup>3</sup>								
		Содержание, % (м <sup>3</sup> )		воздух, м <sup>3</sup>		CO <sub>2</sub>		H <sub>2</sub> O		N <sub>2</sub>		Всего		
Состав	Содержание, % (м <sup>3</sup> )	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Всего	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	Всего	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	Всего		
CO <sub>2</sub>	8,68 (8,68)	-	$\left. \begin{array}{l} 30,425 \times \\ \times 3,762 = \\ = 115,125 \end{array} \right\}$	$\left. \begin{array}{l} 30,425 + \\ + 115,125 = \\ = 145,550 \end{array} \right\}$	8,68	-	-	-	8,68	-	-	-		
CO	23,35 (23,35)	11,675					23,35	-	115,125 (из воздуха)	-	-	-	-	-
CH <sub>4</sub>	5,23 (5,23)	10,460					5,23	10,46	-	-	5,23	10,46	-	-
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,62 (0,62)	1,860					1,24	1,24	-	-	1,24	1,24	-	-
H <sub>2</sub>	13,10 (13,10)	6,550					-	13,10	-	-	-	13,10	-	-
N <sub>2</sub>	45,40 (45,40)	-			-	-	45,40	-	-	-	45,40	-		
H <sub>2</sub> O	3,50 (3,50)	-			-	3,50	-	-	-	3,50	-	-		
O <sub>2</sub>	0,12 (0,12)	-			-	-	-	-	-	-	-	-		
Суммарное значение, м <sup>3</sup> (%), при:														
$\alpha_B = 1,0$		30,425 (21)	115,125 (79)	145,550 (100)	38,50 (17,11)	28,30 (12,62)	160,525 (70,27)	227,325 (100)	38,50 (17,11)	28,30 (12,62)	160,525 (70,27)	227,325 (100)		
$\alpha_B = 1,1$		33,52 (21)	126,588 (79)	160,108 (100)	38,50 (16,02)	28,30 (11,69)	171,988 (71,04)	241,983 (100)	38,50 (16,02)	28,30 (11,69)	171,988 (71,04)	241,983 (100)		

Примечание. Суммарное содержание кислорода в продуктах сгорания при  $\alpha_B = 1,1$  составляет 3,095 м<sup>3</sup> (1,25%).

Проверяем расчет составлением материального баланса.

Поступило:

Газ  $100 \text{ м}^3$

В том числе, кг:

$\text{CO}_2 \quad 8,68 \cdot 1,963 = 17,10$

$\text{CO} \quad 23,35 \cdot 1,250 = 29,15$

$\text{CH}_4 \quad 5,23 \cdot 0,716 = 3,72$

$\text{C}_2\text{H}_4 \quad 0,62 \cdot 1,250 = 0,77$

$\text{H}_2 \quad 13,10 \cdot 0,09 = 1,17$

$\text{N}_2 \quad 45,40 \cdot 1,250 = 56,50$

$\text{O}_2 \quad 0,12 \cdot 1,428 = 0,171$

Всего: 108,58

Воздух  $160,108 \text{ м}^3$

В том числе, кг:

$\text{O}_2 \quad 33,52 \cdot 1,428 = 47,90$

$\text{N}_2 \quad 126,588 \cdot 1,250 = 158,00$

Всего: 205,90

Всего поступило: 314,48

Получено:

Продукты сгорания  $241,983 \text{ м}^3$

В том числе, кг:

$\text{CO}_2 \quad 38,68 \cdot 1,963 = 75,51$

$\text{H}_2\text{O} \quad 28,30 \cdot 0,804 = 22,70$

$\text{O}_2 \quad 3,095 \cdot 1,428 = 4,42$

$\text{N}_2 \quad 171,988 \cdot 1,250 = 214,50$

Всего: 317,13

Расхождение, определяемое погрешностью расчета, составляет 2,65 кг.

Плотность компонентов газа и продуктов сгорания находим как частное от деления молекулярной массы на объем, занимаемый одним киломолем компонента, например

$$\rho = \frac{44}{22,4} = 1,963 \text{ кг} / \text{м}^3.$$

Плотность газа

$$\rho_{\text{Г}} = \frac{108,58}{100} = 1,08 \text{ кг} / \text{м}^3;$$

плотность продуктов сгорания

$$\rho_{\text{пг}} = \frac{317,13}{241,933} = 1,315 \text{ кг/м}^3.$$

Определяем калориметрическую температуру горения. Начальная энтальпия продуктов сгорания

$$i_0 = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р см}} + i_{\text{в}} V_{\text{в}}}{V_{\text{п.г}}} = \frac{6700 + 532,08 \cdot 1,60}{2,42} = 3080 \text{ кДж/м}^3.$$

Здесь  $V_{\text{в}} = 1,6 \text{ м}^3 / \text{м}^3$  заимствуем из табл. 3.17,  $i_{\text{в}} = c_{\text{в}} t_{\text{в}}$  — энтальпия подогретого воздуха.

$$t'_{\text{к}} = 1800 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t''_{\text{к}} = 1900 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$i_{\text{CO}_2} = 0,1602 \cdot 4360,67 = 699,8;$$

$$i_{\text{CO}_2} = 0,1602 \cdot 4634,76 = 741,0;$$

$$i_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1169 \cdot 3429,90 = 400,5;$$

$$i_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1169 \cdot 3657,85 = 425,8;$$

$$i_{\text{O}_2} = 0,0125 \cdot 2800,48 = 35,1;$$

$$i_{\text{O}_2} = 0,0125 \cdot 2971,30 = 37,2;$$

$$i_{\text{N}_2} = 0,7104 \cdot 2646,76 = 1883,0;$$

$$i_{\text{N}_2} = 0,7104 \cdot 2808,22 = 1985,0;$$

$$i_{1800} = 3018,4 \text{ кДж/м}^3.$$

$$i_{1900} = 3189,0 \text{ кДж/м}^3.$$

Калориметрическая температура горения равна

$$t_{\text{к}} = 1800 + \frac{3080 - 3018,4}{3189 - 3018,4} \cdot 100 = 1836 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

**Пример 3.** Природный газ сжигается в воздухе, обогащенном кислородом (содержание  $\text{O}_2$  35 %), при коэффициенте расхода воздуха  $\alpha_{\text{в}} = 1,1$ . Необходимо найти расход воздуха, состав, количество продуктов сгорания и калориметрическую температуру горения.

Как изменятся эти параметры по сравнению с горением газа в обычном воздухе?

Рабочий состав топлива, %: 93,2  $\text{CH}_4$ ; 0,7  $\text{C}_2\text{H}_6$ ; 0,6  $\text{C}_3\text{H}_8$ ; 0,6  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ; 4,9  $\text{N}_2$ .

Расчет горения природного газа в воздухе при  $\alpha_B = 1,1$  производим аналогично расчету горения смешанного газа в примере 2.

Результаты расчета представлены в табл. 3.18.

При расчете горения природного газа в воздухе, обогащенном кислородом, следует учесть, что на единицу объема  $\text{O}_2$  в воздухе приходится  $\text{N}_2/\text{O}_2 = 65/35 = 1,96$  единиц азота. В остальном расчет производится как обычно. Результаты расчета представлены в табл. 3.19.

**Расход воздуха, состав и количество продуктов сгорания природного газа в воздухе**

Природный газ		Воздух, м <sup>3</sup>			Продукты сгорания, м <sup>3</sup>			Всего		
Состав	Содержание, % (м <sup>3</sup> )	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Всего	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>			
CH <sub>4</sub>	93,2 (93,2)	186,4	$\left. \begin{array}{l} 195,75 \times \\ \times 3,762 = \\ = 736,31 \end{array} \right\}$	$\left. \begin{array}{l} 195,75 + \\ + 736,31 = \\ = 932,06 \end{array} \right\}$	93,2	186,4	736,31 (из воздуха)	-		
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,7 (0,7)	2,45			$\left. \begin{array}{l} 195,75 \times \\ \times 3,762 = \\ = 736,31 \end{array} \right\}$	$\left. \begin{array}{l} 195,75 + \\ + 736,31 = \\ = 932,06 \end{array} \right\}$	1,4	2,1	-	-
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,6 (0,6)	3,0					1,8	2,4	-	-
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,6 (0,6)	3,9					2,4	3,0	-	-
N <sub>2</sub>	4,9 (4,9)	-					-	-	-	-
Суммарное значение, м <sup>3</sup> (%), при:										
$\alpha_a = 1,0$		195,75 (21)	736,31 (79)	932,06 (100)	98,8 (9,55)	193,9 (18,75)	741,21 (71,7)	1033,81 (100)		
$\alpha_a = 1,1$		215,32 (21)	809,94 (79)	1025,26 (100)	98,8 (8,76)	193,9 (17,22)	814,84 (72,29)	1127,01 (100)		
$\alpha_a = 1,15$		225,5 (21)	847,5 (79)	1063 (100)	98,8 (8,35)	193,9 (16,5)	852,4 (72,6)	1174,85 (100)		

*Примечание.* Суммарное содержание кислорода в продуктах сгорания при  $\alpha_a = 1,1$  составляет 19,57 м<sup>3</sup> (1,73 %), а при  $\alpha_a = 1,15$  – 29,75 м<sup>3</sup> (2,55 %).

Расход воздуха, состав и количество продуктов сгорания природного газа  
в воздухе, обогащенном кислородом

Природный газ		Воздух, обогащенный кислородом, м <sup>3</sup>			Продукты сгорания, м <sup>3</sup>					
Состав	Содержание, % (м <sup>3</sup> )	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Всего	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	Всего		
CH <sub>4</sub>	93,2 (93,2)	186,4	$\left. \begin{array}{l} 195,75 \times \\ \times 1,96 = \\ = 383,65 \end{array} \right\}$	$\begin{array}{l} 195,75 + \\ + 383,65 = \\ = 579,4 \end{array}$	93,2	186,4	383,65 (из воздуха)	-		
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,7 (0,7)	2,45					1,4	2,1	-	-
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,6 (0,6)	3,0					-	-	-	-
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,6 (0,6)	3,9					2,4	3,0	-	-
N <sub>2</sub>	4,9 (4,9)	-					-	-	4,9	-
Суммарное значение, м <sup>3</sup> (%), при:										
$\alpha_B = 1,0$		195,75 (35)	383,65 (65)	579,4 (100)	98,8 (14,5)	193,9 (28,4)	388,55 (57,1)	681,25 (100)		
$\alpha_B = 1,1$		215,32 (35)	421,1 (65)	636,42 (100)	98,8 (13,4)	193,9 (26,2)	426 (57,7)	738,27 (100)		

Примечание. Суммарное содержание кислорода в продуктах сгорания при  $\alpha_B = 1,1$  составляет 19,57 м<sup>3</sup> (2,7 %).

В обоих случаях расчеты проверяем составлением материального баланса, как показано в примере 2.

Для расчета калориметрической температуры горения находим низшую теплоту сгорания газа

$$Q_H^p = \frac{805560 \cdot C_{H_4} + 1323580 \cdot C_{C_2H_6} + 2044156 \cdot C_{C_3H_8} + 2658745 \cdot C_{C_4H_{10}}}{22,4} =$$

$$= \frac{805560 \cdot 0,932 + 1323580 \cdot 0,007 + 2044156 \cdot 0,006 + 2658745 \cdot 0,006}{22,4} =$$

$$= 33800 \text{ кДж/м}^3.$$

При горении в обычном воздухе энтальпия продуктов сгорания равна

$$i'_0 = \frac{Q_H^p}{V'_{п.г}} = \frac{33800}{11,27} = 3002 \text{ кДж/м}^3.$$

$$t'_k = 1900 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t'_k = 2000 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$i_{CO_2} = 0,0876 \cdot 4360,67 = 413,5; \quad i_{CO_2} = 0,0876 \cdot 4835,10 = 462;$$

$$i_{H_2O} = 0,1722 \cdot 3429,90 = 641,5; \quad i_{H_2O} = 0,1722 \cdot 3839,72 = 729;$$

$$i_{O_2} = 0,0173 \cdot 2971,30 = 51,4; \quad i_{O_2} = 0,0173 \cdot 3442,76 = 54,4;$$

$$i_{N_2} = 0,7229 \cdot 2646,74 = 1893,0; \quad i_{N_2} = 0,7229 \cdot 2970,26 = 2130;$$

$$i_{1900} = 2999,4 \text{ кДж/м}^3. \quad i_{2000} = 3374,4 \text{ кДж/м}^3.$$

$$t_k = 1900 + \frac{3002 - 2999,4}{3374,4 - 2999,4} \cdot 100 = 1901 \text{ }^\circ\text{C}.$$

При горении в воздухе, обогащенном кислородом, энтальпия продуктов сгорания

$$i''_0 = \frac{Q_H^p}{V''_{п.г}} = \frac{33800}{7,38} = 4580 \text{ кДж/м}^3.$$

$$t'_k = 2400^\circ\text{C}$$

$$t''_k = 2500^\circ\text{C}$$

$$i_{\text{CO}_2} = 0,134 \cdot 6023,25 = 806 ;$$

$$i_{\text{CO}_2} = 0,134 \cdot 6303,53 = 971 ;$$

$$i_{\text{H}_2\text{O}} = 0,262 \cdot 4724,37 = 1239 ;$$

$$i_{\text{H}_2\text{O}} = 0,262 \cdot 5072,74 = 1330 ;$$

$$i_{\text{O}_2} = 0,027 \cdot 3837,64 = 103,5 ;$$

$$i_{\text{O}_2} = 0,027 \cdot 4014,29 = 108 ;$$

$$i_{\text{N}_2} = 0,577 \cdot 3620,58 = 2090 ;$$

$$i_{\text{N}_2} = 0,577 \cdot 3786,09 = 2185 ;$$

$$i_{2400} = 4238,5 \text{ кДж/м}^3.$$

$$i_{2500} = 4594 \text{ кДж/м}^3.$$

$$t_k = 2400 + \frac{4580 - 4238,5}{4594 - 4238,5} \cdot 100 = 2496^\circ\text{C}.$$

Из результатов расчетов видно, что обогащение кислородом воздуха, расходуемого на горение газа, уменьшает расход воздуха, количество продуктов сгорания, а, следовательно, увеличивает калориметрическую температуру горения.

#### 4. РАСЧЕТ НАГРЕВА МЕТАЛЛА

Для проведения расчетов нагрева необходимо знать теплофизические свойства нагреваемого тела:

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С;

$c$  – теплоемкость, кДж/кг·°С;

$\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с.

Необходимо учитывать зависимость теплофизических свойств от температуры металла. При этом следует иметь в виду, что в одних случаях вычисляемые значения теплофизических свойств относятся к определенному значению температуры, в других – к среднему значению в данном температурном интервале. Таким образом, необходимо различать истинные и средние значения теплофизических свойств.

Коэффициент теплопроводности углеродистой стали можно вычислять по эмпирической формуле

$$\lambda_0 = 1,163 (60 - 8,7 C - 14,4 \text{ Mn} - 29 \text{ Si}), \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C},$$

где C, Mn, Si – содержание углерода, марганца и кремния в стали, %.



Формула действительна для температуры  $0^{\circ}\text{C}$  и содержания углерода до 1,5 %, марганца и кремния – до 0,5 %. Значения  $\lambda$  при различных температурах выражаются следующими зависимостями:  $\lambda_{200} = 0,95\lambda_0$ ;  $\lambda_{400} = 0,85\lambda_0$ ;  $\lambda_{600} = 0,75\lambda_0$ ;  $\lambda_{800} = 0,68\lambda_0$ ;  $\lambda_{1000} = 0,68\lambda_0$ ;  $\lambda_{1200} = 0,73\lambda_0$ .

Все теплофизические характеристики нагреваемых материалов даны в справочной и технической литературе [8, 11, 12]. Для предварительных расчетов можно воспользоваться значениями, приведенными в табл. 4.1 и 4.2.

В теории нагрева металла рассматриваются случаи нагрева тонких и массивных тел. Поэтому при решении задачи о нагреве тела важное значение имеет оценка его термической массивности.

Для установления границ тонких и массивных тел пользуются критерием Био, характеризующим соотношение между количеством тепла, полученным поверхностью ( $\alpha$ ), и количеством тепла, отведенным внутрь ( $\frac{\lambda}{S}$ ), т. е. между внешним и внутренним теплообменом.

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda/S} = \frac{\alpha \cdot S}{\lambda},$$

где  $\alpha$  – суммарный коэффициент теплоотдачи к телу, характеризующий интенсивность внешнего теплообмена,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ ;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ;

$S$  – расчетная толщина нагреваемого тела (изделия), м.

Расчетная толщина нагреваемого тела

$$S = \mu \delta,$$

где  $\mu$  – коэффициент несимметричности нагрева (при двустороннем нагреве  $\mu = 0,5$ , при одностороннем  $\mu = 1$ );

$\delta$  – толщина нагреваемого тела (изделия), м.

Для некоторых наиболее распространенных случаев значения коэффициента несимметричности  $\mu$  и расчетной толщины  $S$  приведены в табл. 4.3.

## Теплофизические свойства сталей

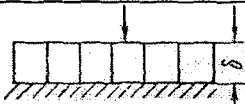
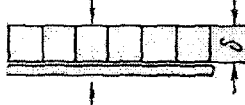
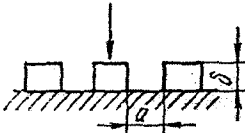
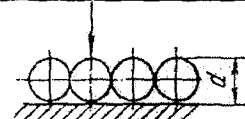
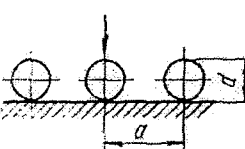
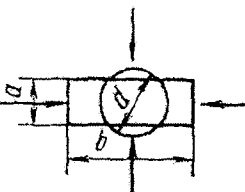
Параметр	Стали	Температура, °С												
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Средняя теплоемкость с от 0 до t °С, кДж/(кг·К)	Углеродистые	0,486	0,506	0,524	0,540	0,562	0,591	0,620	0,695	0,695	0,692	0,687	0,683	0,683
	низколегированные	0,486	0,503	0,520	0,536	0,549	0,591	0,645	0,695	0,686	0,675	0,670	0,670	
	трансформаторная	0,494	0,507	0,533	0,536	0,558	0,616	0,628	0,654	0,666				
Жаропрочные: хромистые хромоникелевые	Жаропрочные:													
	хромистые	0,469	0,486	0,506	0,532	0,561	0,598	0,636	0,683					
хромоникелевые	0,504	0,511	0,524	0,536	0,545	0,554	0,561	0,570	0,574	0,582	0,591	0,595	0,599	
Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)	Углеродистые:													
	малоуглеродистые	55,6	52,6	48,6	45,0	40,8	37,1	34,2	30,2	27,4	27,8	28,5	29,8	
	среднеуглеродистые	49,4	48,2	45,6	42,5	39,1	35,8	32,5	26,2	26,1	26,9	28,1	29,6	
	высокоуглеродистые	46,6	44,0	40,9	37,8	35,0	32,4	28,2	24,1	25,3	26,5	27,9	29,5	
	Низколегированные:													
	хромистые	44,8	42,3	39,4	36,4		32,6			26,8				
	марганцовистые	41,6	40,1	38,9	37,0	35,3	34,4	31,0	26,4					
	хромокремнистые		38,8		36,0	33,5	32,6		26,8					
	кремнемарганцовистые	41,6	41,6	39,5	39,0	36,3	34,9	33,8	32,6					
	хромомолибденовые	43,9	41,9	41,4	39,5	36,5	32,4	29,8	29,1	23,5				
хромованадиевые	52,5	48,8		45,4	41,9									
трансформаторная	24,9	27,2	29,3	31,1	30,6	28,1	27,3	27,7	26,4					
Жаропрочные: хромистые хромоникелевые	Жаропрочные:													
	хромистые	27,6	28,8	29,3	28,8	28,5	28,0							
	хромоникелевые	16,3	17,2	18,4	20,1	21,7	23,8	25,6	26,7	26,7	28,0	28,8	29,7	

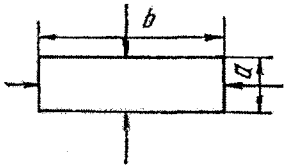
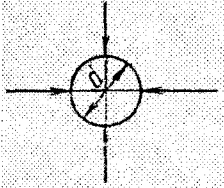
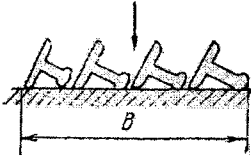
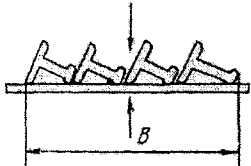
Параметр	Стали	Температура, °С												
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Температуро- проводность $\alpha, \text{ м}^2/\text{ч}$ (данные сле- дует умно- жить на $10^{-2}$ )	Углеродистые: малоуглеродистые	5,2	4,6	4,2	3,5	2,9	2,3	1,7	1,6	2,0	2,0	2,1		
	среднеуглеродистые	4,7	4,2	3,8	3,3	2,8	2,3	1,8	1,8	2,0	2,0	2,0		
	высокоуглеродистые	4,3	3,8	3,4	2,9	2,5	2,2	1,3	2,0	2,0	2,0	2,1		
	Низколегированные: хромистые	4,1	3,7	3,2	2,7		1,9			2,1				
	марганцовистые	3,8	3,5	3,2	2,8	2,3	2,0	1,2	2,1	2,1				
	хромокремнистые		3,4	3,2	2,7	2,2	1,9		2,1	2,1				
	кремнемарганцовистые	3,8	3,6	3,4	2,9	2,4	2,1	1,3	2,6					
	хромомолибденовые	4,0	3,6	3,4	2,9	2,4	1,9	1,2	2,3	2,2				
	хромованадиевые	4,8	4,2	3,0	3,4		2,8							
	хромоникелевые	3,5	3,3	2,5	2,7	2,3	1,9	1,1	2,1	2,0	2,1			
трансформаторная	2,3	2,4		2,4	2,2	1,7	1,4	1,8						
Жаропрочные: хромистые	2,5	2,4	1,6	2,1	1,8	1,6	1,3							
хромоникелевые	1,4	1,5		1,8	1,9	2,1	2,2	2,4	2,5					
Энтальпия $i$ , кДж/кг	углеродистые	48,6	101,4	157,0	216,0	280,5	352,0	436,0	557,0	624,5	691,0	754,5	821,-	889,0
	низколегированные	48,6	100,6	156,0	215,0	274,5	352,0	453,0	557,0	620,0	675,0	737,0	805,0	
	трансформаторная	49,5	101,5	152,0	215,0	279,5	353,0	440,0	523,6	595,0				
	Жаропрочные: хромистые	46,9	97,1	143,8	213,0	280,5	360,0	446,0	505,0					
	хромоникелевые	50,3	102,1	157,0	214,5	272,0	332,0	393,0	456,0	541,0	583,0	645,0	712,0	780,0

Теплофизические свойства цветных металлов и сплавов

Параметр	Материал	Температура, °С													
		0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000			
Средняя теплоемкость с от 0 до t °С, кДж/(кг·К)	Алюминий	0,896	0,915	0,938	0,946	0,980	0,996	1,021							
	Медь	0,390	0,394	0,398		0,407		0,415					0,423		0,431
	Никель	0,428	0,448	0,473		0,512		0,520					0,524		0,528
	Титан	0,532	0,540	0,553		0,574		0,595					0,620		0,628
	Латуны Л90	0,390													
Бронза ОЦЧ-3	0,369														
Бронза БрАЖМц	0,419														
Энтальпия i, кДж/кг	Алюминий		91,5	187,4	284,0	392,0	499,0	611,0							
	Медь		39,4	49,6		163,0		248,0					338,0		431,0
	Никель		44,8	94,5		204,6		312,0					418,0		528,0
	Титан		54,0	110,9		229,5		356,0					496,0		628,0
Теплопроводность λ, Вт/(м·К)	Алюминий	203,5	204,5	378,0	230,0	249,0	267,5	280,0							
	Медь	394,0	386,0	54,6	371,0	365,0	359,5	354,0					333,0		320,0
	Никель	61,6	57,0	54,6		48,8		52,3					58,1		
	Титан	15,1	15,7		16,7	18,0		18,0							
	Латуны Л90	114,0	125,8	142,0	157,0	174,5	188,0	203,5							
Бронза ОЦЧ-3	83,6	93,0	101,2	108,1	114,0	120,0	124,2								
Бронза БрАЖМц	58,5	64,2	71,4	76,7	80,5	83,6									
Температуропроводность α, м <sup>2</sup> /ч (данные слесует умножить на 10 <sup>-3</sup> )	Алюминий	31,3	30,6	30,4	30,2	29,8	29,6	29,4							
	Медь	40,5	39,6	38,2	37,2	36,0	34,8	33,9					31,8		29,2
	Никель	6,4	5,3	4,6		4,2		4,5					5,1		
	Титан	2,27	2,33	2,37		2,46		2,55							
	Латуны Л90	12,0													
Бронза ОЦЧ-3	9,3														
Бронза БрАЖМц	6,7														

**Расчетная толщина заготовок S  
в зависимости от способа их укладки**

Расположение заготовок		$\mu$ ; S												
	Односторонний нагрев	$\mu = 1,0$ ; $S = \delta$												
	Двухсторонний нагрев, водоохлаждаемые трубы	$\mu = 0,55 - 0,6$ ; $S = \mu\delta$												
	Односторонний нагрев, монолитный под	<table border="1"> <tr> <td align="center">a/d</td> <td align="center">0</td> <td align="center">0,5</td> <td align="center">1</td> <td align="center">2</td> <td align="center"><math>\infty</math></td> </tr> <tr> <td align="center"><math>\mu</math></td> <td align="center">1</td> <td align="center">0,6</td> <td align="center">0,55</td> <td align="center">0,5</td> <td align="center">0,4</td> </tr> </table> <p align="center"><math>S = \mu\delta</math></p>	a/d	0	0,5	1	2	$\infty$	$\mu$	1	0,6	0,55	0,5	0,4
a/d	0	0,5	1	2	$\infty$									
$\mu$	1	0,6	0,55	0,5	0,4									
	Односторонний нагрев, монолитный под	$\mu = 0,75 - 0,8$ ; $S = \mu d$												
	Односторонний нагрев, монолитный под	<table border="1"> <tr> <td align="center">a/d</td> <td align="center">1</td> <td align="center">2</td> <td align="center">&gt;2</td> </tr> <tr> <td align="center"><math>\mu</math></td> <td align="center">0,8-1</td> <td align="center">0,5-0,6</td> <td align="center">0,5</td> </tr> </table> <p align="center"><math>S = \mu d</math></p>	a/d	1	2	>2	$\mu$	0,8-1	0,5-0,6	0,5				
a/d	1	2	>2											
$\mu$	0,8-1	0,5-0,6	0,5											
	Четырехсторонний нагрев, плоские вертикальные заготовки при $b/a \leq 1,8$ ; $d = 1,128\sqrt{a b}$	$\mu = 0,5$ ; $S = 0,5d$												

Расположение заготовок	$\mu$ ; S
 <p data-bbox="412 219 614 301">Плоские вертикальные заготовки при <math>b/a &gt; 1,8</math></p>	$\mu = 0,5$ ; $S = 0,5a$
 <p data-bbox="412 457 614 509">Круглые вертикальные заготовки</p>	$\mu = 0,5$ ; $S = 0,5d$
 <p data-bbox="412 620 614 783">Односторонний нагрев: F – площадь поперечного сечения изделия; B – ширина ряда</p>	$S = \frac{\Sigma F}{B}$
 <p data-bbox="412 832 614 1006">Двухсторонний нагрев: F – площадь поперечного сечения изделия; B – ширина ряда</p>	$S = \frac{\Sigma F}{2B}$

Так как в рабочем пространстве нагревательной печи теплообмен происходит одновременно за счет теплового излучения и конвекции, то коэффициент теплоотдачи будет равен  $\alpha = \alpha_{л} + \alpha_{к}$ . Лучистый теплообмен преобладает над конвективным. Коэффициент теплоотдачи излучением определяется:

$$\alpha_{\text{л}} = C_{\text{пр}} \frac{\left(\frac{T_{\text{печ}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{пов}}}{100}\right)^4}{t_{\text{печ}} - t_{\text{пов}}} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К},$$

где  $C_{\text{пр}}$  – приведенный коэффициент излучения,  $\text{Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}^4(\text{К})$ ;

$t_{\text{печ}} (T_{\text{печ}})$  – температура печи,  $^\circ\text{С}(\text{К})$ ;

$t_{\text{пов}} (T_{\text{пов}})$  – температура поверхности,  $^\circ\text{С}(\text{К})$ .

