

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНАЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ
УКРАИНЫ**

В.И.Губинский

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПЕЧИ

Днепропетровск НМетАУ 2006

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНАЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ
УКРАИНЫ**

В.И.Губинский

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПЕЧИ

Утверждено на заседании
Ученого совета академии как учебное пособие

Днепропетровск НМетАУ 2006

УДК 669.046(076.3)

Губинский В.И. *Металлургические печи: Учеб. пособие.* - Днепропетровск: НМетАУ, 2006. – 85 с.

Настоящее учебное пособие предназначено для изучения металлургических печей как составной части дисциплины «Теория и технология производства и обработки стали» в рамках бакалаврской программы «Металлургия».

Включает классификацию печей, вопросы сжигания топлива, рассматриваются тепловая работа и конструкции нагревательных печей, энергосбережение и экологические требования при эксплуатации печей.

Издается в авторской редакции.

Рецензенты: Хейфец Р.Г., д-р техн. наук, проф. (НПО «Трубопечь»)
Згура А.А., канд. техн. наук (Государственное предприятие "Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт трубной промышленности им. Я.Е.Осады")

©Национальная металлургическая академия Украины, 2006

ВВЕДЕНИЕ

Промышленная печь – это агрегат для тепловой обработки материалов, а именно, для их нагрева с целью осуществления какого-либо технологического процесса. В металлургических печах производят нагрев до высокой температуры с целью получения металлов и сплавов – чугуна, стали, ферросплавов, цветных металлов, а также для придания металлическим или огнеупорным изделиям требуемых механических свойств. На металлургических предприятиях высокотемпературные печи являются основным технологическим оборудованием.

Для нагрева материалов необходимо снабжать печь энергией в форме теплоты и передавать теплоту нагреваемым материалам. Теплотехнический процесс генерации теплоты в печи и передачи её материалам составляет сущность тепловой работы печи.

Технологический процесс может происходить в рабочем пространстве печи одновременно с теплотехническим, как, например, при выплавке металла, обжиге огнеупоров, при термообработке отливок. В другом случае технологический процесс следует за теплотехническим и происходит вне печи, например, при нагреве слитков и заготовок перед обработкой давлением: прокаткой, ковкой, прессованием.

Современные печи представляют собой разнообразные по конструкции, сложные тепловые агрегаты. Они состоят из собственно печи и вспомогательного оборудования. Собственно печь включает в себя рабочее пространство и устройства для генерации теплоты: горелки, форсунки, фурмы в топливных печах и электроды, резисторы в электрических печах. В состав вспомогательного оборудования входят устройства для утилизации теплоты и очистки уходящих из печи дымовых газов, вентиляторы, дымососы, трубопроводы с клапанами и задвижками, дымовые трубы, контрольно-измерительные приборы и устройства для управления печью.

Дисциплина «Металлургические печи» является составной частью комплексной дисциплины «Теория и технология производства и обработки стали» («ТТПОС»), изучение которой предусмотрено в рамках бакалаврской программы «Металлургия».

Технологические печные процессы и конструкции плавильных печей

черной и цветной металлургии, служащих для производства чугуна, стали, ферросплавов, цветных металлов изучаются в других, технологических, частях комплексной дисциплины «ТТПОС». С конструкциями плавильных печей можно познакомиться по литературным источникам [4, 9].

В настоящем пособии раскрывается содержание тепловой работы промышленных печей, рассматриваются способы энергосбережения и экологические требования при эксплуатации печей, а также конструкции нагревательных печей прокатного производства.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПЕЧЕЙ

1.1. Классификация печей по принципу теплогенерации

Генерация теплоты в печи происходит путем превращения химической или электрической энергии в теплоту. В зависимости от источника тепловыделения печи делятся на топливные, автогенные и электрические.

Топливные печи. В топливных печах источником теплоты является химическая энергия твердого, жидкого или газообразного топлива. Теплота выделяется в результате сгорания топлива. Теплоносителями являются газообразные продукты сгорания топлива – дымовые газы.

Топливные металлургические печи подразделяются на два класса: **пламенные** и **слоевые**. Рабочее пространство пламенных печей в малой степени заполнено обрабатываемым материалом, который располагается на поду. Основной объем рабочего пространства заполнен пламенем и дымовыми газами, передающими теплоту материалу. Современные пламенные печи работают на газообразном или на жидком топливе - мазуте. Для сжигания газообразного топлива служат горелки, для сжигания мазута – форсунки. К классу пламенных печей относятся сталеплавильные (мартеновские) печи, печи для плавки медных концентратов на штейн, печи для рафинирования меди, разнообразные печи прокатного и кузнечно-прессового производства: нагревательные колодцы, методические, кольцевые, роликовые печи, печи с выкатным подом, вращающиеся трубчатые печи для обжига сыпучих материалов.

Известны три разновидности слоевых топливных печей: с плотным, "кипящим" и со взвешенным слоем обрабатываемого материала.

В вертикальных шахтных печах с плотным слоем шихты, в состав которой может входить и твердое кусковое топливо, расположена по всему объему печи и медленно опускается сверху вниз. Горячие газы – продукты горения топлива – движутся через слой между кусками шихты снизу вверх, т.е. в противотоке. Шахтные печи с плотным слоем шихты широко распространены в металлургии. К ним относятся доменные печи, вагранки, печи для производства извести путем обжига известняка, печи никелевых и свинцовых заводов.

В печах с "кипящим" слоем под действием движущихся снизу вверх газов размельченная шихта, в состав которой может входить и размельченное топливо, разуплотняется. Отдельные частицы шихты потоком газов поднимаются над слоем подобно кипящей жидкости. Иногда вместе с воздушным дутьем снизу в печь подают газообразное топливо. В цветной металлургии печи с «кипящим» слоем применяют для обжига сульфидных концентратов различных материалов, для сушки глинозема.

В печах со взвешенным слоем обрабатывают материалы, доведенные до пылевидного состояния. Каждая частица материала находится во взвешенном состоянии под действием потока газов, идущего снизу вверх, и движется вместе с потоком. Применяют в этих печах размолотое и газообразное топливо. Их используют в цветной металлургии для плавки сульфидов цветных металлов.

Автогенные печи. Источником теплоты в этих печах является тепловой эффект экзотермических реакций окисления и горения ряда элементов, содержащихся в обрабатываемых материалах. В черной металлургии примером автогенных печей являются кислородные, сталеплавильные конвертеры и двухванные сталеплавильные печи. В них при продувке жидкого чугуна кислородом происходит окисление углерода и ряда других элементов с выделением теплоты. Этот процесс не требует расхода топлива.

В цветной металлургии при производстве материалов из сульфидного сырья основным источником теплогенерации является процесс выгорания серы, содержащейся в сульфидах.

В мартеновской печи, наряду с выделением теплоты сгорания топлива, происходит тепловыделение от окисления углерода и других элементов, содержащихся в жидкой ванне. Такие печи занимают промежуточное положение между топливными и автогенными печами.

Электрические печи. По способу преобразования электрической энергии в теплоту можно выделить три класса печей, применяемых в металлургии: электродуговые, индукционные и печи сопротивления.

В дуговых печах используется принцип пропускания электрического тока через газовый промежуток между двумя электродами. Под действием электрического напряжения газ между электродами ионизируется и становится электропроводным. При этом в газовом промежутке возникает электрическая дуга, представляющая собой яркосветящуюся смесь электронов, положительных ионов, атомов и молекул. Дуга является зоной, в которой энергия электричества преобразуется в теплоту, при этом температура дуги составляет от 3000 до 20000 К.

В индукционных печах используется свойство переменного электрического тока создавать вокруг проводника переменное магнитное поле. Если поместить в такое поле нагреваемое тело, являющееся проводником, то в нем будут индуцироваться вихревые токи. Энергия вихревых токов преобразуется в теплоту, которая выделяется внутри нагреваемого тела.

Работа так называемых **печей сопротивления** основана на действии закона Джоуля-Ленца, согласно которому при протекании тока в проводнике выделяется теплота, пропорциональная его электрическому сопротивлению. В печах сопротивления можно использовать постоянный и переменный ток.

В металлургии электрические печи применяют для выплавки стали, производства ферросплавов, для нагрева металла перед обработкой давлением и при термической и термохимической обработке металлоизделий.

1.2. Классификация печей по технологическому назначению и по режиму работы

По технологическому назначению металлургические печи разделяют на плавильные и нагревательные.

Плавильные печи служат для получения и переплавки металлов.

В этих печах материалы, как правило, изменяют своё агрегатное состояние. Плавильные печи могут быть чугуноплавильными, сталеплавильными, медеплавильными и т.д.

Нагревательные печи служат для нагрева материалов без изменения их агрегатного состояния. Нагревательные печи применяют в металлургии для обжига огнеупорных изделий, известняка, магнезита, для сушки литейных форм, руды, песка, для придания металлу пластических свойств перед обработкой давлением, для термической обработки металла с целью изменения его структуры и механических свойств.

По режиму работы печи можно разделить на два класса: непрерывного и периодического (циклического) действия.

К печам непрерывного действия относятся рудовосстановительные дуговые печи, шахтные слоевые печи, печи "кипящего" и взвешенного слоя, туннельные печи для обжига огнеупорных изделий, трубчатые вращающиеся печи, такие печи прокатного производства, как методические печи с шагающими подом или балками, кольцевые и роликовые печи. В этих печах технологический процесс идет непрерывно, материалы, как правило, перемещаются от загрузочных устройств к устройствам для выпуска готовой продукции.

К печам периодического действия относятся сталеплавильные дуговые и мартеновские печи, конвертеры, нагревательные колодцы, садочные камерные печи с выкатным и с неподвижным подом, применяемые в кузнечно-прессовом производстве и в термических цехах и отделениях. Эти печи работают циклами. Цикл состоит из последовательных операций загрузки шихты или изделий, их тепловой обработки и затем выпуска или выгрузки готовой продукции.

Между циклами проводят подготовительные и текущие ремонтные работы, как, например, заправка подины мартеновской печи или нагревательного колодца, разогрев печи перед началом следующего рабочего цикла.

2. ТОПЛИВО И ЕГО СЖИГАНИЕ В ПЕЧАХ

Преобразование химической энергии топлива в теплоту происходит в процессе горения, который представляет собой цепную реакцию окисления горючих элементов топлива. Продукты горения топлива в печах должны быть газообразными и безвредными для человека и природы. До недавнего времени считалось, что этим требованиям удовлетворяют два химических элемента – углерод (С) и водород (Н), а также их химические соединения – углеводороды. К настоящему времени выяснилось, что безвредным топливом является только водород, в результате горения которого образуются пары воды. Продукт горения углерода CO_2 , десятилетиями накапливаясь в атмосфере, создает вокруг земли "парниковый эффект", изменяющий климатические условия, что может привести к экологической катастрофе. Мировое сообщество осознало эту опасность и с 90-х годов прошлого века принимает меры по сохранению объема использования углеродного топлива на существующем уровне.

2.1. Теплота сгорания

Это наиболее важная характеристика топлива.

Теплота сгорания показывает, какое количество теплоты выделяется при полном сгорании единицы топлива. Для твердого и жидкого топлива такой единицей служит 1 кг, для газообразного – 1 м^3 при нормальных условиях. Единица измерения теплоты сгорания – Дж/м^3 или кратные единицы кДж/кг , кДж/м^3 , МДж/кг , МДж/м^3 . Используют также внесистемную единицу ккал/кг и ккал/м^3 ($1 \text{ ккал} = 4,187 \text{ кДж}$).

Твердое и жидкое топливо содержит следующие элементы: углерод (С), водород (Н), кислород (О), азот (N), серу (S), а также золу (А) и влагу (W). Содержание каждого элемента измеряется в % массы. Различают органическую, горючую, сухую и рабочую (влажную) массу топлива. В табл. 1 представлен их элементарный состав и обозначение (индекс).

Газообразное топливо состоит из смеси газов, содержание которых измеряют в % объема. Различают составы сухого и влажного (рабочего) газа.

Таблица 1 – Элементарный состав твердого и жидкого топлива

| Индекс | С | Н | Н | О | С | А | W |
|--------|-------------------------|---|---|---|---|---|---|
| О | органическая масса | | | | | | |
| Г | горючая масса | | | | | | |
| С | сухая масса | | | | | | |
| Р | рабочая (влажная масса) | | | | | | |

Теплоту сгорания обычно относят к 1 м³ влажного (рабочего) газа и к 1 кг влажного (рабочего) твердого и жидкого топлива. Её обозначают Q^p . В зависимости от агрегатного состояния H₂O в продуктах горения теплота сгорания топлива может быть высшей Q^p_B или низшей Q^p_H . Если H₂O в продуктах горения находится в виде водяного пара, то теплота сгорания будет низшей, так как она не включает теплоту конденсации пара 2257 кДж/кг (539 ккал/кг). В высшую теплоту сгорания включают теплоту конденсации пара, образовавшегося при горении единицы топлива, и теплоту, выделяемую водой при охлаждении её от 100 °С до ~ 40 °С при атмосферном давлении. Поэтому разница между Q^p_B и Q^p_H составляет 2500 кДж на 1 кг H₂O.

Температура дымовых газов, уходящих из металлургических печей, превышает 100 °С, поэтому пар в них не конденсируется и в расчетах нужно пользоваться величиной Q^p_H .

Формулы для расчета Q^p_H имеют следующий вид:

1) для газообразного топлива

$$Q^p_H = 127,7 \cdot CO + 108 \cdot H_2 + 358 \cdot CH_4 + 590 \cdot C_2H_4 + 555 \cdot C_2H_2 + 636 \cdot C_2H_6 + 913 \cdot C_3H_8 + 1185 \cdot C_4H_{10} + 1465 \cdot C_5H_{12} + 234 \cdot H_2S \text{ кДж/м}^3, \quad (1)$$

где CO, H₂, CH₄ и т.д. – процентное содержание газов в 1 м³ влажного (рабочего) топлива;

2) для твердого и жидкого топлива (формула Д.И. Менделеева)

$$Q^p_H = 340 \cdot C^p + 1030 \cdot H^p - 109 (O^p - S^p) - 25 \cdot W^p \text{ кДж/кг}, \quad (2)$$

где C^p, H^p, O^p, S^p – процентное содержание элементов в 1 кг влажного (рабочего) топлива.

2.2. Основные виды топлива для металлургических печей.

Условное топливо

Кокс – твердое топливо для доменных печей - производится на коксохимических предприятиях путем термической обработки (коксования) каменного угля в коксовых печах (батареях). Каменный уголь нагревают до 800 °С без доступа воздуха, при этом из него выделяются смолы, газообразные вещества (летучие), и в печи остается кокс – твердый остаток в виде отдельных кусков. В органической массе кокса содержатся $C^o =$

$= 96,5-97,5\%$; $H^o = 0,5-0,8\%$; $O^o = 0,3-0,4\%$; в горючей массе есть сера $S^r = 0,5-1,5\%$. Теплота сгорания кокса зависит от количества золы и влаги. В среднем она равна 29,3 МДж/кг (7000 ккал/кг).

Газообразные вещества, выделившиеся при коксовании, также используются в качестве топлива, которое называют **коксовым газом**. Сухой, очищенный от серы и смол коксовый газ имеет следующий состав: $H_2^c = 46-61\%$; $CH_4^c = 21-30\%$; $C_mH_n^c = 1,5-3,0\%$; $CO^c = 4-8\%$; $N_2^c = 3,6-18\%$; $O_2^c = 0,3-1,7\%$. Теплота сгорания составляет в среднем 17 МДж/м³ (~ 4000 ккал/м³).

Природный газ поступает на предприятия с помощью компрессорных установок по газопроводам. Он содержит 92-98% метана (CH₄) и имеет высокую теплоту сгорания 33-38 МДж/м³, а в среднем его $Q_H^p = 35$ МДж/м³ (8300 ккал/м³).

Наиболее бедным газообразным топливом является **доменный газ**, который получают при выплавке чугуна. В его составе только третья часть объема содержит горючие вещества, в основном CO. Состав сухого доменного газа следующий: $CO^c = 28,5-29,5\%$; $CH_4^c = 0,1-0,4\%$; $H_2 = 1,3-2,5\%$; $CO_2^c = 10-11\%$; $N_2^c = 58-59\%$. Он имеет низкую теплоту сгорания 3,5-4,0 МДж/м³ (850-950 ккал/м³). Основным видом жидкого металлургического топлива – **мазут**. Это продукт перегонки нефти. Его привозят на металлургические предприятия с нефтеперегонных заводов в железнодорожных цистернах, из которых сливают в цеховые мазутохранилища. По содержанию горючих веществ мазут относится к богатым видам топлива. Теплота сго-

рания мазута составляет 40-42 МДж/кг (9500-10000 ккал/кг). В его составе: $C^r = 85-87\%$; $H^r = 10-12,5\%$; $N^r = 0,5-1,0\%$; $S^r = 0,4-3,0\%$. Разные марки мазута различают по вязкости (жидкоподвижности). Так, при подогреве до 50 °С мазут марки 100 вытекает из мерного сосуда с калиброванным отверстием в 100 раз дольше, чем вода, а мазут марки 40 – в сорок раз дольше.

Условное топливо. На металлургических предприятиях для отопления печей используют разные виды топлива. Для эквивалентного учета и сопоставления расходов топлива с различной теплотой сгорания было предложено вести учет расхода топлива не в м³ газа или в кг мазута, кокса, а в кг **условного топлива** (усл.т), теплота сгорания которого равна $Q_{\text{усл.т}} = 7000$ ккал/кг (29,3 МДж/кг). Это равносильно тому, что учет будут вести по количеству теплоты топлива Q в МДж, израсходованной на производство продукции, но в более осязаемой форме – в килограммах или тоннах условного топлива. Чтобы найти расход условного топлива, нужно перевести МДж в кг.усл.т, а именно

$$\left[\frac{Q}{Q_{\text{усл.т}}} \right] = \frac{\text{МДж} \cdot \text{кг.усл.т}}{\text{МДж}} = \text{кг.усл.т}.$$

2.3. Полное и неполное горение топлива.

Коэффициент расхода воздуха

Для горения топлива необходим кислород, который содержится в воздухе. Топливо и воздух называют компонентами горения.

Объем воздуха, необходимый для полного сгорания единицы топлива (1 кг или 1 м³), называют теоретическим объемом воздуха и обозначают L_0 . Его вычисляют по химическим реакциям окисления составляющих топлива, приведенным в таблице 2. Сначала определяют необходимый объем кислорода V_{O_2} , а затем воздуха

$$L_0 = \frac{V_{O_2}}{K_{O_2}},$$

где K_{O_2} - содержание кислорода в воздухе в частях объема.

Таблица 2 – Реакции горения компонентов топлива и теоретический расход кислорода на их сжигание

| № пп | Горючие вещества | Реакции горения | Расход кислорода | |
|------|-----------------------|---|-----------------------|-------------------|
| | | | Единица измерения | V_{O_2} |
| 1 | Углерод С | $C+O_2 = CO_2$ | $м^3/кг$ | 1,867 |
| 2 | Водород H_2 | $H_2+0,5O_2 = H_2O$ | $м^3/кг$ $м^3/м^3$ | 5,6 0,5 |
| 3 | Сера S | $S+O_2 = SO_2$ | $м^3/кг$ | 0,7 |
| 4 | Оксид углерода | $CO+0,5O_2 = CO_2$ | $м^3/м^3$ | 0,5 |
| 5 | Сероводород H_2S | $H_2S+1,5O_2 = H_2O+SO_2$ | $м^3/м^3$ | 1,5 |
| 6 | Метан CH_4 | $CH_4+2O_2 = CO_2+2H_2O$ | $м^3/м^3$ | 2,0 |
| 7 | Углеводороды C_mH_n | $C_mH_n + \left(m + \frac{n}{4}\right)O_2 =$ $= m \cdot CO_2 + \frac{n}{2} \cdot H_2O$ | $м^3/м^3$ | $m + \frac{n}{4}$ |

В обычном воздухе $K_{O_2} = 0,21$ или 21% и 79% N_2 . При обогащении воздуха кислородом $K_{O_2} > 0,21$. На практике для обеспечения полного сгорания топлива нужен некоторый избыток воздуха в количестве 5-25% от теоретически необходимого в зависимости от типа сожигательных устройств.

Отношение фактического объема воздуха L_n к теоретически необходимому L_0 называют коэффициентом расхода воздуха $n = L_n/L_0$. При достаточном избытке воздуха ($n > 1$) происходит полное сгорание топлива. В продуктах полного горения содержатся CO_2 , H_2O , N_2 (из топлива и воздуха) и свободный кислород O_2 . Фактический объем продуктов горения – дымовых газов – V_d больше, чем теоретический при $n = 1$, на величину объема избыточного воздуха.

При недостатке воздуха, т.е. при $n < 1$, сгорание топлива становится неполным. В продуктах неполного горения появляются оксид углерода CO , водород H_2 . Несгоревший метан CH_4 и тяжелые углеводороды C_mH_n .

входящие в состав топлива, разлагаются на водород и сажистый углерод. Сажа в виде копоти сопутствует горению с недостатком воздуха. При большом недостатке воздуха в продуктах горения появляется неразложившийся метан и другие углеводороды.

Химический недожог топлива при $n < 1$ обычно является вредным явлением, поскольку приводит к перерасходу топлива. В ряде случаев недожог необходим для создания восстановительной газовой среды, например, в доменных печах, в нагревательных печах безокислительного нагрева металла.

Состав сухих продуктов горения, т.е. без учета содержания H_2O , определяют с помощью газоанализатора. Величина химического недожога определяется по формуле

$$Q_{\text{хн}} = (127,7 \cdot CO_{\text{д}}^{\text{с}} + 108 \cdot H_{2\text{д}}^{\text{с}} + 358 \cdot CH_{4\text{д}}^{\text{с}}) \cdot V_{\text{д}}^{\text{с}}, \text{ кДж/м}^3,$$

где $CO_{\text{д}}^{\text{с}}$, $H_{2\text{д}}^{\text{с}}$, $CH_{4\text{д}}^{\text{с}}$ - объемное процентное содержание горючих компонентов в сухих дымовых газах; $V_{\text{д}}^{\text{с}}$ - объем сухих дымовых газов при сжигании единицы топлива с учетом химического недожога, $\text{м}^3/\text{ед.топлива}$.

2.4. Температура горения топлива

Если бы вся теплота, которая выделяется при полном сгорании топлива, шла только на нагрев образующихся продуктов сгорания, то они могли бы нагреться до максимальной для данного топлива температуры, которую называют **калориметрической**. По этой условной температуре, которую определяют расчетным путем, судят, пригодно ли данное топливо для применения в данной печи. При этом учитывают, что **действительная температура продуктов** сгорания может достигнуть не более 65-75% калориметрической, так как часть теплоты сразу же при горении топлива отдается в печи продуктами сгорания нагреваемым материалам и огнеупорному ограждению (футеровке).