Определение значения  $C_{\text{пр}}$  рассматривается ниже. Значение конвективной составляющей теплоотдачи  $\alpha_{\text{к}}$  составляет 5–15 % лучистой (меньшее значение для зоны с более высокой температурой).

В тонких телах перепад температур по сечению получается незначительным (более интенсивный процесс отвода тепла с поверхности внутрь), поэтому им можно пренебречь. При нагреве массивных тел перепад температур достигает значительной величины (процесс теплопередачи на поверхность происходит интенсивнее отвода тепла внутрь), что необходимо учитывать в расчетах.

В термическом отношении тело считается массивным, если соблюдается условие  $Bi \geq Bi_{\text{кр}} (Bi_{\text{кр}} = 0,5)$ . При  $Bi \leq 0,25$  имеем область тонких тел, при  $0,25 < Bi < 0,5$  – переходную область.

Так как критерий Био определяется не только размерами ( $S$ ) и теплофизическими свойствами ( $\lambda$ ), но и условиями теплопередачи ( $\alpha$ ), то одно и то же тело при нагреве в среде с низкой температурой ( $\alpha$  мало) может быть отнесено к тонким телам и при нагреве в среде с высокой температурой ( $\alpha$  велико) – к массивным.

Ввиду того, что при нагреве металла в печах преобладающим видом теплообмена является излучение, то для определения границы тонких и массивных тел можно пользоваться радиационным критерием Старка

$$Sk = \frac{C_{\text{р}}}{100} \cdot \left(\frac{T_{\text{р}}}{100}\right)^3 \cdot \frac{S}{\lambda},$$

где  $\frac{C_r}{100} \cdot \left(\frac{T_r}{100}\right)^3$  – аналог коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ ;

$C_r$  – приведенный коэффициент излучения, отнесенный к температуре газов,  $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{°C}^4$ ;

$T_r$  – температура газа, К.

Область тонких тел в этом случае определяется значением  $Sk \leq 0,1$ , массивных –  $Sk > 0,1$  ( $Sk_{\text{крит}} = 0,1$ ).

Классификация нагреваемого тела на предмет его термической массивности вызвана необходимостью выбора режима нагрева, количества зон и построения температурного графика нагрева.

### **Некоторые рекомендации по режимам нагрева.**

Для массивных тел в холодном (непластичном) состоянии быстрый нагрев способствует появлению температурных напряжений, вызывающих трещины. Обычно рекомендуется медленный (методический) нагрев изделий до температуры центра не более  $500 \text{ °C}$ . Разность температур между поверхностью и серединой изделия в конце методической зоны можно принять равной  $(700-800)\delta$ . При дальнейшем нагреве влияние скорости подъема температуры не столь существенно, но появляется перепад температур по сечению изделия.

В термических печах перепад температур  $\Delta t_{\text{кон}} = t_{\text{кон}}^{\text{пов}} - t_{\text{кон}}^{\text{ц}}$  не должен превышать  $20 \text{ °C}$  не зависимо от толщины изделия.

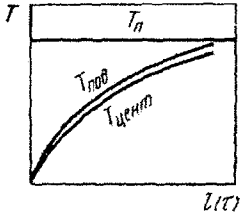
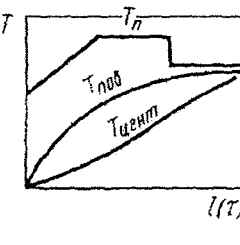
При нагреве металла под обработку давлением по технологическим соображениям перепад температур по сечению изделия не должен превышать  $50 \text{ °C}$  и ориентировочно может быть выбран: при нагреве высоколегированных сталей любой толщины  $\Delta t_{\text{кон}} = 100\delta$ , при нагреве прочих марок сталей толщиной менее  $0,1\text{м}$ ,  $\Delta t_{\text{кон}} = 200\delta$ , а толщиной более  $0,2\text{м}$ ,  $\Delta t_{\text{кон}} = 300\delta$ .

Температурный режим – это изменение температуры печи во времени (по длине печи).

В практике нагрева металла перед горячей обработкой давлением и при термообработке встречаются одноступенчатый, двухступенчатый, трехступенчатый и многоступенчатый режимы нагрева, область применения которых представлена в табл. 4.4.



## Режимы нагрева металла

Режим	$T = f(\tau);$ $T = f(l)$	Область применения
Одноступенчатый		Нагрев тонких тел (протяжные печи, печи для термообработки, ковки и штамповки мелких и средних изделий)
Двухступенчатый		Методические печи ( $\delta \leq 0,1$ м), кузнечные камерные печи для нагрева средних и крупных заготовок, нагревательные колодцы при холодном посаде, печи с выдвижным подом, сушилка
Трех- и более ступенчатый		Методические печи ( $\delta > 0,2$ м), печи с выдвижным подом для нагрева очень крупных заготовок
Циклический		Термические печи с заданным графиком нагрева изделий

Режим нагрева сталей зависит от конструкции и назначения печи, марки стали, формы и размеров слитков, заготовок или изделий и от расположения их в печи.

Одноступенчатый режим, состоящий из одного периода (при  $t_{\text{печ}} = \text{const}$  или  $q = \text{const}$ ), обычно применяют для нагрева тонких заготовок: листов, сутунок и т. д. при одиночном их расположении. В этом случае нет необходимости выделять период нагрева, связанный с возникновением температурных напряжений, а также не требуется выравнивание температур по сечению и заготовки можно нагревать с неограниченной скоростью нагрева, которая сдерживается только условиями внешнего теплообмена. Одноступенчатый нагрев может применяться так же при горячем посаде слитков (температура поверхности 600 °С и более). Однако при термообработке изделий часто вводят период выдержки с целью завершения всех структурных превращений металла.

Чаще всего нагрев ведут при постоянной температуре печи и расчет нагрева сводят к определению его продолжительности.

Двухступенчатый режим нагрева обычно состоит из периода основного нагрева (при  $t_{\text{печ}} = \text{const}$ ; при  $q = \text{const}$ ) и периода выдержки (при  $t_{\text{печ}} = \text{const}$  или  $t_{\text{п}} = \text{const}$ ).

Период (зона) выдержки всегда служит для доведения температуры геометрического центра садки до температуры операции. Необходимость зоны выдержки появляется лишь при условии  $V_i \geq V_{i_{\text{кр}}}$ .

Двухступенчатый режим нагрева используют в двух зонных методических печах, в которых предварительный нагрев металла производят в методической зоне при постоянно увеличивающемся тепловом потоке, а окончательный – в сварочной при постоянной температуре печи.

Трехступенчатый режим состоит из периода напряжений (до  $t = 500$  °С в середине тела), периода ускоренного нагрева и периода выдержки. Этот способ нагрева применяют для высоколегированных и легированных сталей разных размеров.

Многоступенчатый режим, состоящий из нескольких периодов нагрева, выдержки и охлаждения, применяется в сложных режимах

термообработки. Чаще всего такой режим задается в виде графика и расчет в этом случае сводится к определению температур металла, печи и тепловых потоков в каждой ступени нагрева.

#### 4.1. Построение температурного графика нагрева

Температурный график нагрева под горячее формообразование основа теплового конструкторского расчета печи. По графику выбираем необходимые для расчета значения температуры продуктов сгорания и нагреваемой садки. Сначала необходимо построить приближенный температурный график (рис. 4.1). Для этого используем приближенные значения теплофизических характеристик, коэффициентов теплоотдачи,  $t_{MK}^П$ ,  $t_{MK}^Ц$ ,  $t_M^K$ ,  $t_{ПП}$ .

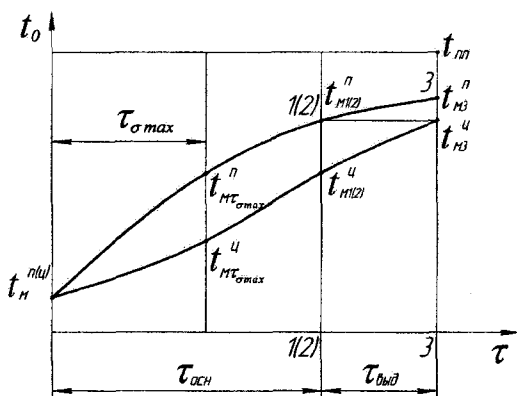


Рис. 4.1. Температурный график нагрева (приближенный)

Так, для определения суммарного коэффициента теплоотдачи при нагреве садки в камерных кузнечных печах можно использовать формулу

$$\alpha_{\Sigma} = 0,1 \left( \frac{T_{\Gamma}}{100} \right)^3, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К.}$$

Для методических печей  $\alpha_{\Sigma} = 58 + 0,35(t_{\Gamma} - 700)$ .

Полагая, что для всех зон рабочего пространства коэффициент теплоотдачи к металлу постоянный, определяем критерий  $Bi$ , и если для симметричного нагрева  $Bi_{x=d/2} = Bi_{кр}$ , а для несимметричного —  $Bi_{x=d} > Bi_{кр}$ , то температурный график должен иметь зону выдержки (томильную зону).

Уточненный температурный график (рис. 4.2) строим в координатах  $t - \tau$ . В контрольных сечениях условно откладываем значение температуры продуктов сгорания  $t_{ухг}$ ,  $t_{\Gamma_1}$ ,  $t_{\Gamma_3}$ , а также температуры на поверхности заготовки  $t_{M_0}^n$ ,  $t_{M_1}^n$ ,  $t_{M_3}^n$  и в ее геометрическом центре  $t_{M_0}^u$ ,  $t_{M_1}^u$ ,  $t_{M_3}^u$ .

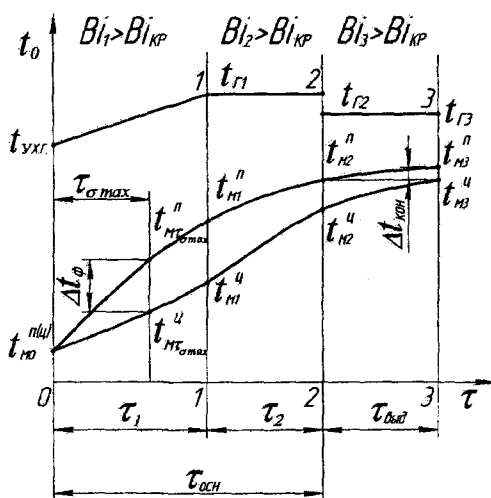


Рис. 4.2. Уточненный температурный график нагрева

Определяем время, когда температурные напряжения максимальны и равны  $\sigma_{max}$ .

$$\tau_{\sigma_{max}} = 0,3 \frac{x^2}{a} \quad (\text{для цилиндра}),$$

$$\tau_{\sigma \max} = 0,25 \frac{x^2}{a} \text{ (для пластины).}$$

Сопоставив  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_y$  ( $\sigma_{\max} \geq \sigma_y$ ), получим, что зону основного нагрева между сечениями  $O-O$  и  $1(2)-1(2)$  необходимо разделить на две зоны – щадящего и форсированного нагрева.

Между точками  $t_{M\tau_{\sigma \max}}^{\Pi}$  и  $t_{M\tau_{\sigma \max}}^{\Pi}$  отмечаем фактический перепад температур  $\Delta t_{\text{фак}}$ , между точками  $t_{M_2}^{\Pi}$  и  $t_{M_2}^{\Pi}$ , а также  $t_{M_3}^{\Pi}$  и  $t_{M_3}^{\Pi}$  – соответственно начальный  $\Delta t_{\text{нач}}$  и конечный  $\Delta t_{\text{кон}}$ .

Перепаду  $\Delta t_{\text{кон}}$  следует уделять большое внимание, так как неравномерность прогрева контрольного сечения заготовки влияет на время выдержки, угар и обезуглероживание садки, а также на работу кузнечно-прессового оборудования, прокатного стана и т. п.

Значение  $\Delta t_{\text{кон}}$  находим по формуле

$$\Delta t_{\text{кон}} = \delta_t \cdot x,$$

где  $\delta_t$  – удельная неравномерность прогрева садки в сечении 3–3, принимаемая равной 2–3 °C/см;

$x$  – характерный размер садки.

Точки  $t_{M_0}^{\Pi(\Pi)}$ ,  $t_{M_2}^{\Pi}$  и  $t_{M_3}^{\Pi}$  наносим на график как заведомо известные.

Так,  $t_{M_0}^{\Pi(\Pi)}$  – температура загрузки (начальная) садки (она задается).

Температуры  $t_{M_2}^{\Pi}$  и  $t_{M_3}^{\Pi}$  равны температуре операции  $t_{\text{оп}}$ , которую выбирают по таблицам, зная марку нагреваемой стали. Значение температуры на поверхности садки в момент ее выдачи из печи находим по выражению

$$t_{M_3}^{\Pi} = t_{M_3}^{\Pi} + \Delta t_{\text{кон}}.$$

В первом приближении температура  $t_{M_1}^{\Pi}$  принимается равной 900–1000 °С (затем она пересчитывается). Значение температуры  $t_{M_1}^{\Pi}$  рассчитываем по уравнениям:

$$F_{01} = f_1 \left( Bi_1, \left( \frac{\theta\tau}{\theta_0} \right)_1^{\Pi} \right); \quad F_{01} = f_1 \left( Bi_1, \left( \frac{\theta\tau}{\theta_0} \right)_1^{\Pi} \right);$$

$$\left( \frac{\theta\tau}{\theta_0} \right)_1^{\Pi} = \frac{t_{r_1} - t_{M_1}^{\Pi}}{t_{r_1} - t_{M_0}^{\Pi}}; \quad \left( \frac{\theta\tau}{\theta_0} \right)_1^{\Pi} = \frac{t_{r_1} - t_{M_1}^{\Pi}}{t_{r_1} - t_{M_0}^{\Pi}}.$$

Эти уравнения нужно решать относительно температуры  $t_{M_1}^{\Pi}$ , используя номограммы, представленные на рис. 4.3–4.6. Аналогично можно рассчитать значение температуры  $t_{M_2}^{\Pi}$ . Найденные значения наносят на температурный график.

Температура продуктов сгорания на выходе из печи  $t_{\text{ух.г}}$  (для двух-трех ступенчатого режима нагрева) принимается равной 800–950 °С. Значения температур  $t_{r_1}$  и  $t_{r_2}$  принимают из соображения их превышения над температурой металла на 400–150 °С, а  $t_{r_3}$  на 100–150 °С и даже 50 °С. Полученный таким образом температурный график при необходимости уточняется и строится заново.

После уточнения температурного графика можно записать значения температур металла и дымовых газов, что позволит рассчитать теплообмен во всех температурных зонах рабочего пространства, продолжительность пребывания металла в печи и другие параметры.

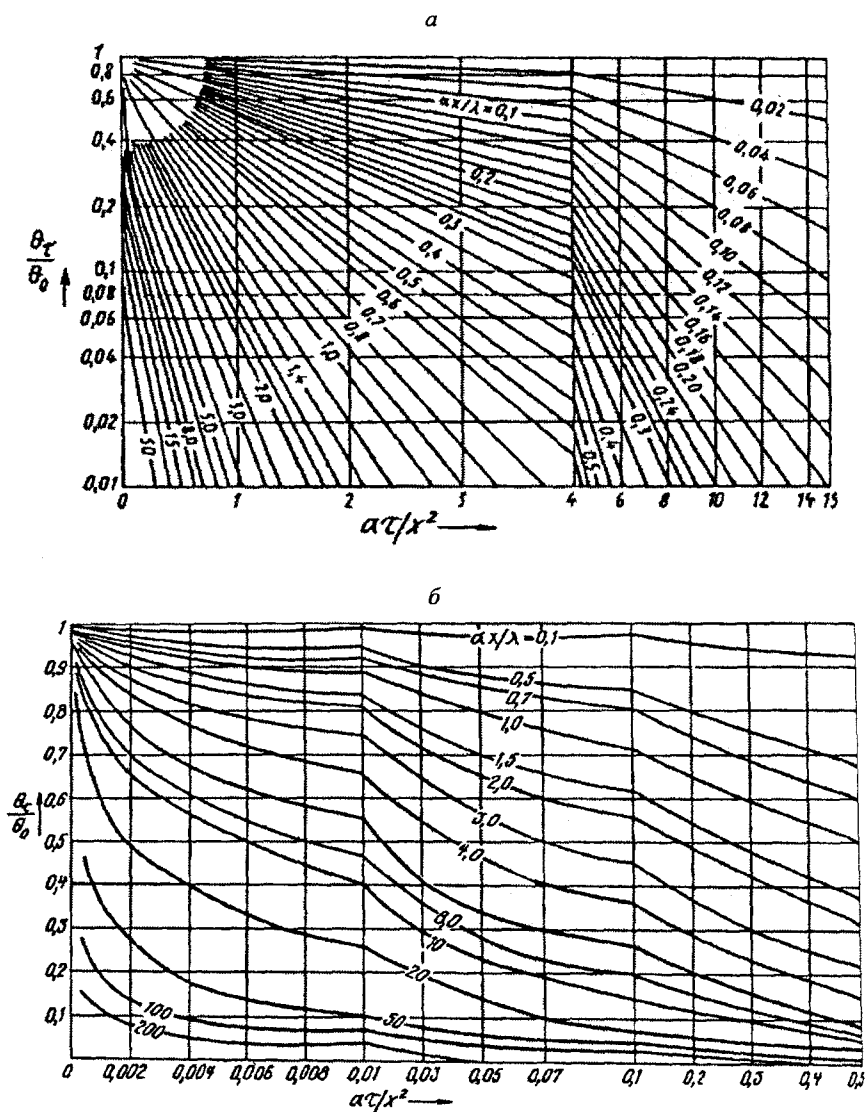
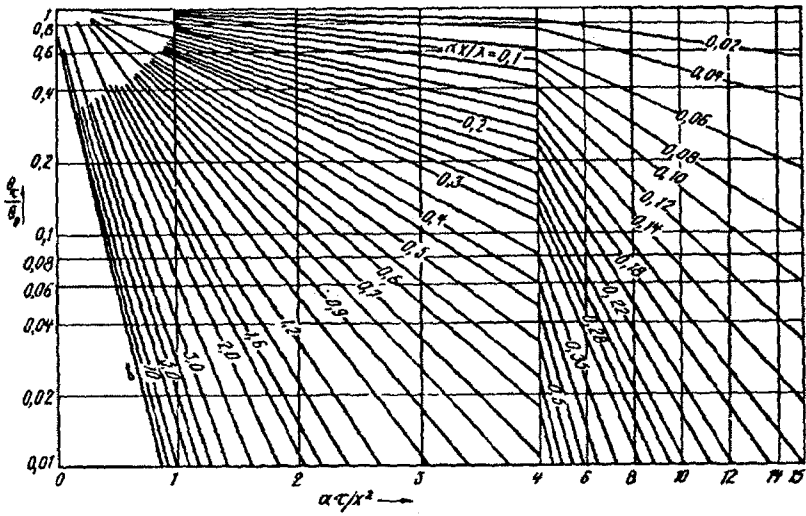


Рис. 4.3. Относительная температура поверхности цилиндра:  
 а -  $Fo < 15$ ; б -  $Fo < 0,5$

a



b

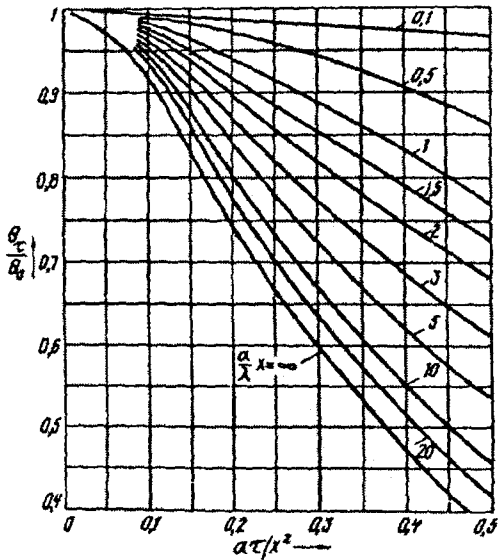


Рис. 4.4. Относительная температура середины цилиндра:  
 а -  $Fo < 15$ ; б -  $Fo < 0,5$



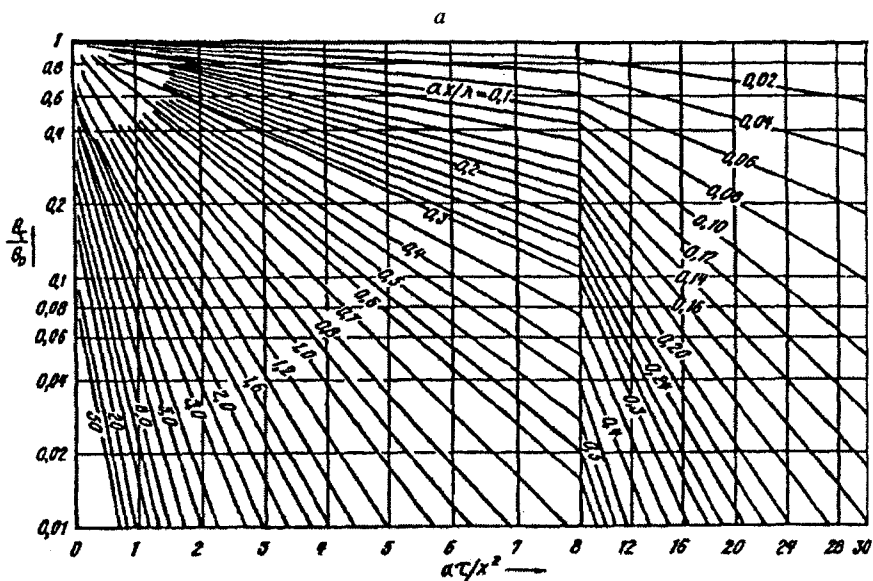


Рис. 4.5. Относительная температура поверхности пластины:  
 а —  $Fo < 30$ ; б —  $Fo < 0,5$

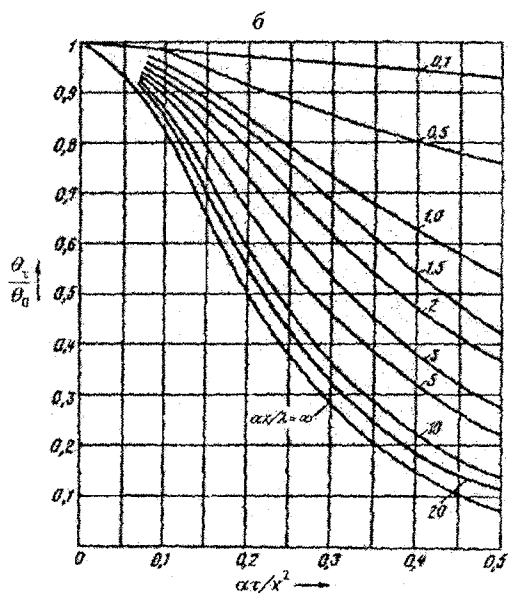
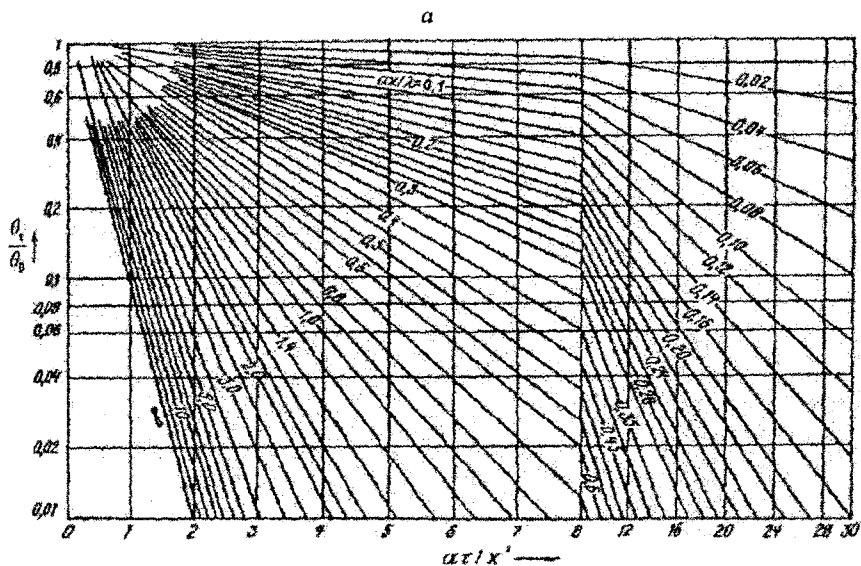


Рис. 4.6. Относительная температура середины пластины:  
а —  $Fo < 30$ ; б —  $Fo < 0,5$

#### 4.2. Расчет интенсивности внешнего теплообмена в зонах рабочего пространства печи

Такой расчет выполняют в соответствии с параметрами температурного графика для каждой зоны в отдельности и в следующей последовательности:

1. Предварительно определяем размеры рабочего пространства печи в зависимости от принятой удельной производительности (напряженности печи), заданных размеров заготовки и способа их расположения на поду. В соответствии с предварительными конструктивными данными для каждой технологической зоны определяют степень развития кладки (рассчитывать площади можно на 1 м длины (погонный) рабочего пространства по эскизному изображению зон) по формуле

$$\omega = \frac{F_{\text{кл}}}{F_{\text{м}}^{\wedge}},$$

где  $F_{\text{кл}}$  и  $F_{\text{м}}^{\wedge}$  – площади поверхностей соответственно излучающей кладки и лучевоспринимающей металла.

$$F_{\text{кл}} = F_{\text{св}} + 2F_{\text{бс}} + 2F_{\text{тс}},$$

$$F_{\text{м}}^{\wedge} = n \cdot \pi d \cdot \varphi,$$

где  $F_{\text{св}}$  – поверхность свода;

$F_{\text{бс}}$  – поверхность боковой стенки;

$F_{\text{тс}}$  – поверхность торцевой стенки;

$n$  – количество заготовок, одновременно уложенных на поду;

$\varphi$  – коэффициент облученности (выбирают по таблице в зависимости от формы заготовки и способа расположения ее на поду).

При расчете на 1 м длины печи

$$\omega = \frac{2H + B}{1},$$

где  $H$  и  $B$  – высота и ширина рабочего пространства печи.

2. Определяем эффективную длину луча в зонах рабочего пространства

$$S_{\text{эф}} = 0,9 \frac{4V}{F},$$

где  $V$  – объем, заполненный излучающим газом, или объем рабочего пространства,  $\text{м}^3$ ;

$F$  – площадь стенок, ограничивающих указанный объем,  $\text{м}^2$ .

При расчете на 1 м длины печи эта формула примет вид

$$S_{\text{эф}} = 0,9 \frac{4HB}{2H + 2B}.$$

3. На основании данных расчета горения топлива находим парциальное давление излучающих газов (диоксид углерода  $\text{CO}_2$  и водные пары  $\text{H}_2\text{O}$ ):

$$p_{\text{CO}_2} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{\sum_{i=1}^4 V_i} \cdot B = \frac{V_{\text{CO}_2}}{\sum_{i=1}^4 V_i} \cdot 98,1, \text{ кН/м}^2,$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{\sum_{i=1}^4 V_i} \cdot B = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{\sum_{i=1}^4 V_i} \cdot 98,1, \text{ кН/м}^2,$$

где  $\sum_{i=1}^4 V_i$  – суммарный объем продуктов сгорания,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;

$V_{\text{CO}_2}$  и  $V_{\text{H}_2\text{O}}$  – содержание  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  в продуктах сгорания,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ .

4. Рассчитываем произведение  $P_{CO_2} \cdot S_{эф}$  и  $P_{H_2O} \cdot S_{эф}$  для всех зон рабочего пространства, среднее значение температур продуктов сгорания в зонах и при этих значениях температур, используя номограммы (рис. 4.7 и 4.8), определяем степень черноты излучающих газов  $\epsilon_{CO_2}$  и  $\epsilon_{H_2O}$  и суммарное значение степени черноты продуктов горения топлива по формуле

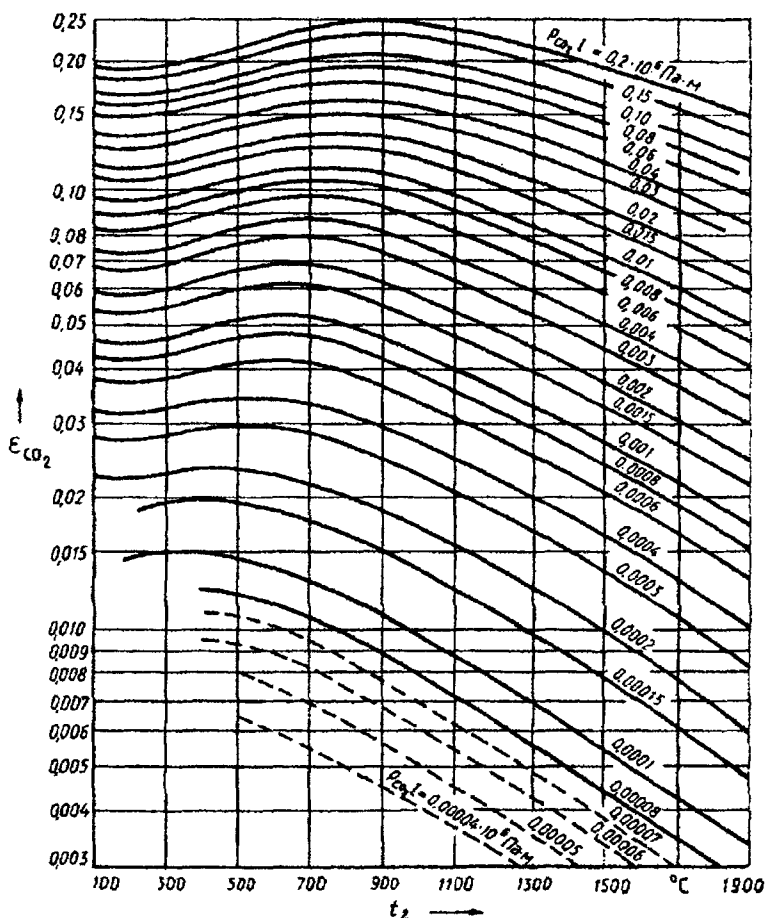


Рис. 4.7. Номограмма для определения  $\epsilon_{CO_2}$

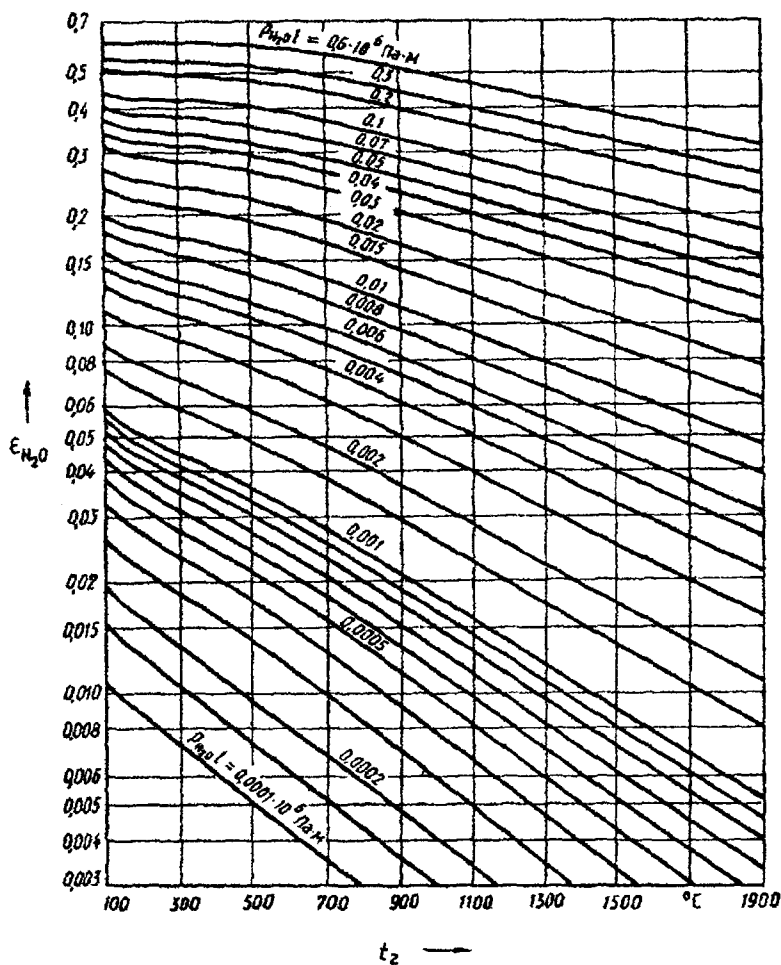


Рис. 4.8. Номограмма для определения  $\epsilon_{H_2O}$

$$\epsilon_r = (\epsilon_{CO_2} + \beta \cdot \epsilon_{H_2O}) + \Delta\epsilon_r,$$

где  $\beta$  и  $\Delta\epsilon_r$  – поправочные коэффициенты, выбираемые в соответствии с рис. 4.9 и 4.10.

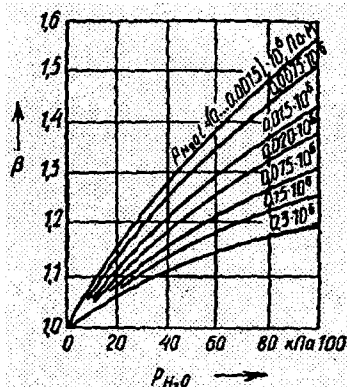


Рис. 4.9. График для определения поправки, учитывающей парциальное давление водяных паров

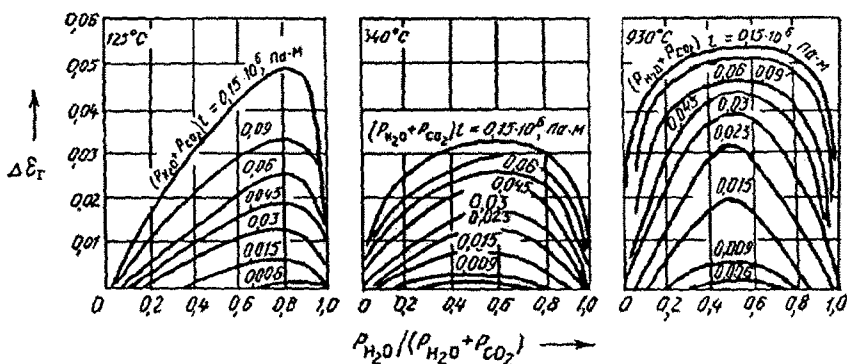


Рис. 4.10. Значения поправки  $\Delta \epsilon_T$  на излучение смеси  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  при различных температурах

5. Определяем значение приведенного коэффициента излучения в системе газ–кладка–металл по приближенной формуле

$$C_{\text{пр}} = C_0 \cdot \epsilon_{\text{пр}} = C_0 \cdot \epsilon_M \cdot \frac{\omega + 1 - \epsilon_T}{[\epsilon_M + \epsilon_T(1 - \epsilon_M)] \cdot \frac{1 - \epsilon_T}{\epsilon_T} + \omega}$$

где  $C_0$  – коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела, равный  $5,67 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ ;

$\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенная степень черноты системы, равная  $f(\varepsilon_{\text{м}}, \varepsilon_{\text{г}}, \omega)$ ;

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

6. Рассчитываем коэффициент теплоотдачи излучением в зонах рабочего пространства по формуле

$$\alpha_{\text{л}} = C_{\text{пр}} \frac{\left[ \left( \frac{T_{\text{г}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{м}}}{100} \right)^4 \right]}{t_{\text{г}} - t_{\text{м}}}$$

Если по длине печи или с течением времени температуры газа и металла меняются, то средний за время нагрева коэффициент теплоотдачи излучением находят по формуле

$$\alpha_{\text{л}} = \sqrt{\alpha_{\text{л}}^{\text{н}} \cdot \alpha_{\text{л}}^{\text{к}}} = \frac{\sqrt{C_{\text{пр}}^{\text{н}} \cdot C_{\text{пр}}^{\text{к}} \left[ \left( \frac{T_{\text{г}}^{\text{н}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{м}}^{\text{н}}}{100} \right)^4 \right] \left[ \left( \frac{T_{\text{г}}^{\text{к}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{м}}^{\text{к}}}{100} \right)^4 \right]}}{\sqrt{(t_{\text{г}}^{\text{н}} - t_{\text{м}}^{\text{н}})(t_{\text{г}}^{\text{к}} - t_{\text{м}}^{\text{к}})}}$$

где индексы «н» и «к» означают температуры газа и металла в начале и конце периода нагрева.

Если температура газа принимается неизменной, то

$$\alpha_{\text{л}} = C_{\text{пр}} \frac{\sqrt{\left[ \left( \frac{T_{\text{г}}^{\text{н}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{м}}^{\text{н}}}{100} \right)^4 \right] \left[ \left( \frac{T_{\text{г}}^{\text{к}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{м}}^{\text{к}}}{100} \right)^4 \right]}}{\sqrt{(t_{\text{г}} - t_{\text{м}}^{\text{н}})(t_{\text{г}} - t_{\text{м}}^{\text{к}})}}$$

7. Выполняем расчет конвективного теплообмена. Определяем значение конвективной составляющей теплоотдачи  $\alpha_{\text{п}}$ , полагая, что  $\alpha_{\text{к}} = (0,05 - 0,15)\alpha_{\text{л}}$ .



8. Определяем суммарный коэффициент теплоотдачи для каждой зоны путем суммирования конвективной и лучистой составляющих:

$$\alpha = \alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{к}}.$$

9. Значение эффективных коэффициентов теплоотдачи сопоставляют с принятыми ранее при построении первоначального графика, пересчитывают критерий  $Вi$  для каждой зоны и вносят коррективы в классификацию садки (при необходимости изменяют число зон, приводя его в соответствие с расчетными данными), уточняют расчетное время пребывания садки в зонах рабочего пространства, наносят значения времени на температурный график.

10. Путем суммирования рассчитывают общее время нагрева заготовок и полученные значения сопоставляют с данными, имеющимися в литературе.

#### ***4.3. Определение продолжительности нагрева заготовок***

Продолжительность нагрева тонких тел при постоянной температуре печи определяют по формуле

$$\tau = \frac{G}{F} \cdot \frac{c}{\alpha} \cdot \ln \frac{t_{\text{печ}} - t_{\text{М}}^{\text{Н}}}{t_{\text{печ}} - t_{\text{М}}^{\text{К}}}, \text{ с}$$

или

$$\tau = \frac{S \cdot c \cdot \rho}{m \alpha} \cdot \ln \frac{t_{\text{печ}} - t_{\text{М}}^{\text{Н}}}{t_{\text{печ}} - t_{\text{М}}^{\text{К}}}, \text{ с},$$

где  $\frac{G}{F} = \frac{S \cdot \rho}{m}$  – отношение массы к поверхности тела;

$S$  – расчетная толщина нагреваемого тела (изделия), м;

$\rho$  – плотность тела (изделия),  $\text{кг/м}^3$ ;

$m$  – коэффициент формы, зависящий от отношения объема тела к его поверхности и равный для пластины – 1, для цилиндра – 2, для шара – 3;

$c$  – средняя теплоемкость тела (изделия), кДж/кг·°С;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>·°С;

$t_{\text{печ}}$  – температура печи, °С;

$t_M^H$  и  $t_M^K$  – начальная и конечная температуры тела, °С.

Средняя температура тела за весь период нагрева

$$\bar{t} = t_{\text{печ}} + \frac{t_M^H - t_M^K}{\ln \frac{t_{\text{печ}} - t_M^H}{t_{\text{печ}} - t_M^K}}$$

Для высокотемпературных печей, в которых преобладает теплопередача излучением, продолжительность нагрева может определяться по радиационной формуле

$$\tau = \frac{S \cdot c \cdot \rho}{m \alpha} \cdot \frac{100}{\left(\frac{T_{\text{печ}}}{100}\right)^3} \cdot \left[ \psi\left(\frac{T_M^K}{T_{\text{печ}}}\right) - \psi\left(\frac{T_M^H}{T_{\text{печ}}}\right) \right].$$

Функция  $\psi$  имеет вид

$$\psi\left(\frac{T}{T_{\text{печ}}}\right) = \frac{1}{4} \ln \frac{1 + \left(\frac{T}{T_{\text{печ}}}\right)}{1 - \left(\frac{T}{T_{\text{печ}}}\right)} + \frac{1}{2} \arctg \frac{T}{T_{\text{печ}}}.$$

Значение  $\psi\left(\frac{T}{T_{\text{печ}}}\right)$  можно определить по графику (рис. 4.11).

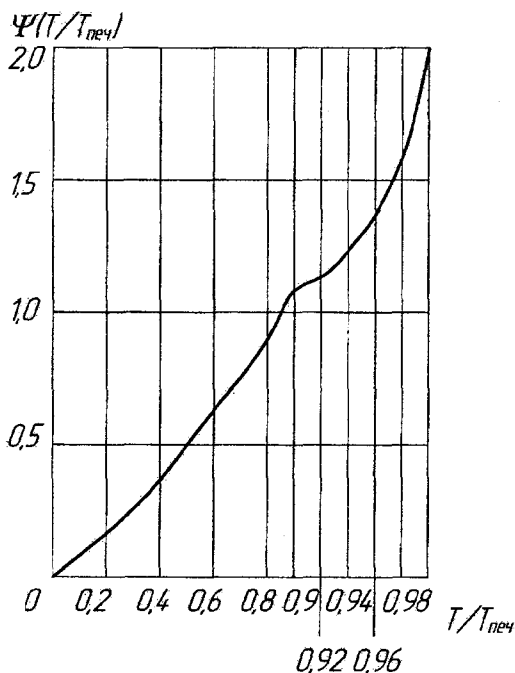


Рис. 4.11. График функции  $\Psi(T/T_{\text{печ}})$

Более универсальным способом определения времени нагрева детали в термической или нагревательной печи является способ расчета по критериальным зависимостям, который можно выразить в следующей форме:

$$\frac{t_{\text{печ}} - t_{\text{M}}^{\text{K}}}{t_{\text{печ}} - t_{\text{M}}^{\text{H}}} = e^{-m \text{Bi} \text{Fo}},$$

где  $\text{Bi}$  и  $\text{Fo}$  – критерии Био и Фурье.

Подставив в эту зависимость выражение критерия Фурье  $Fo = \frac{a \tau}{S^2}$  и решив его относительно времени нагрева, получим

$$\tau = \frac{S^2 \ln \frac{t_{\text{печ}} - t_M^H}{t_{\text{печ}} - t_M^K}}{a Bi} \cdot \frac{1}{m},$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности металла,  $m^2/c$ ;  
 $m$  – коэффициент формы.

Существуют графики, построенные Д.В. Будриным [7, 10, 13], представляющие данную критериальную зависимость, т. е.

$$\theta = \frac{t_{\text{печ}} - t_M^K}{t_{\text{печ}} - t_M^H} = f(Bi; Fo; \frac{\chi}{S}).$$

В этих графиках приведены значения функций  $f(Bi; Fo)$  для поверхности ( $\chi = \pm S$  или  $r = R$ ) и для центра ( $\chi = 0$  или  $r = 0$ ) пластины и цилиндра в зависимости от критериев Био ( $Bi = \frac{\alpha S}{\lambda}$  – для пластины или  $Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}$  – для цилиндра) и Фурье (см. рис. 4.3–4.6).

Приведенные формулы и указанные графики Будрина можно использовать и для случая охлаждения тел в среде с постоянной температурой, т. е. когда  $t_{\text{среды}} < t_{\text{нач}}^M$ .

Определение времени нагрева (охлаждения) по критериальным зависимостям производится в следующей последовательности:

- а) находим критерий  $Bi$ ;
- б) находим температурный критерий для поверхности нагреваемого изделия  $\theta_{\text{пов}}$  и срединных слоев металла  $\theta_{\text{цен}}$ ;

в) определяем критерий  $Fo$  (по графику) по найденным значениям критериев  $Bi$  и  $\theta$ ;

г) уточняем значение коэффициента теплопроводности по приближенному значению  $t_{цен}$ , а затем соответственно уточняем рассчитанные выше величины;

д) рассчитываем время нагрева  $\tau = Fo \frac{S^2}{a}$  ( $a$  – среднее значение коэффициента температуропроводности).

Следует отметить, что рассчитать нагрев деталей в печах с постоянной температурой можно по формулам для тонких тел, когда критерий Био  $< 0,4$ , и по графикам Д.В. Будрина, когда критерий Био  $> 0,4$ .

Нагрев массивных тел ведется по двух- или трехступенчатому графику, если не оговорен специальный режим термообработки.

При определении продолжительности нагрева массивных тел пользуются формулой, выведенной из уравнения теплопроводности в предположении, что температура поверхности изменяется прямолинейно в зависимости от времени:

$$\tau = \frac{\Phi S^2}{a \Delta t_M^k} (t_M^k - t_M^H), \text{ с,}$$

где  $\Phi$  – коэффициент формы заготовки, выбираемый по таблице [10, 13];

$S$  – расчетная толщина заготовки, м;

$a$  – коэффициент температуропроводности металла,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$t_M^H$  и  $t_M^k$  – начальная и конечная температуры металлов,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\Delta t_M^k$  – конечная разность температур поверхности и центра нагреваемой заготовки,  $^{\circ}\text{C}$ .  $\Delta t_M^k$  определяется по формуле

$$\Delta t_M^k = \left[ \left( \frac{T_{\text{печ}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_M^k}{100} \right)^4 \right] \frac{1}{0,6} \cdot \frac{S}{\lambda}, \text{ } ^{\circ}\text{C,}$$

где  $T_{\text{печ}}$  – температура печи, К;

$T_{\text{м}}^{\text{к}}$  – температура металла конечная, К;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м · °С.

Если нагрев протекает с выдержкой в конце для выравнивания температур по сечению заготовок и для завершения структурных превращений, то продолжительность выравнивания температур определяется по формуле

$$\tau_{\text{выр}} = e \frac{S^2}{a}, \text{ с,}$$

где  $e$  – коэффициент, выбираемый по графику в зависимости от степени выравнивания температур  $\delta$  и формы тела [13]:

$$\delta = \frac{\Delta t_{\text{м}}^{\text{доп}}}{\Delta t_{\text{м}}^{\text{к}}},$$

где  $\Delta t_{\text{м}}^{\text{доп}}$  – допустимая разность температур в конце выдержки (200 °С на 1 м толщины заготовки).

Степень выравнивания температуры можно определить по следующей расчетной формуле [7]:

$$\delta = \frac{\Delta t_{\text{к}}}{\Delta t_{\text{н}}} = f\left(\frac{a\tau}{S^2}\right), \quad \frac{a\tau}{S^2} = e,$$

где  $\Delta t_{\text{н}}$  и  $\Delta t_{\text{к}}$  – разность температур по сечению тела в начале и конце нагрева, °С.

При нагреве под ковку и штамповку  $\Delta t_{\text{к}} = 20\text{--}50$  °С, при нагреве под термообработку  $\Delta t_{\text{к}} = 5\text{--}10$  °С и ниже.

Продолжительность выдержки при термообработке для завершения структурных превращений, по литературным данным принимается равной примерно двойному времени выравнивания, т. е.

$$\tau_{\text{выд}} = 2\tau_{\text{выр}}.$$

При нагреве высокоуглеродистых и легированных сталей (трех-ступенчатый режим) температурные напряжения могут возникать до 500–550 °С. Поэтому продолжительность первого периода определяют по формуле

$$\tau_I = \frac{\Phi S^2}{a \Delta t_{\text{доп}}} [500 + (1 - \gamma) \Delta t_{\text{доп}} - t_n], \text{ ч.}$$

где  $\Phi$  – коэффициент формы;

$S$  – расчетная толщина изделия, м;

$a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;

$\gamma$  – поправочный коэффициент (для цилиндра  $\gamma = 0,5$ , для пластины  $\gamma = 0,33$ );

$\Delta t_{\text{доп}}$  – допускаемая разность температур по сечению для первого периода, °С.  $\Delta t_{\text{доп}}$  находят по формулам:

$$\Delta t_{\text{доп}} = \frac{1,05 \sigma_{\text{доп}}}{\beta E}, \text{ °С – для пластины;}$$

$$\Delta t_{\text{доп}} = \frac{1,4 \sigma_{\text{доп}}}{\beta E}, \text{ °С – для цилиндра,}$$

где  $\sigma_{\text{доп}}$  – допустимое температурное напряжение;

$\beta$  – коэффициент объемного расширения, 1 / °С;

$E$  – модуль упругости, Н/м<sup>2</sup>.