Величину калориметрической температуры ($t_{\text{кал}}$) находят из теплового баланса горения единицы топлива

$$Q_{\text{н}}^{\text{р}} + Q_{\text{ф.в}} + Q_{\text{ф.т}} - Q_{\text{хн}} = V_{\text{д}} \cdot \bar{c}_{\text{д}} \cdot t_{\text{кал}},$$

откуда

$$t_{\text{кал}} = \frac{Q_{\text{H}}^{\text{p}} + Q_{\text{ф.в}} + Q_{\text{ф.т}} - Q_{\text{ХН}}}{V_{\text{д}} \cdot \bar{c}_{\text{д}}}, \quad (3)$$

где $Q_{\text{ф.в}} = L_{\text{n}} \cdot \bar{c}_{\text{в}} \cdot t_{\text{в}}$ - физическая теплота воздуха, предварительно нагретого до температуры $t_{\text{в}}$ перед подачей в печь, кДж/ед.топлива; здесь $\bar{c}_{\text{в}}$ - средняя удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, в интервале температур от 0 °С до $t_{\text{в}}$ °С, кДж/(м³·К); $Q_{\text{ф.т}} = \bar{c}_{\text{т}} \cdot t_{\text{т}}$ - физическая теплота топлива, предварительно нагретого до температуры $t_{\text{т}}$ перед подачей в печь, кДж/ед.топлива; здесь $\bar{c}_{\text{т}}$ - средняя удельная теплоемкость топлива при постоянном давлении, в интервале температур от 0 °С до $t_{\text{т}}$ °С, в кДж/м³ топлива – для газообразного топлива или в кДж/кг топлива – для жидкого и твердого топлива; $V_{\text{д}}$ – действительный (фактический) объем дымовых газов при сгорании единицы топлива, м³/ед.топлива; $\bar{c}_{\text{д}}$ - средняя удельная теплоемкость дымовых газов при постоянном давлении в интервале температур от 0 °С до $t_{\text{кал}}$ °С, определяемая по расчетному составу продуктов сгорания, кДж/(м³·К).

Из формулы (3) следует, что величина $t_{\text{кал}}$ определяется не только качеством топлива, т.е. теплотой его сгорания Q_{H}^{p} , но и условиями сжигания.

Обратим внимание на величины $Q_{\text{ф.в}}$ и $Q_{\text{ф.т}}$. Предварительный подогрев компонентов горения повышает $t_{\text{кал}}$. Для природного и коксового газа, а также для мазута подогрев воздуха на каждые 100 °С увеличивает $t_{\text{кал}}$ на $65-70$ °С. При сжигании доменного газа одновременный подогрев воздуха и газа на 100 °С увеличивают $t_{\text{кал}}$ примерно на 80 °С.

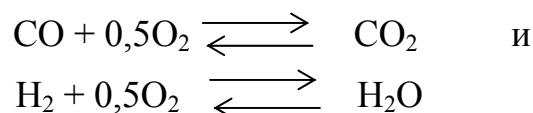
Для повышения температуры горения кокса в фурменной зоне доменной печи воздух предварительно подогревают до $1100-1350$ °С. При отоплении мартеновской печи природным газом воздух подогревают до $900-1000$ °С. Нагревательные высокотемпературные печи прокатного производства, можно отапливать бедным доменным газом, если подогреть воздух и газ до $800-900$ °С.

Наибольшее значение $t_{\text{кал}}$ соответствует полному сгоранию с теоретическим объемом воздуха, т.е. при $n = 1$. При избытке воздуха из-за увеличения объема дымовых газов $V_{\text{д}}$, а при недостатке воздуха из-за химиче-

ского недожога $Q_{\text{хн}}$ калориметрическая и действительная температура горения снижается.

Калориметрическую температуру горения рассчитывают, полагая, что реакции окисления горючих элементов топлива являются необратимыми и идут лишь в одну сторону до образования конечных продуктов окисления – CO_2 и H_2O .

В действительности реакции



являются обратимыми и при температурах > 1700 °С, которые достигаются в плавильных печах, обратные реакции диссоциации CO_2 и H_2O , идущие с поглощением теплоты, понижают температуру горения.

Температура дымовых газов, рассчитанная с учетом диссоциации CO_2 и H_2O , получила название **теоретической $t_{\text{теор}}$** . Она всегда меньше $t_{\text{кал}}$ и её рассчитывают по формуле, аналогичной (3)

$$t_{\text{теор}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}} + Q_{\text{ф.в}} + Q_{\text{ф.т}} - Q_{\text{хн}} - Q_{\text{дис}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}. \quad (4)$$

Теплоту диссоциации $Q_{\text{дис}}$ рассчитывают с помощью графика (рис.1), по которому находят степень диссоциации, т.е. долю диссоциированных газов CO_2 и H_2O от объемов этих газов в продуктах горения единицы топлива. Обозначив степень диссоциации ζ_{CO_2} и $\zeta_{\text{H}_2\text{O}}$, получим, что

$$Q_{\text{дис}} = \zeta_{\text{CO}_2} \cdot 127,7 \cdot \text{CO}_2 + \zeta_{\text{H}_2\text{O}} \cdot 108 \cdot \text{H}_2\text{O},$$

где CO_2 и H_2O – расчетное содержание этих компонентов в составе продуктов полного горения топлива (% объема).

Чтобы сравнить уровень температуры горения разных видов топлива в одинаковых стандартных условиях, ввели понятие **"нормальная калориметрическая температура горения"** - $t_{\text{кал}}^{\text{н}}$. Её рассчитывают при **следующих условиях:**

- а) $t_{\text{в}} = t_{\text{т}} = 0$ °С, т.е. $Q_{\text{ф.в}} = Q_{\text{ф.т}} = 0$;
- б) топливо сгорает полностью с теоретическим расходом сухого воздуха, т.е. $n = 1$; $\text{O}_2 = 21\%$; $\text{N}_2 = 79\%$; $Q_{\text{хн}} = 0$;
- в) $Q_{\text{дис}} = 0$;

г) горение происходит при атмосферном давлении $P_{\text{атм}} = 101,3$ кПа.

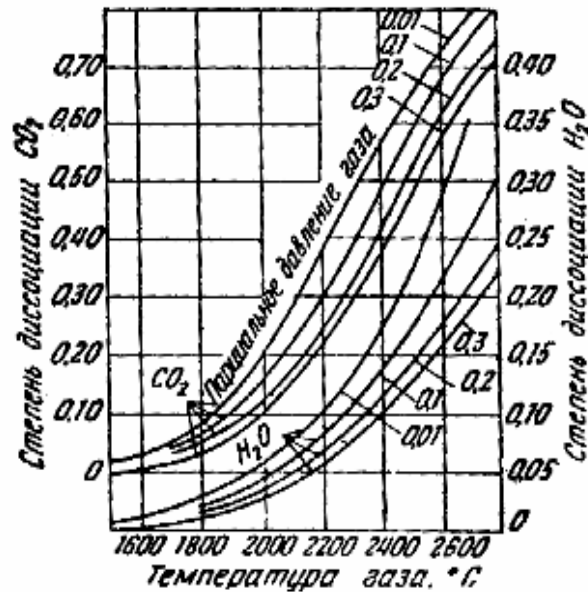


Рис. 1. Степень диссоциации CO_2 и H_2O

Тогда

$$t_{\text{кал}}^{\text{H}} = \frac{Q_{\text{H}}^{\text{p}}}{V_{\text{д}}^{\text{теор}} \cdot c_{\text{д}}} \quad (5)$$

Величина $t_{\text{кал}}^{\text{H}}$ примерно равна: для доменного газа 1400 °С, для коксового газа 2030 °С, для природного газа 1990 °С, для малосернистого мазута марки 100 2140 °С.

2.5. Расчеты горения топлива

Расчет полного горения топлива состоит из следующих вычислительных операций.

2.5.1. Пересчет заданного состава топлива на рабочее топливо, характеризующее его состав в производственных условиях

Если задан состав сухого газообразного топлива и содержание влаги в 1 м^3 сухого газа f_{r} (г/м³ сух. г.), то коэффициент пересчета на влажный газ будет вычислен из выражения,

$$K = \frac{100 - \text{H}_2\text{O}}{100} \quad \text{где} \quad \text{H}_2\text{O} = \frac{100 \cdot f_{\text{r}}}{803,6 + f_{\text{r}}}$$

Состав влажного (рабочего) газа находят умножением концентрации компонентов сухого газа на коэффициент пересчета, например:

$$CO^p = CO^c \cdot K$$

$$H_2^p = H_2^c \cdot K \quad \text{и т.д.}$$

Пересчет состава твердого и жидкого топлива выполняют с помощью коэффициентов пересчета, формулы которых представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Коэффициенты пересчета заданного состава твердого и жидкого топлива на рабочий состав топлива

| Заданный состав топлива | Рабочий состав топлива |
|-------------------------|---|
| Органическая масса | $K = \frac{100 - (S^p + A^p + W^p)}{100}$ |
| Горючая масса | $K = \frac{100 - (A^p + W^p)}{100}$ |
| Сухая масса | $K = \frac{100 - W^p}{100}$ |
| Рабочая масса | $K = 1$ |

2.5.2. Определение теплоты сгорания

Низшую теплоту сгорания вычисляют по формуле (1) для газообразного топлива или по формуле (2) для твердого и жидкого топлива.

Для смеси двух газов теплота сгорания может быть задана. В этом случае необходимо найти долю каждого газа в смеси и состав смеси.

Если обозначить теплоту сгорания смеси $Q_{Hсм}^p$, первого газа Q_{H1}^p , второго газа Q_{H2}^p , то доля первого газа в смеси

$$x = \frac{Q_{H2}^p - Q_{Hсм}^p}{Q_{H2}^p - Q_{H1}^p}.$$

Доля второго газа будет равна $1 - x$.

Теплота сгорания каждого газа вычисляется по формуле (1) в соответствии с его заданным составом.

Состав смеси находим по содержанию компонентов в первом и вто-

ром газах, например:

$$\text{CO}_{\text{см}}^{\text{P}} = \text{CO}_1^{\text{P}} \cdot x + \text{CO}_2^{\text{P}}(1 - x) \quad \text{и т.д.}$$

2.5.3. *Определение количества воздуха, необходимого для сжигания единицы топлива, и количества продуктов полного горения*

Будем считать, что содержание кислорода в сухом воздухе $K_{\text{O}_2} = 0,21$. Исходя из стехиометрических соотношений реакций горения, приведенных в табл. 2, при заданном коэффициенте расхода воздуха n , найдем L_0 , L_n и V_d по следующим формулам.

Для твердого и жидкого топлива.

Теоретически необходимое количество воздуха будет зависеть от влагосодержания воздуха.

Теоретическое количество сухого воздуха

$$L_0^c = [0,0889 \cdot C^{\text{P}} + 0,2667 \cdot H^{\text{P}} + 0,0333(S^{\text{P}} - O^{\text{P}})] \text{ м}^3/\text{кг топлива.}$$

Теоретическое количество влажного воздуха

$$L_0 = L_0^c(1 + 0,00124 \cdot f_{\text{в}}), \text{ м}^3/\text{кг топлива,}$$

где $f_{\text{в}}$ – влагосодержание воздуха в г/м³ сухого воздуха.

Действительное количество воздуха

$$L_n^c = n \cdot L_0^c; \quad L_n = n \cdot L_0 \text{ м}^3/\text{кг топлива.}$$

Количество продуктов горения в м³/кг топлива

$$V_{\text{CO}_2} = 0,0187 \cdot C^{\text{P}};$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,112 \cdot H^{\text{P}} + 0,0124 \cdot W^{\text{P}} + 0,00124 \cdot f_{\text{в}} \cdot L_n^c;$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,007 \cdot S^{\text{P}};$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21(n - 1) \cdot L_0^c;$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,008 \cdot N^{\text{P}} + 0,79 \cdot L_n^c.$$

Суммарное количество продуктов горения

$$V_d = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2}.$$

Процентный состав продуктов горения

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

Для газообразного топлива.

Теоретически необходимое количество сухого воздуха

$$L_o^c = \frac{0,5 \cdot \text{H}_2^{\text{P}} + 0,5 \cdot \text{CO}^{\text{P}} + 1,5 \cdot \text{H}_2\text{S}^{\text{P}} + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) \cdot \text{C}_m\text{H}_n^{\text{P}} - \text{O}_2^{\text{P}}}{0,21}, \quad \text{м}^3/\text{м}^3 \text{ топлива.}$$

лива.

То же для влажного воздуха

$$L_o = L_o^c \cdot (1 + 0,00124 \cdot f_{\text{в}}) \quad \text{м}^3/\text{м}^3 \text{ топлива.}$$

Действительное количество сухого и влажного воздуха

$$L_n^c = n \cdot L_o^c; \quad L_n = n \cdot L_o \quad \text{м}^3/\text{м}^3 \text{ топлива.}$$

Количество продуктов горения в $\text{м}^3/\text{м}^3$ топлива

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01 \left(\text{CO}_2^{\text{P}} + \text{CO}^{\text{P}} + \sum m \cdot \text{C}_m\text{H}_n^{\text{P}} \right);$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01 \left(\text{H}_2^{\text{P}} + \sum \frac{n}{2} \cdot \text{C}_m\text{H}_n^{\text{P}} \right) + f_{\text{r}} \cdot 0,00124 + f_{\text{в}} \cdot 0,00124 \cdot L_n^c;$$

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01 \cdot \text{H}_2\text{S}^{\text{P}};$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,01 \cdot \text{N}_2^{\text{P}} + 0,79 \cdot L_n^c;$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21(n - 1) \cdot L_o^c.$$

Суммарное количество продуктов горения

$$V_{\text{д}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} \quad \text{м}^3/\text{м}^3 \text{ топлива.}$$

Процентный состав продуктов горения

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

2.5.4. Определение температуры горения топлива

Калориметрическую температуру горения вычисляют из формулы (3), теоретическую (с учетом диссоциации CO_2 и H_2O) – из формулы (4), нормальную калориметрическую – из формулы (5). Действительная температура продуктов горения в печи примерно равна

$$t_{\text{дейст}} = (0,65 - 0,75) \cdot t_{\text{кал}}$$

2.6. Условия воспламенения и взрываемости газообразного топлива

Для того, чтобы холодная смесь топлива с воздухом воспламенилась, нужен местный нагрев смеси до температуры воспламенения. **Температура воспламенения** – это минимальная температура смеси, при которой развивается цепная реакция горения. Температура воспламенения различных видов печного газообразного топлива в воздухе, при атмосферном давлении, составляет примерно 650-750 °С. При зажигании топливо и воздух подают на запальники, которыми могут быть раскаленная футеровка, горящий факел, электрическая искра.

Газовоздушная смесь может воспламеняться, когда доля топлива в объеме смеси находится в определенных пределах. Дело в том, что в определенном интервале соотношений объема топлива и воздуха, а именно между нижним и верхним пределами воспламенения, возникают условия для протекания цепной реакции горения.

Наименьшее содержание горючего газа в смеси с воздухом, при котором смесь при начальной температуре 20 °С, загорается от источника огня называется **нижним пределом воспламенения**, наибольшее содержание горючего газа, при котором смесь загорается, - **верхним пределом**.

Для доменного газа нижний предел воспламенения составляет 40%, верхний – 70%, для коксового газа – соответственно 6% и 30%, для природного газа – 5% и 15%.

Содержание горючего газа в смеси с воздухом при полном сжигании топлива в печах и контролируемом избытке воздуха всегда находится в интервале между нижним и верхним пределами.

При обычном горении смесь горючего газа и воздуха не заполняет весь объем печи. Горение происходит в месте встречи потоков газа и воздуха на выходе из горелки. Вследствие разогрева дымовых газов до температуры горения их объем увеличивается по сравнению с объемом газовоздушной смеси. Дым заполняет объем печной камеры, но при непрерывном удалении его из печи через дымоходы давление дымовых газов на ограждение печи незначительно отличается от атмосферного.

Если же замкнутый объем пространства, например, холодная печь или газопровод будут заполняться горючим газом, содержание которого в смеси с находившимся в печи или в газопроводе воздухом достигает предела воспламенения, может произойти взрыв. Достаточно источника местного загорания смеси как вследствие детонации в доли секунды готовая для горения смесь воспламенится во всем объеме загазованного помещения. Дымовые газы мгновенно разогреваются до температуры, близкой к теоретической. Они стремятся увеличиться в объеме, чему препятствует ограждение печи или стенки газопровода. Давление дымовых газов сразу же возрастает пропорционально росту их температуры, что и может вызвать разрушение печного ограждения или оболочки газопровода и привести к человеческим жертвам.

Особенно велика опасность взрыва при разогреве холодной печи после ремонта, пока температура её футеровки ниже температуры воспламенения, и горение газа вследствие этого неустойчиво. При затухании факела печь может заполниться взрывоопасной смесью.

Аналогичная аварийная ситуация может возникнуть при заполнении газом газопровода после окончания ремонта. Взрывоопасная смесь образуется вследствие перемешивания газа с воздухом, заполнившим газопровод во время проведения ремонтных работ. По правилам безопасности в газовом хозяйстве металлургических предприятий, газопровод следует продуть паром или газом на свечу, прежде чем пустить газ в печь.

2.7. Горелки для сжигания газа

Важнейшим элементом топливной печи являются устройства для сжигания газа или мазута. Устройства для сжигания газа называют горелками, для распыливания и сжигания мазута – форсунками. И те и другие состоят из собственно горелки (форсунки) и огнеупорного горелочного туннеля, через который смесь воздуха и топлива поступает в печь.

Процесс сжигания топлива состоит из трех операций: смешивание топлива с воздухом, подогрев компонентов горения до температуры воспламенения и собственно химическая реакция горения. Самая медленная операция – смешивание компонентов горения. В зависимости от её организации различают конструкции газовых горелок с предварительным смешиванием

ванием газа с воздухом внутри корпуса горелки и без предварительного смешивания.

К горелкам с предварительным смешиванием относятся инжекционные (рис. 2,а). В таких горелках воздух засасывается (инжектируется) в корпус под воздействием струи газа, выходящей с большой скоростью из газового сопла. Эти горелки не нуждаются в вентиляторах, а при работе на холодном воздухе и в воздухопроводах. К таким горелкам подводят только газ, их называют однопроводными в отличие от двухпроводных (или дутьевых) горелок, к которым подводят не только газ, но и воздушное дутьё по воздухопроводам. В корпусе-смесителе горелки происходит предварительное смешивание газа с воздухом. Газовоздушная смесь нагревается и сгорает в пределах длины горелочного туннеля. В печи нет видимого пламени. Поэтому инжекционные горелки называют **беспламенными**.

Скорость выхода смеси из носика горелки в туннель должна быть больше скорости распространения пламени в готовой для горения смеси во избежание обратного «проскока» пламени в корпус горелки, что может привести к его прогару, если горелку своевременно не отключить. «Проскоки» пламени при малых расходах газа делают узким диапазон регулирования расходов газа в этих горелках.

Подачу газа в горелку по сравнению с максимальной расчетной уменьшают не более, чем в 2-3 раза. Во избежание «проскоков» нельзя подогреть воздуха и газ до высокой температуры, близкой к температуре воспламенения.

Преимуществом инжекционных горелок является полное сжигание газа с небольшим коэффициентом расхода воздуха, близким к единице, вследствие хороших условий смешивания компонентов горения.

На рис. 2, б, в, г представлены конструкции двухпроводных горелок без предварительного перемешивания. Смесь газа с воздухом образуется вне корпуса горелки, в туннеле и в рабочем пространстве печи. По мере смешивания происходит горение в видимом факеле. Поэтому такие горелки называют **факельными**.

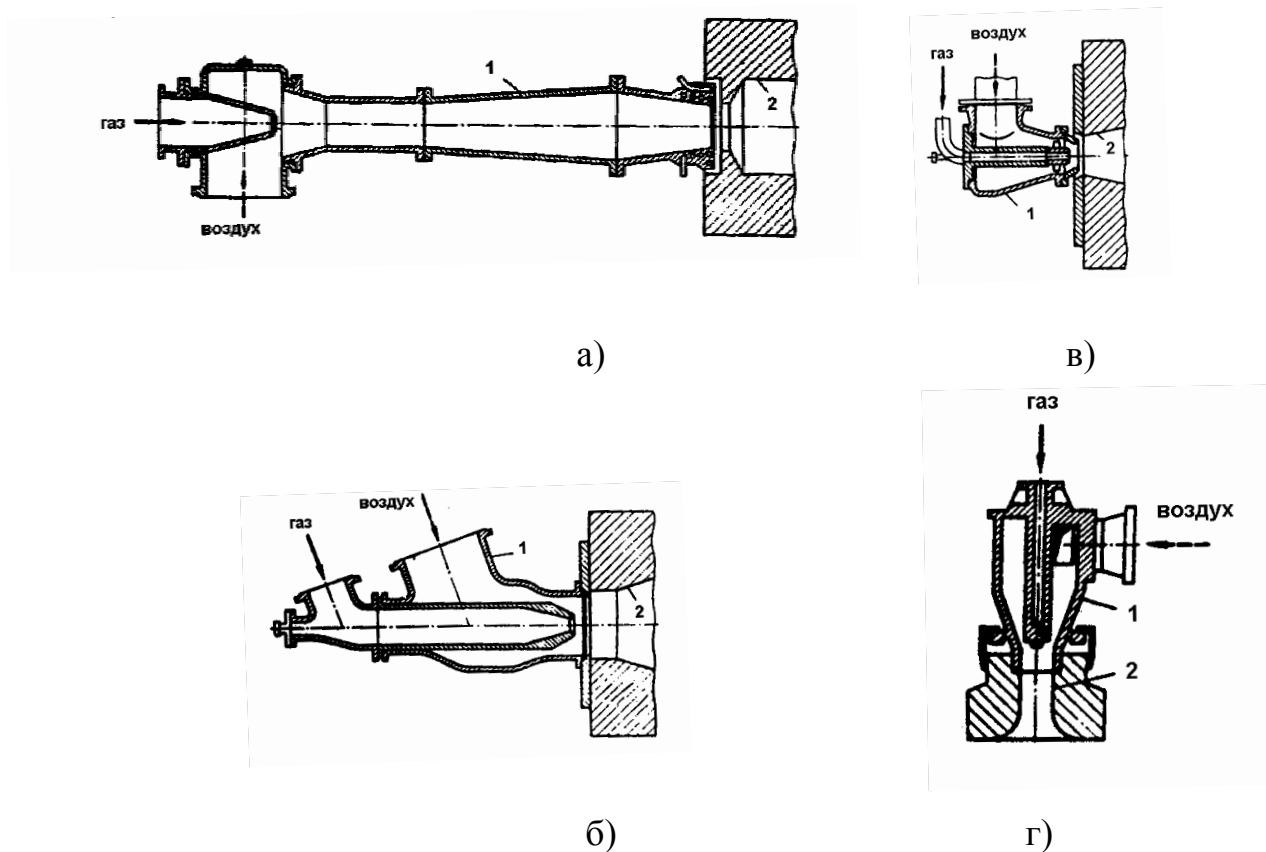


Рис. 2. Виды газовых горелок: а - инжекционная горелка с предварительным смешиванием газа с воздухом; б – дутьевая типа «труба в трубе» без предварительного смешивания; в – дутьевая для природного газа с закруткой воздуха; г – дутьевая сводовая плоскопламенная с закруткой воздуха и газа; 1 – собственно горелка; 2 – огнеупорный туннель

Горелки типа "труба в трубе" с почти параллельными потоками газа и воздуха (см. рис. 2,б) отличаются длинным пламенем ввиду медленного перемешивания параллельных потоков. Газовая труба расположена по оси горелки, воздух проходит по кольцевому зазору между наружной и внутренней трубами. Эти горелки применяются для сжигания газов с низкой и с высокой теплотой сгорания.

Дутьевые горелки для сжигания природного газа низкого давления типа ГНП (см. рис. 2,в) имеют улучшенное смешивание по сравнению с горелками "труба в трубе" и более короткий видимый факел. С этой целью перед выходным отверстием для воздуха установлены лопатки для закручивания воздушного потока, а наконечник для выхода газа делают смен-

ным: с одним центральным выходным отверстием или с несколькими расположенными под углом к потоку воздуха.