Второй период нагрева – ускоренный, или форсированный (металл перешел в пластическое состояние), причем скорость и разность температур по сечениям будут зависеть от тепловой мощности печи.

На практике считают, что  $\Delta t_n = (1,25 - 1,5) \Delta t_{\text{доп}}$ .

$$\text{Тогда } \tau_{II} = \frac{\Phi S^2}{a} [t_{II}^{\text{II}} - \gamma \Delta t_{II} - 500 - (1 - \gamma) \Delta t_{\text{доп}}], \text{ ч.}$$

Продолжительность третьего периода – выдержки для выравнивания температуры по сечению определяют по формулам:

$$\tau_{III} = \frac{S^2}{2,47 a_{III}} \ln 1,03 \frac{\Delta t_{II}}{\Delta t_M^k}, \text{ ч} - \text{ для пластины};$$

$$\tau_{III} = \frac{R^2}{5,78 a_{III}} \ln 1,11 \frac{\Delta t_{II}}{\Delta t_M^k}, \text{ ч} - \text{ для цилиндра},$$

где  $\Delta t_M^k$  – конечная разность температур по сечению, равная 25–70°C.

Продолжительность нагрева по известному тепловому потоку или при  $q_{II} = \text{const}$  определяют по формуле

$$\tau = \frac{\Delta i S \rho}{m q_{ср}},$$

где  $\Delta i$  – приращение теплосодержания, кДж/кг;  
 $m$  – коэффициент формы;

$$q_{ср} = \frac{q_H - q_K}{2,3 \lg \frac{q_H}{q_K}} - \text{средний тепловой поток, Вт/м}^2;$$

$q_H, q_K$  – тепловой поток в начале и конце интервала, Вт/м<sup>2</sup>.

Продолжительность нагрева массивных тел можно определить по формулам для тонких тел, но с поправкой на массивность (для

тел с  $\frac{\alpha S}{\lambda} < 40$ ):

$$\tau = \frac{S \rho c k}{m \alpha} \ln \frac{t_{\text{печ}} - t_M^H}{t_{\text{печ}} - t_M^K}, \text{ с.}$$



Коэффициент  $k$  зависит от массивности тела и его формы и определяется по выражению

$$k = 1 + \frac{\alpha S}{(m + 2) \lambda}.$$

Из эмпирических формул можно рекомендовать формулу Н.Н. Доброхотова для определения времени всестороннего нагрева заготовок толщиной свыше 100 мм до 1200 °С в камерных печах:

$$\tau = kD\sqrt{D}, \text{ ч},$$

где  $k$  – коэффициент, равный 10 для конструкционной углеродистой и низколегированной стали, и 20 для высокоуглеродистой и высоколегированной стали;

$D$  – диаметр или толщина заготовки, м.

Время нагрева, особенно высокоуглеродистой и высоколегированной стали, разбивают чаще всего на два периода: от 0 °С до 850 °С и от 850 °С до 1200 °С; при этом коэффициент  $k$  для первого периода принимают равным 5 для углеродистой стали и 13,3 – для высокоуглеродистой и высоколегированной, а для второго периода – соответственно 5 и 6, 7.

Продолжительность нагрева конструкционных и низколегированных сталей в методических печах с температурой уходящих газов 800–850 °С можно определить по формуле Н.Ю. Тайца

$$\tau = (7 + 0,05D)D, \text{ мин},$$

где  $D$  – толщина изделия, см.

При нагреве заготовок толщиной до 300–350 мм в методических, полуметодических печах продолжительность нагрева ориентировочно можно определить по формуле

$$\tau = kd,$$

где  $k$  – коэффициент равный:

0,1–0,15 – для углеродистых и слаболегированных сталей,

0,15–0,2 – для легированных сталей,

0,3–0,4 – для высоколегированных и инструментальных сталей.

Для учета влияния длины заготовки продолжительность нагрева умножают на коэффициент  $k_1$  в зависимости от отношения длины заготовки к размеру сечения.

При  $l/d$  – 3    2    1,5    1

$k_1$  – 1    0,98    0,92    0,71

При определении продолжительности нагрева изделий следует учитывать, что практически на поду печи лежит не одна заготовка, а несколько, что уменьшает эффективную лучевоспринимающую поверхность. Поэтому время нагрева изделий должно быть вычислено с учетом расположения изделий на поду печи. Значения коэффициентов расположения заготовок (изделий)  $k$  приводятся на рис. 4.12.

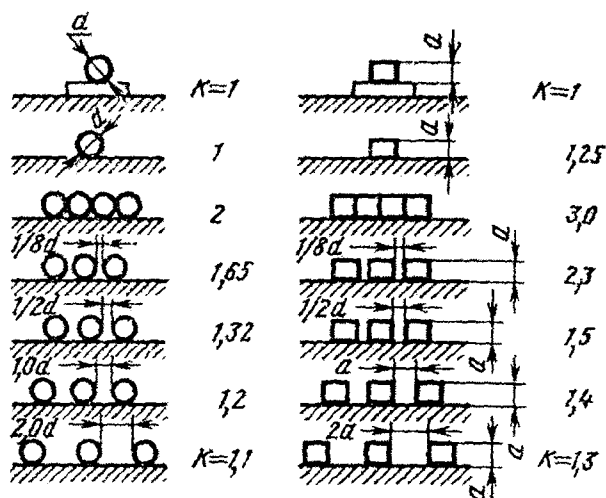


Рис. 4.12. Значения коэффициента  $k$ , учитывающего влияние взаимного расположения заготовок на поду печи во время нагрева

При расчете нагрева металла определяют не только продолжительность нагрева и температуры металла, но и другие параметры.

характеризующие процесс нагрева: температуру печи, тепловой поток, коэффициенты теплоотдачи и т. д. В этих случаях пользуются следующими формулами:

$$t_{\text{печ}} = 100 \sqrt{\frac{q}{C_{\text{пр}}} + \left(\frac{T_{\text{п}}}{100}\right)^4} - 273, \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$q = \frac{2\lambda \Delta t}{S}; \quad q = \alpha(t_{\text{печ}} - t_{\text{п}}), \text{ Вт/м}^2;$$

$$q = C_{\text{пр}} \left[ \left(\frac{T_{\text{печ}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{п}}}{100}\right)^4 \right], \text{ Вт/м}^2;$$

$$\alpha = C_{\text{пр}} \frac{\left(\frac{T_{\text{печ}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{п}}}{100}\right)^4}{t_{\text{печ}} - t_{\text{п}}}, \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C},$$

где  $t_{\text{печ}}$  ( $T_{\text{печ}}$ ) – температура печи,  $^\circ\text{C}$  (К);

$t_{\text{п}}$  ( $T_{\text{п}}$ ) – температура поверхности,  $^\circ\text{C}$  (К);

$C_{\text{пр}} = \varepsilon C_0$  – приведенный коэффициент излучения,  $\text{Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}^4$ ;

$\lambda$  – среднее значение коэффициента теплопроводности,  $\text{Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$ ;

$\Delta t$  – разность температур по сечению тела,  $^\circ\text{C}$ ;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ;

$\varepsilon$  – степень черноты.

Охлаждение при термической обработке – важнейшая стадия процесса. В зависимости от режима термообработки скорость охлаждения может быть различной.

Если изделие охлаждается в печи и скорость охлаждения задана, то расчет охлаждения сводится к определению перепада температур по сечению изделия, теплового потока и температуры печи [7].

В случае охлаждения изделий на воздухе или в жидкой среде расчет охлаждения можно производить по формулам, относящимся к нагреву изделий при постоянной температуре окружающей среды.

## 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА ПЕЧИ

Стандартом установлено понятие рабочего пространства как пространства, определяемого шириной (диаметром), длиной и высотой садки максимальных размеров (а для насыпной продукции – размерами загруженных корзин, поддонов, барабанов, конвейерных лент или плит и т. д.), неравномерность температуры которого по окончании процесса не превышает задаваемого значения.

Следовательно, основными размерами рабочего пространства печи являются ширина, длина и высота.

Размеры рабочего пространства печи определяют исходя из следующих положений:

– Размеры пода печи (ширина и длина) при выбранном расположении изделий должны соответствовать заданной производительности печи.

– Высота рабочего пространства печи должна обеспечивать такой ее объем, при котором достигается полное горение топлива, достаточная интенсивность теплопередачи на поверхность металла и удобство размещения изделий.

Таким образом, размеры пода проектируемой печи связаны с производительностью печи, размерами садки (заготовок), временем пребывания металла в технологических зонах и способом укладки заготовок в печи. Эту связь определяют следующими соотношениями:

### 1. Штучная производительность печи

$$N = \frac{G}{g}, \text{ шт/ч,}$$

где  $G$  – часовая производительность печи, кг/ч;

$g$  – вес нагреваемого изделия, кг/шт.

2. Количество нагреваемых изделий, которое должно находиться одновременно в печи, чтобы обеспечивать требуемую штучную производительность:

$$n = N \cdot \tau, \text{ шт.},$$

где  $\tau$  – продолжительность нагрева заготовок с учетом их расположения в печи, ч.

3. Площадь пода, занятая металлом (полезная площадь пода):

$$F_{\text{акт}} = n \cdot f_{\text{м}}, \text{ м}^2,$$

где  $f_{\text{м}}$  – проекция нагреваемого изделия на под,  $\text{м}^2$ .

4. Коэффициент загрузки пода

$$k_{\text{п}} = \frac{F_{\text{акт}}}{F_{\text{п}}},$$

где  $F_{\text{п}}$  – площадь пода печи (полная),  $\text{м}^2$ .

Отсюда необходимые размеры площади пода для обеспечения часовой производительности  $G$  (кг/ч) или штучной  $N$  (шт/ч).

$$F_{\text{п}} = \frac{F_{\text{акт}}}{k_{\text{п}}} = \frac{N \tau f_{\text{м}}}{k_{\text{п}}} = \frac{G f_{\text{м}}}{g k_{\text{п}}} \tau, \text{ м}^2.$$

Практически в целях получения максимальной производительности для камерных печей  $k_{\text{п}} = 0,4-0,5$ , для методических и проходных печей, когда заготовки лежат вплотную друг к другу,  $k_{\text{п}} = 0,7-0,9$ .

Размер пода печи при заданной производительности можно также определить из выражения

$$F_{\text{п}} = \frac{G}{K}, \text{ м}^2,$$

где  $G$  – производительность печи, кг/ч;

$K$  – коэффициент напряженности пода,  $\text{кг/м}^2 \cdot \text{ч}$ .

Напряженность пода зависит от типа печи, вида топлива, величины поверхности нагреваемого изделия и находится в пределах  $350\text{--}500 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$  для камерных печей (для термической обработки – закалки, нормализации и отпуска –  $100\text{--}160 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$ ),  $500\text{--}550 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$  – для методических (для термообработки –  $100\text{--}200 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$ ),  $50\text{--}60 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$  – для отжигательных печей и  $1200 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$  – для печей скоростного нагрева.

Более точно размер пода рабочего пространства печи определяется исходя из следующего:

А. Ширина пода при укладке изделий поперек пода определяется длиной нагреваемых изделий и удвоенным расстоянием между концами изделия и стенками печи, т. е.

$$B_{\text{п}} = l_{\text{изд}} + 2\delta, \text{ мм},$$

где  $l_{\text{изд}}$  – длина изделия, мм;

$\delta$  – зазор между изделием и стенкой печи, мм.

В расчетах  $\delta$  принимают равным  $200\text{--}300$  мм. При укладке изделий в несколько рядов следует учитывать также величину зазоров между рядами изделий (шаг укладки –  $S$ ).

Тогда

$$B_{\text{п}} = n_1 \cdot l_{\text{изд}} + (n_1 - 1)S + 2\delta, \text{ мм},$$

где  $n_1$  – количество рядов нагреваемых изделий;

$S$  – шаг между изделиями, мм.

Для механизированных печей ширина пода печи зависит от размеров транспортных средств (поддонов, конвейерных лент и др.). Как правило, в этих печах применяют одно- или двухрядный посад (расположение).

В нагревательных проходных печах нет фиксации заготовок (садки), ограничивающей их смещение к стенкам печи, в отличие от термических, где поддоны за счет направляющих могут перемещаться лишь в одном направлении. Поэтому зазоры между движущимися

рядами (а) и между движущимися рядами и стенкой рабочей камеры (с) для перемещающейся садки в поддонах значительно меньше, чем в нагревательных проходных печах (табл. 5.1).

Таблица 5.1

**Характеристика носادا, определяющая ширину рабочего пространства проходных печей**

Тип печи	Значения зазоров, мм	
	а	с
Методическая нагревательная: однорядный посад	250–400	250–350
двухрядный посад	200–350	200–300
Термическая проходная с одно- и многорядным посадом поддонов (конвейерных лент)	50–100	30–150

Б. Длина пода печи определяется количеством изделий, одновременно находящихся в печи.

При однорядной укладке полезная длина пода печи будет равна

$$L_{\text{пол}} = n \cdot b, \text{ мм},$$

где  $n$  – количество нагреваемых изделий;

$b$  – размер (диаметр или сторона квадрата) заготовки.

При двухрядной укладке

$$L_{\text{пол}} = \frac{n}{2} \cdot b, \text{ мм}.$$

Полная длина печи при укладке изделий по длине пода в несколько рядов с учетом шага укладки и расстояния от изделия до торцевой стенки будет равна

$$L_{\text{пол}} = n' b + (n' - 1)S + a, \text{ мм},$$

где  $n'$  – количество изделий в одном ряду, равное  $n/n'$ ;

$S$  – шаг между изделиями, мм;

$a$  – расстояние (зазор) от изделия до торцевой стенки (принимается равным 200–300 мм).

Шаг между изделиями должен быть увязан с коэффициентом, учитывающим расстояние изделий на поду печи  $\alpha_{\text{расп}}$  (см. раздел 4). Тогда полная площадь пода

$$F_{\text{п}} = L_{\text{пол}} B_{\text{п}}.$$

**Высота печи.** На основании исследований рекомендуют рабочее пространство малых печей делать высотой 400–600 мм, учитывая вид топлива и способ его сжигания (для газовых печей меньшее значение), средних – 600–800 мм, а для больших – 800–1000 мм.

Высоту рабочего пространства печи можно определить по формуле, предложенной М.А. Глинковым:

$$H = (A + 0,5B_{\text{п}})t_{\text{г}}10^{-3}, \text{ м},$$

где  $A$  – коэффициент, равный 0,5–0,53 для печи с  $t_{\text{г}} < 900$  °С и 0,6–0,65 –  $t_{\text{г}} > 1300$  °С;

$B_{\text{п}}$  – ширина пода печи, м;

$t_{\text{г}}$  – температура печных газов, °С.

Данной формулой целесообразно пользоваться при расчете методических печей.

Высота сварочных зон кузнечных методических печей равна примерно 1000 мм. Она зависит от скорости газов в печи, которую определить в начале расчета печи трудно.

Высоту рабочего пространства печи можно определить также по отношению поверхностей нагреваемого металла и кладки печи

$\omega = \frac{F_{\text{м}}}{F_{\text{кл}}}$ . Это отношение для нагревательных печей берется в пределах 0,25–0,3.

Следовательно, задав соответствующие значения  $\omega$  и вычислив величину нагреваемой поверхности металла  $F_{\text{м}}$ , можно определить

величину внутренней поверхности кладки  $F_{\text{кл}} = \frac{F_{\text{м}}}{\omega}$ . Тогда высота рабочего пространства печи определяется из уравнения



$$F_{\text{кл}} - F_{\text{св}} = 2H(B_{\text{п}} + L_{\text{п}}),$$

где  $F_{\text{св}}$  – внутренняя поверхность свода печи, равная  $1,1 F_{\text{п}}$ ,  $\text{м}^2$ ;

$B_{\text{п}}$  – ширина пода печи, м;

$L_{\text{п}}$  – длина пода печи, м.

Откуда

$$H = \frac{F_{\text{кл}} + F_{\text{св}}}{2(B_{\text{п}} + L)}.$$

При расчетах иногда принимают  $F_{\text{м}} = F_{\text{п}}$ .

Тогда

$$F_{\text{м}} = F_{\text{кл}} \varpi.$$

где  $\varpi$  – отношение площадей пода и кладки (стен и свода). В этом случае  $\varpi$  берется в пределах 0,35–0,45.

Этими формулами целесообразно пользоваться при расчете камерных печей.

Высота печи может быть рассчитана также по объему рабочего пространства и площади пода:

$$H = \frac{V}{F_{\text{п}}}, \text{ м.}$$

Объем рабочего пространства определяется по времени пребывания газов в печи, к тому же учитывается объем, занятый металлом и зазорами.

Следует иметь в виду, что основные размеры рабочего пространства печей, также как и номинальные температуры, регламентированы ГОСТ 26654-85 «Печи промышленные для нагрева и термической обработки».

Ширина (диаметр) рабочего пространства всех конструкций печей должна соответствовать следующему ряду значений (мм), предусмотренных ГОСТ 6636-69: 100, 120, (150), 180, 200, 250, (300), 320, 400, (450), 500, (600), 630, (650), 800, (850), 1000, (1100), (1200), 1250, 1400, (1500), 1600, 1800, 2000, 2240, (2360), 2500, (3000), 3250, 3550, 4000, 4500, 5000, (6000), 6300, 7100, 8000 и далее через 1000 мм.

Стандартом длину и высоту рабочего пространства рекомендуется выбирать, пользуясь также перечисленными выше значениями.

## **6. ВЫБОР МАТЕРИАЛА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КЛАДКИ ПЕЧИ И СОСТАВЛЕНИЕ РАСЧЕТНОГО ЭСКИЗА ПЕЧИ**

Кладка печей подвергается воздействию высоких температур, которые изменяются во времени, разъедающему действию шлаков и окислы, давлению нагреваемых изделий, ударам при их посадке, что сказывается на продолжительности эксплуатации печей и на технико-экономических показателях их работы.

Поэтому кладка печей должна обладать высокой стойкостью. Это достигается правильным выбором конструкции элементов кладки, рациональным применением различных видов огнеупоров, выполнением кладки высокого качества, а также строгим соблюдением правил эксплуатации печей.

Кладка печей обычно делается в два слоя: внутренний слой выполняется из огнеупорного материала (шамота, динаса, магнезита, хромомagneзита, талька и др.), внешний слой из теплоизоляционного материала (легковесные огнеупоры, диатомит, трепел, асбест, шлаковая и зольная засыпка и др.).

Основные свойства огнеупорных, теплоизоляционных материалов и способы их применения приведены в справочной и технической литературе. Свойства наиболее распространенных материалов представлены в табл. 6.1.

### Теплофизические характеристики основных огнеупорных и теплоизоляционных материалов

Материал	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/м·К	Удельная теплоемкость $c_{ср}$ , Дж/кг·К	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Динас обычный	0,815+0,00067 t	870+0,193 t	1900–2000
Динас высокоплотный	1,58+0,00038 t	870+0,193 t	2000–2100
Шамот	0,7+0,00064 t	865+0,21 t	1800–2000
Шамот класса А	0,88+0,00023 t	865+0,21 t	1800–1900
Высокоглиноземистый:			
ВГО-45	0,84+0,00058 t	835+0,25 t	2200
ВГО-62	1,75+0,0023 t	835+0,25 t	2400
Магнезит	6,28–0,0027 t	1050+0,145 t	2600–2800
Тальк	1,05–0,00031 t	≈677	2000
Хромомагнезит	2,8–0,00087 t	≈920	2700–2850
Магнезитохромит	4,1–0,0016 t	≈920	2800–2900
Карборунд рефракс	37,1–0,0344 t	960+0,145 t	2100
Шамот легковес	0,116+0,00016 t	960	400
ШЛБ-0,8	0,225+0,00022 t	960	800
ШЛБ-1,0	0,314+0,00035 t	960	1000
ШЛА-1,3, ШЛБ-1,3	0,465+0,00038 t	960	1300
Динас-легковес	0,29+0,00037 t	1000	1000
Диатомовый кирпич	0,116+0,00015 t	920	500
Пеношамот	0,28+0,00023 t	850	600
Ультролегковес	0,15–0,24	835	280
Пенодиатгомит	0,07–0,09	–	230–430
Шлаковая вата марки 200	0,048+0,00014 t	1050	< 200
Минеральная вата	0,046–0,058	–	180–250

Огнеупоры применяют в виде кирпичей различных размеров, фасонных изделий и изделий специального назначения. Теплоизоляционные материалы можно применять в виде штучных изделий, засыпных материалов и мастичных масс. Чаще всего кладка выполняется из стандартного прямого кирпича размером 230 × 115 × 65 мм, и толщина кладки принимается кратной одному из размеров кирпича:

- кладка толщиной 230 мм – 1 кирпич (кладка на торец);
- кладка толщиной 115 мм – 1/2 кирпича (кладка на ребро);
- кладка толщиной 65 мм – 1/4 кирпича (кладка на плашку).

Основными элементами кладки печей являются стены, своды, поды, дымоходы и различные отверстия. Стены печей обычно имеют внутренние рабочие (огнеупорные) и наружные теплоизоляционные слои.

Наиболее приемлемыми размерами стен, обеспечивающими их достаточную устойчивость, являются 1,5–2 кирпича. В случае устройства дымоходов внутри стен их толщина должна быть более 2 кирпичей. Толщина стен и отдельных слоев зависит от температурного режима и размера самой стены.

Рекомендуемые материалы и размеры кладки стен приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

### Материалы и размеры кладки стен

Высота стены, м	Температура печи, °С	Рабочий огнеупорный слой		Наружный изоляционный слой	
		Материал	Толщина, мм	Материал	Толщина, мм
До 1	<1200	Шамот, класс Б	115	Диатомит или пеношамот	230
До 1	>1200	Шамот, класс Б	230	Диатомит или пеношамот	115–230
Более 1	<1210	Шамот, класс Б	230	Диатомит или пеношамот	230
Более 1	>1210	Шамот, класс А	230–350	Диатомит или пеношамот	115–230

Для периодически работающих печей с температурой до 1000 °С рабочий слой может быть выполнен из легковесного шамота.

Применение теплоизоляционных материалов в виде засыпок для стен печей не оправдало себя, так как засыпные изоляции труднее выполнимы и ненадежны в эксплуатации (высыпаются и т. д.).

По длине и ширине кладки стен следует предусматривать температурные швы, учитывающие тепловое расширение кладки при нагреве. Средняя величина температурных швов на 1 м кладки должна составлять:

- из шамотного, высокоглиноземистого, шамотного легковесного кирпича 5–6 мм;
- из хромомagneзитового, динасового кирпича 10–12 мм;
- из магнезитового кирпича 8–10 мм.

Для защиты кладки от механических воздействий и устранения фильтрации газов рекомендуется применять наружный кожух из листовой стали толщиной 4–10 мм.

Своды печей выполняются обычно в виде арок с постоянным радиусом кривизны или горизонтальных плоских перекрытий.

Материалом для сводов печей обычно служит шамот класса Б при температурах печи до 1000 °С и шамот класса А при более высоких температурах. Иногда для сводов, работающих непрерывно при температурах выше 1250–1300 °С, применяют динас или высокоглиноземистый кирпич. В качестве теплоизоляционного материала используют диатомовый и пеношамотный кирпич, а также различные засыпки.

Рекомендуемая толщина свода в зависимости от ширины пролета приведена в табл. 6.3.

Таблица 6.3

### Размеры свода печи

Толщина свода, мм	Ширина пролета, м		
	до 1	1–3,5	более 3,5
Толщина огнеупорного слоя	115–250	230–250	230–300
Толщина изоляционного слоя	65–120	65–250	120–250

Арочный свод выполняют из прямого и клинового кирпича. Для восприятия горизонтальной силы, распирающей стенки печи, требуется обязательное применение каркаса и пятовой балки.

Плоские своды выполняют из специальных шамотных плит и применяют для небольших печей, работающих при температурах до 1000 °С.

Когда необходимо перекрыть пролет шириной более 3,5 м, применяют подвесные своды из фасонного кирпича, чаще всего шамота класса А.

Для сводов, так же как и для стен печи, следует выполнять температурные швы. Для уменьшения потерь тепла своды хорошо

теплоизолируют. В печах безокислительного нагрева, в термических печах, работающих с защитными атмосферами, своды покрывают уплотнительной обмазкой или листовой сталью.

Под печи испытывает усилия от веса нагреваемого металла, подвергается химическому воздействию окалины и шлаков, истиранию при перемещении по нему металла, поэтому является ответственной частью печи.

В зависимости от размеров печного пространства и температуры печи толщина пода может колебаться от 200–260 до 500–700 мм. При этом в нижней части пода кладут теплоизоляционный слой из диатомового или пеношамотного кирпича. Верхний слой в печах с температурой выше 1200–1250 °С выполняют из основных и нейтральных материалов, обладающих хорошей устойчивостью против воздействия железистых шлаков (из талькового камня, хромомagnesита, магнезита в виде кирпича или набивки). Основную же часть пода изготавливают из шамота классов Б и В.

В термических печах с температурой до 1000 °С и в печах безокислительного нагрева верхний слой пода может быть выполнен из шамота класса А.

В толкательных печах для уменьшения износа в кладку пода закладывают металлические брусья, плиты или водоохлаждаемые трубы. В механизированных печах (печи с выдвижным, шагающим, вращающимся подами и т. д.) устройство пода тесно связано с конструкцией устройств, используемых для механизации загрузки, выгрузки и перемещения в печи.

Кладку дымоходов обычно выполняют в два слоя: внутренний – из шамота класса А и наружный – из красного строительного кирпича. При отводе продуктов горения под зонт, установленный над печью, отводящие каналы направляют прямо вверх в стенках печи. Кладку отводных каналов выполняют обычно из шамотного кирпича класса Б и В.

Фасонные блоки горелочных амбразур изготавливают из высокоглиноземистого и каолинового кирпича.

Для долговечности кладки большое значение имеет тщательная укладка кирпичей и толщина швов. Толщина швов не должна превышать 1–3 мм, причем в местах с более высокой температурой она должна быть наименьшей.

Для прочности кладки, восприятия усилий, возникающих в ней (сил распора свода), монтажа рам, заслонок, горелок, форсунок, механизмов подъема заслонок и т. д. служит металлический каркас.

Основными элементами каркаса являются стойки из различного проката (швеллер, уголок, двутавр и т. д.), стянутые продольными и поперечными тягами; продольные и поперечные балки из швеллеров или уголков и козуха из листовой стали толщиной 4–10 мм.

Одно из основных направлений совершенствования футеровки (кладки) – внедрение крупноразмерных элементов, в первую очередь из жаростойких бетонов. В последние годы для футеровки нагревательных и термических печей машиностроительных заводов разработаны блоки, размеры которых выбраны с сохранением модулей, применяемых при кладке печей из огнеупорного кирпича. Прямые блоки предусмотрены следующих размеров (табл. 6.4).

Таблица 6.4

### Размеры огнеупорных блоков

Длина × ширина, мм	Толщина, мм
460×460; 460×690	110; 220; 340
460×920; 460×1340	220; 340
730×460; 730×690	110; 220; 340
730×920; 730×1390; 920×1390	220; 340
1390×1390	340

Следует также отметить о промышленном освоении легковесных огнеупорных перлитошамотных изделий с объемной массой 0,4 т/м<sup>3</sup>, обладающих существенными преимуществами по сравнению с выпускаемым пенным способом шамотным кирпичом [14]. Данный материал может служить в печной кладке в качестве огнеупорного материала (первого слоя) и для изоляции. Выбор толщины кладки контролируется по температуре наружной стенки. Она не должна превышать 60 °С. Этой температуре соответствует плотность теплового потока во внешнюю среду  $q = 500 \text{ Вт/м}^2$ .

Таким образом, зная основные размеры рабочего пространства печи и выбрав на основании вышеприведенных рекомендаций толщину и конструкцию кладки стен, свода, пода и т. п., вычерчивают расчетный эскиз печи, по которому составляют тепловой баланс.

На эскизах указывают места размещения топливосжигающих устройств. В камерных печах горелки и форсунки устанавливают на расстоянии 400–700 мм. В толкательных печах – на торцовых и боковых стенках – горелки устанавливают в шахматном порядке, чтобы создать лучшие условия для достижения равномерной температуры. На эскизе также указывают расположение отводящих каналов, рабочих окон для загрузки нагреваемого материала. Определение размеров каналов для отвода продуктов горения из рабочего пространства печи производят после определения расхода топлива.

## 7. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПЕЧИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДОВ ТОПЛИВА

Тепловой баланс печи выражается уравнением, связывающим статьи прихода тепла в печь  $Q_{\text{прих}}$  от отдельных источников и расходов тепла  $Q_{\text{расх}}$  на нагрев металла и потери.

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{расх}} \cdot$$

Уравнение теплового баланса служит при проектировании печей для определения расходов топлива. При испытаниях печей уравнение теплового баланса применяют для анализа тепловых потерь и улучшения использования топлива и работы печи.

Для печей непрерывного действия (методические, кольцевые и т. д.), характеризующихся постоянным во времени температурным режимом, тепловой баланс относится к единице времени. Печи периодического действия характеризуются переменным во времени температурным режимом. Статьи баланса для таких печей относятся не к единице времени, а к длительности нагрева металла.

Рассмотрим способы определения статей теплового баланса.

**Приходная часть теплового баланса включает:**

А. Тепло, выделяющееся при сжигании топлива (химическое тепло топлива):



$$Q_T^x = V_T \cdot Q_H^p, \text{ кВт},$$

где  $V_T$  – расход топлива, кг/с ( $\text{м}^3/\text{с}$ );

$Q_H^p$  – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг ( $\text{кДж}/\text{м}^3$ ).

Б. Тепло, вносимое подогретым топливом:

$$Q_T^\phi = V_T \cdot i_T, \text{ кВт},$$

где  $i_T$  – теплосодержание топлива при температуре подогрева топлива  $t_T$ .

Величина  $i_T = c_T t_T$  подсчитывается по составу газообразного топлива, причем средняя теплоемкость отдельных составляющих топлива берется по таблицам или графикам [7, 10, 13, 15].

При определении теплосодержания жидкого топлива его средняя теплоемкость принимается равной  $c_T = 0,4\text{--}0,5 \text{ кДж}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}$ .

В. Тепло, вносимое подогретым воздухом:

$$Q_B = V_T L_d i_B, \text{ кВт},$$

где  $L_d$  – действительное количество воздуха, поданного в печь для горения единицы топлива,  $\text{м}^3/\text{м}^3$  ( $\text{м}^3/\text{кг}$ );

$i_B$  – теплосодержание воздуха при температуре ввода его в печь.

Величина  $L_d$  подсчитывается при расчете горения топлива. Теплосодержание воздуха  $i_B$  определяется по  $i-t$  диаграмме или по данным приложения [7, 10, 15].

Г. Тепло, выделяющееся при окислении металла (экзотермическая реакция), так как процесс окисления металла протекает с положительным тепловым эффектом.

$$Q_{\text{экз}} = \frac{G q_a}{100}, \text{ кВт},$$

где  $G$  – производительность печи, кг/с;

$q$  – теплота, выделяющаяся при окислении 1 кг металла (для стали  $q = 5652$  кДж/кг);

$a$  – угар (окисление) металла, % (для камерных кузнечных печей – 2–3 %, для методических – 1–2, для термических – 0,5–1 %).

Следовательно, приходная часть баланса печи равна

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{T}}^{\text{x}} + Q_{\text{T}}^{\phi} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{экз}}.$$

**Расходная часть теплового баланса** печи включает большее количество статей:

А. Тепло, затраченное на нагрев металла (полезное тепло)

$$Q_{\text{мет}} = \frac{100-a}{100} G (i_{\text{M}}^{\text{K}} - i_{\text{M}}^{\text{H}}) = \frac{100-a}{100} G (c_{\text{M}}^{\text{K}} t_{\text{M}}^{\text{K}} - c_{\text{M}}^{\text{H}} t_{\text{M}}^{\text{H}}), \text{ кВт},$$

где  $i_{\text{M}}^{\text{K}}$  и  $i_{\text{M}}^{\text{H}}$  – теплосодержание металла в конце и начале нагрева, определяемые по его средней по массе температуре, кДж/кг;

$c_{\text{M}}^{\text{K}}$  и  $c_{\text{M}}^{\text{H}}$  – средние конечная и начальная теплоемкости металла (соответствуют  $t_{\text{M}}^{\text{K}}$  и  $t_{\text{M}}^{\text{H}}$ ), кДж/кг · °С;

$t_{\text{M}}^{\text{K}}$  и  $t_{\text{M}}^{\text{H}}$  – конечная и начальная температуры нагреваемого металла, °С.

Данные о теплосодержании и теплоемкости металлов приведены в справочной литературе и табл. 4.1 и 4.2.

Б. Потери тепла с продуктами горения, уходящими из рабочего пространства печи:

$$Q_{\text{ух}} = V_{\text{T}} V_{\text{д}} i_{\text{ух}}, \text{ Вт},$$

где  $V_{\text{д}}$  – количество продуктов горения, полученных от сгорания единицы топлива, м<sup>3</sup>/кг (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>);

$i_{\text{ух}}$  – теплосодержание газов, уходящих из рабочего пространства печи при температуре  $t_{\text{ух}}$ , кДж/м<sup>3</sup>.

Теплосодержание уходящих газов  $i_{yx}$  можно определять по  $i-t$  – диаграмме либо по составу уходящих газов (см. раздел 3).

Температура уходящих газов  $t_{yx}$  из камерных печей принимается равной

$$t_{yx} = t_M^k + (50-100), \text{ } ^\circ\text{C} .$$

В методических печах температура уходящих газов ниже, чем в камерных вследствие частичного использования тепла дымовых газов на подогрев металла и находится в пределах  $600-1000^\circ\text{C}$ . Более точно

$$Q_{yx} = (V_T V_d - V_{\text{выб}}) \cdot i_{yx} ,$$

где  $V_{\text{выб}}$  – количество продуктов горения, выбивающихся через окна и щели в кладке рабочего пространства,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

В. Потери тепла от химической неполноты горения топлива определяют в процентах от теплотворности топлива на 1 % CO, содержащегося в продуктах горения. Содержание CO в продуктах горения не должно превышать 1–2 % (при сжигании газообразного и жидкого топлива – 1 %)

$$Q_{x,n} = (0,01-0,02) \delta V_T Q_H^p, \text{ кВт},$$

$\delta = 0,02-0,05$  (2–5 %) – потери тепла на 1 % CO от  $Q_H^p$ .

При сжигании газа с помощью короткопламенных горелок и в радиационных трубах  $\delta = 0,01-0,02$ . Для всех других случаев ее можно принять равной 0,02–0,05.

Г. Потери тепла от механической неполноты горения имеют место только в печах, работающих на твердом топливе, и определяются по формуле

$$Q_{m,n} = m V_T Q_H^p, \text{ кВт},$$

где  $m$  – механическая потеря при горении в % от теплотворности топлива (1–5 % в зависимости от типа колосниковой решетки).

Д. Потери тепла через кладку печи при стационарном состоянии, т. е. после разогрева печи и при установившемся режиме ее работы, определяют как сумму потерь через стенки, свод, заслонки рабочих окон и под печи.

$$Q_{\text{кл}} = Q_{\text{ст}} + Q_{\text{св}} + Q_{\text{засл}} + Q_{\text{п}}.$$

Потери тепла через стенки печи можно вычислить по формуле

$$Q_{\text{ст}} = \frac{t_{\text{ст}}^{\text{вн}} - t_{\text{в}}}{\sum \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha}} \cdot F_{\text{ст}}^{\text{р}}, \text{ кВт},$$

где  $t_{\text{ст}}^{\text{вн}}$  – средняя температура внутренней поверхности стенки, °С;

$t_{\text{в}}$  – температура окружающего воздуха, °С ;

$\sum \frac{S}{\lambda}$  – сумма тепловых сопротивлений слоев кладки, °С/Вт;

$S$  – толщина соответствующего слоя многослойной стенки, м;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности слоя, Вт/м · °С;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности стенки в окружающую среду (по практическим данным  $\alpha = 10\text{--}15 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$ ), поэтому величина теплового сопротивления  $1/\alpha$  может быть принята равной 0,09, для свода  $\alpha = 20 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$ ;

$F_{\text{ст}}^{\text{р}}$  – расчетная поверхность стенки, м<sup>2</sup>.

Сложность определения потерь тепла по этому выражению заключается в нахождении значений  $\lambda$  слоев, зависящих от их средних температур, которыми приходится задаваться. При двухслойной кладке средняя температура внутреннего слоя принимается равной

$$t_{\text{сп}}^1 = \frac{t_{\text{сп}}^{\text{вн}} + t_{\text{в}}}{2};$$

средняя температура наружного слоя

$$t_{\text{ср}}^2 = \frac{t_{\text{ср}}^1 + t_{\text{в}}}{2}.$$

При трехслойной кладке средняя температура промежуточного слоя

$$t_{\text{ср}}^2 = \frac{t_{\text{ср}}^{\text{вн}} + t_{\text{в}}}{2};$$

средняя температура внутреннего слоя

$$t_{\text{ср}}^1 = \frac{t_{\text{ср}}^{\text{вн}} + t_{\text{ср}}^2}{2};$$

средняя температура наружного слоя

$$t_{\text{ср}}^3 = \frac{t_{\text{ср}}^2 + t_{\text{в}}}{2}.$$

По данным значениям температур в зависимости от материала слоя определяют значения коэффициентов теплопроводности  $\lambda$ . Далее по эскизу печи вычисляют внутреннюю и наружную поверхности стенки печи, через которые осуществляется теплопередача, а затем расчетную поверхность.

$$F_{\text{ср}}^{\text{п}} = \sqrt{F_{\text{вн}} \cdot F_{\text{нар}}}.$$

После определения  $Q_{\text{ср}}$  следует проверить принятые значения средних температур слоев, которые подсчитываются следующим образом:

$$t_{\text{ср}}^1 = t_{\text{ср}}^{\text{вн}} - \frac{Q_{\text{ср}} \cdot S_1}{2 F_{\text{ср}}^{\text{п}} \cdot \lambda_1},$$

$$t_{\text{ср}}^2 = t_{\text{ср}}^{\text{вн}} - \frac{Q_{\text{ст}}}{2F_{\text{ст}}^{\text{р}}} \left( \frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} \right).$$

Считают допустимым расхождение между принятыми значениями средних температур слоев и подсчитанными по этим формулам в пределах 5–10 %. При больших расхождениях следует сделать пересчет, приняв в качестве исходных значения температур, подсчитанные по формулам.

Полученные значения тепловых потерь через стенки  $Q_{\text{ст}}$  следует увеличить на 15–20 %, учитывая потери тепла через части пода печи, непосредственно расположенные на фундаменте, а также через металлические части фурнитуры и каркаса, находящиеся в кладке. Следует иметь в виду, что если в стенке есть отверстия (рабочие окна), то их площади вычитаются из поверхности стенки.

Аналогично определяют потери тепла через свод печи и под. Если печь имеет несколько тепловых зон, то расчеты ведут для каждой зоны отдельно, а затем суммируют.

Когда рабочее окно закрывают заслонкой или дверцей, которая футеруется обычно легковесным шамотом и теплоизоляционным кирпичом, то потери тепла через заслонку определяют по формуле

$$Q_{\text{засл}} = \frac{t_{\text{печ}} - t_{\text{в}}}{\frac{S_1}{\lambda_1} - \frac{S_2}{\lambda_2}} \cdot F \cdot \tau \quad , \text{ кВт},$$

где  $t_{\text{печ}}$  и  $t_{\text{в}}$  – температура печи и окружающего воздуха, °С;

$S_1$ ,  $S_2$  – толщина футеровки, м;

$\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  – коэффициент теплопроводности слоев футеровки Вт/м·°С;

$F$  – площадь заслонки, м<sup>2</sup>;

$\tau$  – время, в течение которого окно закрыто, с.

Потери тепла через кладку можно определять также пользуясь графиками [7, 13].

Для удобства результаты расчета потерь тепла через кладку оформляются в специальной табл. 7.1.

## Потери тепла через кладку печи

Элементы кладки печи	Поверхность стенки, $F, \text{м}^2$	Температура, $^{\circ}\text{C}$		Термическое сопротивле- ние, $S/\lambda$	Потери тепла, Вт	
		внутренней поверхно- сти, $t_{\text{вн}}$	внешней поверхно- сти, $t_{\text{нар}}$		через $1\text{м}^2$ , $q$	через всю поверх- ность, $Q$
Боковая стенка						
Свод						
Под						
и т. д.						

Е. Потери тепла через открытые окна, щели складываются из потерь тепла излучением и потерь тепла с продуктами горения, выбивающимися через окна, щели и другие отверстия в стенках.

Потери тепла излучением через открытые окна, щели определяют по формуле

$$Q_{\text{ок}}^{\text{изл}} = C_0 \left[ \left( \frac{T_{\text{печ}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{в}}}{100} \right)^4 \right] \cdot F \cdot k_d \cdot \tau, \text{ Вт},$$

где  $C_0 = 5,76$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

$T_{\text{печ}}$ ,  $T_{\text{в}}$  – абсолютная температура печи и окружающего воздуха, К;

$F$  – площадь отверстия или щели,  $\text{м}^2$ ;

$k_d$  – коэффициент диафрагмирования, определяемый в зависимости от толщины кладки и размеров окна или щели по графикам [7, 10, 13];

$\tau$  – время, в течение которого окно открыто, с.

Коэффициент диафрагмирования может быть определен по формуле

$$K_d = \frac{(1 - \varphi_{1-2})}{2},$$

где  $\varphi_{1-2}$  – угловой коэффициент с поверхности  $F_1$  (внутренней) на  $F_2$  (наружную).

$$\varphi_{1-2} = \frac{L}{L+S},$$

где  $L$  – эквивалентный размер полости окна или отверстия, м;  
 $S$  – толщина стенки, м.

$$L = \frac{4V}{f},$$

где  $V$  – объем пространства между поверхностями, м<sup>3</sup>;

$f$  – площадь поверхности, ограничивающая этот объем, м<sup>2</sup>.

В некоторых конструкциях печей окна закрывают тонкими металлическими дверцами без футеровки. В этом случае потери тепла происходят также вследствие излучения, но дверца уменьшает величину потерь. Поэтому в данную расчетную формулу подставляют

вместо  $k_d$  величину  $k_d = \frac{k_d}{1+k_d}$ .

Потери тепла с выбивающимися продуктами горения через окна, щели и кладку зависят от давления в рабочей камере печи и размеров окон и щелей. Вследствие переменного режима работы печи и изменения давления в ее рабочей камере определение этих потерь затруднительно, поэтому у печей с редко открывающимися окнами их относят к неучтенным потерям, а у печей, работающих с открытыми или частично открывающимися окнами, определяют по формуле

$$Q_{ок}^r = V_{выб}^r c_r t_r \tau, \text{ кДж},$$



где  $V_{\text{выб}}^{\Gamma}$  – количество продуктов горения, выбивающихся через окна и щели,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$c_{\Gamma}$  – средняя теплоемкость продуктов горения при температуре в печи  $t_{\text{печ}}$   $^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{кДж}/\text{м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{\Gamma}$  – температура печных газов (продуктов горения),  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\tau$  – продолжительность открытия окна в долях часа.

$V_{\text{выб}}^{\Gamma}$  определяется по формуле

$$V_{\text{выб}}^{\Gamma} = 0,082 b h \sqrt{h t_{\Gamma}} \cdot \frac{273}{273 + t_{\Gamma}}, \text{ м}^3 / \text{ч},$$

где  $b$  – ширина окна,  $\text{м}$ ;

$h$  – высота открытия окна,  $\text{м}$ .

$V_{\text{выб}}^{\Gamma}$  можно вычислять по формуле, приведенной в литературе [10]:

$$V_{\text{выб}}^{\Gamma} = A h^{3/2} b, \text{ м}^3 / \text{с},$$

где  $A$  – коэффициент, зависящий от температуры газов при

$$t_{\Gamma} = 400; 600; 800; 1000; 1500 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

$$A = 1,25; 1,18; 1,1; 1,04; 0,92.$$

Ж. В некоторых печах, особенно методических, в печах малоокислительного нагрева развита система охлаждения. Водоохлаждаемыми элементами конструкции печи являются подовые (поперечные и продольные), глиссажные, опорные трубы, рамы и др. Поэтому при проектировании и исследовании работы печей потери с охлаждающей водой следует учитывать.

Потери тепла с охлаждающей водой определяют по формуле

$$Q_{\text{вод}} = \sum G (t''_{\text{вод}} - t'_{\text{вод}}) c, \text{ Вт},$$

где  $G$  – расход охлаждающей воды через отдельные элементы системы охлаждения печи,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$t'_{\text{вод}}$  – температура входящей воды,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t''_{\text{вод}}$  – температура выходящей воды,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$c$  – теплоемкость воды,  $\text{кДж}/\text{м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$ .

Температуру охлаждающей воды можно принимать

$$t'_{\text{вод}} = 20 - 30 \text{ } ^{\circ}\text{C} \quad \text{и} \quad t''_{\text{вод}} = 50 - 60 \text{ } ^{\circ}\text{C}.$$

Расход воды в процессе охлаждения ряда водоохлаждающих элементов в нагревательных печах приведен в табл. 7.2.

Таблица 7.2

### Расход воды при охлаждении водоохлаждаемых элементов в нагревательных печах

Водоохлаждаемый элемент	Расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$
Наклонный брус торца выдачи	10–15
Балка торца выдачи ( $1\text{м}^2$ поверхности балки)	4–6
Балка торца загрузки	2–4
Балка пережимов между зонами	1–2
Рама бокового окна выдачи-загрузки	3–5
Рамы боковых рабочих окон	2
Заслонка окна загрузки-выдачи	5–7
Отбойники в боковых стенах	2–3
Желоб по оси окна выдачи	10–25
Выгалькиватель у бокового окна выдачи	6
Носик инжекционной горелки диаметром, мм:	
178	0,8
235	1
270	до 1,2

3. Некоторые конструкции печей непрерывного действия имеют перемещающиеся части (конвейеры, поддоны и т. д.).

Потери тепла на нагрев перемещающихся частей печи и тары рассчитывают по формуле

$$Q_T = G_T (i_2 - i_1), \text{ Вт},$$

где  $G_T$  – масса проходящих через печь в единицу времени перемещающихся частей или тары, кг/с;

$i_1, i_2$  – соответственно теплосодержание перемещающихся частей в конце и начале печи, определяемое по их температуре, кДж/кг.

И. Потери тепла с окалиной определяют по уравнению

$$Q_{\text{окал}} = 0,01 a G c_{\text{окал}} (t_{\text{окал}} - t_0) m, \text{ Вт},$$

где  $a$  – угар металла, %;

$G$  – производительность печи, кг/с;

$c_{\text{окал}}$  – теплоемкость окалины, кДж/кг · °С;  $c_{\text{окал}} = 1,0$  кДж/кг · °С;

$t_{\text{окал}}$  – температура окалины, которую принимают равной максимальной температуре поверхности металла, °С;

$t_0$  – начальная температура металла, °С;

$m$  – количество окалины  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , образующейся от окисления 1 кг Fe; из стехиометрического соотношения реакции  $3\text{Fe} + 2\text{O}_2 = \text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $m = 1,38$ .

К. Неучтенные потери принимают равными до 10 % от тепла, выделяющегося при горении топлива:

$$Q_{\text{н.п}} = 0,1 V_T Q_{\text{н}}^p.$$

Л. Среднечасовой расход тепла на разогрев кладки при неустановившемся режиме находят по формуле

$$Q_{\text{раз}} = \frac{V_{\text{кл}} \rho_{\text{кл}} c_{\text{кл}} (t''_{\text{кл}} - t'_{\text{кл}})}{\tau_{\text{раз}}}, \text{ Вт},$$

где  $V_{\text{кл}}$  – объем кладки, м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{кл}}$  – плотность материала кладки, кг/м<sup>3</sup>;



в формулы для определения  $Q_T$ ,  $Q_{ук}$ ,  $Q_{к.н}$ ,  $Q_{окал}$ , а в формулах для определения  $Q_{кл}$ ,  $Q_{ок}^{изл}$ ,  $Q_{вод}$ ,  $Q_T$  правые части умножают на время нагрева  $\tau$ , с.

## 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ПЕЧИ

1. Фактическую напряженность пода печи определяют по формуле

$$K = \frac{G}{F_{п}}, \text{ кг/м}^2,$$

где  $G$  – производительность печи, кг/с;

$F_{п}$  – полная площадь пода печи, м<sup>2</sup>.

2. Определение основных показателей топливоиспользования. К ним относятся помимо найденного расхода топлива  $V_T$  удельный расход топлива, показывающий расход тепла на единицу нагреваемого металла:

$$b = \frac{V_T Q_{н}^p}{G},$$

а также удельный расход условного топлива на единицу нагреваемого металла

$$b_{усл} = \frac{b}{29\,310}, \text{ кг/кг и } b_{усл} = \frac{b}{29\,310} \cdot 100\%,$$

где  $V_T$  – расход топлива, кг/с или м<sup>3</sup>/с;

$Q_{н}^p$  – теплотворность топлива, кДж/кг или кДж/м<sup>3</sup>;

$G$  – производительность печи, кг/с;

29 310 – теплотворность условного топлива, кДж/кг или кДж/м<sup>3</sup>.

К показателям топливоиспользования относят также коэффициент полезного действия печи, определяемый как отношение полезно использованного тепла к подведенному, т. е.

$$\eta = \frac{Q_{\text{уcв.т}}}{Q_{\text{т}}^x} \cdot 100 \%,$$

где  $Q_{\text{уcв.т}}$  – количество выделенного при сжигании тепла, усвоенного изделиями (металлом) в печи, Вт;

$Q_{\text{т}}^x$  – количество тепла, вносимого в печь с химической энергией топлива в единицу времени.

$$Q_{\text{уcв.т}} = Q_{\text{м}} - Q_{\text{уcв.Фe}} \cdot$$

Количество тепла, усвоенного металлом за счет окисления железа:

$$Q_{\text{уcв.Фe}} = Q_{\text{экз}} - Q_{\text{окал}} \cdot$$

В вышеприведенных выражениях  $Q_{\text{т}}^x$ ,  $Q_{\text{м}}$ ,  $Q_{\text{экз}}$ ,  $Q_{\text{окал}}$  определяют по формулам, указанным в разделе «Тепловой баланс печи и определение расходов топлива».

## 9. ВЫБОР И РАСЧЕТ ФОРСУНОК, ГОРЕЛОК И РАДИАЦИОННЫХ ТРУБ

Прежде чем приступить к расчету форсунок, горелок или радиационных труб следует выбрать их, придерживаясь следующих рекомендаций:

1. Исходя из основного положения для нагрева металла – не нагревать металл факелом. В нагревательных и термических печах небольших и средних размеров следует использовать форсунки низкого давления. В больших печах, имеющих форкамеру, а также в печах с удлиненной рабочей камерой рациональнее применять форсунки

высокого давления. Для методических печей, отапливаемых мазутом, обычно применяют форсунки высокого давления с двойным распылением, которые хорошо зарекомендовали себя в процессе многолетней практики.