Все перечисленные дутьевые и инжекционные горелки устанавливают, как правило, в стенах печей. В своде печи устанавливают плоскопламенные горелки (см. рис. 2,г). Газ подают по трубе, расположенной вертикально по оси горелки. Поток воздуха закручивают направляющим винтом или благодаря смещенному от оси (тангенциальному) его подводу. Газ закручивают, применяя косые прорезы в наконечнике газовой трубы. Выходя из горелки, закрученная газоздушная смесь прижимается к стенкам огнеупорного туннеля, имеющего форму граммофонной трубы. Пламя замыкается и направляется вдоль свода печи под прямым углом к оси горелки, приобретая форму плоского диска. Достоинство плоскопламенных горелок заключается в том, что горение происходит на поверхности огнеупорной футеровки свода. Раскаленный свод, имеющий большую излучательную способность, чем дымовые газы, передает металлу, нагреваемому в печи, большой лучистый тепловой поток. Плоскопламенные горелки рассчитывают на работу с природным, коксовым и с различными смесями газов.

Для большинства дутьевых горелок расход газа без ухудшения работы горелки можно изменять в 3-4 раза. Все конструкции газовых горелок перед применением в печах проходят государственные испытания и получают сертификат с указанием допустимого режима эксплуатации: диапазона расходов газа, давления газа и воздуха, коэффициента расхода воздуха.

Метод выбора и расчета горелок изложен в специальной литературе [3].

2.8. Форсунки для сжигания мазута

В качестве жидкого топлива для отопления печей в металлургии используют, как правило, высоковязкие топочные мазуты. Мазуты характеризуются вязкостью, температурой вспышки и воспламенения, температурой застывания. Температурой вспышки называют температуру, при которой пары мазута в смеси с воздухом загораются при поднесении огня. Она находится в пределах 70-150 °С в зависимости от состава мазута. Темпера-

тура вспышки значительно ниже температуры воспламенения, при которой жидкий мазут воспламеняется произвольно, без воздействия огня. Температура воспламенения мазутов в среднем равна 500-600 °С. Температура застывания равна 5-25 °С.

Для удобства транспортирования и распыливания в форсунках вязкость мазута снижают путем подогрева до температуры на 15-20 °С ниже температуры вспышки. Мазут перед сжиганием подвергают распыливанию, чтобы увеличить площадь контакта капель с кислородом воздуха. В металлургии для сжигания мазута применяют форсунки высокого и низкого давления с паровым и воздушным распыливанием. Распыливание происходит в результате взаимодействия струй мазута и распылителя, движущихся с разными скоростями. В форсунках низкого давления распылителем является идущий на горение вентиляторный воздух с давлением 5-20 кПа, при котором обеспечивается скорость его истечения 80-100 м/с. Мазут обычно истекает со скоростью ~ 10 м/с. Достоинство форсунок низкого давления в том, что они не нуждаются в подводе распылителя высокого давления. Их применяют на небольших металлургических печах. Качество распыливания и сжигания лучше, а пределы регулирования расхода мазута выше в форсунках высокого давления. В них распылитель – компрессорный воздух или водяной пар – подают в небольших количествах, но с большой скоростью. Необходимое давление воздуха 400-600 кПа, удельный расход 1,0-1,5 кг/кг мазута, пар может быть сухой насыщенный или перегретый с температурой 200-300 °С под давлением 700-900 кПа, удельный расход пара 0,8-1,0 кг/кг мазута. Скорость истечения распылителя составляет сотни метров в секунду.

Форсунки высокого давления могут иметь большую пропускную способность. Их применяют на крупных металлургических печах. На рис. 3,б показана установка на печи форсунки высокого давления в форсуночной коробке, через которую подают вентиляторный воздух, необходимый для сжигания мазута. На рис. 3,а представлена форсунка низкого давления.

Методика выбора и расчета форсунок, а также детальное описание их конструкции приводятся в специальной литературе [3].

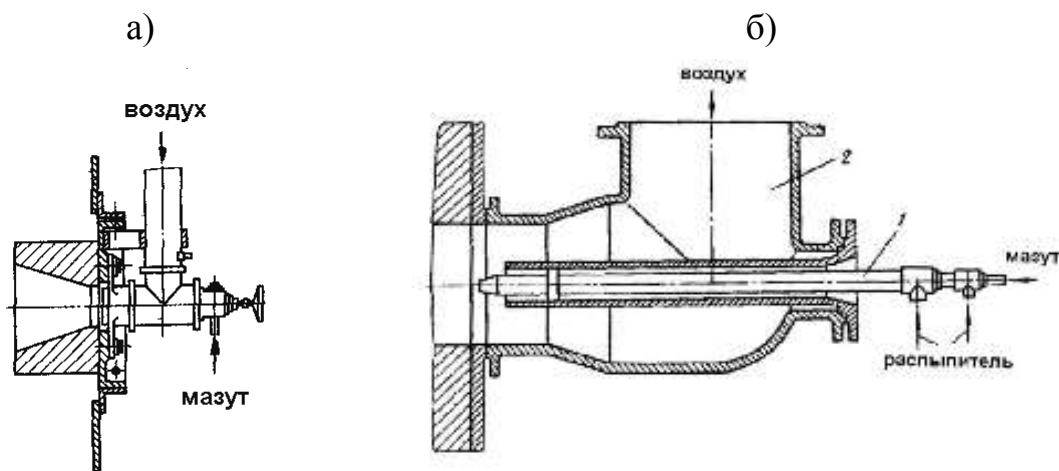


Рис. 3. Виды мазутных форсунок: а - форсунка низкого давления; б – форсунка высокого давления; 1- собственно форсунка; 2 – форсуночная коробка

3. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕЧЕЙ

3.1. Схема тепловой работы печей

Любая печь, как энергетический агрегат, может быть представлена общей схемой: "источник энергии" → "теплота" → "объект тепловой обработки (материалы)". В этой общей схеме должны быть звенья, соединяющие источник энергии с объектом её приложения.

В топливной печи эти звенья представлены наиболее полно. Можно выделить следующие четыре звена тепловой работы топливной печи:

1) **сжигание топлива**, т.е. превращение химической энергии топлива в теплоту, носителями которой являются продукты горения – дымовые или печные газы;

2) **движение печных газов**, с помощью которого теплота переносится во все зоны рабочего пространства, а отработанные газы уходят из печи;

3) **внешняя теплопередача**, т.е. передача теплоты от печных газов излучением и конвекцией на поверхность нагреваемых материалов;

4) **внутренняя теплопередача** от поверхности материалов (кусков, массивных изделий) к их середине теплопроводностью.

В электрических печах некоторые звенья схемы будут отсутствовать: в них нет горения топлива и движения газов.

В дуговых печах есть следующие звенья: тепловыделение в дуге, передача излучением от электрической дуги к поверхности материалов и внутренняя теплопередача в материалах. Подобным образом работают печи сопротивления косвенного действия, в которых электрический ток проходит не через нагреваемое тело, а через нагреватели, расположенные на внутренней поверхности ограждения печи. Выделившаяся в них теплота передается с помощью внешней теплопередачи излучением на поверхность нагреваемых тел.

В индукционных печах и печах сопротивления прямого действия теплота выделяется внутри нагреваемых тел, т.е. отсутствует внешняя теплопередача, а внутренняя имеет место: с помощью теплопроводности теплота равномерно распределяется по объему тел, если мощность внутренних источников энергии была неравномерно распределена.

В автогенных печах, как, например, в конвертере, при продувке жидкого чугуна кислородом, источник энергии (окисление элементов), также является внутренним. Внешняя теплопередача отсутствует, однако движение газов играет определенную роль. Кислородные струи и движение в жидкой ванне газообразного продукта окисления углерода CO перемешивают ванну и способствуют её равномерному прогреву.

3.2. Тепловая мощность печи

Как всякая энергетическая установка печь характеризуется мощностью.

Тепловой мощностью печи называют количество теплоты, которое выделяется в печи в единицу времени при полном сгорании топлива или за счет расхода электрической энергии.

Единицей измерения мощности является $Вт = Дж/с$. Часть мощности, потребляемой печью, расходуется на совершение полезной работы – нагрев материалов. Она поглощается материалами и поэтому называется **усвоенной мощностью** $M_{усв}$, другая часть вынужденно теряется в окружающую среду – $M_{пот}$. Поэтому принято называть тепловую мощность печи **общей мощностью**

$$M_{\text{общ}} = M_{\text{усв}} + M_{\text{пот}}. \quad (6)$$

Общая мощность топливной печи выражается через расход топлива, измеряемый расходомером в м³/ч (м³/с) - для газообразного топлива или в кг/ч (кг/с) – для жидкого топлива. Расход твердого топлива определяют путем взвешивания.

Если обозначить расход топлива V , то

$$M_{\text{общ}} = V \cdot Q_{\text{H}}^{\text{p}} \text{кВт} \left[\frac{\text{м}^3}{\text{с}} \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} = \text{кВт}; \frac{\text{кг}}{\text{с}} \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = \text{кВт} \right]. \quad (7)$$

3.3. Виды тепловых потерь печи. Тепловой баланс

В печной системе имеются два вида потерь теплоты: 1) потери в рабочем пространстве печи – $M_{\text{прп}}$ и 2) теплота, уносимая из печи уходящими дымовыми газами $M_{\text{ух}}$.

Теплота в рабочем пространстве теряется, во-первых, на нагрев футеровки, т.е. огнеупорного ограждения печи, иначе говоря аккумулируется футеровкой, она обозначается $M_{\text{ак.ф}}$; во-вторых, проходит насквозь через футеровку благодаря теплопроводности и уходит в цех излучением и конвекцией от разогретой внешней поверхности футеровки – $M_{\text{пот.ф}}$; в-третьих, теплота теряется излучением через открытые окна печи – $M_{\text{окн}}$; в-четвертых, расходуется на нагрев воды, которая охлаждает металлические элементы конструкции печи, работающие при высокой температуре – $M_{\text{охл.в}}$. В целом

$$M_{\text{прп}} = M_{\text{ак.ф}} + M_{\text{пот.ф}} + M_{\text{окн}} + M_{\text{охл.в}}. \quad (8)$$

В электропечах имеется один вид потерь – потери в рабочем пространстве печи, поэтому для электропечей в (6) $M_{\text{пот}} = M_{\text{прп}}$.

Топливная печь, наряду с потерями в рабочем пространстве печи, имеет и второй вид потерь – с уходящими из рабочего пространства продуктами горения топлива – $M_{\text{ух}}$. Эти потери состоят из физической теплоты горячих газов $M_{\text{ух.ф}}$ и могут включать неиспользованную химическую энергию топлива вследствие неполного его сгорания в печи (недожога) – $M_{\text{хн}}$.

Таким образом, для топливных печей мощность $M_{\text{пот}}$ в выражении (6) будет равна $M_{\text{пот}} = M_{\text{прп}} + M_{\text{ух}}$. Тепловой баланс топливной печи будет та-

КИМ

$$M_{\text{общ}} = M_{\text{усв}} + M_{\text{прп}} + M_{\text{ух}}. \quad (9)$$

Электрические печи по сравнению с топливными должны быть более экономичны по расходу топлива, так как в них нет потерь с уходящими газами, однако не следует забывать, что при производстве электроэнергии на тепловых электростанциях были свои тепловые потери, в том числе с уходящими в атмосферу газами.

Теплота газов, уходящих из рабочего пространства, необязательно полностью теряется в атмосферу. В современных топливных печах часть теплоты дымовых газов используют для подогрева воздуха, а иногда и газообразного топлива, которые направляются в горелочные устройства печи, т.е. теплота дымовых газов частично возвращается в рабочее пространство печи в виде физической теплоты воздуха – $M_{\text{ф.в}}$ и топлива – $M_{\text{ф.т}}$. Этот процесс передачи теплоты дыма воздуху или топливу происходит в специальных устройствах – теплообменниках двух типов: рекуператорах и регенераторах, которые устанавливают в дымовых каналах между рабочим пространством печи и дымовой трубой. Потери теплоты с газами, уходящими в атмосферу – $M_{\text{ух.атм}}$, будут меньше по сравнению с потерями на выходе из рабочего пространства $M_{\text{ух}}$, а именно

$$M_{\text{ух.атм}} = M_{\text{ух}} - M_{\text{ф.в}} - M_{\text{ф.т}}.$$

Тепловой баланс топливной печи окончательно будет иметь вид

$$M_{\text{общ}} = M_{\text{усв}} + M_{\text{прп}} + M_{\text{ух}} - M_{\text{ф.в}} - M_{\text{ф.т}}. \quad (10)$$

В крупных печах, например, в мартеновских и двухванных, теплоту уходящих газов используют для получения водяного пара, для чего за печами устанавливают котлы-утилизаторы.

Потери теплоты в рабочем пространстве печи также стремятся уменьшить прежде всего путем применения футеровки с лучшими теплофизическими свойствами – с меньшей теплоемкостью и теплопроводностью.

Существуют проекты так называемых безинерционных печей, ограждение которых отражает обратно в печь падающее на него из печи тепловое излучение, т.е. имеет свойство теплового зеркала. Существуют печи с

испарительным охлаждением, в которых вода в водоохлаждаемых элементах печи превращается в пар, используемый в системе отопления помещений. Предложены схемы печей, в которых теплота, прошедшая через футеровку, передается воздуху, который также может быть полезно использован.

Потоки теплоты в топливной печи схематично изображены на рис. 4.

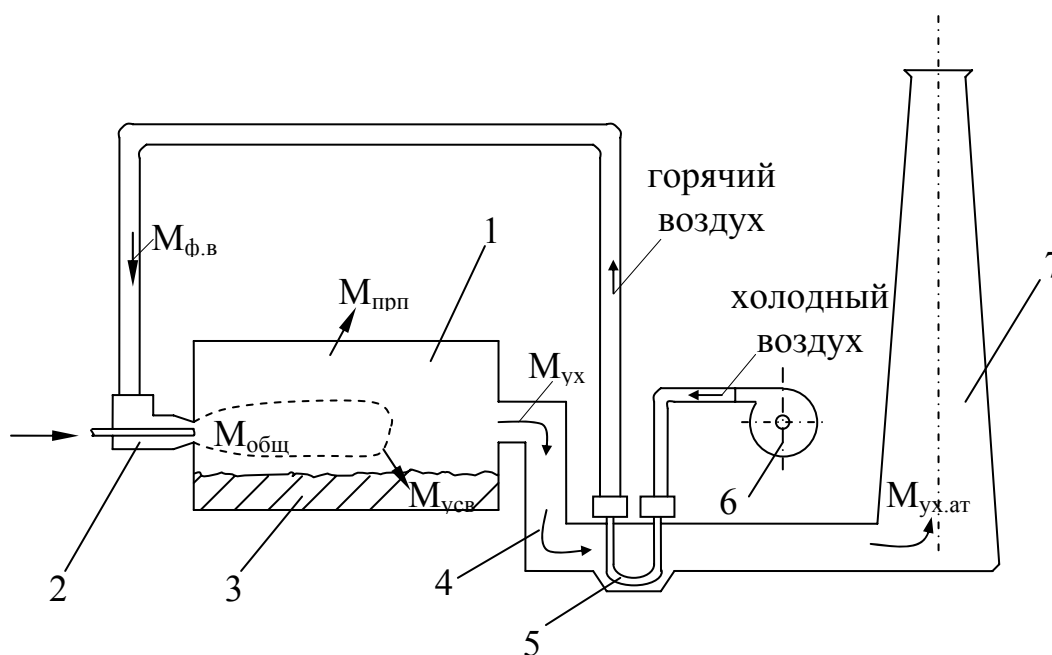


Рис. 4. Потоки теплоты в топливной печи: 1 – рабочее пространство печи; 2 – горелка; 3 – нагреваемый материал; 4 – дымовой канал; 5 – утилизатор теплоты уходящего дыма (рекуператор); 6 – вентилятор; 7 – дымовая труба

3.4. Производительность печи

Масса готовой продукции, выдаваемая из печи за единицу времени, называется **производительностью печи** P (т/ч, т/сутки, т/год, кг/с). Если ёмкость печи, т.е. масса материалов, находящихся в рабочем пространстве, равна E (т, кг), а продолжительность обработки материалов в печи (длительность плавки или нагрева металла) равна τ (ч, с), то

$$P = \frac{E}{\tau}. \quad (11)$$

Продолжительность обработки материалов в печи τ включает в себя время теплотехнического процесса $\tau_{\text{тепл}}$, необходимое для нагрева или плавления, а также время технологических операций $\tau_{\text{техн}}$, если эти операции проводятся в рабочем пространстве печи, т.е. $\tau = \tau_{\text{тепл}} + \tau_{\text{техн}}$. Если же технологический процесс происходит за пределами печи (внепечная обработка жидкого металла в ковше, прокатка, ковка, штамповка), то $\tau = \tau_{\text{тепл}}$.

Удельная производительность печи показывает, сколько продукции (т, кг) получается с единицы площади пода или с единицы объема рабочего пространства за единицу времени (кг/м²ч; т/м³сутки). Такие термины, как «съем металла», «напряженность пода» выражают удельную производительность печи. Иногда, например, при выплавке чугуна в доменной печи пользуются обратным показателем – КИПО – коэффициент использования полезного объема, который показывает, какой полезный объем печи требуется для выплавки 1 т чугуна в сутки.

Теплотехнические факторы, определяющие производительность печи, будут рассмотрены в параграфе 3.9.

3.5. Тепловой дефицит

Тепловой дефицит – это количество теплоты, которое нужно сообщить исходным материалам, чтобы превратить их в 1 кг (или 1 т) конечного продукта. В условиях постоянного давления среды это количество теплоты равно приращению удельной энтальпии $\Delta i = i_k - i_n$, кДж/кг, где i_k – энтальпия конечного продукта на выходе из печи, кДж/кг; i_n – энтальпия материала при загрузке в печь, кДж/кг конечного продукта.

Чем больше Δi , тем больше предстоящая тепловая работа печи, тем продолжительнее время тепловой обработки $\tau_{\text{тепл}}$, тем ниже производительность печи.

Например, при нагреве холодных слитков и заготовок перед обработкой давлением $\Delta i = 800-900$ кДж/кг (МДж/т), в мартеновской или дуговой сталеплавильной печи $\Delta i = 1500-1900$ кДж/кг (МДж/т) жидкой стали, в доменной печи $\Delta i = 10500-12500$ кДж/кг (МДж/т) жидкого чугуна.

Чтобы уменьшить расход топлива или электричества, нужно стремиться к уменьшению теплового дефицита путем сохранения энтальпии,

полученной материалом в предыдущем металлургической переделе: жидкий чугун при выплавке стали, горячие слитки с жидкой сердцевиной при нагреве их перед прокаткой и т.д.

3.6. Усвоенная тепловая мощность и КПД печи

Зная производительность печи P и тепловой дефицит Δi , можно найти усвоенную мощность, т.е. количество теплоты, поглощенное материалами в печи за единицу времени $M_{\text{усв}} = P \cdot \Delta i \left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = \text{кВт} \right]$.

Отношение усвоенной тепловой мощности $M_{\text{усв}}$ к общей мощности, потребляемой печью $M_{\text{общ}}$, называют коэффициентом полезного действия печи (КПД) $\eta_{\text{пд}} = M_{\text{усв}} / M_{\text{общ}}$. При этом не учитываются затраты электроэнергии на привод механизмов, обслуживающих печь: вентиляторов, дымососов, загрузочных и транспортирующих устройств. Поэтому $\eta_{\text{пд}}$ показывает только степень полезного использования энергии в рабочем пространстве агрегата. При экономической оценке различных печей необходимо учитывать все затраты энергии на их эксплуатацию.

Величина КПД колеблется в широких пределах. Наиболее низок этот показатель в печах, где приходится выдерживать нагретый или расплавленный металл для осуществления технологических процессов в течение длительного времени. Например, в термических печах КПД может быть на уровне 8-10%, а в современных нагревательных печах он может составлять 50-85%.

3.7. Удельный расход энергии

Удельный расход энергии показывает, сколько энергии топлива или электричества надо израсходовать в печи для получения единицы продукции (кДж/т, кДж/кг). Обозначим его буквой "e".

На производстве чаще всего пользуются показателем **удельный расход условного топлива** – e' , который получается простым пересчетом

$$e' = \frac{e}{29300} \left[\frac{\text{кДж}}{\text{т}} \cdot \frac{\text{кг.у.т}}{\text{кДж}} = \frac{\text{кг.у.т}}{\text{т}} \right]$$
 и измеряется в кг. условного топлива на тонну продукции. Здесь 29300 – теплота сгорания условного топлива в кДж/кг.у.т.

В соответствии с определением $\epsilon = M_{\text{общ}} / P \left[\frac{\text{кДж}}{\text{с}} \cdot \frac{\text{с}}{\text{кг}} = \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right]$, откуда $M_{\text{общ}} = \epsilon \cdot P$.

Найдем связь между двумя показателями работы печи – КПД и удельным расходом энергии

$$\eta_{\text{пд}} = \frac{M_{\text{усв}}}{M_{\text{общ}}} = \frac{\Delta i \cdot P}{\epsilon \cdot P} = \frac{\Delta i}{\epsilon}. \quad (12)$$

Таким образом, КПД печи обратно пропорционален удельному расходу энергии: чем больше " ϵ " тем ниже $\eta_{\text{пд}}$.

На производстве печи не всегда работают производительно. Существуют простои печей на холостом ходу, вызванные организационными причинами. Если посчитать средний удельный расход энергии с учетом горячих простоев за год или за месяц, то он окажется существенно больше, чем при работе печи без простоев. Поэтому средний удельный расход энергии за год или за месяц характеризует не только экономичность печи, но и уровень организации производства в цехе за указанный период.

Печи циклического действия работают с переменной по времени цикла тепловой мощностью. Приходится оперировать усредненными величинами мощностей и тепловых потерь. В этих печах более удобно измерять расход энергии за цикл работы печи от загрузки до выпуска или выдачи готовой продукции, в кДж/цикл. В этом случае количество теплоты, потребляемое печью за цикл, обозначают $Q_{\text{общ}}$ кДж/цикл, усвоенную материалом теплоту - $Q_{\text{усв}}$ кДж/цикл. КПД печи циклического действия будет равен $\eta_{\text{пд}} = \frac{Q_{\text{усв}}}{Q_{\text{общ}}} = \frac{E \cdot \Delta i}{Q_{\text{общ}}}$, а удельный расход энергии $\epsilon = Q_{\text{общ}} / E$, кДж/т.

3.8. Коэффициент использования теплоты топлива в печи - КИТ

Профессор Семикин И.Д. предложил понятие КИТ – коэффициент использования теплоты топлива – для теплотехнической оценки топлива и экономичности его использования в печах. **КИТ показывает, какая часть общей тепловой мощности печи остается в рабочем пространстве печи и используется на совершение полезной работы и на покрытие потерь теплоты в рабочем пространстве.**

Буквенное обозначение КИТ - $\eta_{ит}$ не будем путать с КПД - $\eta_{пд}$.

Для печей непрерывного действия будем иметь

$$\eta_{ит} = \frac{M_{усв} + M_{прп}}{M_{общ}} = \frac{M_{усв}}{M_{общ}} + \frac{M_{прп}}{M_{общ}} = \eta_{пд} + \frac{M_{прп}}{M_{общ}}. \quad (13)$$

Для печей циклического действия в среднем за цикл работы

$$\eta_{ит} = \frac{Q_{усв} + Q_{прп}}{Q_{общ}} = \frac{Q_{усв}}{Q_{общ}} + \frac{Q_{прп}}{Q_{общ}} = \eta_{пд} + \frac{Q_{прп}}{Q_{общ}}.$$

Таким образом, КИТ больше КПД на величину относительных потерь теплоты в рабочем пространстве печи.

Минимальное значение КИТ имеет печь, работающая на холостом ходу, без нагреваемых материалов. В этом случае $M_{усв} = 0$, тогда $\eta_{пд} = 0$, а $\eta_{ит}^{\min} = M_{прп} / M_{общ} > 0$.

Максимальное значение КИТ имеют электрические печи, в которых вся теплота остается в рабочем пространстве, т.е. $\eta_{ит}^{\max} = 1,0$. В топливных печах всегда имеются потери теплоты с уходящими в атмосферу газами, поэтому в этих печах $\eta_{ит} < 1$. В теоретическом пределе, если вся теплота уходящих дымовых газов будет использована на подогрев воздуха и топлива, которые возвратят её в печь, то $M_{ух} \rightarrow 0$, а $\eta_{ит} \rightarrow 1,0$. В современных топливных печах можно достичь значения $\eta_{ит} \approx 0,9$, т.е. 90% потребляемой печью энергии останется в рабочем пространстве, а остальная часть $(1 - \eta_{ит})$ в количестве 10% будет выброшена в атмосферу.

Тепловой баланс печи с участием КИТ из выражения (13) будет представлен следующим образом

$$M_{общ} \cdot \eta_{ит} = M_{усв} + M_{прп}. \quad (14)$$

В установившемся режиме работы печи $M_{усв} + M_{прп} = \text{const}$, тогда произведение $M_{общ} \cdot \eta_{ит} = \text{const}$, т.е. во сколько раз увеличится КИТ, во столько раз меньше будет мощность печи и, следовательно, расход топлива на её работу.

КИТ можно вычислить, не зная $M_{общ}$, $M_{усв}$ и $M_{прп}$. Для вывода расчетной формулы КИТ запишем тепловой баланс топливной печи в терми-

нах мощностей в виде (10), т.е. с учетом использования теплоты уходящих газов на подогрев воздуха и топлива

$$M_{\text{общ}} = M_{\text{усв}} + M_{\text{прп}} + M_{\text{ух}} - M_{\text{ф.в}} - M_{\text{ф.т}},$$

откуда следует, что

$$M_{\text{общ}} + M_{\text{ф.в}} + M_{\text{ф.т}} - M_{\text{ух}} = M_{\text{усв}} + M_{\text{прп}}.$$

Разделив обе части этого уравнения на $M_{\text{общ}}$, приходим к следующему выражению для КИТ

$$\eta_{\text{ит}} = \frac{M_{\text{усв}} + M_{\text{прп}}}{M_{\text{общ}}} = \frac{M_{\text{общ}} + M_{\text{ф.в}} + M_{\text{ф.т}} - M_{\text{ух}}}{M_{\text{общ}}}.$$

В последнем выражении все значения мощностей находятся из следующих формул:

$$M_{\text{общ}} = V \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}}; M_{\text{ф.в}} = V \cdot L_{\text{н}} \cdot i_{\text{в}}; M_{\text{ф.т}} = V \cdot i_{\text{т}}; M_{\text{ух}} = V \cdot \nu_{\text{д}} \cdot i_{\text{ух}}.$$

Здесь V – расход топлива, $\text{м}^3/\text{с}$ или $\text{кг}/\text{с}$; $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – теплота сгорания топлива, $\text{кДж}/\text{м}^3$ или $\text{кДж}/\text{кг}$; $L_{\text{н}}$ – действительный расход воздуха, подаваемый в печь для сжигания единицы топлива в $\text{м}^3/\text{м}^3$ топлива или в $\text{м}^3/\text{кг}$ топлива; $\nu_{\text{д}}$ – объем дымовых газов, образующихся от сжигания единицы топлива в $\text{м}^3/\text{м}^3$ топлива или в $\text{м}^3/\text{кг}$ топлива; $i_{\text{в}}$, $i_{\text{т}}$, $i_{\text{ух}}$ – энтальпии воздуха и топлива, подогретых в рекуператоре или регенераторе, и дымовых газов на выходе из рабочего пространства печи соответственно, $\text{кДж}/\text{м}^3$.

После подстановки этих величин в последнее выражение получим

$$\eta_{\text{ит}} = \frac{V \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}} + V \cdot L_{\text{н}} \cdot i_{\text{в}} + V \cdot i_{\text{т}} - V \cdot \nu_{\text{д}} \cdot i_{\text{ух}}}{V \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}}}.$$

Сократив дробь на V , приходим к расчетной формуле для КИТ, все члены которой относятся к единице топлива

$$\eta_{\text{ит}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}} + L_{\text{н}} \cdot i_{\text{в}} + i_{\text{т}} - \nu_{\text{д}} \cdot i_{\text{ух}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}. \quad (15)$$

Из этой формулы следует второе определение КИТ, идентичное первому: **КИТ показывает, какая часть теплоты сгорания топлива остается в рабочем пространстве печи.** Сравните это второе определение с первым, приведенным в начале данного параграфа.

Введение понятия КИТ дает возможность разделить общую мощность печи на две составляющих. Из выражения (14) получаем

$$M_{\text{общ}} = \frac{M_{\text{усв}} + M_{\text{прп}}}{\eta_{\text{ит}}} = \frac{M_{\text{усв}}}{\eta_{\text{ит}}} + \frac{M_{\text{прп}}}{\eta_{\text{ит}}} = M_{\text{раб}} + M_{\text{хх}}. \quad (16)$$

Первая составляющая получила название **рабочей мощности** $M_{\text{раб}} = M_{\text{усв}} / \eta_{\text{ит}}$, вторая составляющая называется **мощностью холостого хода** $M_{\text{хх}} = M_{\text{прп}} / \eta_{\text{ит}}$.

Рабочая мощность обеспечивает выполнение печью полезной тепловой работы в количестве $M_{\text{усв}}$. Но $M_{\text{раб}} > M_{\text{усв}}$, если $\eta_{\text{ит}} < 1$. Значит, часть рабочей мощности, пропорциональная $\eta_{\text{ит}}$, усваивается материалом в количестве $M_{\text{усв}} = \eta_{\text{ит}} \cdot M_{\text{раб}}$, а оставшаяся часть, равная $(1 - \eta_{\text{ит}}) \cdot M_{\text{раб}}$ теряется с уходящими из печи газами. Чем выше КИТ, тем ближе друг к другу значения $M_{\text{раб}}$ и $M_{\text{усв}}$. В электрических печах $\eta_{\text{ит}} = 1$, так как нет потерь с уходящими газами, поэтому $M_{\text{раб}} = M_{\text{усв}}$.

Мощность холостого хода обеспечивает поддержание печи при рабочей температуре, когда в ней нет материалов, т.е. эта мощность компенсирует потери теплоты в количестве $M_{\text{прп}}$. Но $M_{\text{хх}} > M_{\text{прп}}$, если $\eta_{\text{ит}} < 1$. Опять-таки, часть $M_{\text{хх}}$, равная $M_{\text{хх}} \cdot \eta_{\text{ит}} = M_{\text{прп}}$ теряется в рабочем пространстве, а остальная часть $(1 - \eta_{\text{ит}}) \cdot M_{\text{хх}}$ выбрасывается в атмосферу. Чем выше $\eta_{\text{ит}}$, тем ближе друг к другу значения $M_{\text{хх}}$ и $M_{\text{прп}}$. В электрических печах при $\eta_{\text{ит}} = 1$ $M_{\text{хх}} = M_{\text{прп}}$.

3.9. Теплотехнические факторы, определяющие производительность печи

В данном анализе будем считать, что производительность печи зависит от длительности теплотехнического процесса нагрева или плавления материалов. Исходя из записи теплового баланса печи непрерывного действия, работающей в установившемся режиме (выражение 14), и имея в виду, что $M_{\text{усв}} = P \cdot \Delta i$, найдем формулу для производительности печи

$$M_{\text{общ}} \cdot \eta_{\text{ит}} = P \cdot \Delta i + M_{\text{прп}}, \text{ откуда}$$

$$P = \frac{M_{\text{общ}} \cdot \eta_{\text{ит}} - M_{\text{прп}}}{\Delta i}. \quad (17)$$

Для печей, работающих циклами, получим аналогичную формулу

$$P = \frac{Q_{\text{общ}} \cdot \bar{\eta}_{\text{ит}} - Q_{\text{прп}}}{\Delta i \cdot \tau_{\text{тепл}}} = \frac{\bar{M}_{\text{ср}} \cdot \bar{\eta}_{\text{ит}} - \bar{M}_{\text{прп}}}{\Delta i},$$

где $\bar{M}_{\text{общ}}$, $\bar{M}_{\text{прп}}$, $\bar{\eta}_{\text{ит}}$ - средние за цикл общая мощность печи, мощность потерь теплоты в рабочем пространстве и КИТ.

Из формулы (17) следует, что P является функцией четырех факторов $P = f(M_{\text{общ}}, \eta_{\text{ит}}, \Delta i, M_{\text{прп}})$. Рассмотрим влияние каждого из четырех факторов на производительность печи.

Первый фактор – $M_{\text{общ}}$. Из формулы (17) видно, что с ростом $M_{\text{общ}}$ увеличивается производительность P . Это происходит потому, что с увеличением тепловыделения растет температура газов в печи и становятся больше тепловые потоки на нагреваемые материалы $q(\text{Вт/м}^2)$. Однако с ростом температуры печных газов возрастают потери мощности $M_{\text{прп}}$ и снижается $\eta_{\text{ит}}$. Поэтому рост величины числителя в формуле (17) постоянно затухает. Дальнейшее форсирование работы печи путем увеличения общей мощности почти не дает роста производительности, снижаются $\eta_{\text{ит}}$ и $\eta_{\text{пл}}$, увеличивается удельный расход энергии "ε" (рис. 5). К настоящему времени разработан эмпирический способ определения оптимальной величины общей мощности и производительности, при которой печь будет эксплуатироваться с минимальным удельным расходом энергии.

Второй фактор - $\eta_{\text{ит}}$. Повышение $\eta_{\text{ит}}$, т.е. увеличение части общей мощности, используемой в рабочем пространстве, будет приводить к росту производительности при $M_{\text{общ}} = \text{const}$. Если повышать производительность не требуется, то рост $\eta_{\text{ит}}$ позволит уменьшить $M_{\text{общ}}$ и "ε". Способы повышения $\eta_{\text{ит}}$ будут рассмотрены в разделе 4, посвященном энергосбережению.

Третий фактор - Δi . Снижение Δi уменьшает знаменатель в формуле (17) и при неизменном значении величины числителя приводит к росту производительности печи. Напомним, что $\Delta i = i_{\text{к}} - i_{\text{н}} = c_0^{\bar{t}_{\text{к}}} \cdot \bar{t}_{\text{к}} - c_0^{\bar{t}_{\text{н}}} \cdot \bar{t}_{\text{н}}$, где $c_0^{\bar{t}_{\text{н}}}$ и $c_0^{\bar{t}_{\text{к}}}$ - удельная теплоемкость тел, нагреваемых в печи в интервале температур от 0°C до среднemasсовой температуры материалов на входе в

печь \bar{t}_n и среднемассовой температуры продукции на выходе из печи \bar{t}_k . Чтобы уменьшить Δi , нужно повысить \bar{t}_n и по возможности снижать \bar{t}_k , нужно также уменьшить массу материалов, загружаемых в печь на получение 1 т продукции.

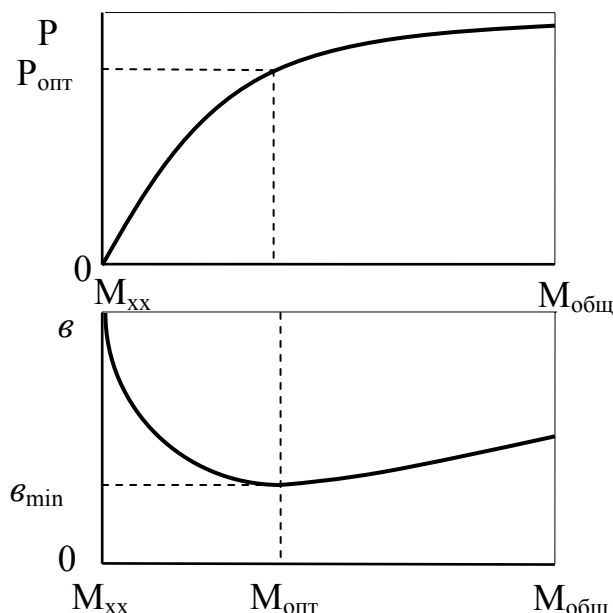


Рис. 5. Влияние общей мощности на производительность печи и удельный расход теплоты топлива

Известны практические способы уменьшения теплового дефицита в металлургии:

1. Для повышения \bar{t}_n требуется использовать теплоту, накопленную металлом в предыдущем переделе: применять жидкий чугун при выплавке стали; сохранять теплоту непрерывно-литых заготовок после МНЛЗ для прокатки их с минимальным подогревом или без дополнительного нагрева в печи (литейно-прокатные комплексы); сажать в нагревательные колодцы слитки с жидкой сердцевиной; устанавливать теплозащитные экраны на рольгангах между обжимными и заготовочными прокатными станами для осуществления транзитной прокатки без подогрева раскатов.

2. Примером снижения \bar{t}_k является понижение температуры нагрева заготовок в печи перед прокаткой до рационального уровня, при котором будет минимальным расход средств на нагрев и прокатку. При снижении температуры нагрева увеличивается расход электроэнергии при обжатии

металла и износ прокатного оборудования. С другой стороны, снижается расход энергии на нагрев, уменьшаются потери металла от угара в печи и обезуглероживания, повышается стойкость печного оборудования и огнеупорной футеровки, что приводит к удешевлению ремонтных работ.

3. Чтобы уменьшить массу материалов, которые приходится нагревать для получения 1 т готовой продукции, нужно обогащать руды, удалять вредные примеси и уменьшать количество шлаков, использовать обожженные окатыши и флюсы, чистый от песка и шлака скрап и лом при выплавке стали.

Четвертый фактор – $M_{\text{прп}}$. Чем больше потери теплоты в рабочем пространстве, тем большая доля общей тепловой мощности расходуется непроизводительно, что снижает производительность печи.

Уменьшение тепловых потерь достигается путем применения низко-теплопроводной и менее теплоемкой тепловой изоляции футеровки и водоохлаждаемых балок, умеренного применения водяного охлаждения, уплотнения рабочих и смотровых окон. В лучших современных нагревательных печах непрерывного действия $M_{\text{прп}}$ составляет $\sim 5\% M_{\text{общ}}$.

Мы проанализировали воздействие на производительность печей наиболее общих факторов. Часть факторов, влияющих на производительность печей, но не входящих в формулу (17), мы не рассматривали. К ним относятся ёмкость печи, её размеры, а именно площадь пода, объем печи, величина поверхности нагрева материалов, через которую осуществляется внешняя теплопередача, закономерности циркуляции печных газов и теплопередачи, распределение горелочных устройств в топливных печах. Роль этих факторов рассматривается в специальных монографиях и статьях по металлургической теплотехнике применительно к печам каждого типа и назначения.

4. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЕЧЕЙ

4.1. Пути сокращения удельного расхода энергии

Сущность энергосберегающих мероприятий при эксплуатации печей состоит в сокращении расхода энергии на единицу продукции, который мы

называем удельным расходом энергии "e". Чтобы вычислить "e" в печи непрерывного действия, нужно $M_{\text{общ}}$ разделить на производительность

$$e = \frac{M_{\text{общ}}}{P} \text{ кДж/т.}$$

Для печей циклического действия

$$e = \frac{Q_{\text{общ}}}{E} = \frac{\bar{M}_{\text{общ}} \cdot \tau}{E} = \frac{\bar{M}_{\text{общ}}}{P}, \text{ поскольку } \frac{E}{\tau} = P.$$

Нам известно, что

$$M_{\text{общ}} = \frac{M_{\text{усв}}}{\eta_{\text{ит}}} + \frac{M_{\text{прп}}}{\eta_{\text{ит}}} = \frac{P \cdot \Delta i}{\eta_{\text{ит}}} + \frac{M_{\text{прп}}}{\eta_{\text{ит}}},$$

поэтому

$$e = \frac{M_{\text{общ}}}{P} = \frac{P \cdot \Delta i}{P \cdot \eta_{\text{ит}}} + \frac{M_{\text{прп}}}{P \cdot \eta_{\text{ит}}} = \frac{\Delta i}{\eta_{\text{ит}}} + \frac{M_{\text{xx}}}{P}. \quad (18)$$

Полученная формула дает возможность проанализировать пути уменьшения удельного расхода энергии. Для печей циклического действия формула для "e" запишется аналогично (18)

$$e = \frac{\Delta i}{\eta_{\text{ит}}} + \frac{\bar{M}_{\text{xx}}}{P}.$$

Формула (18) показывает, что удельный расход энергии состоит из двух слагаемых, которые представляют собой "прямые расходы энергии" на технологический процесс и "накладные расходы" на содержание печи в рабочем состоянии. Первое слагаемое $\Delta i / \eta_{\text{ит}}$ выражает прямой расход энергии. Он не зависит от производительности печи и всецело определяется тепловым дефицитом: чем меньше тепловой дефицит, тем меньше энергии требуется на нагрев материалов. Возможности уменьшения Δi весьма велики. Пути уменьшения Δi мы рассмотрели в параграфе 3.9 при изучении факторов, влияющих на производительность печи: использование жидкого чугуна при выплавке стали, горячий посад слитков, литейно-прокатные комплексы, "транзитная" прокатка, обогащение руд для получения металла, уменьшение количества шлака, предварительный обжиг флюсов.

"Накладные расходы энергии" – второе слагаемое M_{xx} / P - зависит

от производительности печи. Во время простоя печи, когда $P = 0$, а $M_{xx} \neq 0$, удельный расход энергии стремится к бесконечности. Чем больше производительность печи, тем меньше "накладные расходы", если рост P достигается уменьшением простоев печи на холостом ходу. Если же рост производительности происходит за счет увеличения общей тепловой мощности, то удельный расход топлива сокращается до тех пор, пока в дроби $e = M_{\text{общ}} / P$ производительность (знаменатель) растет быстрее, чем мощность (числитель).

Однако с ростом $M_{\text{общ}}$, как мы отмечали выше, рост производительности постепенно затухает (см. рис. 5), так как с повышением температуры печных газов возрастают потери $M_{\text{прп}}$, уменьшается $\eta_{\text{ит}}$, а значит, увеличивается мощность холостого хода, $M_{xx} = M_{\text{прп}} / \eta_{\text{ит}}$ и удельный расход энергии. Чтобы минимизировать "e", нужно эксплуатировать печь при оптимальной производительности и соответствующей оптимальной тепловой мощности, как показано на рис. 5.

Формула (18) показывает также, что сокращение $M_{\text{прп}}$ и повышение $\eta_{\text{ит}}$ однозначно приводят к снижению удельного расхода энергии. Снижение потерь теплоты в рабочем пространстве достигается путем изготовления тепловой изоляции из современных волокнистых изделий. Характеристика этих изделий приведена в разделе 5. Поверхности водоохлаждаемых балок и труб изолируются легкими волокнистыми муллитокремнеземистыми изделиями с оболочкой из огнеупорного бетона.

Особенно эффективно применение шамотных волокнистых плит для футеровки термических печей циклического действия, так как при регулярно повторяющемся разогреве печи в начале каждого цикла уменьшаются потери теплоты, которую поглощает (аккумулирует) футеровка. Так, замена шамотной футеровки на волокнистую в закалочной печи с выкатным подом площадью 14 м^2 уменьшает расход природного газа, которым отапливается эта печь, на 43%.

В топливных печах существенную экономию энергии можно получить путем повышения коэффициента использования теплоты КИТ. Способы повышения КИТ в топливных печах рассмотрим в следующем параграфе. Максимальное значение $\eta_{\text{ит}} = 1$. Оно характерно для электрических

печей, поэтому резервы экономии энергии в этих печах состоят в уменьшении горячих простоев, в повышении производительности и в уменьшении потерь теплоты в рабочем пространстве.

4.2. Способы повышения КИТ в топливных печах

Способы повышения КИТ рассмотрим с помощью расчетной формулы (15), которую запишем следующим образом

$$\eta_{\text{ИТ}} = \frac{Q_{\text{Н}}^{\text{Р}} + Q_{\text{ф.в}} + Q_{\text{ф.т}} - Q_{\text{ф.ух}} - Q_{\text{х.н}}}{Q_{\text{Н}}^{\text{Р}}},$$

где $Q_{\text{Н}}^{\text{Р}}$ - низшая рабочая теплота сгорания топлива;

$Q_{\text{ф.в}} = L_{\text{н}} \cdot i_{\text{в}} = L_{\text{н}} \cdot \bar{c}_{\text{в}} \cdot t_{\text{в}}$; $Q_{\text{ф.т}} = \bar{c}_{\text{т}} \cdot t_{\text{т}}$; $Q_{\text{ф.ух}} = \nu_{\text{д}} \cdot \bar{c}_{\text{д}} \cdot t_{\text{ух}}$ - физическая теплота воздуха, топлива и уходящих из печи газов; $t_{\text{в}}$, $t_{\text{т}}$ и $t_{\text{ух}}$ - температура воздуха, топлива (на входе в горелки) и дымовых газов на выходе из рабочего пространства; $\bar{c}_{\text{в}}$, $\bar{c}_{\text{т}}$ и $\bar{c}_{\text{д}}$ - средние удельные теплоемкости воздуха, топлива и дымовых газов соответственно; $Q_{\text{х.н}}$ - теплота недожога топлива в печи.

В топливных печах практически достижимым можно считать значение $\eta_{\text{ИТ}} = 0,9$, при котором 90% теплоты топлива используется в рабочем пространстве печи. В пределе можно себе представить случай $\eta_{\text{ИТ}} = 1,0$, когда $Q_{\text{ф.в}} + Q_{\text{ф.т}} = Q_{\text{ф.ух}}$, а $Q_{\text{х.н}} = 0$, т.е. вся теплота, уносимая дымом из рабочего пространства, будет возвращена в него с физической теплотой воздуха и топлива, подаваемых в печь через горелки, форсунки или фурмы.

Чтобы повысить значение КИТ, нужно применить способы увеличения числителя в формуле для $\eta_{\text{ИТ}}$. Рассмотрим поочередно влияние каждого слагаемого в числителе этой формулы.

1. Недожог топлива $Q_{\text{х.н}}$ уменьшает $\eta_{\text{ИТ}}$. Следовательно, необходимо организовать **полное сгорание топлива** без недожога. Конструкции горелок и форсунок должны обеспечивать перемешивание топлива с кислородом воздушного дутья, а количество кислорода должно быть достаточным для полного сгорания топлива.

Каждая конструкция сожигательного устройства имеет свое минимальное значение соотношения расходов воздуха и топлива, которое

должно быть больше теоретически необходимого, чтобы в пределах рабочего пространства произошло полное сгорание топлива. Лучшие условия для перемешивания компонентов горения создаются в инжекционных горелках, они работают с наименьшим коэффициентом расхода воздуха $n = 1,0-1,05$. В горелках типа «труба в трубе» требуется большой избыток воздуха, в них $n = 1,1-1,15$. Мазутные форсунки должны работать при $n = 1,2-1,25$.

Почему нельзя допускать чрезмерно большой избыток воздуха? Потому, что избыточный воздух входит в состав дымовых газов и увеличивает их объем v_d . Из формулы для $\eta_{ит}$ видно, что при этом возрастают физические потери теплоты с уходящими из печи газами. Другими словами, избыточный воздух должен быть нагрет в печи до температуры дымовых газов, для чего требуется дополнительный расход топлива.

Таким образом, существует **оптимальное значение коэффициента расхода воздуха**, которое контролируют на практике путем анализа дымовых газов и сравнивают с расчетным составом дыма. Обычно содержание O_2 в дыме должно быть на уровне 1-2%, при этом содержание CO должно быть равно 0, что свидетельствует об отсутствии недожога.

Итак, **первый способ** увеличения КИТ реализуется путем наладки процесса полного сжигания топлива при оптимальном коэффициенте расхода воздуха.