2. Выбор горелки для сжигания газообразного топлива зависит от конструкции, температуры и производительности печи, давления подаваемого газа и воздуха, калорийности газа и других факторов. При сжигании неочищенного газа в больших печах применяют простейшие горелки с раздельным подводом газа и воздуха, что позволяет подогревать газ и воздух до высокой температуры. При сжигании газа с теплотворностью до  $5000 \text{ кДж/м}^3$  целесообразно применять горелки внешнего смешения. Для средних и малых печей, работающих на газе с  $Q_{\text{H}}^{\text{P}} > 5000 \text{ кДж/м}^3$ , следует использовать инжекционные горелки. Для современных печей, отапливаемых газом с  $Q_{\text{H}}^{\text{P}} > 10\,000 \text{ кДж/м}^3$ , рекомендуют горелки типа «труба в трубе». Эти горелки наиболее простой конструкции могут работать на подогретом газе и воздухе и дают возможность регулировать производительность горелки в широких пределах (расход газа может изменяться в 5–6 раз).

3. В новых прогрессивных конструкциях печей, работающих на газообразном топливе и требующих изоляции продуктов горения от рабочего пространства, сжигание газа производится в радиационных (излучающих) трубах с толщиной стенки 4–7 мм, изготовленных из жаропрочных сплавов. Применение радиационных труб позволяет вести нагрев обрабатываемых деталей в нужной контролируемой атмосфере.

Число форсунок или горелок определяют с учетом расхода топлива и принятой производительности одной форсунки или горелки. При этом следует придерживаться следующего положения. При большом количестве форсунок или горелок малой производительности удобно регулировать тепловой режим работы печи посредством выключения отдельных форсунок или горелок. Однако в этом случае возникает затруднение с размещением форсунок или горелок и трубопроводов к ним, что повышает стоимость установки и усложняет ее обслуживание. Учитывая это обстоятельство, необходимо стремиться устанавливать меньше форсунок или горелок, но при этом сохранять равномерную температуру в рабочей камере печи.

**Расчет форсунок.** Расчет форсунок низкого давления складывается из расчета диаметров подводящих мазутопроводов и воздухопроводов и расчета выходных сечений форсунки для топлива и воздуха по заданным расходам и давлениям (на основе формул для расчета истечения).

Внутренний диаметр мазутного наконечника (трубки) определяем по формуле

$$d_1 = \sqrt{\frac{G_1}{0,785 \rho_1 w_1}}, \text{ мм,}$$

где  $G_1$  – производительность форсунки, кг/с;

$\rho_1$  – плотность мазута, принимаемая равной 700–900 кг/м<sup>3</sup>;

$w_1$  – скорость истечения мазута, берется равной 1 м/с.

Чтобы устранить возможность засорения внутренний диаметр мазутного наконечника должен быть не менее 3 мм.

Диаметр выходного отверстия воздушной насадки

$$d_2 = \sqrt{\frac{F_1 + F_2}{0,785}}, \text{ мм,}$$

где  $F_1$  – площадь сечения мазутной насадки (наконечника) с учетом толщины стенки трубки, т. е. по наружному диаметру, мм<sup>2</sup>;

$F_2$  – площадь сечения воздушной насадки, мм<sup>2</sup>.

$$F_2 = \frac{G_2}{\rho_2 w_2} = \frac{L_d G_1}{\rho_2 w_2}, \text{ мм}^2,$$

где  $G_2$  – расход воздуха, кг/с;

$\rho_2$  – плотность истекающего воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$w_2$  – скорость истечения воздуха, м/с.

Скорость истечения воздуха рассчитывается по формуле



$$w_2 = \sqrt{2RT_H \left(1 - \frac{P_{\text{окр}}}{P_H}\right)}, \text{ м/с,}$$

где  $R$  – газовая постоянная воздуха;

$T_H$  – температура воздуха, К;

$P_{\text{окр}}$  – давление в печном пространстве, Н/м<sup>2</sup>;

$P_H$  – начальное давление воздуха, Н/м<sup>2</sup>.

Начальное давление воздуха с учетом потерь давления в подводящих участках воздухопровода (10 %) будет равно

$$P_H = P_{\text{окр}} + 0,9h_{\text{ст}},$$

где  $h_{\text{ст}}$  – давление воздуха в воздухопроводе перед форсункой.

Плотность истекающего воздуха при  $P_H$

$$\rho_2 = \frac{P_H}{RT_H}, \text{ кг/м}^3.$$

Диаметр подводящего воздухопровода рассчитывается исходя из количества воздуха (расхода воздуха  $G_2$ ), проходящего через трубопровод, и скорости воздуха в трубопроводе, принимаемой равной  $w_B = 10\text{--}15$  м/с. Диаметр мазутопровода определяют по скорости  $w_M = 0,2\text{--}0,8$  м/с. Внутренний диаметр мазутопровода можно определить также по формуле [9]

$$d = 18,8 \sqrt{\frac{B_T^M}{\rho_1 w_M}}, \text{ мм,}$$

где  $B_T^M$  – расход мазута, кг/ч;

$\rho_1$  – плотность мазута, кг/м<sup>3</sup>;

$w_M$  – скорость мазута в мазутопроводе, м/с.

Учитывая возможность засорения мазутопровода, его диаметр не следует принимать менее 10 мм.

Форсунки высокого давления в отличие от форсунок низкого давления рассчитывают с учетом изменения плотности истекающего распылителя. При расчете используют формулы адиабатического истечения газов. Причем для расчета мазутного наконечника скорость истечения мазута принимается равной  $w_M = 5-10$  м/с, а скорость воздуха в воздухопроводе –  $w_B = 20-25$  м/с. Для воздушной форсунки высокого давления конструкции Шухова выходное сечение воздушной насадки можно вычислять по формуле

$$f = \frac{1,75 B_T^M}{P_0}, \text{ мм}^2,$$

где  $B_T^M$  – расход мазута, кг/ч;

$P_0$  – абсолютное давление, ат.

Расчеты форсунок высокого давления с цилиндрическим соплом Лавалья при распылении мазута компрессорным воздухом и пером приведены в литературе [7].

В нагревательных и термических печах, как указывалось выше, широкое применение получили горелки с внешним смешиванием (в виде простого газового сопла и горелок типа «труба в трубе»), с частичным предварительным смешиванием газа и воздуха и инъекционные горелки.

**Расчет горелок с внешним смешиванием** заключается в определении размера горелки (диаметра носика), диаметра газового сопла и длины факела по заданному статистическому давлению газа перед горелкой и расходу газа через сопло, а также в проверке скоростей газа и воздуха в подводящих трубопроводах, самой горелке и газозвушной смеси в носике горелки на основании формул истечения (так же, как и для форсунок). Примерный расчет простых газовых сопел низкого, среднего и высокого давления приведен в литературе [7]. Расчет горелок типа «труба в трубе» производится так же, как простого газового сопла. Только длина факела определяется по диаметру газового сопла  $d_0$ , а площадь проходного сечения для

воздуха вычисляется по скорости истечения воздуха  $w_B$ , которая для горелок низкого давления принимается равной  $w_B = (0,5 - 1,0)w_T$ , для горелок среднего давления –  $w_B = (0,2 - 0,4)w_T$ . Диаметр внутренней трубы  $d_1$ , по которой подводится газ, выбирают из конструктивных соображений ( $d_1/d_0 \geq 2 - 3$ ). Диаметр наружной трубы  $d_2$ , по которой подводится воздух, рассчитывается с учетом расхода воздуха и скорости его истечения. Расчет типа «труба в трубе» можно производить по графикам [16].

Инжекционные горелки рассчитывают по формулам для расчета струйных приборов, на основании которых определяются оптимальные размеры смесителя (диаметр, длина), диаметр рабочего сопла и воздушного отверстия, полезное разряжение в смесителе, скорость вылета смеси из горелки (для проверки). Подробный расчет инжекционных горелок низкого, среднего и высокого давления приводится в литературе [7]. При использовании горелки с туннелем определяют размеры туннеля по рекомендациям, указанным в литературе [13].

Расчет горелок комбинированной конструкции, состоящих из инжекционной горелки и горелки типа «труба в трубе», т. е. горелки с инжекцией первичного воздуха и принудительной подачей вторичного воздуха, складывается из расчета инжектора, проходного сечения для вторичного воздуха и длины факела, создаваемого горелкой. Расчет производится по заданному запасу статического давления газа либо по заданному коэффициенту расхода первичного воздуха [7].

Конструктивные размеры форсунок и горелок приведены в литературе [7, 10, 16].

Методика **расчета радиационных труб** такова: условно (конструктивно) выбираем радиационные трубы (V-образной формы, вертикальные и т. д.) со следующими исходными размерами: длина ветки рабочей части трубы –  $L$ , диаметр трубы наружный –  $d_H$ , диаметр трубы внутренний –  $d_{вн}$ , расстояние между трубами –  $S$  и т. д.

Исходя из размеров труб определяем активную длину одной трубы  $L_{\text{акт}}$  и ее рабочую поверхность  $f = \pi d_{\text{н}} L_{\text{акт}}$ . Тогда тепловая нагрузка трубы будет равна

$$g_{\text{T}} = g_{\text{н}} f,$$

где  $g_{\text{н}}$  – тепловая нагрузка на  $1 \text{ м}^2$  наружной поверхности трубы;  
 $f$  – поверхность одной трубы.

Тепловая нагрузка наружной поверхности трубы, отнесенная к  $1 \text{ м}^2$  внутренней поверхности трубы, равна

$$g_{\text{н}} = g_{\text{в}} \cdot \frac{d_{\text{вн}}}{d_{\text{н}}}.$$

Общее уравнение теплопередачи в радиационной трубе

$$g_{\text{в}} = \alpha (t_{\text{г}} - t_1),$$

где  $\alpha$  – суммарный коэффициент теплопередачи, равный  $0,065 \text{ Re}^{0,74}$ ,  $\text{ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}$  и  $0,27 \text{ Re}^{0,74}$ ,  $\text{Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ;

$t_{\text{г}}$  – средняя температура газа в трубе,  $^\circ\text{C}$ ;

$t_1$  – температура стенки трубы,  $^\circ\text{C}$ ;

$\text{Re}$  – критерий Рейнольдса.

$$\text{Re} = \frac{\omega_t \cdot d_{\text{вн}}}{\nu},$$

где  $\omega_t$  – средняя скорость газов в трубе;

$d_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр трубы;

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости продуктов горения газов, зависящий от температуры.

Среднюю температуру газа в трубе определяют по формуле

$$T_{\Gamma} = \sqrt{T_{\kappa} - T_{y\kappa}} ,$$

где  $T_{\kappa}$  – калориметрическая температура газа, К;

$T_{y\kappa}$  – принятая температура уходящих газов, К.

Температуру стенки трубы определяем совместным решением уравнений, характеризующих тепло, выделяемое (излучаемое) радиационными трубами, и тепло, получаемое металлом.

Расход газа в одной трубе

$$b_{\Gamma} = \frac{g_{\Gamma}}{Q_{\text{H}}^{\text{P}} - i_{y\kappa} V_{\text{п.Г}}},$$

где  $g_{\Gamma}$  – тепловая нагрузка одной трубы;

$Q_{\text{H}}^{\text{P}}$  – теплотворная способность газа;

$i_{y\kappa}$  – теплосодержание продуктов горения газа при  $t_{y\kappa}$ ;

$V_{\text{п.Г}}$  – количество продуктов горения газа при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha_{\text{в}} = 1,05$ .

Скорость газа в трубе  $\omega_0$  при принятом сечении  $f_{\text{тр}} = \frac{\pi d_{\text{вн}}^2}{4}$

трубы равна

$$\omega_0 = \frac{b_{\Gamma} \cdot V_{\text{п.Г}}}{3600 \cdot f_{\text{тр}}}$$

или

$$\omega_t = \omega_0 (1 + \alpha t) .$$

Зная общий расход газа и расход газа в одной трубе, можно определить количество радиационных труб.

## 10. РАСЧЕТ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОВ

Расчет движения газов в печи заключается в определении потерь давления на пути движения продуктов горения. Эти потери складываются из:

а) гидростатических потерь давления на вертикальных участках пути;

б) потерь давления на преодоление сопротивления сил трения на всех участках движения газов;

в) потерь давления на преодоление местных сопротивлений (потерь давления на поворотах, в сужениях и расширениях, шибах, заслонках, рекуператорах и т. д., т. е. в тех местах, где происходит изменение направления или скорости движения газового потока).

Формулы для определения этих потерь давления приведены в литературе [7, 8, 10].

Суммарная потеря давления является исходной величиной для расчета устройства (дымовой трубы, дымососа, эжектора, вентилятора), обеспечивающего движение газов в печах.

Современные нагревательные и термические печи обычно работают с принудительным движением газов, которое осуществляется давлением, создаваемым горелками или форсунками. Так как давления, создаваемого этими средствами, вполне достаточно для преодоления сопротивления движению газов, то обычно необходимо рассчитать только ту часть печной системы, которая отводит продукты горения из рабочего пространства печи; сечение каналов, отводящих дымовые газы непосредственно из рабочей камеры печи; сечение дымохода, где дымовые газы движутся за счет разряжения, создаваемого дымовой трубой или вентилятором; и размеры трубы.

Сечение каналов, отводящих продукты горения из рабочей камеры печи, а также сечение дымоходов определяют исходя из скорости движения продуктов горения

$$F = \frac{V_0}{3600 W_0}, \text{ м}^2,$$

где  $V_0$  – объем отводимых продуктов горения при нормальных условиях,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$W_0$  – скорость газов, приведенная к нормальным условиям, ее принимают равной  $W_0 = 2-5 \text{ м/с}$ .

Сечение трубы  $f_0$  определяется исходя из скорости газов у основания ( $W_{01} = 2,5-3 \text{ м/с}$ ) и на выходе ( $W_{02} = 3-4 \text{ м/с}$ ). Высоту трубы  $H_{\text{тр}}$  в первом приближении принимают равной  $20D$ , где  $D$  – диаметр трубы у основания, или определяют по формуле

$$H_{\text{тр}} = 15 \sqrt{\frac{4f_0}{\pi}} + 10, \text{ м.}$$

Высота трубы должна быть не менее 16 м.

Далее можно определить разрежение, создаваемое дымовой трубой у ее основания, по формуле

$$\begin{aligned} \Delta p &= H_{\text{тр}} (\gamma^{\text{в}} - \gamma^{\text{г}}) \frac{V}{760} - \frac{W_2^2 - W_1^2}{2g} \cdot \gamma^{\text{г}} - h_{\text{тр}} = \\ &= H_{\text{тр}} \left( \frac{\gamma_0^{\text{в}}}{1 + \alpha t_{\text{в}}} - \frac{\gamma_0^{\text{г}}}{1 + \alpha t_{\text{ср}}^{\text{г}}} \right) 101,3 - \\ &- \frac{W_{02}^2 - W_{01}^2}{2g} \cdot \gamma_0^{\text{г}} (1 + \alpha t_{\text{ср}}^{\text{г}}) - \lambda \frac{H_{\text{тр}}}{d_{\text{тр}}} \cdot \frac{W_0^2}{2g} \cdot \gamma_0^{\text{г}} (1 + \alpha t_{\text{ср}}^{\text{г}}), \text{ Н/м}^2, \end{aligned}$$

где  $H_{\text{тр}}$  – ориентировочная высота трубы, м;

$\gamma^{\text{в}}$  и  $\gamma_0^{\text{в}}$  – действительный и приведенный к  $0^\circ\text{C}$  удельный вес воздуха,  $\text{кг/м}^3$ ;

$\gamma^{\text{г}}$  и  $\gamma_0^{\text{г}}$  – действительный и приведенный к  $0^\circ\text{C}$  удельный вес отходящих газов,  $\text{кг/м}^3$ ;

$B$  – барометрическое давление, минимальное для данной местности,  $\text{кН/м}^2$ ;

$t_b$  – средняя температура воздуха по высоте дымовой трубы,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{\text{ср}}^r$  – средняя температура отходящих газов в трубе,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$W_1, W_{01}$  – действительная и приведенная скорость газов у основания трубы,  $\text{м/с}$ ;

$W_2, W_{02}$  – действительная и приведенная скорость газов при выходе из трубы,  $\text{м/с}$ ;

$\lambda$  – коэффициент трения газов о стенки трубы (для кирпичных труб  $\lambda = 0,05$ , для металлических –  $\lambda = 0,03$ );

$d_{\text{тр}}$  – средний диаметр трубы,  $\text{м}$ .

Средняя температура газов в трубе

$$t_{\text{ср}}^r = \frac{t_1 - (t_1 + c H_{\text{тр}})}{2},$$

где  $t_1$  – температура уходящих газов у основания трубы,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$c = 1,5\text{--}2,5$   $^{\circ}\text{C/м}$  для кирпичных или  $c = 3\text{--}4$   $^{\circ}\text{C/м}$  для металлических труб;

$H_{\text{тр}}$  – высота трубы,  $\text{м}$ .

Средняя температура воздуха  $t_b$  по высоте трубы

$$t_b = t'_b - \frac{\sqrt{H_{\text{тр}}}}{2},$$

где  $t'_b$  – температура воздуха у основания трубы, зависящая от климатических условий [7].

Следует иметь в виду, что действительное разрежение, создаваемое трубой, должно быть больше рассчитанной потери давления на 30–50 % на случай возможного последующего форсирования работы печи или увеличения сопротивлений по дымовому тракту.

Далее по заданной тяге, используя вышеприведенную формулу, делают окончательный выбор высоты трубы.



## 11. РАСЧЕТ ТЕПЛОИСПОЛЬЗУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Потери тепла с уходящими продуктами горения в печах достигают 60–70 % от тепла сжигаемого топлива, так как они покидают рабочую камеру печи с высокой температурой (на 50–100 °С выше конечной температуры нагрева металла в камерных печах), что значительно снижает КПД печи.

Увеличение теплоиспользования и повышение производительности печи возможно путем использования тепла отходящих дымовых газов на подогрев воздуха и газообразного топлива в специальных устройствах – рекуператорах и регенераторах. Рассмотрим методику расчета этих теплоиспользующих устройств. Методика расчета различных типов рекуператоров в основном одинакова. Отличие заключается лишь в определении общего коэффициента теплопередачи, гидравлических сопротивлений на пути движения воздуха и дымовых газов и пр. [9, 17].

При расчете рекуператоров обычно известны следующие исходные данные: расход топлива  $V_T$ ; расход воздуха на  $1 \text{ м}^3$  топлива  $L_d$  и его температура – начальная  $t_B^H$ , конечная  $t_B^K$ ; объем продуктов горения на  $1 \text{ м}^3$  топлива  $V_d$ ; температура уходящих из печи продуктов горения  $t_{ух}$ .

Расчет рекуператора сводится обычно к определению общей поверхности нагрева

$$F_{\text{нагр}} = \frac{Q_B}{K \Delta t_{\text{ср}}}, \text{ м}^2,$$

где  $Q_B$  – количество тепла, которое передается в единицу времени от дымовых газов к воздуху с учетом потери тепла в рекуператорах, Вт;

$K$  – общий коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$ ;

$\Delta t_{\text{ср}}$  – среднелогарифмическая разность температур дымовых газов и воздуха (газа) для всей поверхности нагрева, °С.  $\Delta t_{\text{ср}}$  определяется по формуле

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\text{н}} - \Delta t_{\text{к}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{н}}}{\Delta t_{\text{к}}}} .$$

В рекуператорах продукты горения и нагреваемый воздух (газ) могут иметь различные схемы (направления) движения: прямоточное, противоточное и перекрестное. При прямоточной схеме движения дыма и воздуха (газа) температура подогрева воздуха (газа) не может быть выше температуры дымовых газов на выходе из рекуператора. Поэтому она применяется в том случае, когда температура дымовых газов настолько велика, что возникает опасение за стойкость материала рекуператора.

Для прямоточного движения

$$\Delta t_{\text{н}} = t_{\text{д}}^{\text{н}} - t_{\text{в}}^{\text{н}} ,$$

$$\Delta t_{\text{к}} = t_{\text{д}}^{\text{к}} - t_{\text{в}}^{\text{к}} ,$$

а для противоточного движения

$$\Delta t_{\text{н}} = t_{\text{д}}^{\text{н}} - t_{\text{в}}^{\text{к}} ,$$

$$\Delta t_{\text{к}} = t_{\text{д}}^{\text{к}} - t_{\text{в}}^{\text{н}} .$$

В отдельных случаях при незначительном изменении температуры дыма и воздуха

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{t_{\text{д}}^{\text{н}} + t_{\text{д}}^{\text{к}}}{2} - \frac{t_{\text{в}}^{\text{н}} + t_{\text{в}}^{\text{к}}}{2} .$$

Для других схем движения в формулу для нахождения  $\Delta t_{\text{ср}}$  вводится поправочный коэффициент [7, 16].

Общий коэффициент теплопередачи определяют по формуле

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_d} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_v}}, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{С},$$

где  $\alpha_d$  – коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием и конвекцией от продуктов горения к стенке, Вт/м<sup>2</sup> · °С;

$S$  – толщина стенки, м;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала стенки рекуператора, Вт/м · °С;

$\alpha_v$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией от стенки к воздуху, Вт/м<sup>2</sup> · °С.

При расчете коэффициента теплопередачи  $K$  необходимо задать скорости движения воздуха и дыма, рекомендуемые значения которых приведены в табл. 11.1.

Таблица 11.1

### Скорости воздуха и дыма в рекуператорах

Рекуператоры	Скорости при нормальных условиях, м/с	
	воздуха	дыма
Игольчатые	3–8	1–4
Термоблок	3–10	0,5–3
Трубчатые	5–10	2–4
Радиационные	20–30	–
Керамические	0,5–1	1–3

В большинстве случаев при расчете коэффициента теплопередачи металлических рекуператоров можно использовать приведенную формулу, пренебрегая термическим сопротивлением стенки. При этом формула принимает вид:

$$K = \frac{\alpha_v \cdot \alpha_d}{\alpha_v + \alpha_d}.$$

Для определения  $Q_v$ ,  $t_d^H$ ,  $t_d^K$  необходимо вначале определить расход воздуха, подаваемого в рекуператор:

$$V_v = k V_T L_d,$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий утечку воздуха, равный для:

трубчатых рекуператоров	1,0
игольчатых	1,1–1,15;
керамических, работающих с нагнетанием воздуха	1,25–1,4;
керамических, работающих с прососом воздуха	1,1–1,2.

Затем расход продуктов горения перед рекуператором

$$V_d = m V_d (1 + \rho), \text{ м}^2 / \text{с},$$

где  $m$  – коэффициент, учитывающий потери продуктов горения в печи и дымоходах до рекуператора и равный 0,65–0,85;

$\rho$  – присос воздуха в долях от количества продуктов горения, равный 1,1–1,15.

Теплосодержание продуктов горения перед рекуператором

$$i_d^H = \frac{\rho i_v + i_{yx}}{1 + \rho},$$

где  $i_v$  – теплосодержание окружающего воздуха, кДж/м<sup>3</sup>;

$i_{yx}$  – теплосодержание продуктов горения при температуре  $t_{yx}$ , кДж/м<sup>3</sup>.

По найденному значению теплосодержания  $i_d^H$  находим температуру продуктов горения перед рекуператором  $t_d^H$ .

Теплосодержание и температура продуктов горения за рекуператором определяется из уравнения теплового баланса рекуператора:

$$V_D (i_D^H - i_D^K) \cdot \xi = V_B (i_B^K - i_B^H),$$

где  $\xi$  – коэффициент, учитывающий потери тепла через кладку рекуператора, равный 0,9–1,0.

Откуда

$$i_D^K = i_D^H - \frac{V_B}{V_D \cdot \xi} (i_B^K - i_B^H),$$

а температура продуктов горения после рекуператора будет

$$t_D^K = \frac{i_D^K}{C_D^K},$$

где  $C_D^K$  – теплоемкость продуктов горения после рекуператора.

Если в рекуператоре имеет место утечка воздуха, то

$$i_D^K = \frac{V_D \cdot i_D^H \cdot \xi - V_B \cdot i_B^K}{(V_D + n V_B) \xi},$$

где  $n$  – утечка воздуха в долях количества воздуха, нагреваемого в рекуператоре ( $n = k - 1$ ).

Количество тепла, передаваемого воздуху через всю поверхность нагрева:

$$Q_B = V_B (i_B^K - i_B^H).$$

В металлических рекуператорах, предназначенных для нагрева воздуха до высоких температур, определяют также температуру стенок для того, чтобы не допустить ее увеличения выше допустимых пределов:

$$t_{\text{ср}} = t_{\text{в}} + \frac{t_{\text{д}} - t_{\text{в}}}{1 + \frac{\alpha_{\text{в}}}{\alpha_{\text{д}}}}$$

При расчете регенераторов, так же как и при расчете рекуператора, основной задачей является определение необходимой поверхности нагрева для обеспечения заданного подогрева воздуха или газа. Поэтому тепловой расчет регенератора может быть сведен к расчету эквивалентного рекуператора. При этом поверхность нагрева определяют по формуле

$$F_{\text{нагр}} = \frac{\Delta Q'}{\alpha_{\text{ср}} \Delta t_{\text{ср}}},$$

где  $\Delta Q'$  – количество тепла, передаваемого нагреваемому воздуху (газу) за цикл работы регенератора, кДж/цикл;

$\alpha_{\text{ср}}$  – среднее значение коэффициента теплопередачи от продуктов горения к воздуху (газу), кДж/м<sup>2</sup>·цикл·°С;

$\Delta t_{\text{ср}}$  – среднелогарифмическая разность температур между дымом и воздухом в регенераторе, °С.