2. Теплота, уносимая из рабочего пространства с дымовыми газами $Q_{ф.ух} = v_d \cdot \bar{c}_d \cdot t_{ух}$ понижает КИТ. Можно сократить потери двумя путями: уменьшить объем v_d либо температуру дымовых газов $t_{ух}$.

Для уменьшения объема дымовых газов имеются следующие возможности:

1) **повышение теплоты сгорания газообразного топлива** позволяет уменьшить объем некоторых балластных газов, содержащихся в топливе, прежде всего N_2 и CO_2 , которые из топлива переходят в дым. Расчет показывает, что повышение Q_H^p до ~ 12 МДж/м³ эффективно влияет на $\eta_{ит}$. Применение топлива с $Q_H^p > 12$ МДж/м³ менее заметно повышает $\eta_{ит}$, по-

сколькx увеличение знаменателя в формуле для $\eta_{ит}$ начинает компенсировать рост числителя;

2) **обогащение воздушного дутья кислородом** позволяет снизить содержание в нём балластного газа N_2 и тем самым уменьшить υ_d . Этот способ нашел применение в нагревательных печах путем увеличения содержания кислорода в воздухе, подаваемом в горелки, с 21% до 30%. Продувка жидкого металла техническим кислородом в подовых сталеплавильных печах и в конвертерах позволяет аналогичным образом повысить коэффициент использования теплоты экзотермических реакций окисления примесей.

Понизить температуру газов, покидающих рабочее пространство можно путем **улучшения теплоотдачи от печных газов к материалам**.

На практике для понижения t_{yx} используют следующие способы: применяют противоточную схему движения газов и материалов (доменная печь, методические и кольцевые печи, трубчатые вращающиеся печи); увеличивают площади пода неотпливаемой зоны со стороны выхода газов из печи; интенсифицируют теплоотдачу конвекцией в неотпливаемой зоне печи с помощью струйного обдува поверхности материала дымовыми газами.

Осуществление мероприятий по уменьшению $Q_{ф,yx}$ должно быть экономически целесообразным, с приемлемым сроком окупаемости затрат на экономию топлива. Итак, **второй способ увеличения КИТ** – это понижение объема и температуры уходящих из рабочего пространства газов с помощью повышения теплоты сгорания топлива, обогащения воздушного дутья кислородом и улучшения теплоотдачи от печных газов к материалам.

3. Физическая теплота воздуха $Q_{ф,в}$ и газообразного топлива $Q_{ф,т}$ повышает КИТ, так как она получена за счет охлаждения дымовых газов перед выбросом их в атмосферу, т.е. для нагрева компонентов горения не расходовалась дополнительная химическая энергия топлива. Этот **третий способ повышения КИТ** получил название: утилизация теплоты уходящих газов в рекуператорах или регенераторах. Общая тепловая мощность

печи остается единственным внешним, первичным источником энергии для работы печи (первичным энергоресурсом).

Теплота уходящих газов называется вторичными энергоресурсами, которые мы не сумели использовать для нагрева материалов. Утилизация теплоты дыма путем нагрева компонентов горения помогает исправить этот недостаток работы печи, увеличивая КИТ и уменьшая тепловые выбросы в атмосферу.

Ранее говорилось, что теплота дымовых газов может быть использована также для получения водяного пара в котлах-утилизаторах за печью. Этот вид утилизации вторичных энергоресурсов не влияет на расход топлива в печи, на величину КИТ, но позволяет экономить топливо на выработку пара или горячей воды для отопления помещений и технологических нужд.

Эффективность утилизации теплоты уходящих газов оценивают коэффициентом рекуперации (регенерации)

$$\tau_{\phi} = \frac{Q_{\phi.в} + Q_{\phi.т}}{Q_{\phi.ух}},$$

который показывает, какую долю теплоты уходящего дыма удастся вернуть в рабочее пространство с нагретым воздухом и газообразным топливом.

Рекуператоры применяют, в основном, в нагревательных печах различного назначения. Регенераторы нашли применение как в плавильных, так и в нагревательных печах.

5. РЕКУПЕРАТОРЫ

5.1. Общая характеристика и классификация

Рекуператор – это теплообменник стационарного режима работы, в котором теплота непрерывно передается от дымовых газов к нагреваемому газу (воздуху либо газообразному топливу) через сплошную твердую стенку. Площадь поверхности этой разделяющей стенки называют поверхностью теплообмена F , м^2 . Чаще всего стенка имеет цилиндрическую форму, т.е. выполняется в виде трубы, внутри которой протекает один теплоноси-

тель, а снаружи – другой. В зависимости от материала стенки различают керамические и металлические рекуператоры.

Материалом для металлических рекуператоров служат хромоникелевые стали типа X18H10T, X25H20C2 с допустимой температурой дыма перед рекуператором 1100-1200 °С, либо хромистая сталь типа X17 с допустимой температурой дыма не более 1000 °С. Толщина стальной стенки $S = 2-3$ мм. Температура нагрева воздуха (или газа) в существующих рекуператорах не превышает 400-500 °С.

Керамические рекуператоры выполняют из карбошамотных или шамотных восьмигранных трубок длиной 300-350 мм, с толщиной стенки $S = 10-12$ мм, а также реже из шамотных пустотелых блоков. В керамических рекуператорах нагревают только воздух ввиду их негерметичности. Максимальная температура дыма перед рекуператором 1250-1300°С, нагретого воздуха – 800-850 °С. Более высокая температура воздуха – единственное преимущество керамических рекуператоров, недостатками их являются:

неплотные соединения трубок между собой, через которые происходит утечка воздуха, изменяющаяся в процессе службы и нарушающая нормальное сжигание топлива;

большие габаритные размеры из-за высокого теплового сопротивления керамической стенки, в связи с чем коэффициент теплопередачи в 4-5 раз меньше, а поверхность теплообмена во столько же раз больше, чем у металлического рекуператора.

По схеме движения горячего и холодного теплоносителей различают рекуператоры прямоточные, противоточные и перекрестного тока (рис. 6).

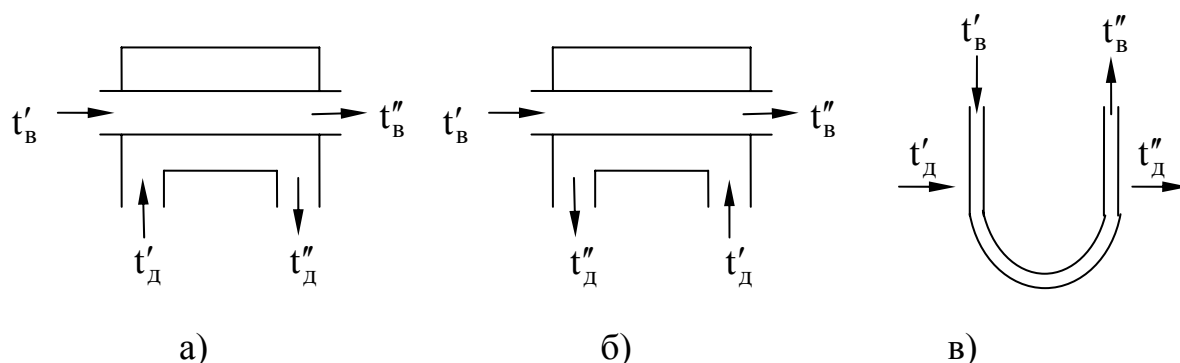


Рис. 6. Схемы движения теплоносителей в рекуператоре:

а – прямоток; б – противоток; в – перекрестный ток

По преобладающему виду теплоотдачи от дымовых газов к стенке рекуператоры могут быть конвективными, радиационными и конвективно-радиационными.

5.2. Теплообмен и температурные поля в рекуператорах

Рассмотрим схему теплообмена при передаче теплоты через стенку рекуператора (рис. 7). Для определенности будем считать, что в рекуператоре нагревается сухой воздух, состоящий из двухатомных газов N_2 и O_2 , которые прозрачны для тепловых лучей. Слева от стенки находится горячий теплоноситель – дым, в составе которого имеются трехатомные продукты горения CO_2 и H_2O , способные излучать тепловой поток. В связи с этим коэффициент теплоотдачи от дыма к стенке включает лучистую $\alpha_{\text{д}}^{\text{луч}}$ и конвективную $\alpha_{\text{д}}^{\text{к}}$ составляющие: $\alpha_{\text{д}} = \alpha_{\text{д}}^{\text{к}} + \alpha_{\text{д}}^{\text{луч}}$, тогда как со стороны воздуха только конвективную $\alpha_{\text{в}} = \alpha_{\text{в}}^{\text{к}}$.

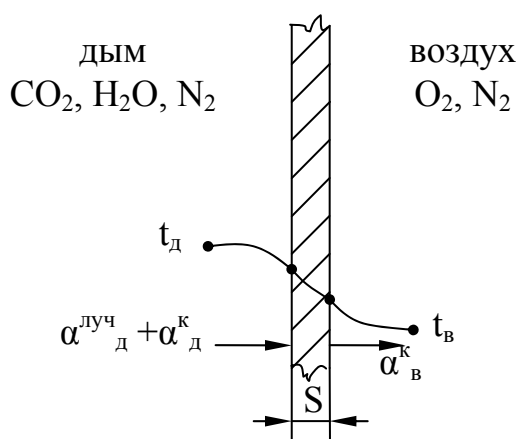


Рис. 7. Схема теплопередачи через стенку рекуператора

Тепловой поток от дыма к воздуху преодолевает три тепловых сопротивления: от дыма к стенке - $1/\alpha_{\text{д}}$, внутреннее сопротивление стенки - S/λ и от стенки к воздуху - $1/\alpha_{\text{в}}$. Как известно из теплотехники, коэффициент теплопередачи будет равен

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{д}}} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}}}} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (19)$$

а тепловой поток через стенку площадью F , м^2

$$Q = \kappa \cdot \overline{\Delta t} \cdot F \text{ Вт}, \quad (20)$$

где κ и $\overline{\Delta t}$ - средние по поверхности F значения коэффициента теплопередачи и разности температур между дымом и воздухом.

Выражение (20) называют уравнением теплопередачи в рекуператоре, а $\overline{\Delta t}$ - средним «температурным напором», который находят по формуле среднего логарифмического (вывод формулы мы не приводим)

$$\overline{\Delta t} = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}}. \quad (21)$$

Обозначения величин $\Delta t'$ и $\Delta t''$ показаны на рис. 8.

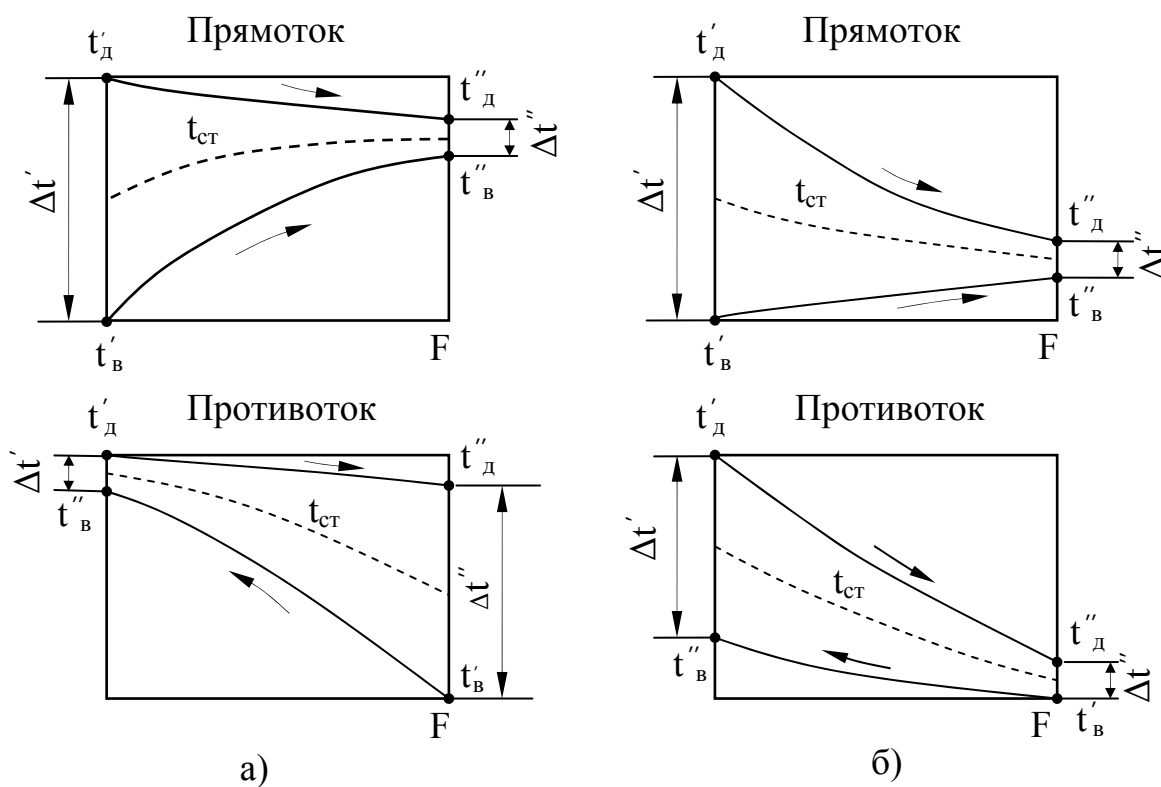


Рис. 8. Температурные поля рекуператоров

а - $G_D \cdot \bar{c}_D > G_B \cdot \bar{c}_B$; б - $G_D \cdot \bar{c}_D < G_B \cdot \bar{c}_B$

Характер температурных полей на рис. 8 определяется уравнением теплового баланса рекуператора

$$G_D \cdot (i'_D - i''_D) \cdot \eta_{\text{пот}} = G_B \cdot (i''_B - i'_B)$$

ИЛИ

$$G_d \cdot \bar{c}_d (t'_d - t''_d) \cdot \eta_{\text{пот}} = G_b \cdot \bar{c}_b (t''_b - t'_b), \quad (22)$$

где G_d и G_b – массовые расходы дыма и воздуха в кг/с; t'_d и t''_d – температуры дыма на входе в рекуператор и на выходе из него, °С; t'_b и t''_b – то же для воздуха, °С; $\eta_{\text{пот}} = 0,9-0,95$ – коэффициент потерь теплоты в окружающую среду.

Из уравнения теплового баланса (22) при $\eta_{\text{пот}} = 1$ получаем соотношения

$$\frac{G_d \cdot \bar{c}_d}{G_b \cdot \bar{c}_b} = \frac{t''_b - t'_b}{t'_d - t''_d}. \quad (23)$$

По физическому смыслу, $G_d \cdot \bar{c}_d$ и $G_b \cdot \bar{c}_b$ – это теплоемкости секундного расхода дыма и воздуха. Из (23) следует вывод: чем больше теплоемкость теплоносителя, тем меньше изменяется его температура в рекуператоре.

На рис. 8 представлены температурные поля прямоточного и противоточного рекуператоров при $G_d \cdot \bar{c}_d > G_b \cdot \bar{c}_b$ и при $G_d \cdot \bar{c}_d < G_b \cdot \bar{c}_b$. Анализируя рис. 8, мы видим, что температура нагрева воздуха t''_b при одинаковых значениях t'_d и t'_b в прямоточном рекуператоре стремится к t''_d , а в противоточном – к t'_d , т.е. t''_b будет меньше в прямоточном рекуператоре, при этом из-за существенного уменьшения текущего значения $\Delta t = t_d - t_b$ количество передаваемой теплоты также уменьшается, поэтому в прямоточном рекуператоре экономическим обоснованным считается предельное значение $t''_b \leq 0,5t''_d$.

5.3. Схема расчета рекуператора

Цель расчета состоит в определении величины поверхности теплообмена F , которая является исходным параметром при проектировании. Массовые расходы теплоносителей и температуры t'_b , t''_b и t'_d должны быть заданы.

В расчете используются два уравнения рекуператора: теплового баланса (22) и теплопередачи (20).

Из уравнения (22) находят неизвестную температуру дыма на выходе из рекуператора $t''_д$ и количество передаваемой воздуху теплоты Q .

$$Q = G_B \cdot \bar{c}_B (t''_B - t'_B).$$

Из уравнения (20) определяют искомую величину поверхности теплообмена

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t}.$$

Коэффициент теплопередачи "к" находят по формуле (19). В металлических рекуператорах внутреннее тепловое сопротивление стенки S/λ пренебрежимо мало по сравнению с величинами - $1/\alpha_д$ и $1/\alpha_в$, поэтому формула (19) упрощается

$$k = \alpha_д \cdot \alpha_в / (\alpha_д + \alpha_в).$$

Формулы для вычисления коэффициентов теплоотдачи $\alpha_д$ и $\alpha_в$ приведены в учебном пособии [1].

5.4. Конструкции рекуператоров

Конструкции рекуператоров разнообразны. В качестве примера рассмотрим рекуператоры трех конструкций:

1. **Петлевой трубчатый рекуператор** перекрестного тока (рис. 9) выполняется из металлических труб $\varnothing 57/50$ мм, устанавливается в дымовом канале. Достоинством его является свободное удлинение труб при разогреве рекуператора, так как трубы находятся в подвешенном состоянии и не испытывают термических напряжений.

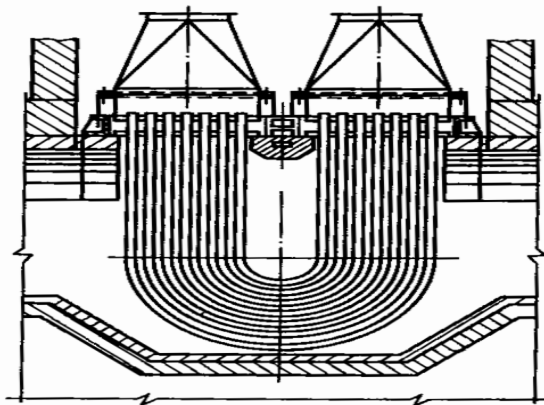


Рис. 9. Петлевой трубчатый рекуператор

Воздух входит в один из двух коллекторов, затем движется внутри труб по петлевой траектории и выходит из второго коллектора. Поток дыма проходит вдоль дымового канала между трубами. Эти рекуператоры широко применяются на нагревательных печах для подогрева воздуха и газообразного топлива.

2. Струйный радиационный рекуператор (рис. 10) имеет плоскую поверхность теплообмена в виде металлического листа. Он устанавливается на дымовой канал сверху. Дым проходит по каналу под рекуператором и передает теплоту на поверхность теплообмена в основном излучением, так как скорость движения дыма в канале мала (2-3 м/с), а его температура довольно высока – обычно более 1000 °С. Поэтому конвективный тепловой поток от дыма к поверхности теплообмена значительно меньше, чем лучистый. Воздушные струи истекают из мелких отверстий коллектора на поверхность теплообмена, при этом конвективная теплоотдача происходит более интенсивно, чем при движении воздуха вдоль поверхности теплообмена.

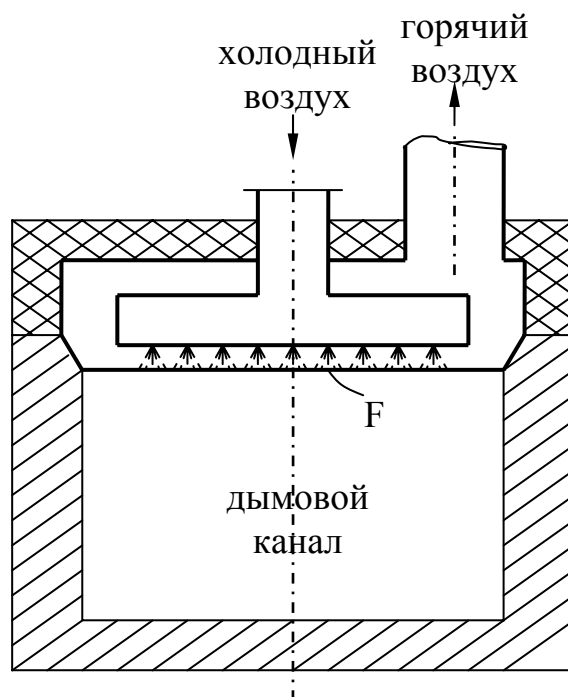


Рис. 10. Схема струйного радиационного рекуператора

3. Керамический трубчатый рекуператор (рис. 11) перекрестного тока служит для подогрева воздуха до 800-850 °С. Дымовые газы проходят

обычно внутри труб, воздушный поток омывает поверхность труб снаружи. Трубы выполняются из шамота, либо из смеси шамота с карборундом (SiC). Как отмечалось выше, керамические рекуператоры имеют низкую газоплотность (из-за большого количества недостаточно плотных соединений труб между собой) и низкий коэффициент теплопередачи $k = 5-10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. В связи с этим для высокотемпературного подогрева воздуха и газообразного топлива целесообразно применять регенераторы.

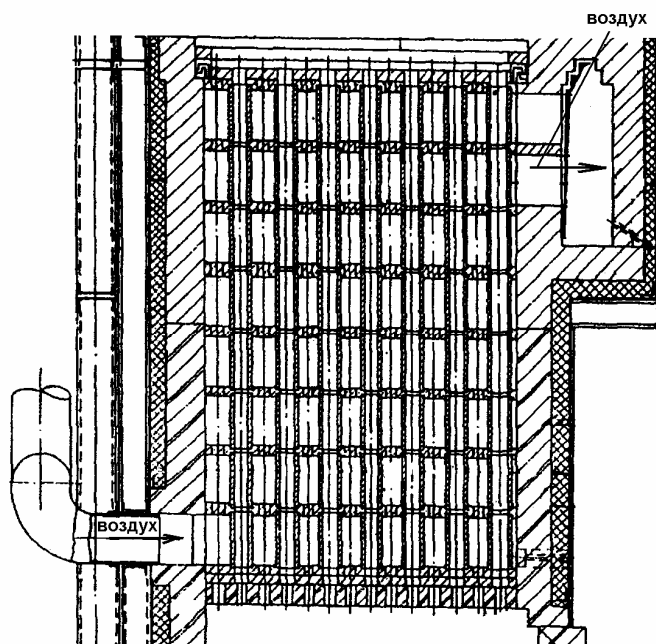


Рис. 11. Керамический трубчатый рекуператор

6. РЕГЕНЕРАТОРЫ

6.1. Общая характеристика регенераторов

Регенератор металлургической печи представляет собой камеру, заполненную многорядной решеткой (насадкой) из огнеупорного кирпича, чаще всего динасового и шамотного, или из других штучных изделий.

В работе регенератора различают два рабочих периода времени - τ_1 и τ_2 . В течение периода τ_1 через регенератор проходит горячий теплоноситель – дым, который нагревает огнеупорную насадку. Это дымовой период или период нагрева насадки. В течение периода τ_2 через регенератор про-

пускают холодный теплоноситель – воздух или газообразное топливо. Это период дутья или период охлаждения насадки. Насадка отдает ранее аккумулярованную теплоту нагреваемому воздуху или газу, т.е. выполняет роль посредника в теплообмене между дымом и воздухом (газом).

Печь потребляет топливо и воздух непрерывно, поэтому она должна иметь как минимум два регенератора для нагрева воздуха и два – для нагрева топлива, если есть необходимость в нагретом топливе. Такая необходимость возникает при отоплении печи низкокалорийным газом, чтобы обеспечить достаточную температуру горения.

При наличии на печи одной пары регенераторов продолжительность периодов нагрева и охлаждения насадки одинакова $\tau_1 = \tau_2$. По два воздушных регенератора имеют мартеновские и нагревательные печи. Регенеративные нагревательные колодцы, работающие на доменном газе, имеют два воздушных и два газовых регенератора. В доменных воздухонагревателях длительность дымового и воздушного периодов разная, поэтому они оборудованы тремя или четырьмя регенераторами (кауперами). Если число регенераторов n больше двух, то $\tau_2 = (\tau_1 + \Delta\tau)/n - 1$, где $\Delta\tau$ - длительность операции переключения с дымового периода на воздушный и наоборот. Эту операцию на производстве называют "перекидка клапанов".

Движение газов в регенераторах противоточное, греющий и нагреваемый газы проходят по одним и тем же каналам насадки, но в разные периоды времени и в противоположном направлении.

Таким образом, **регенератор, в отличие от рекуператора, - это теплообменник нестационарного режима работы, в котором теплота передается от дымовых газов к воздуху либо топливу с помощью периодического нагрева и охлаждения огнеупорной насадки.**

Преимущество регенераторов состоит в возможности работы в условиях более высоких температур, при сохранении герметичности даже при высоком давлении теплоносителей. В доменных воздухонагревателях и в мартеновских печах температура дыма на входе в насадку $t'_d = 1400-1600$ °С, она ограничивается свойствами керамической насадки: огнеупорностью,

термостойкостью, шлакоустойчивостью. Температура нагрева воздуха достигает значений $t'_в = 1300-1400$ °С.

Недостатком регенераторов является необходимость перекидки клапанов и колебание температуры нагретого воздуха (топлива). Температурное поле регенератора представлено на рис. 12. При постоянной температуре дыма $t'_д$ и воздуха $t'_в$ на входе в насадку температуры $t''_д$ и $t''_в$ изменяются во времени. В начале дымового периода охлажденная ранее насадка поглощает большее количество теплоты, чем в конце периода, когда разность температур дыма и насадки становится меньше. Поэтому на рис. 12 температура дыма на выходе из насадки в начале дымового периода $t''_{д.н}$ меньше, чем в конце $t''_{д.к}$ этого периода.

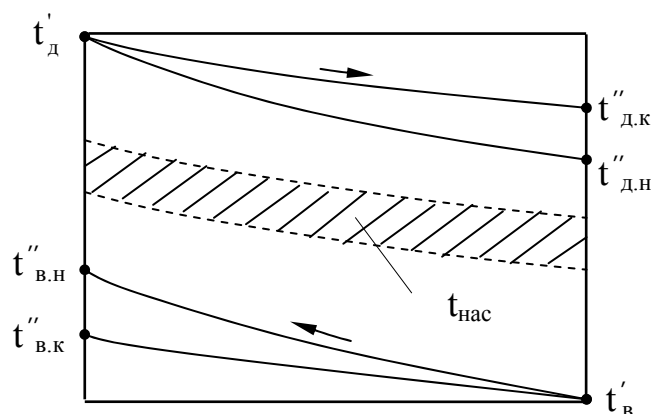


Рис. 12. Температурное поле регенератора:

- $t'_д, t'_в$ - температура дыма и воздуха на входе в регенератор;
- $t''_{д.н}, t''_{д.к}$ - температура дыма на выходе из регенератора в начале и в конце дымового периода;
- $t''_{в.н}, t''_{в.к}$ - температура нагрева воздуха в начале и в конце воздушного периода;
- $t_{нас}$ - температура насадки. Заштрихована область изменения $t_{нас}$ в течение цикла «нагрев – охлаждение»

Температура нагрева воздуха выше в начале воздушного периода, когда насадка имеет наиболее высокую температуру, т.е. $t''_{вн} > t''_{вк}$.

Чтобы не допускать значительного колебания температуры нагрева воздуха или топлива, перекидку клапанов делают через несколько минут.

6.2. Виды регенераторной насадки

Наибольшее распространение получили насадки (решетки) из обыкновенного кирпича – динасового и шамотного. В зависимости от способа укладки кирпичей различают насадки типа Каупер (рис. 13,а) и типа Сименс (рис. 13,б). Насадка Каупера имеет только вертикальные каналы, она обладает повышенной строительной прочностью, но её удельная поверхность теплообмена, т.е. площадь соприкасающейся с газами поверхности кирпичей в m^2 на $1 m^3$ насадки, меньше, чем у насадки Сименса. Насадка Сименса имеет вертикальные и горизонтальные каналы, её строительная прочность ниже. Удельная поверхность насадок Сименса и Каупера находится на уровне $15-20 m^2/m^3$ в зависимости от размера каналов для прохода газов (ячеек).

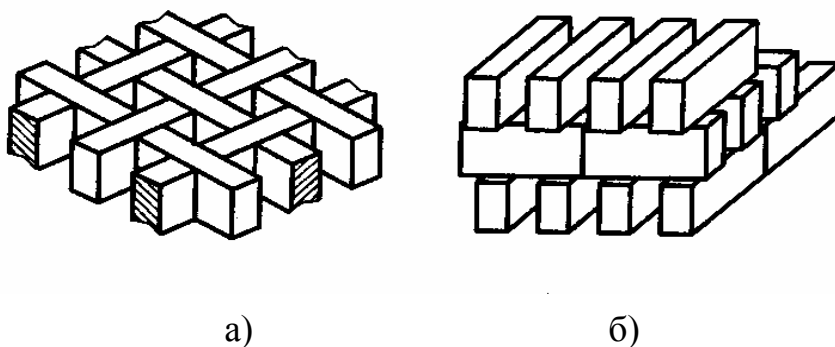


Рис. 13. Регенеративные насадки из кирпича типа Каупер (а) и типа Сименс (б)

Специальный вид насадки из фасонных огнеупорных блоков для доменных воздухонагревателей имеет удельную поверхность $35-40 m^2/m^3$.

За последние 20 лет получили распространение малогабаритные регенераторы с шариковой насадкой. Корундовые шарики с содержанием $Al_2O_3 = 98\%$ имеют высокую огнеупорность и термостойкость. Засыпка

шариков диаметром 20 мм имеет удельную поверхность $\sim 200 \text{ м}^2/\text{м}^3$, т.е. на порядок выше, чем насадка из кирпичей.

Шариковые регенераторы применяют в плавильных и нагревательных печах. В нагревательных колодцах с отоплением из центра подины одного из металлургических комбинатов Украины керамические трубчатые рекуператоры были заменены компактными шариковыми регенераторами, при этом температура подогрева воздуха возросла с $600 \text{ }^\circ\text{C}$ до $1100\text{--}1150 \text{ }^\circ\text{C}$, а расход топлива снизился на 30%.

7. ОГНЕУПОРНЫЕ И ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Огнеупорные изделия применяют для строительства рабочего пространства и других элементов печей, работающих в условиях высоких температур и воздействия агрессивных сред – расплавов, окалины, газов. Чтобы уменьшить потери теплоты, футеровку печи по толщине делают, как правило, комбинированной: рабочий слой выполняют из огнеупорных, наружный слой – из теплоизоляционных изделий.

Различают формованные огнеупорные изделия в виде кирпичей, блоков, панелей и неформованные: порошки, набивные массы, смеси для изготовления огнеупорного бетона.

7.1. Виды огнеупорных изделий для строительства печей и их свойства

Огнеупорность определяется как температура $T_{\text{огн}}$, при которой происходит деформация стандартного образца в форме усеченной пирамиды при отсутствии механического и физико-химического воздействия. Огнеупорные изделия подразделяют на три группы: средней огнеупорности – $T_{\text{огн}}$ до $1720 \text{ }^\circ\text{C}$; высокой огнеупорности $T_{\text{огн}}$ от $1720 \text{ }^\circ\text{C}$ до $2000 \text{ }^\circ\text{C}$, высшей огнеупорности – $T_{\text{огн}}$ – выше $2000 \text{ }^\circ\text{C}$. Предельная рабочая температура службы огнеупоров в условиях эксплуатации $T_{\text{раб}}^{\text{max}}$ значительно ниже, чем $T_{\text{огн}}$.

В таблице 4 приведены свойства наиболее широко используемых печных огнеупоров. Все огнеупоры характеризуются такими важными эксплуатационными показателями, как термостойкость, шлакоустойчи-

Таблица 4 – Свойства огнеупоров, наиболее широко используемых в печах

| | Группа огнеупоров | Главные химические компоненты в % массы | $T_{\text{огн}},$ °C | $T_{\text{раб}}^{\text{max}},$ °C | Плотность, $\rho,$ т/м ³ | Теплопроводность, $\lambda,$ Вт/(м·К) | Удельная теплоемкость, $c,$ кДж/(кг·К) |
|----|--------------------------------|---|-------------------------|--------------------------------------|---|---|---|
| 1 | Динасовые | $\text{SiO}_2 \geq 93$ | 1690-1720 | 1650-1700 | 1,84-1,97 | $1,23 + 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot t$ | $0,84 + 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot t$ |
| 2 | Шамотные | $30 \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 45$ | 1580-1750 | 1200-1400 | 1,83-1,95 | $0,84 + 0,58 \cdot 10^{-3} \cdot t$ | $0,88 + 0,23 \cdot 10^{-3} \cdot t$ |
| 3 | Муллитовые | $62 \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 72$ | 1600-1800 | 1600-1650 | 2,34-2,52 | $1,12 + 0,44 \cdot 10^{-3} \cdot t$ | $0,84 + 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot t$ |
| 4 | Корундовые | $\text{Al}_2\text{O}_3 > 90$ | 1950-2000 | 1650-1800 | 2,89-3,12 | $2,1 + 0,02 \cdot 10^{-3} \cdot t$ | $0,79 + 0,42 \cdot 10^{-3} \cdot t$ |
| 5 | Смолодоломитовые | $50 < \text{MgO} < 85$ $10 < \text{CaO} < 45$ | 1800-1900 | 1300-1400 | 2,7-2,8 | $3,5 - 1,08 \cdot 10^{-3} \cdot t$ | $0,68 + 0,28 \cdot 10^{-3} \cdot t$ (1000-1900°C) |
| 6 | Периклазовые (магнезитовые) | $\text{MgO} \geq 85$ | 2200-2400 | 1650-1700 | 2,6-2,8 | $4,7 - 1,8 \cdot 10^{-3} \cdot t$ | $1,05 + 0,29 \cdot 10^{-3} \cdot t$ |
| 7 | Периклазохромитовые | $\text{MgO} \geq 60$ $5 \leq \text{Cr}_2\text{O}_3 \leq 20$ | 2000 | 1650-1700 | 2,95-3,04 | $2,58 - 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot t$ | $0,67 + 0,48 \cdot 10^{-3} \cdot t +$ $+ 2,83 \cdot 10^3 \cdot t^{-2}$ |
| 8 | Хромитопериклазовые | $40 \leq \text{MgO} \leq 60$ $15 < \text{Cr}_2\text{O}_3 < 35$ | 1920-2000 | 1700 | 2,9-3,15 | $2,04 - 0,38 \cdot 10^{-3} \cdot t$ | $1,8 \div 1,15$ (20-1000°C) |
| 9 | Цирконовые | $\text{ZrO}_2 > 50,$ $\text{SiO}_2 > 25$ | 2000-2300 | 1900-2000 | 3,48-3,83 | $1,3 + 0,64 \cdot 10^{-3} \cdot t$ | $0,63 + 0,13 \cdot 10^{-3} \cdot t$ |
| 10 | Карбидкремниевые | $\text{SiC} > 70$ | 2000 | 1800-2000 | 2,35-2,54 | $32,6 - 0,14 \cdot 10^{-3} \cdot t$ | $0,96 + 0,15 \cdot 10^{-3} \cdot t$ |

вость, строительная прочность, изменение объема при нагреве, которые определяют их применение для строительства элементов печей.

Термостойкостью называют способность огнеупоров выдерживать циклическое изменение температур при нагреве и охлаждении, так называемые теплосмены. Термостойкость характеризуют числом теплосмен до потери 20% первоначальной массы огнеупора в результате образования трещин и скалывания.

Шлакоустойчивость характеризует способность огнеупора выдерживать воздействие жидкого шлака и металла, окислы, газов.

Рассмотрим характеристики и область применения некоторых печных огнеупоров.

Динас содержит более 93% SiO_2 и относится к кремнеземистым, кислым огнеупорам. Обладает высокой строительной прочностью, высокой температурой начала деформации под нагрузкой и соответственно рабочей температурой службы 1650–1700 °С. Устойчив к воздействию кислых расплавов и газовых сред, но не выдерживает контакта с основными расплавами металлов и их оксидов. Термостойкость динаса по стандартной методике не превышает 1-2 водяных теплосмен. Однако, если колебания температуры происходят в области значений выше 300 °С и особенно выше 600 °С, то термостойкость динаса исключительно высока.

Динас широко применяют для изготовления высокотемпературной части насадки доменных воздухонагревателей и регенераторов нагревательных колодцев, которая не охлаждается ниже 600 °С, для кладки распорных сводов.

Шамот относится к алюмосиликатным огнеупорам, содержащим кроме SiO_2 до 45% Al_2O_3 . Обладает более высокой термостойкостью (10-20 водяных теплосмен), но низкой шлакоустойчивостью. Наиболее широко применяется в печестроении при температурах до 1350 °С для строительства стен, сводов, не контактирующих с оксидами металлов, для низкотемпературной части регенеративной насадки. Не выдерживает истирающего действия при высоких температурах.

Муллит и корунд относятся к высокоглиноземистым алюмосиликатным огнеупорам. По мере увеличения содержания Al_2O_3 повышается их

рабочая температура службы, прочность и постоянство объема при разогреве. Термостойкость превышает 150 водяных теплосмен. Применяются вместо шамота в условиях более высоких температур: муллит – до 1650 °С, корунд – до 1800 °С. Плавленые корундовые изделия обладают высокой шлакоустойчивостью и выдерживают давление и истирающее действие металла и шихты. Применяются в установках внепечной обработки стали, в монолитных подинах методических нагревательных печей, в качестве насадки шариковых регенераторов.

Периклаз (или магнезит) содержит не менее 85% MgO. Температура начала размягчения под нагрузкой значительно ниже огнеупорности. Максимальная рабочая температура 1700 °С. Термостойкость изделий невысока и составляет 1-2 водяных теплосмены.

Шлакоустойчивость по отношению к основным расплавам – металлам и шлакам, богатым оксидами металлов и известью, исключительно высока. Поэтому магнезитовые кирпичи используются для кладки элементов печей черной и цветной металлургии, которые контактируют с расплавами металлов и основных шлаков. Магнезитовый порошок используют для заполнения швов при кладке подин плавильных печей.

Периклазохромитовые и хромитопериклазовые огнеупоры содержат в качестве основы MgO и хромит Cr₂O₃. Свойства этих огнеупоров существенно отличаются от периклазовых и зависят от соотношения хромита и магнезита. Максимальная термостойкость соответствует отношению Cr₂O₃:MgO = 30:70. Шлакоустойчивость выше при содержании хромита 20%. В сводах сталеплавильных печей наибольшую стойкость имеют изделия с содержанием хромита 20-30%. Они изнашиваются из-за образования трещин и сколов, к которым приводят термические напряжения, возникающие при колебании температуры в рабочем пространстве печи.

Смолодоломитовые безобжиговые огнеупоры содержат в качестве основы MgO и CaO, а также углерод в виде смоляной связки в количестве 2-4%. Они применяются для футеровки конвертеров. Известь CaO взаимодействует с силикатами конвертерного шлака, благодаря чему на поверхности футеровки образуется гарниссаж, препятствующий проникновению шлака в футеровку.

Углеродистые огнеупоры изготавливаются из доступного сырья – графита, кокса – с высокой температурой плавления ≥ 3500 °С. Они не смачиваются расплавами и поэтому устойчивы против них, имеют высокую термостойкость, но начинают окисляться в продуктах горения топлива при температуре ≥ 600 °С. Поэтому их используют для службы в восстановительной среде: в электрических печах для производства ферросплавов, алюминия, свинца, в лещади доменных печей, в качестве припаса для разливки металлов, для изготовления электродов дуговых плавильных печей.

Карбидкремниевые огнеупоры содержат в качестве главного компонента SiC – карборунд. Они покрыты защитной плёнкой SiO₂, поэтому не окисляются как углеродистые. Имеют высокую прочность, износостойчивость, термостойкость. Устойчивы против нейтральных и кислых расплавов, нестойки против основных. Применяются для изготовления трубок керамических рекуператоров, огнеупорных муфелей.

Неформованные огнеупоры применяют для изготовления монолитных футеровок из огнеупорного бетона и набивных масс. Огнеупорный бетон представляет собой смесь огнеупорного наполнителя (бой огнеупорных изделий) с размером частиц от 0,5 до 70 мм, вяжущего и добавок. В качестве вяжущего используют твердеющие в холодном состоянии огнеупорные цементы (глиноземистый, магнезиальный), жидкое стекло, фосфатные связки на основе ортофосфорной кислоты H₃PO₄. Добавки могут регулировать скорость схватывания и твердения, улучшать пластические свойства, уменьшать усадку.

Широко распространены динасовые бетонные блоки и панели для стен нагревательных колодцев, глинистокварцитовые массы для набивной футеровки ковшей. Применяют монолитную футеровку стен и сводов нагревательных печей из жидкого (литого) бетона с креплением её к металлическому каркасу печи с помощью анкерных кирпичей, распределенных по площади стен и свода.

Защитные гарниссажи образуются на рабочей поверхности ограждения плавильных, шахтных и дуговых печей из спекающихся или расплавленных материалов при интенсивном охлаждении стен печи водой или

воздухом. В плавильных печах цветной металлургии гарниссаж является эффективным средством защиты, а иногда и замены футеровки.

7.2. Теплоизоляционные материалы, применяемые в печестроении

Для тепловой изоляции металлургических печей применяются два вида изделий: 1) легковесные пористые огнеупорные кирпичи: шамот-легковес, динас-легковес, диатомитовый и другие; 2) изделия в виде плит, ваты, войлока, картона, изготовленные на основе керамического волокна в смеси со связующим материалом, так называемые волокнистые огнеупоры.

Легковесные огнеупорные кирпичи обладают большой пористостью и поэтому меньшей плотностью и теплопроводностью, чем обычные огнеупорные кирпичи (табл. 5). Марка кирпича в табл. 5 расшифровывается так: Д – динас, Ш – шамот, Л – легковес, числа после тире означают плотность. Чем меньше плотность кирпича, тем лучше его теплоизоляционные свойства, но ниже максимальная рабочая температура.

Таблица 5 – Свойства легковесных огнеупорных изделий

| № пп | Тип и марка изделия | Плот- ность, ρ , т/м ³ | $T_{\text{раб}}^{\text{max}}$, °С | Теплопровод- ность, λ , Вт/(м·К) | Теплоем- кость c , кДж/(кг·К) в интервале 0-1400 °С |
|---------|------------------------|--|---------------------------------------|---|---|
| 1 | Динас ДЛ-1,2 | 1,2 | 1500 | $0,58+0,38 \cdot 10^{-3} \cdot t$ | 1,19 |
| 2 | Шамот ШЛ-1,3 | 1,3 | 1350 | $0,47+0,14 \cdot 10^{-3} \cdot t$ | 1,19 |
| 3 | ШЛ-0,9 | 0,9 | 1200 | $0,29+0,20 \cdot 10^{-3} \cdot t$ | 1,17 |
| 4 | ШЛ-0,4 | 0,4 | 1100 | $0,06+0,14 \cdot 10^{-3} \cdot t$ | 1,17 |
| 5 | Диатомитовый кирпич | 0,5 | 1000 | 0,15 (при $t=350$ °С) | 1,0 |

По сравнению с обычными огнеупорами шамот-легковес и другие легковесы имеют более низкую прочность, шлакоустойчивость и термостойкость. Их можно применять не только для теплоизоляционного слоя футеровки, но и для рабочего слоя, в термических печах. Диатомитовый

кирпич применяют только для наружного слоя тепловой изоляции стен и свода нагревательных печей.

В таблице 6 представлены некоторые виды волокнистых огнеупорных изделий и их свойства. Волокнистые плиты, как и шамот-легковес, применяют для изготовления не только изоляционного, но и рабочего слоя футеровки термических печей с целью снижения потерь теплоты в рабочем пространстве печи. При этом уменьшаются два вида потерь: на аккумуляцию теплоты футеровкой и теплопроводностью через футеровку в окружающую среду.

Таблица 6 – Виды волокнистых огнеупорных изделий Северского огнеупорного завода (Донецкая область)

| № пп | Тип и марка изделия | Тол- щина, мм | Плот- ность, ρ , т/м ³ | $T_{\text{раб}}^{\text{max}}$, °С | Теплопро- водность, λ , Вт/(м·К) при 600 °С | Теплоем- кость, с, кДж/(кг·К) |
|---------|------------------------|---------------------|--|---------------------------------------|--|-------------------------------------|
| 1 | Плита ШПГТ-450 | 100 | 0,45 | 1300 | 0,2 | 1,0 |
| 2 | Вата МКРР-130 | 15;20 | 0,13 | 1250 | 0,22 | 1,0 |
| 3 | Войлок МКРВЦ-150 | 15;20 | 0,15 | 1400 | 0,14 | 1,0 |
| 4 | Фетр МКРВЦФ-130 | 15;20 | 0,13 | 1400 | 0,18 | 1,0 |

С технологией изготовления огнеупорных и теплоизоляционных изделий можно познакомиться по учебному пособию [4].

8. НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Плавильные и обжиговые печи, в которых происходят процессы обжига окатышей, спекания агломерата, производства чугуна, стали, цветных металлов, являются не только тепловыми, но и технологическими агрегатами. Поэтому конструкции доменных, мартеновских, двухванных печей, сталеплавильных конвертеров, электродуговых и руднотермических элек-

тропечей, а также плавильных печей цветной металлургии, изучаются в технологических частях дисциплины «Теория и технология производства и обработки стали» в комплексе с описанием технологии. С конструкциями и работой этих печей можно ознакомиться по учебным пособиям [4, 9].

Нагревательные печи, в которых происходит нагрев металла перед обработкой давлением, являются чисто тепловыми агрегатами, выполняющими подготовительную функцию. Технологические процессы прокатки,ковки,штамповки происходят вне печи, после выдачи из неё нагретого металла. Поэтому технологи имеют к нагревательным печам косвенное отношение.

В связи с этим в настоящем разделе рассматриваются конструкции нагревательных печей прокатного производства.

Печи обжимных станов. Для нагрева стальных слитков перед прокаткой на блюмингах и слябингах служат камерные садочные печи циклического действия, которые называют **нагревательными колодцами**. Их рабочее пространство в форме куба или прямоугольника сверху закрывается футерованной огнеупором крышкой. Во время нагрева крышка закрывает колодец сверху, т.е. служит сводом. При посадке и выдаче слитков специальная машина поднимает крышку и сдвигает её в сторону. Слитки с помощью клещевого крана устанавливаются на подину в вертикальном положении. Садка общей массой 100-200 т состоит из 8-16 слитков.

Отделение нагревательных колодцев, обслуживающее крупный обжимной стан, насчитывает несколько десятков нагревательных колодцев. Производительность одного колодца зависит от температуры слитков при посадке и составляет в среднем 100-150 тысяч тонн в год. Максимальная тепловая мощность одного колодца равна 5-10 МВт. Удельный расход топлива в зависимости от условий эксплуатации изменяется в пределах 20-40 кг.усл.т. на тонну. Слитки поступают в отделение колодцев из сталеплавильных цехов, как правило, в горячем состоянии, с температурой на поверхности слитка более 800 °С. Энергосберегающая технология предусматривает посадку в колодец слитков с жидкой сердцевиной. Среднемассовая температура нагрева слитков составляет 1200–1300 °С в зависимости от марки стали, при этом перепад температуры по сечению слитка не должен превышать 50 °С.

В данном параграфе мы познакомимся с двумя конструкциями нагревательных колодцев.

При прокатке трещиностойких сталей (например, быстрорежущей) на блюмингах небольшой производительности нагрев слитков производят с холодного состояния в методических печах, конструкция которых рассмотрена в следующем параграфе.