Количество тепла  $\Delta Q'$ , полученное воздухом, определяется из уравнения теплового баланса регенератора

$$\Delta Q' = V_{\text{в}} \Delta i_{\text{в}} \Delta \tau,$$

где  $V_{\text{в}}$  – расход нагреваемого воздуха, м<sup>3</sup>/с ;

$\Delta \tau$  – величина длительности воздушного периода, с.

Количество тепла, вносимое продуктами горения, определяется по формуле

$$Q_{\text{н}} = V_{\text{д}} i_{\text{д}}^{\text{н}} \Delta \tau,$$

где  $V_{\text{д}}$  – расход продуктов горения, м<sup>3</sup>/с ;

$i_{\text{д}}^{\text{н}}$  – начальное теплосодержание продуктов горения, кДж/м<sup>3</sup>.

Количество тепла, уносимого с продуктами горения из регенератора за период  $\Delta\tau$  при тепловых потерях через стенки регенератора, равных 5 % от начального теплосодержания продуктов горения, равно

$$Q_k = 0,95 Q_H - \Delta Q'.$$

Теплосодержание продуктов горения, покидающих насадку:

$$i_d^k = \frac{Q_k}{V_d \Delta\tau}.$$

Температура продуктов горения  $t_d^k$  находится по  $i_d^k$  с помощью  $i-t$  диаграмм.

Среднелогарифмическая разность температур между продуктами горения и воздухом определяется аналогично, как и для рекуператора.

Наибольшие трудности при расчете регенераторов представляет определение коэффициента теплопередачи  $\alpha_{ср}$ , на величину которого большое влияние оказывает режим нагрева и охлаждения кирпича в насадке [7]. Определив необходимую поверхность нагрева (насадки), рассчитаем объем одной насадки

$$V_{нас} = \frac{F_{нагр}}{f},$$

где  $f$  – поверхность, приходящаяся на  $1 \text{ м}^3$  объема насадки,  $\text{м}^2$ . Ее подсчитывают исходя из размеров и формы элементов насадки.

## **12. ВЫБОР КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И РЕГУЛИРУЮЩИХ ПРИБОРОВ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ОСНОВНЫХ ОПЕРАЦИЙ НАГРЕВА**

Необходимость автоматизации теплового режима термических и нагревательных печей вызвана следующими требованиями:

а) обеспечением необходимой температуры садки в соответствии с заданным графиком нагрева или термообработки;

- б) экономичным использованием источника тепла;
- в) обеспечением необходимой производительности печи;
- г) безопасной работой печи.

При выборе средств контроля и регулирования следует учитывать динамические и статистические характеристики печи как объекта регулирования, характер возмущающих воздействий на тепловой режим, диапазон изменения тепловой нагрузки и температуры, технологические условия, степень механизации и характер работы механизмов печи.

Применяемые в настоящее время системы автоматического регулирования теплового режима термических и нагревательных печей периодического и непрерывного действия включают следующие основные блоки:

- а) регулирования температуры в рабочем пространстве печи и отдельных ее зонах;
- б) регулирования давления в рабочем пространстве;
- в) контроля факела и подготовки топлива.

Кроме того, на всех печах обычно предусматривают также контроль температуры дымовых газов на выходе из печи и воздуха (в случае его нагрева в рекуператорах), давления газа и воздуха (в случае использования регулятора соотношения).

### **Регулирование температуры рабочего пространства**

В термических и нагревательных печах используют следующие структурные схемы систем автоматического регулирования температуры:

1. Одноконтурные системы автоматического регулирования температуры, предусматривающие замер температуры в одной точке рабочего пространства (в центре свода) и изменение расхода энергии на всю печь. Топливо распределяют по зонам вручную по показаниям термопар.

2. Многоконтурные системы, предусматривающие автоматическую стабилизацию температуры в ряде зон рабочего пространства печи, с отдельными стабилизирующими регуляторами температуры и задатчиками в каждой зоне либо с одним многоканальным регулятором, к которому периодически подключают термопары и исполнительные механизмы каждой из зон.

3. Система автоматического регулирования, в которой управление режимов осуществляется по температуре поверхности садки



(с оптимизатором распределения тепловой нагрузки и коррекцией стабилизируемой температуры в зонах по температуре поверхности металла или температуре одной из зон).

В настоящее время в печах применяют в основном многоконтурные системы автоматического регулирования температуры.

Блок автоматического регулирования температуры представлен на рис. 12.1. Импульс отбирается с помощью термопары 1а и по кабелю передается к автоматическому потенциометру 1б, затем – к регулятору температуры 1г. Сюда же поступает сигнал от задатчика предела регулирования 1в. На тепловом щите установлены: двухштифтовая кнопка управления исполнительным механизмом при ручном регулировании 2г, указатель положения регулирующего органа (дроссельная заслонка на топливопроводе) 2б и переключатель схемы с автоматического на ручное регулирование температуры продуктов горения топлива 2в. На тепловом щите установлена сигнальная лампа НЛ1, позволяющая судить о наличии на щите регулирования температуры напряжения. На электрическом щите установлен магнитный пускатель 2а.

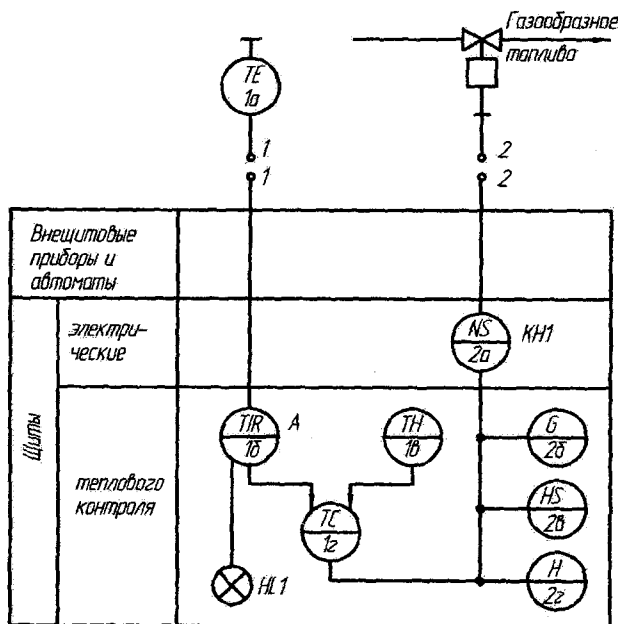


Рис. 12.1. Блок регулирования температуры

В качестве датчиков температуры для регуляторов используют при температуре рабочего пространства печи до 1000 °С хромель-алюмелевые термопары, до 1300 °С – платинородий-платиновые, а свыше 1300 °С – платинородиевые термопары или радиационные пирометры. Для измерения температуры в рабочем пространстве термопары вводят со стороны свода в горизонтальных печах или со стороны боковых стен в вертикальных печах. При этом следует стремиться, чтобы спай термопары находился в зоне наиболее высоких температур на расстоянии 150 мм от верхней поверхности садки. Однако чаще на горизонтальных термических и нагревательных печах термопары вводятся по центру свода на глубину 300–500 мм от внутренней поверхности свода.

В системах автоматического регулирования используют регуляторы температуры непрерывного, релейного и импульсного действия. Ниже приводятся указания по применению тех или иных регуляторов.

В термических печах периодического действия, в которых допускается незначительное отклонение температуры от заданной графиком термообработки и требуется большая равномерность нагрева садки, особенно в конце выдержки, устанавливают регуляторы температуры с программным задатчиком, общим для всей печи. При этом используют регуляторы непрерывного действия типов ПИ (пропорционально-интегральные), ПИД (пропорционально-интегрально-дифференциальные) и импульсивные. Последние применяют при отсутствии возмущений течения процесса. Двухпозиционными регуляторами следует пользоваться только в специализированных термических печах при небольших колебаниях расхода топлива.

В зависимости от габаритов рабочего пространства, вида садки и конструктивных особенностей термические печи периодического действия можно условно разделить на зоны с самостоятельным регулированием температуры с учетом взаимного влияния регуляторов. Однозонное регулирование рекомендуется в печах с длиной рабочего пространства до 8 м. При длине печи более 8 м рекомендуется на расстоянии 0,8–1 м от торцевых стен устанавливать контрольные термопары, работающие в комплекте с регистрирующим прибором.

Для регулирования температуры в нагревательных печах, к которым предъявляют менее жесткие требования в отношении точности поддержания температуры в равномерности нагрева изделий,

преимущественно рекомендуются позиционные регуляторы как наиболее простые и соответствующие динамическим свойствам данных печей.

Термические печи непрерывного действия в отношении регулирования температуры отличаются относительно стабильными коэффициентами передачи и динамическими характеристиками, допускающими применение как непрерывных регуляторов типа П (пропорциональные), ПИ, ПИД, так и позиционных. Применение двухпозиционных регуляторов во многих случаях предпочтительно, так как, во-первых, термические печи непрерывного действия часто делят на зоны, исходя из условий обеспечения заданного графика термообработки по длине печи и взаимного влияния регуляторов соседних зон, и при использовании позиционного регулирования может быть установлен один многоканальный позиционный регулятор температуры, выполняющий разные задачи по каналам регулирования. При непрерывном же регулировании число регуляторов должно быть равно числу зон регулирования, что усложняет эксплуатацию системы автоматики. Во-вторых, двухпозиционные регуляторы целесообразно использовать на печах, где часто происходят возмущения, связанные с загрузкой и выгрузкой изделий.

Для регулирования температуры нагревательных печей непрерывного действия, допускающих нагрев заготовок с максимальной скоростью, также может быть использован многоканальный позиционный регулятор, работающий с одной задачей для всех каналов регулирования. При применении такого регулятора облегчается также изменение задания при переходе печи с нагрева одних заготовок на нагрев других.

Для небольших печей возможно использование двухпозиционных регуляторов с дополнительным подключением ступенчатого импульсивного прерывателя типа СИП-01, который является двойным реле времени со ртутными выключателями, позволяющими изменять продолжительность включения исполнительного механизма и время между включениями.

Регуляторы температуры воздействуют с помощью исполнительных механизмов на регулирующие органы – поворотные заслонки, газо- и воздухопроводы типа ЗМС и ПРЗ, краны типа КР. Краны используют во всех печах, отапливаемых мазутом, а также в печках, отапливаемых газом при малых расходах топлива. Исполнительные механизмы в большинстве случаев принимают с электрическим приводом.

## **Регулирование соотношения расходов топлива и воздуха**

В настоящее время известны способы автоматического поддержания соотношения расходов топлива и воздуха с помощью:

1) регуляторов непрерывного действия, различных по конструкции и виду используемой энергии (гидравлических, пневматических, электрических, электрогидравлических), но с одинаковыми структурными схемами (их чаще применяют при использовании регуляторов температуры непрерывного и импульсивного действия);

2) датчиков расхода, работающих в комплекте с суживающими устройствами, – расходомеров переменного перепада, а также расходомеров постоянного перепада (расходомеров обтекания);

3) механической, электрической, жесткой или гибкой связью регулирующих органов;

4) автоматических оптимизаторов, осуществляющих автоматический поиск максимума температуры горения (преимущественно в нагревательных печах), – экстремальное регулирование;

5) инжекционных горелок, использующих энергию давления воздуха;

6) магнитных, термомагнитных и опти–акустических газоанализаторов по результатам анализа продуктов горения.

Блок регулирования соотношения «топливо–воздух» представлен на рис. 12.2. Изменение расхода топлива, поступающего в зону, дает возможность изменять (регулировать) температуру продуктов сгорания, однако это всегда приводит к диспропорции между компонентами рабочей смеси, что в свою очередь нарушает процесс горения топлива. Пропорционирование топлива и воздуха–окислителя в пределах принятого коэффициента избытка воздуха достигается прикрытием–открытием дроссельного клапана на трубопроводе дутьевого воздуха. Это осуществляется с помощью схемы регулирования соотношения «топливо–воздух».

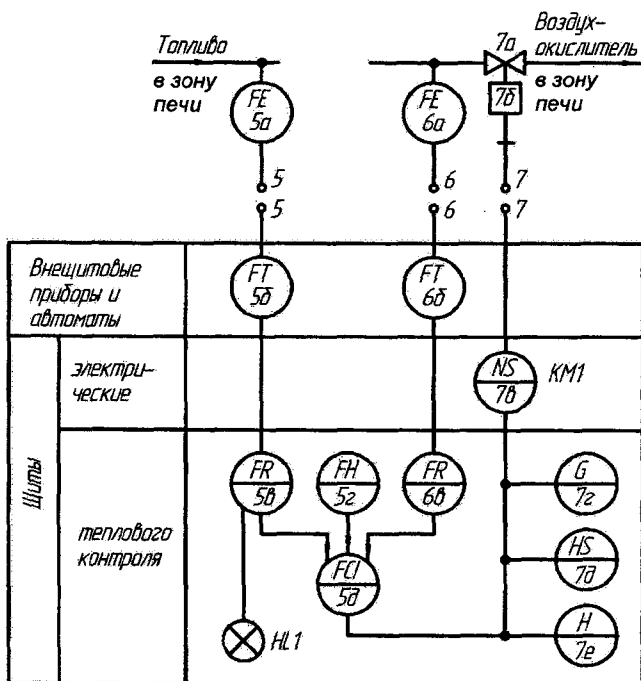


Рис. 12.2. Блок регулирования соотношения компонентов рабочей смеси

Для отбора механических (пневматических) импульсов используются измерительные диафрагмы 5а и 6а, установленные соответственно на трубопроводах топлива и воздуха-окислителя. Механический импульс поступает к бесшкальным дифманометрам 5б и 6б (эти приборы установлены вне щитка). С помощью этих элементов схемы механический импульс преобразуется в электрический и по электрическому кабелю передается к вторичным приборам 5в и 6в (самопишущие расходомеры), а затем к регулятору соотношения 5д. К последнему поступает сигнал от задатчика 5г. От регулятора электрический сигнал передается к исполнительному механизму 7б и на открытие-закрытие регулирующего органа 7а. Для контроля за положением регулирующего органа, дистанционным управлением, исполнительным механизмом 7б и переключением схемы с ручного на автоматическое регулирование предусмотрены элементы 7г

(указатель положения регулирующего органа), 7е (двухштифтовая кнопка управления) и 7д (ключ управления). На электрическом щите установлен магнитный пускатель 7в.

Автоматическое поддержание заданного соотношения «топливо–воздух» в термических и нагревательных печах периодического действия осуществляется с помощью регуляторов соотношения непрерывного действия типа И (интегральные), основанных на пропорциональных изменениях расходов топлива и воздуха, а также с помощью применения механической и электрической жесткой связи регулирующих органов на трубопроводах топлива и воздуха. Во всех случаях предусматривается возможность быстрого изменения коэффициента расхода воздуха, что особенно важно, когда таким способом достигается равномерный нагрев садки.

На печах непрерывного действия автоматическое поддержание заданного соотношения «топливо–воздух» осуществляется механической связью регулирующих органов на трубопроводах топлива и воздуха либо установкой конечных выключателей на исполнительных механизмах, раздельно управляющих подачей топлива и воздуха. Применение регуляторов соотношения расходов на многозонных агрегатах затруднительно, а при двухпозиционном регулировании температуры нецелесообразно.

**Регулирование давления в рабочем пространстве печи** осуществляется с помощью регуляторов давления, основной задачей которых является поддержание заданного нулевого или небольшого положительного давления на поду печи, чтобы устранить подсосы (проникновение) холодного воздуха через неплотности печи в рабочее пространство. Эффективная работа системы регулирования давления возможна при правильном выборе места отбора импульса, типа датчика и регулятора, конструкции и размера регулирующего шибера.

Блок регулирования давления атмосферы рабочего пространства зоны представлен на рис. 12.3. Здесь вне щита предусмотрен «слепой» прибор, преобразующий механический импульс в электрический. Для этой цели использован дифференциальный манометр рГ. За дифманометром импульс передается по электрическому кабелю. Связь между элементами схемы осуществляется электрическим кабелем.

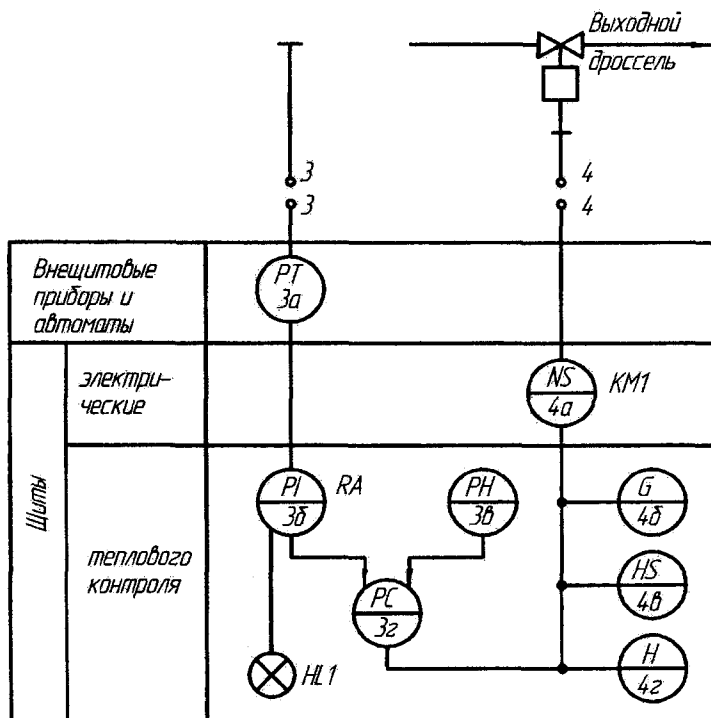


Рис. 12.3. Блок регулирования давления в зоне

Учитывая особенности работы печей периодического и непрерывного действия, на печах периодического действия для регулирования давления в печи импульс следует отбирать на уровне пода, а на печах непрерывного действия можно производить отбор импульса и под сводом. Регулирование давления в рабочем пространстве термических печей периодического действия осуществляется с помощью регуляторов типа И и ПИ. Печи периодического действия для регулирования давления не делят на зоны независимо от числа применяемых регуляторов температуры. Регулятор давления через исполнительный механизм воздействует на органы, изменяющие давление в рабочем пространстве: шибер, установленный в дымоходе, или заслонку.

На печах непрерывного действия регулирование давления в рабочем пространстве также осуществляется воздействием на дымовой шибер или заслонку, изменяющую подачу воздуха (вентиляторного

или атмосферного) в дымосливные каналы. Поддержание заданного давления в многозонных печах осуществляется с помощью регулятора непрерывного действия типа ПИ независимо от типа применяемых регуляторов температуры, так как изменение количества продуктов горения при работе отдельных регуляторов температуры составляет небольшую долю всего объема дымовых газов в печи, вследствие чего колебания давления в рабочем пространстве незначительны. На однозонных печах возможно применение тех же средств поддержания давления, которые используются на нагревательных печах периодического действия.

Количество регулирования давления, в основном, определяется тем, насколько полно скомпенсированы связи через объект между контурами регулирования температуры и давления в печи. Одним из средств компенсации влияния контуров является введение внешних статистических связей, которые могут быть выполнены в виде механического привода от одного исполнительного механизма к органам, регулирующим тепловую нагрузку и давление в печи, либо в виде следящей системы, согласующей работу исполнительных устройств.

**Системы контроля пламени** предназначены для предотвращения образования взрывоопасной среды. Контроль пламени может осуществляться либо по основной, либо по запальной горелке. К системам контроля пламени в печах предъявляют следующие требования:

1. При погасании пламени контрольной горелки (форсунки) система должна прекращать подачу топлива к основным горелкам (форсункам).

2. Время срабатывания системы должно быть меньше времени, за которое может образоваться взрывоопасная или токсичная смесь.

3. Система должна обладать свойством самоконтроля, т. е. при любой неисправности в приборе (обрыв, утечка, изменение параметров деталей и т. д.) должно происходить срабатывание исполнительного устройства на отсечку подачи топлива.

4. Приборы системы должны быть устойчивыми к помехам, надежными и недорогими.

Контроль пламени можно осуществлять приборами:

а) работающими по принципу теплового расширения (монометаллические и биметаллические устройства, устройства с использованием теплового расширения жидкости, пара);

б) термоэлектрического действия (термопара);



в) использующими различные свойства пламени (световое излучение, электропроводность, способность пламени выпрямлять переменный электрический ток, пульсацию пламени и т. д.).

В системах автоматического контроля за пламенем в особенности нуждаются низкотемпературные и универсальные печи, температура рабочего пространства которых может быть ниже температуры воспламенения топлива.

В системах автоматического регулирования теплового режима печей обязательно предусматривается установка приборов измерения, учета и регулирования параметров топлива, т. е. предусматривается подготовка топлива.

**Подготовка газового топлива перед сжиганием** заключается в снижении и стабилизации давления газа и очистке его от механических примесей. При наличии на заводе газораспределительного пункта подготовка газового топлива осуществляется в газорегуляторных установках, предназначенных для снабжения печей, расположенных только в одном помещении (цехе). Газорегулирующая установка должна иметь фильтр очистки, предохранительно-запорный клапан на выходе газа и манометр для замера давления газа на выходе и входе. Помимо этого предусмотрена сигнализация о повышении и снижении давления газа сверх установленных пределов, а при подаче воздуха в горелки от дутьевых устройств – автоматическое отключение подачи газа в горелки при падении давления воздуха ниже установленного предела.

Однако оптимальным решением, особенно при использовании жесткой связи регулирующих органов, является установка индивидуального регулятора давления газа и вентилятора на каждую печь, так как колебания давления воздуха в общецеховых установках могут ухудшать настройку системы регулирования теплового режима.

Подготовка мазута заключается в его очистке, регулировании давления и вязкости. При отоплении мазутом для печи в целом и для каждой зоны крупной печи предусматривают узел мазутоподготовки, состоящий из фильтра, регулятора давления и регулятора температуры подогрева мазута.

Вопросы автоматического регулирования теплового режима печей – структурные и принципиальные схемы контроля и регулирования теплового режима более подробно рассмотрены в учебной и специальной литературе [1, 2, 10, 13, 18, 19].

Принципиальные схемы автоматического регулирования и управления тепловой нагрузкой высокотемпературной теплотехнологической установки строятся в полном соответствии с функциональными схемами, приведенными на рис. 12.1, 12.2, 12.3.

При эксплуатации нагревательных и термических печей в настоящее время широко используют различные механизмы и приспособления для облегчения труда по загрузке, транспортировке и разгрузке печей, а в некоторых случаях и для полной автоматизации этих процессов.

Наиболее часто встречающиеся механизмы и приспособления с указанием назначения, особенностей и принципа их работы приведены в литературе [10, 13, 16, 20].

Механизмы работают в определенной последовательности, через заданные промежутки времени, т. е. по заданной программе. Отсюда одной из основных задач автоматизации процесса обработки изделий в печах является автоматизация управления механизмами. Заданная последовательность операций при автоматическом управлении механизмами может быть достигнута:

- за счет использования аппарата, выдающего команды приводам в заранее установленные моменты времени;
- применением контактов конечных выключателей или других устройств, контролирующих выполнение предыдущей операции, для непосредственной выдачи команд на последующую операцию;
- с помощью тех же контактов, но и при использовании счетно-шаговых устройств.

Поэтому в схеме управления механизмами помимо блокировок, нулевой защиты и защиты электроприводов от перегрузки с помощью тепловых реле магнитных пускателей, электромагнитных и тепловых расцепителей и автоматических выключателей и плавких предохранителей необходимо предусматривать контроль за исполнением тех или иных операций с помощью реле скорости, давления и напряжения, а также тока, конечных выключателей и т. п.

Более подробно эти вопросы рассмотрены в специальной литературе [18, 20, 21].

### 13. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПЕЧЕЙ БЕЗОКИСЛИТЕЛЬНОГО И МАЛООКИСЛИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА

Расчет печей безокислительного и малоокислительного нагрева производится, в основном, по аналогии с печами обычного нагрева и содержит все вышеприведенные этапы проектирования. Однако при выполнении некоторых этапов проектирования следует учитывать особенность безокислительного и малоокислительного нагрева. Поэтому в данном разделе рассмотрим только особенности расчета печей безокислительного и малоокислительного нагрева.

**Выбор топлива.** Выбор топлива для печей безокислительного и малоокислительного нагрева в каждом конкретном случае определяется условиями производства. Наиболее часто применяются высококалорийные газы: природный, коксовальный и нефтяной. При выборе и оценке газообразного топлива необходимо иметь в виду, что при использовании для печей безокислительного и малоокислительного нагрева метаносодержащих газов, восстановительные печные атмосферы, обеспечивающие получение безокислительного нагрева, получаются при более высоких значениях коэффициентов расхода воздуха, чем при использовании коксовального газа. Однако при сжигании коксовального газа максимально возможные температуры в печах безокислительного нагрева получаются при более низких температурах нагрева первичного воздуха, чем при сжигании в таких же печах природного газа.

#### Расчет горения топлива при $\alpha_v < 1$

1. Определение коэффициента расхода воздуха  $\alpha_v$  при сжигании природного или коксовального газа в печах безокислительного и малоокислительного нагрева производится с помощью диаграммы равновесия: продукты горения – металлы [9, 10, 20], на которых по-

казана зависимость отношения  $\frac{CO}{CO_2}$  и  $\frac{H_2}{H_2O}$  от коэффициента

расхода воздуха  $\alpha_v$ , по графикам зависимости коэффициента расхода воздуха от величины угара металла [10, 20] либо по составу топлива и продуктов горения по формуле для твердого и жидкого топлива

$$\alpha_B = \frac{1}{1 - 3,76 \frac{O_2^D - 0,5(CO^D + H_2^D) - 2CH_4^D}{N_2^D}},$$

для газообразного топлива

$$\alpha_B = \frac{1}{1 - 3,76 \frac{O_2^D - 0,5(CO^D + H_2^D) - 2CH_4^D}{N_2^D \left[ 1 - \frac{N_2(CO_2^D + SO_2^D + CO^D + CH_4^D)}{N_2^D \cdot 100(V_{CO_2} + V_{SO_2})} \right]}}$$

где  $O_2^D$ ,  $CO^D$  и т. д. – содержание соответствующих газов в продуктах горения, %;

$N_2$  – содержание азота в топливе, %;

$V_{CO_2}$  и  $V_{SO_2}$  – объем  $CO_2$  и  $SO_2$  в продуктах горения.

Данные формулы используют для определения  $\alpha_B$  для печей обычного нагрева.

2. При расчете объема и состава продуктов неполного горения исходят из допущений о достижении их равновесного состава и об отсутствии в них  $CH_4$  и  $H_2S$ . Таким образом, продукты неполного сгорания предполагаются состоящими из  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO$  и  $H_2$ .

Необходимое количество кислорода при коэффициенте расхода воздуха  $\alpha_B < 1$ .

$$L_{O_2} = 0,21\alpha_B L_T.$$

С этим количеством кислорода будет введено азота (из воздуха)

$$L_{N_2} = \frac{100 - C}{C} L_{O_2},$$

где  $C$  – объемная концентрация  $O_2$  в дутье, %.

Таким образом, общее количество азота в продуктах горения

$$\sum L_{N_2} = L_{N_2} + 0,01N_2,$$

где  $N_2$  – содержание азота в топливе, %.

Обозначим содержание компонентов ( $\text{м}^3/\text{м}^3$ ) в продуктах горения  $\text{CO}_2$ – $x$ ,  $\text{CO}$ – $y$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ – $z$ ,  $\text{H}_2$ – $q$ .

Составляем уравнение баланса по балансу углерода:

$$x + y = (\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4 + m C_m \text{O}_n) \cdot 0,01 = A, \quad \text{м}^3 / \text{м}^3;$$

по балансу водорода:

$$z + q = (\text{H}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{CH}_4 + \frac{n}{2} C_m \text{O}_n) \cdot 0,01 = B, \quad \text{м}^3 / \text{м}^3;$$

по балансу кислорода:

$$2x + y + z = (2\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{O} + 2\text{O}_2) \cdot 0,01 = C, \quad \text{м}^3 / \text{м}^3.$$

Если в продуктах горения будет  $\text{CH}_4$  (при горении газа  $\alpha_n = 0,4-0,5$  в продуктах горения может содержаться 1–2 %  $\text{CH}_4$ ), то это следует учесть при составлении баланса.

Константа равновесия реакции водяного газа

$$K = \frac{\text{CO} \cdot \text{H}_2\text{O}}{\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2} = \frac{yz}{xq}.$$

Выражая величины  $y$ ,  $z$ ,  $q$  через  $x$ , получаем

$$K = \frac{(A-x)(C-A-x)}{x(B-C+A+x)}.$$

Значения константы равновесия  $K$  в зависимости от температуры приведены в таблице [7] либо определяются по диаграмме [9, 10].

Решив это уравнение относительно  $x$ , можно затем найти и остальные составляющие продуктов неполного горения –  $y, z, q$ .

Общий объем продуктов неполного сгорания

$$V_q = x + y + z + q + \sum L_{N_2}, \text{ м}^3 / \text{м}^3.$$

Состав продуктов неполного сгорания

$$\text{CO}_2 = \frac{x}{V_q} \cdot 100 \% \text{ и т. д.}$$

3. Необходимую calorиметрическую температуру горения можно определить по выражению

$$t_{\text{кал}}^{\text{тр}} = \frac{t_{\text{п.п}}}{\eta},$$

где  $t_{\text{п.п}}$  – требуемая температура печного пространства; определяется исходя из конечной температуры нагрева металла и теплового напора ( $t_{\text{п.п}} = t_{\text{м}}^{\text{к}} + \Delta t$ );

$\eta$  – пирометрический коэффициент, равный для методических и полуметодических печей 0,75–0,8, а для камерных – 0,7–0,75.

4. Температура нагрева первичного воздуха может быть определена по графику зависимости calorиметрической температуры горения от коэффициента расхода воздуха и температуры нагрева воздуха [22], а также по формуле

$$t_{\text{в}} = \frac{Q_{\text{в}}^{\phi} \cdot V_{\text{п.н.г}}^{\alpha < 1}}{L_{\text{в.л}}^{\alpha < 1} \cdot c_{\text{в}}},$$

где  $Q_{\text{в}}^{\phi}$  – количество тепла, которое должно поступить с воздухом, кДж/м<sup>3</sup>;

$V_{\text{п.н.г}}^{\alpha < 1}$  – объем продуктов неполного горения,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;

$L_{\text{вл}}^{\alpha < 1}$  – расход влажного воздуха ( $L_q^{\alpha < 1}$ ),  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;

$c_{\text{в}}$  – теплоемкость воздуха,  $\text{кДж}/\text{м}^3, ^\circ\text{С}$ .

Количество тепла, которое должно поступить с воздухом, определяется по выражению

$$Q_{\text{в}}^{\phi} = i_{\text{к}} - i_{\text{о}},$$

где  $i_{\text{к}}$  – теплосодержание продуктов неполного горения при  $\alpha_{\text{в}} < 1$  и заданном значении  $t_{\text{кал}}$

$$(i_{\text{к}} = q_{\text{п.н.г}} = \sum V_{\text{п.н.г}}^{\alpha < 1} C_{\text{п.н.г}} t_{\text{кал}}) \text{ кДж}/\text{м}^3,$$

$i_{\text{о}}$  – начальное теплосодержание продуктов неполного горения,  $\text{кДж}/\text{м}^3$ .

$$i_{\text{о}} = \frac{Q_{\alpha < 1}^{\text{р}}}{V_{\text{п.н.г}}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}} - Q_{\text{хим}}^{\text{р}}}{V_{\text{п.н.г}}},$$

где  $Q_{\alpha < 1}^{\text{р}} = Q_{\text{н}}^{\text{р}} - Q_{\text{хим}}^{\text{р}}$  – количество тепла, выделяемое газом в печи при полном его горении;

$Q_{\text{хим}}^{\text{р}}$  – химическая неполнота горения, зависящая от содержания в продуктах неполного горения, покидающих рабочее пространство печи  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и свободного сажастого углерода, которая может быть приближенно определена по уравнению

$$Q_{\text{хим}}^{\text{р}} = (126 \text{ CO} + 108 \text{ H}_2 + 358 \text{ CH}_4) \cdot V_{\text{п.н.г}}^{\alpha < 1} + 34 C_{\text{св}} \cdot V_{\text{п.н.г}}^{\alpha < 1},$$

где  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  – содержание составляющих продуктов неполного горения, % (126; 108; 358 – количество тепла, выделяемого при сгорании 1 % указанных газов,  $\text{кДж}$ );

$C_{\text{св}}$  – содержание углерода в  $1 \text{ м}^3$ ,  $\text{г}/\text{м}^3$  (34 – количество тепла, выделяемое при сгорании 1 г углерода). В реальных условиях  $C_{\text{св}} = 2-5 \text{ г}/\text{м}^3$ .

**Выбор линейных размеров пода печи безокислительного и малоокислительного нагрева производится по аналогии с размерами печи обычного нагрева. При этом учитываются производительность печи, форма нагреваемых заготовок и т. д.**

Высоту рабочей камеры печи безокислительного и малоокислительного нагрева можно определить по одной из формул

$$H = \frac{V_{\text{п.н.г}}}{B \cdot W_0}, \text{ м}$$

или

$$H = \frac{F_{\text{кл}} - 1,1F_{\text{п}}}{2(B + L)}, \text{ м},$$

где  $V_{\text{п.н.г}}$  – секундный объем продуктов неполного горения, проходящих через рабочую камеру при нормальных условиях,  $\text{м}^3$ ;

$B$  – ширина рабочей камеры, м;

$W_0$  – приведенная скорость движения продуктов неполного горения, принимаемая для  $t_{\text{п.н.г}} > 1200^\circ\text{C}$  –  $W_0 = 0,5 - 0,8$  м/с ;

для  $t_{\text{п.н.г}} > 800 - 1200^\circ\text{C}$  –  $W_0 = 0,6 - 1,0$  м/с .

Практика показывает, что высота рабочей камеры печи безокислительного и малоокислительного нагрева должна быть на 10–20 % меньше высоты рабочей камеры такой же печи, работающей по обычному режиму.

**Расчет расхода топлива.** В камерных печах безокислительного и малоокислительного нагрева расход топлива подсчитывается из балансов тепла работающих камер по аналогии с печами обычного нагрева. Расход топлива в методических печах безокислительного и малоокислительного нагрева подсчитывают из балансов тепла по зонам.

При составлении теплового баланса также имеют место некоторые особенности. Так, приход тепла в печах безокислительного и малоокислительного нагрева складывается из тепла, получаемого от неполного горения высококалорийного газа, физического тепла воздуха и газа в случае его предварительного подогрева.



Количество тепла, введенное в печь при неполном горении газа, может быть выражено следующим уравнением:

$$Q_T = V_T (Q_H^P - Q_{\text{хим}}) = V_T Q_{\alpha < 1}^P, \text{ Вт.}$$

Количество тепла  $Q_{\alpha < 1}^P$  в печах безокислительного нагрева находится в зависимости от коэффициента расхода воздуха и условий сжигания газа.

Если обозначить отношение  $\frac{Q_{\alpha < 1}^P}{Q_H^P} = P$ , то

$$Q_T = V_T Q_H^P P, \text{ Вт.}$$

где  $P$  показывает возможную степень использования теплоты горения в печах безокислительного и малоокислительного нагрева.

Общий расход тепла печи безокислительного и малоокислительного нагрева определяется следующим образом:

$$Q_{\text{расх}} = Q_M + Q_{\text{хим}} + Q_5 + Q_{\text{вод}} + Q_{\text{п.н.г}}^{\Phi}, \text{ Вт.}$$

где  $Q_M$  – расход тепла на нагрев металла, Вт;

$Q_{\text{хим}}$  – потери тепла от химической неполноты горения, Вт;

$Q_5$  – потери тепла через кладку и за счет излучения через открытые окна и щели, Вт;

$Q_{\text{вод}}$  – тепло, уносимое охлаждающей водой, Вт;

$Q_{\text{п.н.г}}^{\Phi}$  – физическое тепло продуктов неполного горения, покидающих рабочее пространство печи, Вт.

$$Q_{\text{хим}} = V_T \cdot (Q_H^P - Q_{\alpha < 1}^P) = V_T \cdot Q_H^P \cdot K, \text{ Вт.}$$

где  $K = \frac{Q_H^P - Q_{\alpha < 1}^P}{Q_H^P}$  – коэффициент химической неполноты горения.

Потери тепла с уходящими продуктами неполного горения в печах безокислительного и малоокислительного нагрева могут быть определены из уравнения

$$Q_{п.н.г}^{\Phi} = V_T V_{\alpha < 1} (P_{CO_2} \cdot C_{CO_2} + P_{CO} \cdot C_{CO} + P_{H_2O} \cdot C_{H_2O} + P_{H_2} \cdot C_{H_2} + P_{CH_4} \cdot C_{CH_4} + P_{N_2} \cdot C_{N_2}) t_{ух.г}, \text{ Вт},$$

где  $V_{\alpha < 1}$  – объем влажных продуктов горения, образующихся при неполном горении  $1 \text{ м}^3$ , при  $\alpha < 1$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;

$P_{CO_2}, P_{CO} \dots$  – доля отдельных составляющих газа в составе продуктов неполного горения по объему,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;

$C_{CO_2}, C_{CO} \dots$  – средняя теплоемкость составляющих продуктов неполного горения,  $\text{кДж}/\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ ;

$t_{ух.г}$  – средняя температура продуктов неполного горения, покидающих рабочую камеру печи,  $^\circ\text{C}$ .

**Выбор горелок.** Для сжигания высококалорийных газов при неполном горении применяют факельные горелки различной конструкции. Чаще всего применяются турбулентные горелки низкого давления типа ГНП производительностью  $3\text{--}1500 \text{ м}^3/\text{ч}$  в зависимости от давления газа воздуха. Допустимый подогрев воздуха  $550\text{--}650 \text{ }^\circ\text{C}$  и газа  $200\text{--}300 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Расчет теплоиспользующих устройств** производится по вышеприведенной методике. При расчете регенераторов с насадкой из небольших элементов с продолжительностью перекидки  $0,5\text{--}1,5$  мин. поверхность нагрева, полученную расчетом, надо увеличить в  $1,5$  раза ввиду больших внутренних потерь, связанных с частыми перекидками клапанов.

Нормальная работа печей безокислительного и малоокислительного нагрева возможна только при наличии хорошей тяги (разряжения), обеспечивающей эффективное удаление продуктов неполного горения из рабочих камер и хорошую регулировку давлений в них с помощью приборов автоматики. Хорошая тяга необходима также в связи с требованиями техники безопасности. Поэтому при

проектировании печей безокислительного и малоокислительного нагрева должны обязательно проводиться **расчеты движения газов** с определением (или проверкой) всех параметров устройств, обеспечивающих разряжение и удаление печных газов в атмосферу.

Наиболее полные данные по теории расчета печей безокислительного и малоокислительного нагрева изложены в специальной литературе [22]. В этой литературе приводятся конструкции печей безокислительного и малоокислительного нагрева, принципиальные схемы теплового контроля и автоматического регулирования тепловым режимом печей.

#### **14. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЛАМЕННЫХ ПЕЧЕЙ**

Техника безопасности должна соблюдаться при пуске и эксплуатации печей. Во избежание хлопков и взрывов при розжиге печей необходимо придерживаться соответствующих правил и определенной последовательности операций. Начинать надо с проверки надежности отключения печи от цеховой газовой сети, т. е. с тщательного осмотра отсечных устройств. Если газопроводы длительное время были без газа или разбирались для ремонта, то их следует испытать на плотность, а затем продуть газом. После продувки необходимо проветрить топки печей и приступить к зажиганию.

Последовательность операций при пуске и разогреве печей определяется техникой безопасности и необходимостью повышать рабочую температуру в печи с такой скоростью, которая допускается назначением печи и видом огнеупорных материалов, из которых она выполнена. Эти операции следующие: подготовка к зажиганию, зажигание и разогрев печи.

Подготовка к зажиганию печи начинается с тщательного осмотра печи и очистки ее от строительного мусора. Затем выполняется сушка печи, так как различные виды растворов, которые применяют для выполнения огнеупорной кладки, содержат влагу. Если ее не удалить, то при резком подъеме температуры вода начинает интенсивно испаряться, что приведет к растрескиванию кладки.

Сушку выполняют воздухом и дымовыми газами. Начинают с сушки воздухом, для чего открывают все заслонки печей, поднимают шибер, обеспечивая тем самым движение воздуха в рабочем

пространстве печи и других ее элементах. Сушка воздухом продолжается несколько дней. После того, как появится тяга, разводят костер в рабочем пространстве печи, стараясь заполнить все рабочее пространство дымовыми газами. Сушка дровами продолжается до тех пор, пока температура в печи не превысит 700 °С. При использовании газообразного топлива печь можно протопить газом без принудительной подачи воздуха. При этом необходимо следить за тем, чтобы горелки не погасли, так как при этом может возникнуть взрывоопасная гремучая смесь.

После того как температура печи превысит 700 °С и необходимая тяга будет обеспечена переходят к зажиганию печи, т. е. отоплению ее проектным топливом.

Зажигание печи должно проводиться с соблюдением определенных правил с целью избежания возможных взрывов. Вначале необходимо:

1. Проверить печь, чтобы исключить всякую возможность непредвиденного скопления газа в каких-либо элементах объема печи или скопления мазута на полу.

2. Проверить состояние устройств для сжигания топлива, трубопроводов, задвижек.

3. Обеспечить установку форсунок и горелок точно по оси горелочного отверстия.

4. Плотно закрыть все задвижки на мазутопроводах, газопроводах и воздухопроводах, так как в дальнейшем их следует открывать в строго установленном порядке.

Разогрев печи до рабочей температуры постепенным увеличением расхода топлива проводится по определенному графику, зависящему от конструкции печи, вида и объема огнеупорного материала, из которого выполнена печь.

Так, печь с кладкой из динасового кирпича разогревают по следующему режиму:

Температура печи, К°	<423	423–573	573–923	>923
Скорость нагрева кладки, °С/ч	5–10	10–20	20–40	40–50

Устойчивая работа форсунок и горелок в первую очередь зависит от температуры в непосредственной близости от их выходного отверстия. Горение устойчиво лишь тогда, когда эта температура

превышает температуру воспламенения топлива. Для обеспечения воспламенения топлива вначале при еще недостаточно прогретой поверхности горелочного кирпича (туннеля) необходимо использовать запальники. Обычно в качестве таких запальников используют прутки, обмотанный на конце ветошью, смоченный мазутом, или свечу газообразного топлива. В последнее время широко применяют электрозapальники.

Форсунки вводят в действие поочередно. До ввода форсунки в действие перед ее устьем помещают зажженный факел. После этого в форсунку подают небольшое количество воздуха, затем мазута. Создав таким образом небольшое устойчивое пламя, постепенно его увеличивают. Затем поочередно зажигают другие форсунки.

При пуске горелок на горящий запальник сначала пускают газ и обеспечивают небольшое устойчивое пламя, а после этого начинают понемногу подавать воздух. Увеличивая расход газа и воздуха, обеспечивают желаемый размер пламени. Горелки также разжигают поочередно.

При зажигании форсунок и горелок не следует стоять близко к отверстиям для поджигания и тем более смотреть в них.

Если нужно выключить форсунки или горелки, то все операции выполняют в обратном порядке. При выключении форсунки сначала отключают мазут, а потом воздух, при выключении горелки – сначала воздух, а потом газ.

После того как в действие введены форсунки и горелки начинается разогрев кладки. При разогреве надо строго следить за расширением кладки, особенно свода печи.

В процессе эксплуатации печей должны осуществляться необходимые наблюдения и контроль.

Наблюдение за работой системы отопления печей включает следующее:

1. Горелки и форсунки должны работать равномерно, топливо и воздух равномерно распределяться по горелкам и форсункам.
2. Не должно быть подтекания мазута в форсунках, проскока и обрыва пламени в горелках.
3. Все отсечные устройства должны быть в исправном состоянии и плотно перекрывать трубопроводы топлива и воздуха.

4. Печь должна быть обеспечена достаточной тягой, для этого нельзя допускать подсоса холодного воздуха в боровы и дымоотводящие каналы.

5. Необходимо поддерживать требуемое давление в печи, предотвращающее подсос холодного воздуха из атмосферы цеха и выбивание дымовых газов из окон печи.

Обслуживающий персонал нагревательных печей должен остерегаться падения заготовок при транспортировке к печам, штамповочному оборудованию, движущихся частей подъемных столов, толкателей и выталкивателей, отравления газом, а также ушибов и ожогов нагретым металлом при выдаче его из печей, ручной кантовке. Нагревательные печи выделяют большое количество тепла в помещении, поэтому их расположение в цехах должно обеспечивать достаточный приток свежего воздуха к каждой печи. Для избежания возможности отравления газом следует неуклонно выполнять все требования по уплотнению газопроводов и соответствующей арматуры.

## Литература

1. Сатановский, Л.Г., Мирский, Ю.А. Нагревательные и термические печи в машиностроении. – М.: Металлургия, 1971.
2. Ковка и штамповка: справочник. В 4 т. Т. 1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка / Под ред. Е.И. Семенова. – М.: Машиностроение, 1985. – 568 с.
3. Промышленные теплотехнологии. Машиностроительное и металлургическое производство: учебник. В 2 ч. / А.П. Несенчук [и др.]; под общ. ред. А.П. Несенчука. – Мн.: Вышэйшая школа, 1997.
4. ОМТРМ 5432-002-66. Термическое и нагревательное оборудование для машиностроения. Термическое оборудование на газообразном и жидком топливе для процессов термической обработки и нагрева металла под обработку давлением. – Ч. 2. – М.: НИИМаш, 1966.
5. Некрасов, А.С., Сияк, Ю.В. Экономика энергетики процессов горения. – М.: Энергия, 1965.
6. ОМТРМ 5066-002-065. Рациональный выбор технологического топлива для процессов нагрева и термической обработки металлов. – М.: НИИМаш, 1965.
7. Расчеты нагревательных печей / С.И. Аверин [и др.]; под ред. Н.Ю. Тайца. – Киев: Техника, 1969.
8. Казанцев, Е.И. Промышленные печи: справочное руководство для расчетов и проектирования. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.
9. Промышленные теплотехнологии. Методики и инженерные расчеты оборудования высокотемпературных теплотехнологий машиностроительного и металлургического производства: учебник / В.И. Тимошпольский [и др.]; под общ. ред. А.П. Несенчука, В.И. Тимошпольского. – Мн.: Вышэйшая школа, 1998. – 222 с.
10. Нагревательные устройства / А.А. Скворцов [и др.]. – М.: Высшая школа, 1965.
11. Шмыков, А.А. Справочник термиста. – М.: МашГИЗ, 1961.
12. Каменичный, И.С. Краткий справочник технолога-термиста. – М.: МашГИЗ, 1963.
13. Касенков, М.А. Нагревательные устройства кузнечного производства. – М.: МашГИЗ, 1962.
14. Огнеупоры / В.И. Каменецкий [и др.]. – 1968. – №1. – С. 5–9.

15. Мaстрюков, Б.С. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей. В. 2 т. Т. 2. Расчеты металлургических печей. – М.: Металлургия, 1978. – 272 с.

16. Методические печи / В.Л. Гусовский [и др.]; под ред. В.М. Тымгина. – М.: Металлургия, 1970.

17. Тетеньков, Б.П. Рекуператоры для промышленных печей. – М.: Металлургия, 1975. – 298 с.

18. Васильев, А.В., Энно, И.К. Автоматизация пламенных печей в машиностроении. – М.: Металлургия, 1970.

19. Свиридов Ю.А. Автоматизация нагревательных печей. – М.: Металлургия, 1965.

20. Рустем, С.А. Оборудование и проектирование термических цехов. – М.: МашГИЗ, 1962.

21. Иванова, Н.И., Перимов, А.А., Тымчак, В.М. Механизмы печей прокатного производства. – М.: Машиностроение, 1972. – 124 с.

22. Безокислительный и малоокислительный нагрев стали под обработку давлением / А.А. Скворцов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1968.



## Содержание

Введение .....	3
1. СОДЕРЖАНИЕ, ОБЪЕМ И ОФОРМЛЕНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ (ПРОЕКТА) .....	4
2. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА ПЕЧИ .....	6
2.1. Обоснование выбора типа печи .....	6
2.2. Обоснование выбора источника тепловой энергии .....	11
3. РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА .....	12
3.1. Определение теплотворной способности топлива .....	21
3.2. Определение теоретического количества воздуха .....	26
3.3. Определение состава и количества продуктов полного горения топлива $V_d$ .....	27
3.4. Определение температур горения .....	30
3.5. Примеры расчетов горения топлива .....	41
4. РАСЧЕТ НАГРЕВА МЕТАЛЛА .....	55
4.1. Построение температурного графика нагрева .....	66
4.2. Расчет интенсивности внешнего теплообмена в зонах рабочего пространства печи .....	74
4.3. Определение продолжительности нагрева заготовок .....	80
5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА ПЕЧИ .....	91
6. ВЫБОР МАТЕРИАЛА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КЛАДКИ ПЕЧИ И СОСТАВЛЕНИЕ РАСЧЕТНОГО ЭСКИЗА ПЕЧИ .....	97
7. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПЕЧИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДОВ ТОПЛИВА .....	103
8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ПЕЧИ .....	116
9. ВЫБОР И РАСЧЕТ ФОРСУНОК, ГОРЕЛОК И РАДИАЦИОННЫХ ТРУБ .....	117

10. РАСЧЕТ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОВ .....	125
11. РАСЧЕТ ТЕПЛОИСПОЛЬЗУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА .....	128
12. ВЫБОР КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И РЕГУЛИРУЮЩИХ ПРИБОРОВ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ОСНОВНЫХ ОПЕРАЦИЙ НАГРЕВА .....	134
13. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПЕЧЕЙ БЕЗОКСИДНОГО И МАЛООКСИДНОГО НАГРЕВА .....	146
14. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЛАМЕННЫХ ПЕЧЕЙ .....	154
Литература .....	158

**цена 1153**

Учебно-методическое издание

ЛОГАЧЕВ Михаил Васильевич  
ИВАНИЦКИЙ Николай Иванович  
ДАВИДОВИЧ Людмила Михайловна

## РАСЧЕТЫ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Учебно-методическое пособие  
для студентов специальностей  
1-36 01 05 «Машины и технология  
обработки материалов давлением»,  
1-36 01 02 «Материаловедение в машиностроении»

В 3 частях

Часть 1

### РАСЧЕТ ПЛАМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Редактор Е.Н. Гордейчик  
Компьютерная верстка О.В. Дубовик

---

Подписано в печать 09.02.2007.

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 9,4. Уч.-изд. л. 7,36. Тираж 300. Заказ 880.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0131627 от 01.04.2004.

220013, Минск, проспект Независимости, 65.