Рекуперативный колодец с одной верхней горелкой (рис. 14) имеет длину рабочего пространства 8-10 м, высоту 4 м, ширину 2,5-3,0 м. Слитки устанавливают в 2 ряда по длине колодца.

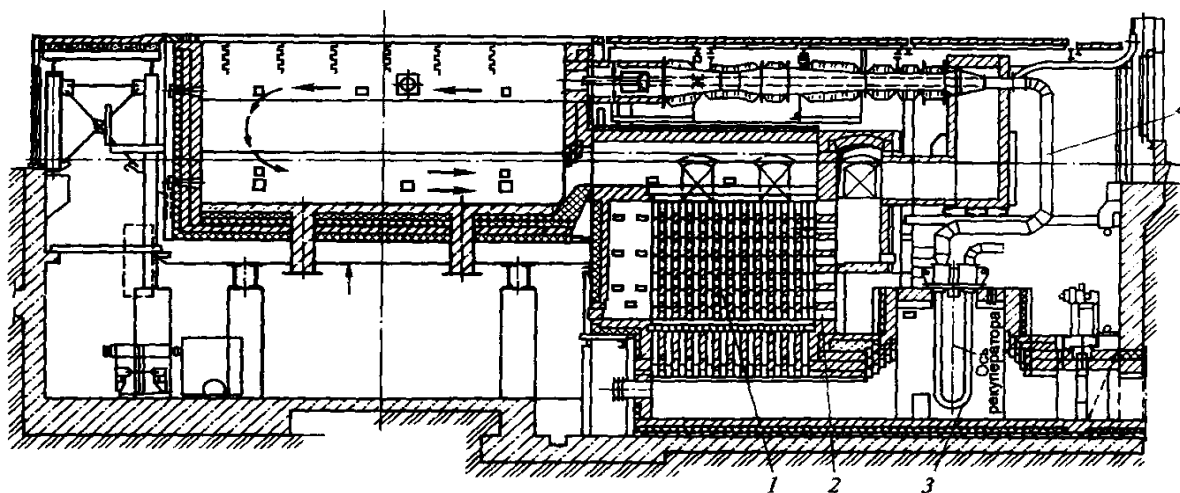


Рис. 14. Рекуперативный нагревательный колодец с одной верхней горелкой: 1 – керамический рекуператор; 2 – каналы для входа холодного воздуха; 3 – металлический рекуператор для нагрева сжатого воздуха; 4 – подвод сжатого воздуха в инжектор

В одной торцевой стене расположены два отверстия: вверху – для горелки, внизу – для отвода дымовых газов в керамический трубчатый рекуператор, в котором нагревается воздух, идущий в горелку. Побудителем движения воздуха из атмосферы цеха к горелке является инжектирующая струя сжатого воздуха, который предварительно нагревается в металлическом петлевом рекуператоре, расположенном за керамическим по ходу движения дыма. Расход сжатого воздуха, подаваемого в инжектор под дав-

лением 1,2-1,5 атм., составляет примерно 10% от инжектируемого атмосферного воздуха.

Факельное горение газообразного топлива происходит в верхней части камеры колодца в процессе перемешивания и совместного движения газа с воздухом от горелочного торца к глухой торцовой стене. Затем дымовые газы по нижней части камеры перемещаются к дымовому окну.

Все слитки, посаженные в колодец, должны быть нагреты и выданы в прокат одновременно. Для выравнивания температуры нагрева слитков по высоте и по длине камеры необходима выдержка при постоянной температуре печи, значение которой не должно превышать температуру плавления окалины 1340-1350°C. Оплавление окалины приводит к повышенной потере металла от окисления и увеличивает количество шлака на подине колодца. Кроме того, становится вероятным перегрев и пережог металла.

Перегревом называют явление чрезмерного роста зёрен металла при длительном пребывании его в области температур выше 1300 °С. При обжати перегретого слитка в валках металл разрушается с образованием рванин и трещин вследствие уменьшения пластичности и прочности. Перегрев исправляют путем охлаждения и повторного подогрева слитков.

Пережог – высшая степень перегрева, при которой происходит окисление металла по границам зерен с окончательной потерей пластичности и прочности. Пережог металла в печи – это неисправимый вид брака.

Режим нагрева слитков горячего посада и низкоуглеродистых марок стали холодного посада состоит из двух стадий: повышения температуры в колодце при максимальном расходе топлива и выдержки при постоянной температуре печи.

Для ускоренного выравнивания температуры в объеме камеры и сокращения за счет этого времени нагрева всей садки слитков до заданной температуры разработано несколько способов [5]. Один из них предусматривает качание газового сопла горелки в вертикальной плоскости, в результате которого факел периодически перемещается по высоте камеры, как изображено на рис. 15, и температура газов по объему печи становится более равномерной.

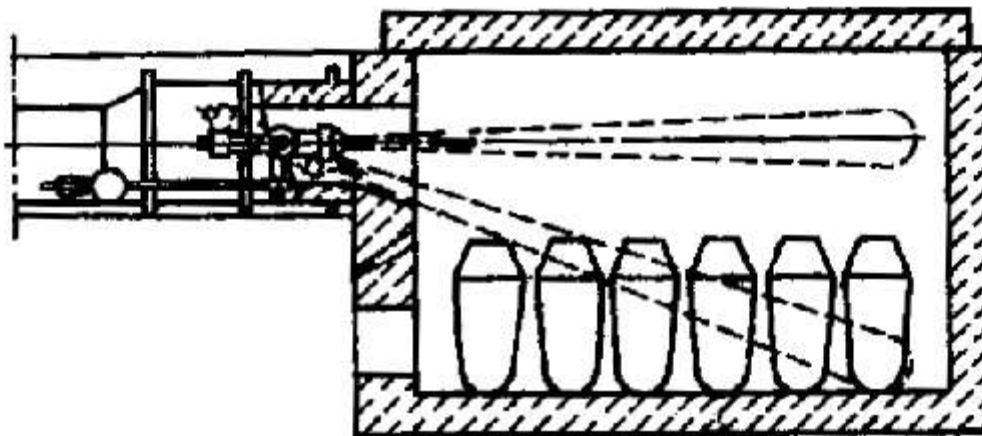


Рис. 15. Схема нагревательного колодца с качающимся факелом

Регенеративный колодец с отоплением из центра подины имеет почти одинаковую длину и ширину камеры 4,5-5,0 м и высоту 3,0-3,5 м. Схема колодца представлена на рис. 16. В центре подины установлена труба с соплом для подачи газообразного топлива, вокруг которой расположена футерованная огнеупором горловина, разделенная герметичной перегородкой на две равные части. Колодец имеет два шариковых компактных регенератора для нагрева воздуха и один дымовоздушный клапан, с помощью которого происходит переключение регенераторов с дыма на воздух и с воздуха на дым.

Каждая из двух частей горловины соединена с помощью огнеупорных каналов с одним из двух регенераторов. В течение 3-5 минут между перекидками клапана шариковая насадка одного регенератора нагревается дымом, идущим из камеры колодца, при этом дым охлаждается в регенераторе от 1300 °С до 200 °С; в это время через насадку второго регенератора проходит воздух, который нагревается до 1100 °С и подается в горловину горелки. После перекидки клапана потоки дыма и воздуха меняются местами.

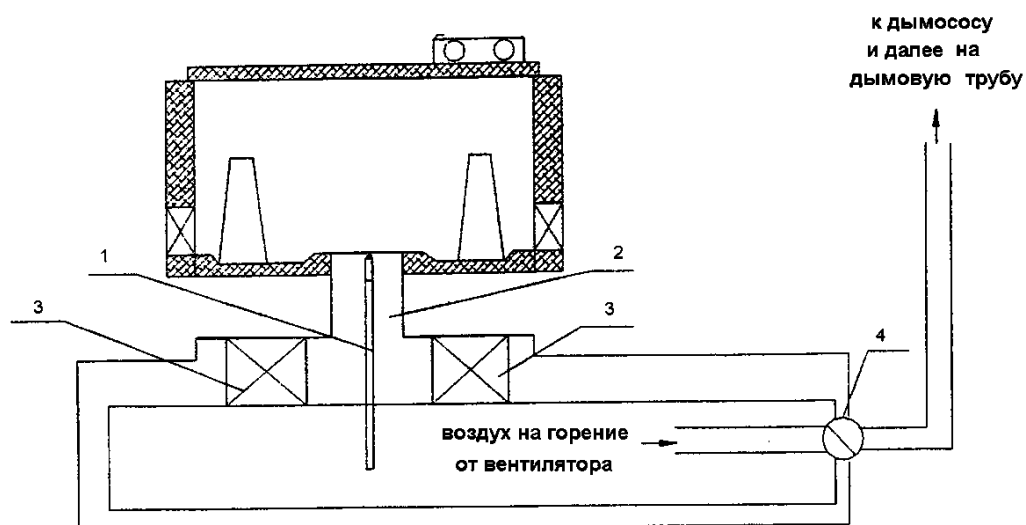


Рис. 16. Схема регенеративного нагревательного колодца с отоплением из центра подины: 1 – газоподающая труба с соплом; 2 – горловина; 3 – регенераторы; 4 – дымовоздушный перекидной клапан

В связи с более глубокой утилизацией теплоты дымовых газов удельный расход топлива в этих колодцах ниже, чем в рекуперативных.

Печи листовых и сортовых станов. Для нагрева заготовок на этих станах применяют печи непрерывного действия, которые называют методическими. Методическая печь по смыслу означает печь постепенного (методичного) нагрева заготовок.

Рабочее пространство методической печи, как правило, представляет собой параллелепипед, длина которого значительно больше ширины и высоты. Общим для всех методических печей является поперечное расположение заготовок и наличие окон для их посадки и выдачи, расположенных в противоположных концах длины печи. Заготовки проходят через печь от окна посадки до окна выдачи, поэтому такие печи называют проходными.

В зависимости от толщины нагреваемых заготовок различают печи:

- с **односторонним (верхним) отоплением**, когда сжигание топлива происходит над заготовками, которые располагаются на монолитной огнеупорной подине; такие печи применяют для нагрева тонких заготовок толщиной до 120 мм на мелкосортных и проволочных станах;

- с двухсторонним (верхним и нижним) отоплением, когда топливо сжигают над и под заготовками, которые в этом случае располагаются на продольных водоохлаждаемых опорных трубах, покрытых тепловой изоляцией; такие печи применяют для нагрева заготовок толщиной более 120 мм.

По способу передвижения заготовок вдоль печи различают толкательные печи, печи с шагающим подом (ПШП) и с шагающими балками (ПШБ).

В толкательных печах заготовки располагаются вплотную друг к другу. Посад и выдача очередных заготовок происходит синхронно, при этом толкатель перемещает всю массу заготовок, находящихся в печи. Это наиболее старые печи, с более низким уровнем механизации, чем ПШП и ПШБ.

ПШП и ПШБ имеют одинаковый механизм перемещения заготовок вдоль печи, но печь с шагающим подом имеет одностороннее отопление, а печь с шагающими балками – двухстороннее. Поэтому ПШБ применяют для нагрева массивных заготовок на крупносортовых и толстолистовых станах.

Подина ПШП по всей длине печи состоит из чередующихся между собой подвижных и неподвижных балок, футерованных огнеупорными материалами. Зазоры между балками уплотняются с помощью гидрозатворов (рис. 17). Подвижные балки в стационарном положении находятся на более низкой отметке, чем неподвижные. Поэтому заготовки опираются на неподвижные балки. Для перемещения заготовок по направлению к окну выдачи на один шаг подвижные балки последовательно совершают движение вверх и поднимают заготовки выше уровня неподвижных балок, затем следует горизонтальное перемещение вдоль печи на 200 - 300 мм, движение вниз и назад в исходное стационарное положение.

В ПШБ опорой для заготовок служат чередующиеся между собой водоохлаждаемые подвижные и неподвижные трубы П-образной формы, которые называют балками. Цикл движения неподвижных балок в ПШБ и в ПШП одинаков.

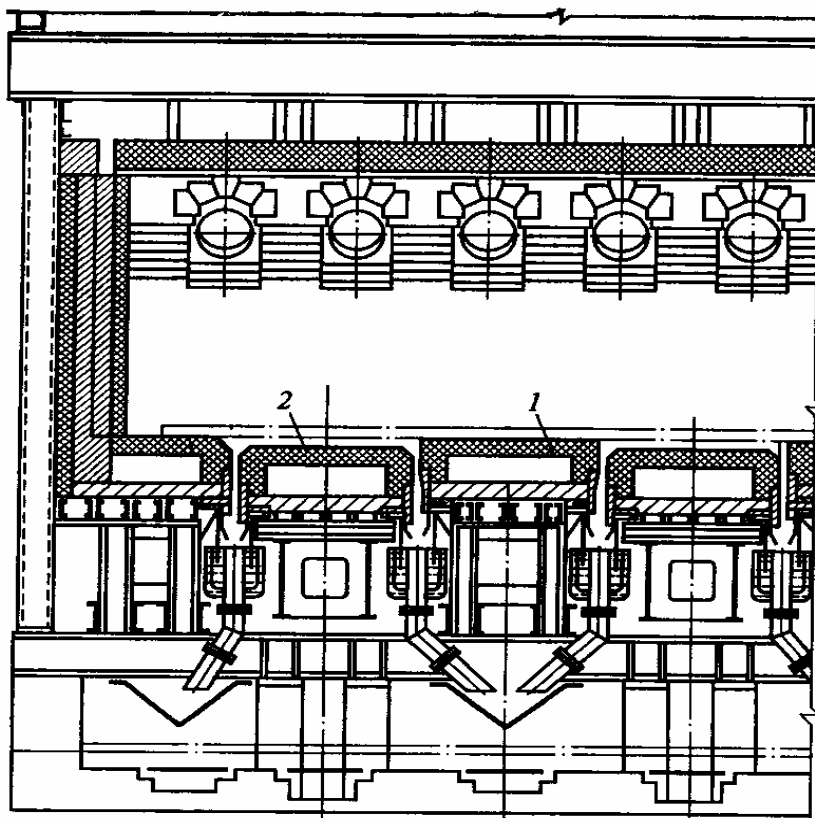


Рис. 17. Поперечный разрез печи с шагающим подом: 1 – неподвижные балки; 2 – подвижные балки

Горелки методических печей могут устанавливаться в торцовых, боковых стенах и на своде печи. В зависимости от этого различают печи с торцовым, боковым или сводовым отоплением.

Для управления режимом нагрева методическая печь по длине разделяется на зоны, в каждой из которых можно автоматически регулировать расход топлива и температуру. Заготовки движутся навстречу потоку продуктов сгорания, т.е. в противотоке, последовательно проходя одну зону за другой. Первая по ходу движения металла зона называется подогревательная или методическая. В ней, как правило, нет горелок. Продукты полного горения топлива, пришедшие из других, отапливаемых зон печи, в подогревательной зоне отдают металлу физическую теплоту, охлаждаясь обычно до температуры 800–1000 °С на выходе из печи, и направляются в металлический рекуператор для нагрева воздуха. Следующая зона называется традиционно сварочной. В печи может быть несколько последовательных

сварочных зон, как верхних, так и нижних. В толкательных печах с двухсторонним отоплением участок последней по ходу металла верхней сварочной зоны выполняют с монолитным подом с целью выравнивания температурного поля заготовки. Иногда этот участок выделяют в отдельную зону, температура в которой ниже, чем в сварочной зоне. Это так называемая томильная зона (или зона выдержки).

Необходимость выравнивания температуры по массе заготовки перед выдачей из толкательной печи вызвана тем, что на нижней поверхности заготовки в местах контакта с водоохлаждаемыми опорными трубами остаются непрогретые участки (темные пятна).

Печи с шагающими балками не имеют томильной зоны с монолитным огнеупорным подом. В этой зоне нет необходимости, поскольку заготовки опираются не на холодные трубы, а на горячие массивные жаропрочные башмаки (рейтеры), надетые на трубы сверху.

В ПШП и ПШБ, в отличие от толкательных печей, заготовки расположены не вплотную друг к другу, а на определенном расстоянии. Зазор между соседними заготовками обычно равен ширине заготовки или несколько больше. Поэтому боковые грани заготовок тоже получают тепловой поток от печных газов и футеровки. В связи с этим скорость нагрева заготовок квадратного сечения в ПШП и ПШБ больше, чем в толкательных печах.

На рис. 18 показан характерный температурный режим печей с двумя температурными зонами – методической и сварочной, с тремя зонами – методической, сварочной и томильной, а также четырехзонный температурный режим, реализуемый при наличии 2-х сварочных зон. Температура нагрева металла, т.е. конечная температура поверхности заготовок, обычно равна 1150–1250 °С, а перепад температур по поперечному сечению заготовки не превышает 30–40 °С.

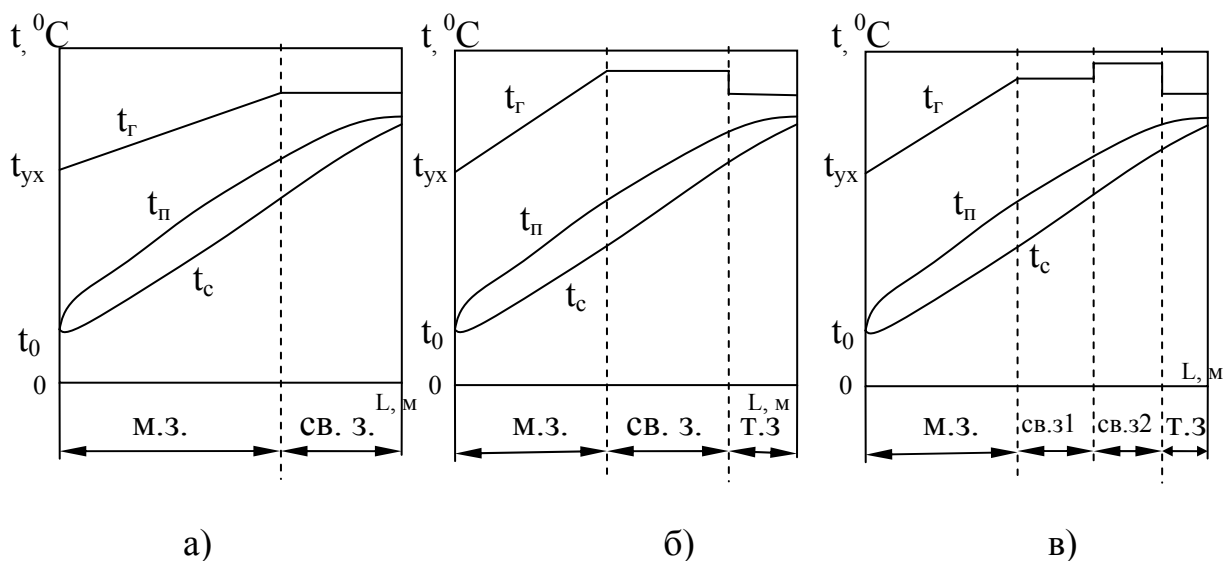


Рис. 18. Температурный режим методических печей:

а) двухзонный режим; б) трехзонный режим; в) многозонный режим; t_0 – начальная температура заготовки; $t_п$ – температура поверхности заготовки; t_c – температура середины заготовки; t_r – температура дымовых газов; t_{yx} – температура уходящего дыма; м.з. – методическая зона; св.з. – сварочная зона; т.з. – томильная зона; L – длина печи

На рис. 19 показана печь с шагающими балками толстолистого стана с верхним торцовым отоплением и с комбинированным отоплением нижних зон – с торцовыми и с боковыми горелками. Торцовые горелки расположены равномерно по ширине печи между зонами, в пережимах свода, и в торцовых стенах печи со стороны выдачи заготовок.

В цветной металлургии нагрев перед обработкой давлением применяется в большинстве случаев для слитков и заготовок из меди, алюминия и сплавов на их основе. Чаще всего для этой цели используют двухзонные методические печи с одно- и двухсторонним отоплением, конструкция которых не отличается от печей черной металлургии.

Температура нагрева металла в методических печах цветной металлургии обычно не превышает 850–900 °С. Печи отапливают природным газом с помощью двухпроводных горелок. Воздух для горения нагревается до 250–300 °С в металлическом рекуператоре.

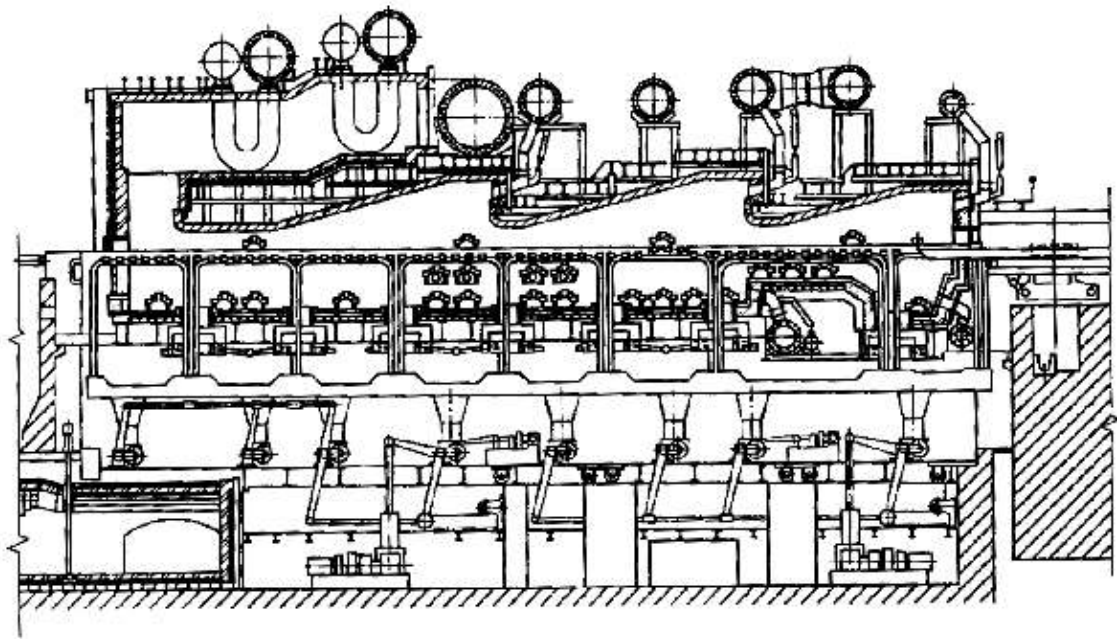
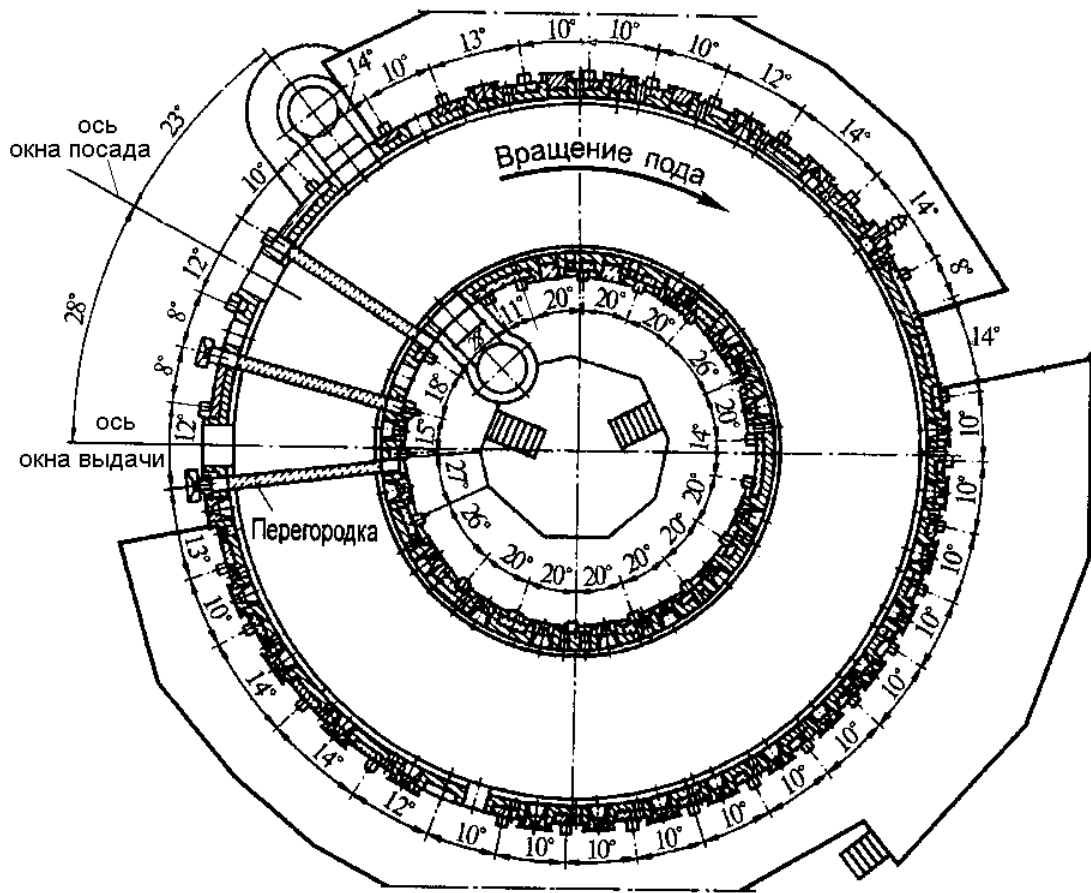


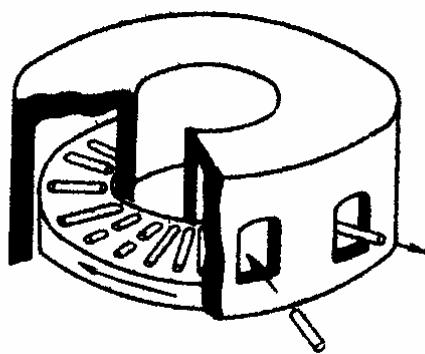
Рис. 19. Печь с шагающими балками

Цветные металлы отличаются повышенной склонностью к окислению, поэтому в составе печных газов не должно быть избыточного кислорода.

Печи трубoproкатных станов. Современные трубoproкатные и колесоoproкатные станы оборудованы кольцевыми печами с вращающимся подом, подобным карусели (рис. 20). Эти механизированные печи лучше других приспособлены для нагрева цилиндрических и фасонных заготовок. Кольцевая печь по существу аналогична методической печи с односторонним нагревом, но её рабочее пространство имеет форму кольца, а заготовки транспортируют от окна посадки до окна выдачи с помощью вращающегося пода, футерованного огнеупорными материалами. Угол между осями окон посадки и выдачи обычно равен 28 градусам. Заготовки сажают и выдают напольными машинами в моменты прекращения вращения пода. За время одного оборота пода на угол $360 - 28 = 332$ градуса заготовки проходят последовательно все температурные зоны: подогревательную, сварочные, томильную, - и нагреваются до заданной температуры 1150–1200 °С. Трубные заготовки укладывают на поду в радиальном направлении с зазо-



а)



б)

Рис. 20. Кольцевая печь: а – горизонтальный разрез печи; б – схема перемещения металла

рами, соответствующими углу поворота пода на 10-12 градусов, что обеспечивает всесторонний равномерный нагрев металла по периметру и по длине заготовок.

Газовые или газо-мазутные горелки установлены в двух неподвижных боковых стенах – наружной и внутренней, а иногда в своде. Зазоры между неподвижными стенами и вращающимся подом перекрыты кольцевыми гидравлическими затворами. Дымовые газы движутся по кольцевому рабочему пространству навстречу вращающемуся поду, в противотоке с заготовками, затем удаляются из печи через дымоотводящие каналы в районе окна посада и направляются в металлический рекуператор.

Окна посада и выдачи отделены друг от друга и от смежных с ними зон подвесными перегородками (см. рис. 20,а), которые служат для уменьшения перетока дыма из горячей томильной зоны, со стороны окна выдачи, в более холодную подогревательную зону, где расположены дымоотводящие каналы.

Наружный диаметр кольцевой печи обычно не превышает 30 м, а ширина пода 6 м. У стана располагают одну или две кольцевых печи. Для оценки продолжительности нагрева металла в разных печах прокатного производства введен показатель **удельной продолжительности нагрева Z** на 1 см толщины или диаметра заготовки, в мин/см:

$$Z = \frac{60 \cdot \tau}{100 \cdot d}, \text{ мин/см,}$$

где τ - время нагрева металла, в часах; d – диаметр или толщина заготовки, в метрах.

| | |
|--|-------------|
| Удельная продолжительность нагрева в различных печах составляет: | |
| методические толкательные печи | 7-9 мин/см; |
| ПШП и ПШБ при нагреве листовых заготовок | 7-9 мин/см; |
| ПШП и ПШБ при нагреве сортовых заготовок квадратного сечения | 5-6 мин/см; |
| кольцевые печи | 4-6 мин/см. |

На некоторых трубопрокатных станах цилиндрические заготовки нагреваются в секционных печах с роликовым подом. Для них характерна более высокая скорость нагрева ($Z = 2-3$ мин/см), но широкого распростране-

ния они пока не получили из-за повышенного угара металла и недостаточной стойкости водоохлаждаемых роликов.

В специальных случаях, при небольшой производительности, для нагрева металла перед прокаткой, ковкой, штамповкой применяют электрические печи сопротивления, а также индукционные проходные печи. Индукционные печи отличаются высокой скоростью нагрева. Их рабочее пространство может заполняться восстановительным или нейтральным газом, защищающим поверхность изделия от окисления и обезуглероживания. С этой же целью в рабочем пространстве таких печей создают вакуум.

Для нагрева слитков перед ковкой широко применяются топливные камерные печи с выкатным подом. С конструкцией таких печей, секционных печей с роликовым подом, а также с многообразными топливными и электрическими печами для термообработки сортового, листового проката и труб можно познакомиться по учебному пособию [4].

Методика и примеры теплового расчета металлургических печей различного назначения содержатся в учебных пособиях [1, 6, 7].

9. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЕЧЕЙ

Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в атмосфере промышленных предприятий в виде пыли и токсичных газов регламентируются государственными стандартами и основаны на санитарно-гигиенических нормах. Значения ПДК основных вредных веществ в приземном слое атмосферы так называемой рабочей зоны приведены в таблице 7.

Пыль представляет собой систему твердых частиц размером от 5 до 50 мкм. Задача очистки газов от пыли до уровня ПДК решается путем осаждения частиц пыли, содержащихся в потоке дымовых газов, в пылеулавливающих аппаратах.

Существуют механические и электрические методы пылеулавливания. Механические методы разделяются на сухие и мокрые. Для сухой механической очистки газов металлургических печей от пыли применяют осадительные камеры, инерционные пылеуловители, циклоны, тканевые фильтры, схемы которых изображены на рис. 21 и 22.

Таблица 7 –Значения ПДК основных вредных веществ

| № пп | Вещества | ПДК для рабочей зоны в мг/м ³ воздуха |
|------|--|--|
| 1 | Пыль нетоксичная | 15,0 |
| 2 | Диоксид азота NO ₂ | 2,0 |
| 3 | Оксид азота NO | 5,0 |
| 4 | Оксид углерода CO | 20,0 |
| 5 | Сернистый ангидрид SO ₂ | 10,0 |
| 6 | Сероводород H ₂ S | 10,0 |
| 7 | Бензапирен C ₂₀ H ₁₂ | 15·10 ⁻⁵ |

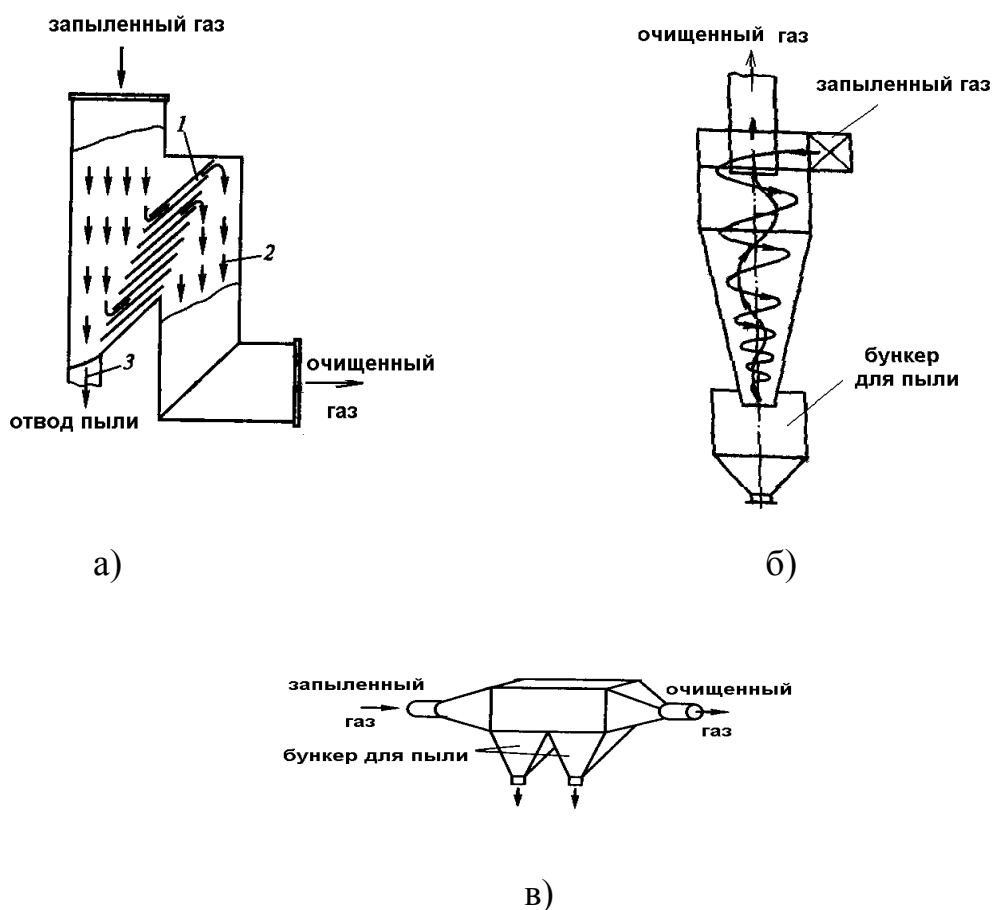


Рис. 21. Аппараты для сухой механической очистки газов: а) инерционный пылеуловитель; б) циклон; в) осадительная камера; 1 - перегородки; 2 – траектория газа

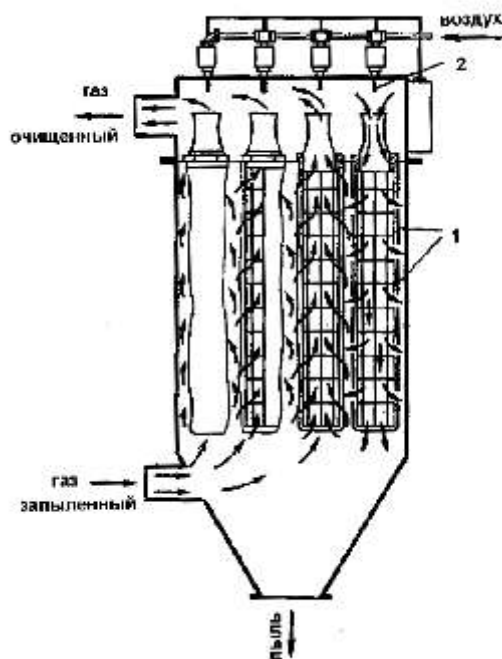


Рис. 22. Схема работы тканевого рукавного фильтра: 1 - рабочие рукава; 2 - подача воздуха для сдува пыли, прилипшей к рукавам

Принцип мокрой очистки газа основан на контакте запыленного потока с жидкостью. С помощью аппаратов мокрого типа решают комплексную задачу: охлаждение горячих газов, пылеулавливание и в некоторой степени очистку газов от вредных газообразных компонентов.

В металлургии широко применяют аппараты, в которых газы контактируют с каплями распыленной жидкости. Распыление жидкости производят с помощью форсунок (форсуночные оросительные скрубберы – рис. 23,а) или за счет энергии газового потока (скрубберы Вентури – рис. 23,б).

Электрическая очистка газов от пыли производится в электрофильтрах. Их применяют для второй, тонкой ступени очистки. Частицы пыли в потоке газа, который проходит между электродами в поле коронного разряда, заряжаются отрицательными ионами и осаждаются на поверхности осадительного электрода (рис. 24).

Подробно с работой пылеулавливающих аппаратов и со схемами очистки печных газов в черной и цветной металлургии можно познакомиться по учебному пособию [4].

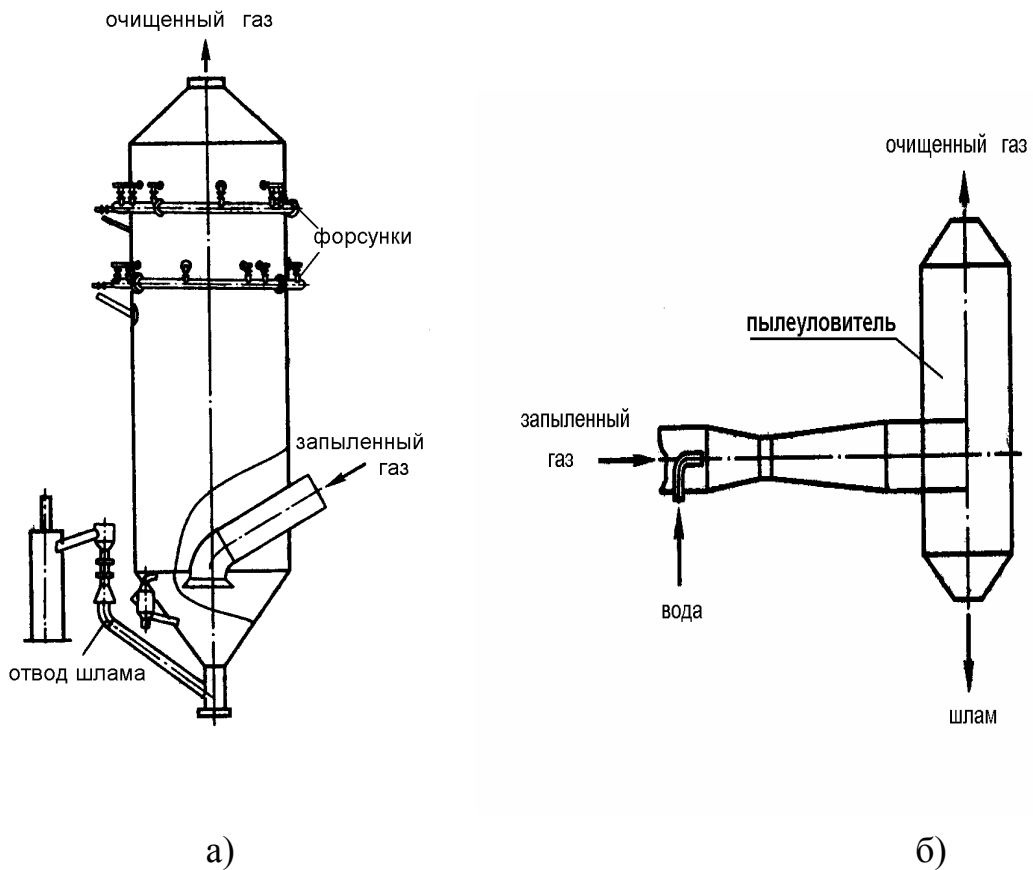


Рис. 23. Аппараты для мокрой очистки газов: а – форсуночный скруббер; б – труба Вентури с пылеуловителем

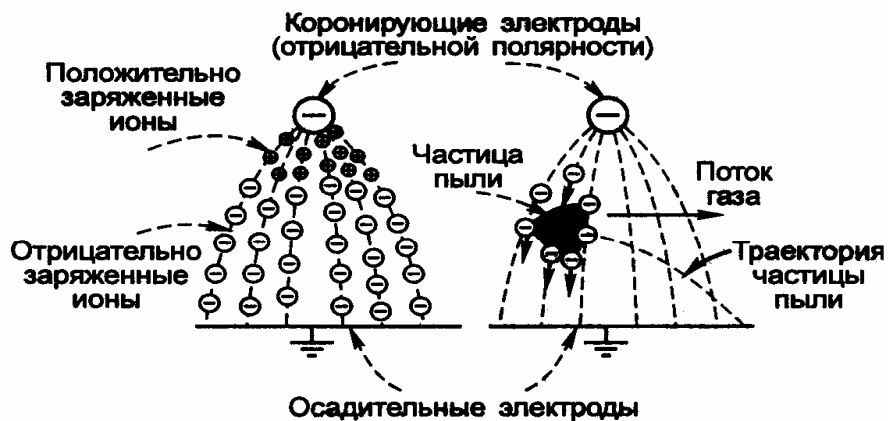


Рис. 24. Схема зарядки и осаждения пыли в электрофильтре

Для уменьшения выброса в атмосферу с печными газами вредных газообразных веществ – SO_2 , NO_x , CO и других – в металлургии в настоящее время применяются следующие методы:

- очистка топлива (коксового газа) от серы перед сжиганием или применение для отопления печей малосернистого мазута; использование печных газов, содержащих SO_2 , в сернокислотном производстве;

- полное сжигание топлива в печи с коэффициентом расхода воздуха $n > 1$, исключаяющее содержание в продуктах горения CO , C_mH_n , сажу;

- снижение излишне высокой температуры горения топлива в печи с целью уменьшения образования NO_x путем постепенного сжигания топлива в несколько стадий, путем применения рециркуляции продуктов горения, уменьшения теплоты сгорания топлива.

В настоящее время наиболее эффективным средством сокращения вредных выбросов в атмосферу является уменьшение затрат энергии на производство одной тонны металлургической продукции. Способы энергосбережения при эксплуатации печей рассмотрены нами в разделе 4.

В будущем будут строиться экологически нейтральные металлургические печи с полной тепловой и химической утилизацией уходящих газов на поверхности земли. В результате утилизации печных газов могут производиться полезные продукты: пар, горячая вода, смазочные материалы, минеральные удобрения – сульфат и нитрат аммония, химически чистый углекислый газ. Такие печи будут строиться без дымовых труб, поскольку отпадает необходимость выбрасывать дымовые газы в атмосферу. Технология строительства экологически нейтральных печей разработана [8] и продолжает совершенствоваться.

Литература

1. Расчеты нагревательных печей: Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е. Под ред. Н.Ю.Тайца. – Киев: "Техніка", 1969.
2. Семикин И.Д., Аверин С.И., Радченко И.И. Топливо и топливное хозяйство металлургических заводов: Учебное пособие для вузов – М.: "Металлургия", 1965. – 391 с.
3. Сожигательные устройства нагревательных и термических печей: Справочник. / Гусовский В.П., Лифшиц А.Е., Тымчак В.М. – М.: "Металлургия", 1981. – 272 с.

4. Теплотехника металлургического производства. Т. 2. Конструкция и работа печей: Учебное пособие для вузов / Кривандин В.А. и др. – М.: "МИСИС", 2001. – 736 с.
5. Губинский В.И., Лу Чжун-У. Теория пламенных печей. – М.: "Машиностроение", 1995. – 256 с.
6. Мастрюков Б.С. Расчеты металлургических печей. – М.: "Металлургия", 1986. – 376 с.
7. Теплотехнические расчеты металлургических печей: Учебник для студентов вузов. Изд. 3-е. / Гордон Я.М., Зобнин Б.Ф., Казяев М.Д. и др. – М.: "Металлургия", 1993. – 368 с.
8. Губинский В.И. и др. Разработка научных и технологических основ конструирования металлургических печей, работающих без выброса дымовых газов в атмосферу. Сборник научных трудов международной конференции "Черная металлургия России и СНГ в XXI веке", Т. 2. – М.: "Металлургия", 1994.–с.6-7.
9. Свинолобов Н.П., Бровкин В.Л. Печи черной металлургии: Учебное пособие для вузов. – Днепропетровск: Пороги, 2004. – 154 с.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 3 |
| 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПЕЧЕЙ..... | 4 |
| 1.1. Классификация печей по принципу теплогенерации..... | 4 |
| 1.2. Классификация печей по технологическому назначению и по режиму работы..... | 6 |
| 2. ТОПЛИВО И ЕГО СЖИГАНИЕ В ПЕЧАХ..... | 8 |
| 2.1. Теплота сгорания..... | 8 |
| 2.2. Основные виды топлива для металлургических печей. Условное топливо..... | 10 |
| 2.3. Полное и неполное горения топлива. Коэффициент расхода воздуха..... | 11 |
| 2.4. Температура горения топлива..... | 13 |
| 2.5. Расчеты горения топлива..... | 16 |
| 2.6. Условия воспламенения и взрываемости газообразного топлива..... | 20 |
| 2.7. Горелки для сжигания газа..... | 21 |
| 2.8. Форсунки для сжигания мазута..... | 24 |
| 3. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕЧЕЙ..... | 26 |
| 3.1. Схема тепловой работы печей..... | 26 |
| 3.2. Тепловая мощность печи..... | 27 |
| 3.3. Виды тепловых потерь. Тепловой баланс..... | 28 |
| 3.4. Производительность печи..... | 30 |
| 3.5. Тепловой дефицит..... | 31 |
| 3.6. Усвоенная тепловая мощность и КПД печи..... | 32 |
| 3.7. Удельный расход энергии..... | 32 |
| 3.8. Коэффициент использования теплоты топлива – КИТ..... | 33 |
| 3.9. Теплотехнические факторы, определяющие производительность печи..... | 36 |
| 4. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЕЧЕЙ..... | 39 |
| 4.1. Пути сокращения удельного расхода энергии..... | 39 |
| 4.2. Способы повышения КИТ в топливных печах..... | 42 |

| | |
|---|----|
| 5. РЕКУПЕРАТОРЫ..... | 45 |
| 5.1. Общая характеристика и классификация..... | 45 |
| 5.2. Теплообмен и температурные поля в рекуператорах..... | 47 |
| 5.3. Схема расчета рекуператора..... | 49 |
| 5.4. Конструкции рекуператоров..... | 50 |
| 6. РЕГЕНЕРАТОРЫ..... | 52 |
| 6.1. Общая характеристика регенераторов..... | 52 |
| 6.2. Виды регенераторной насадки..... | 55 |
| 7. ОГНЕУПОРНЫЕ И ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ..... | 56 |
| 7.1. Виды огнеупорных изделий для строительства печей обжимных станов..... | 56 |
| 7.2. Теплоизоляционные материалы, применяемые в печестроении..... | 61 |
| 8. НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА.. | 62 |
| Печи обжимных станов..... | 63 |
| Рекуперативный колодец с одной верхней горелкой..... | 64 |
| Регенеративный колодец с отоплением из центра подины..... | 66 |
| Печи листовых и сортовых станов..... | 67 |
| Печи трубопрокатных станов..... | 72 |
| 9. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЕЧЕЙ..... | 75 |
| Литература..... | 79 |

Учебное издание

Губинский Владимир Иосифович

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПЕЧИ

Учебное пособие

Тем. план 2006, поз. 142

Подписано к печати 06.03.06. Формат 60x84 1/16. Бумага типогр. Печать плоская. Уч.-изд. л. 4,94. Усл. печ. л. 4,88. Тираж 100 экз. Заказ №

Национальная металлургическая академия України
499600, Днепропетровск-5, пр. Гагарина,4

Редакционно-издательский отдел НМетАУ