

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСиС»  
НОВОТРОИЦКИЙ ФИЛИАЛ

Кафедра металлургических технологий и оборудования

Н.Г. Куница

**ТЕПЛОТЕХНИКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ**

Учебное пособие  
по дисциплинам «Теплотехника», «Металлургическая теплотехника»  
для студентов направлений подготовки  
18.03.01 «Химическая технология»,  
15.03.02 «Технологические машины и оборудование»,  
22.03.02 «Металлургия»  
всех форм обучения

Новотроицк, 2015 г.

УДК 669. 041  
ББК 31.391  
К 91

Рецензенты:

*Заведующий кафедрой теплотехнических и энергетических систем  
ФГБОУ ВПО МГТУ им. Г.И. Носова, д.т.н. Агапитов Е.Б.*

*Доцент кафедры металлургических технологий и оборудования  
Новотроицкого филиала ФГАОУ ВПО НИТУ МИСиС,  
к.т.н. Братковский Е.В.*

Куницина Н.Г. Теплотехника металлургических печей: учебное пособие. – Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2015. – 83 с.

В учебном пособии приведены сведения о различных видах топлива, используемых в металлургическом производстве, способах его сжигания в печах различных конструкций, способах утилизации тепла отходящих газов, а также рассмотрены основные виды металлургических печей, их конструктивные и технологические особенности.

Материал учебного пособия подготовлен на основе трудов ведущих специалистов в области металлургической теплотехники Кривандина В.А., Гусовского Л.В., Матрюкова Б.С. и др.

Пособие составлено в соответствии с требованиями ФГОС ВО подготовки бакалавров направлений 22.03.02 «Металлургия», 18.03.01 «Химическая технология» и 15.03.02 «Технологические машины и оборудование», обучающихся в Новотроицком филиале НИТУ «МИСиС».

Рекомендовано Методическим советом НФ НИТУ «МИСиС»

© Новотроицкий филиал  
ФГАОУ ВПО «Национальный  
исследовательский  
технологический университет  
«МИСиС», 2015.

## Содержание

Введение .....	4
1 Характеристика топлива .....	5
1.1 Понятие топлива. Классификация топлива .....	5
1.2 Состав топлива .....	5
1.3 Теплота сгорания топлива .....	11
1.4 Условное топливо. Температура горения топлива .....	12
2 Принципы сжигания топлива .....	13
2.1 Факельное сжигание топлива .....	13
2.2 Устройства для сжигания газообразного и жидкого топлива. Классификация сжигающих устройств .....	14
3 Огнеупорные и изоляционные материалы печей .....	20
3.1 Конструктивные элементы печей металлургического производства и их назначение .....	20
3.2 Классификация огнеупорных и теплоизоляционных материалов .....	21
3.3 Теплотехнические характеристики огнеупорных и теплоизоляционных материалов .....	23
3.4 Кладка печи. Конструкции сводов, окон и вспомогательных узлов печи .....	28
4 Утилизация теплоты дымовых газов .....	32
4.1 Вторичные материальные и энергетические ресурсы .....	32
4.2 Схемы использования теплоты уходящих газов в печах. Принципы утилизации теплоты .....	33
5 Рекуперативные теплообменники .....	36
5.1 Схемы работы рекуператоров. Виды рекуператоров .....	36
5.2 Конструкции рекуператоров .....	40
6 Регенеративные теплообменники .....	44
6.1 Характеристика регенераторов. Схема работы регенераторов .....	44
6.2 Конструкции регенераторов .....	45
7 Основы тепловой работы печей .....	47
7.1 Классификация печей .....	47
7.2 Понятия о тепловой мощности печи .....	49
7.3 Виды тепловых потерь печи. Тепловой баланс .....	49
8 Показатели тепловой работы печей .....	53
8.1 Производительность печи .....	53
8.2 Расход теплоты на единицу продукции .....	53
8.3 Усвоенная тепловая мощность и КПД печи .....	55
9 Конструкции и тепловые режимы работы металлургических печей .....	56
9.1 Технологические цепочки в металлургии .....	56
9.2 Нагревательные печи металлургии .....	57
9.3 Характеристика нагревательных колодцев .....	57
9.4 Методические печи. Режимы нагрева заготовок в методических печах .....	63
9.5 Характеристика термических печей .....	70
9.6 Термические печи камерного типа .....	71
9.7 Термические печи проходного типа .....	76
Список использованных источников .....	82

## Введение

Производство в металлургии основывается на тепловой обработке материалов, которая производится в нагревательных устройствах, называемых печами. Тепловая обработка производится с целью выплавки металлов и сплавов, а также для нагрева металлов под обработку давлением и различные виды термической обработки материалов и изделий из них.

Металлургическая печь – промышленное оборудование, в котором в результате теплогенерации происходит нагрев, обжиг, плавление и необходимые физико-химические превращения металлосодержащих материалов с целью извлечения, рафинирования или химико-термической обработки металлов и сплавов.

Теплота выделяется за счет химической энергии топлива (пламенные печи) или за счет преобразования электрической энергии в теплоту (электropечи).

От успешной работы печей в значительной мере зависит количество, качество и себестоимость производимой продукции.

Материал учебного пособия раскрывает содержание основных тем в соответствии с программой дисциплин «Теплотехника» и «Металлургическая теплотехника». Завершает изложение учебного материала по каждой теме ряд вопросов для самопроверки, которые входят в комплекс вопросов для текущего контроля (контрольные работы №1 и №2) и промежуточной аттестации (экзамена).

Таким образом, учебное пособие облегчает усвоение теоретических знаний на лекционных и практических занятиях, помогает подготовке к мероприятиям по текущему контролю и промежуточной аттестации по дисциплинам «Теплотехника» и «Металлургическая теплотехника».

Успешное усвоение учебных материалов по теплотехнике металлургических печей является необходимым условием качественного познания специальных дисциплин по технологии металлургического производства, обработке металлов давлением, физико-химии металлургических систем и процессов, а также выполнения выпускной квалификационной работы.

# 1 Характеристика топлива

## 1.1 Понятие топлива. Классификация топлива

Топливом называется вещество, которое при сжигании выделяет значительное количество тепла и может быть использовано для получения энергии. Оно должно соответствовать следующим требованиям: достаточность и доступность в природе данного вещества или сырья для его получения, возможность сжигания с достаточно высокой степенью использования получаемого тепла, безвредность продуктов сгорания для обслуживающего персонала, применяемой аппаратуры и окружающей среды, а также экономическая целесообразность.

В зависимости от ряда признаков и соответственно свойств целесообразно деление топлива на виды.

По агрегатному состоянию топливо подразделяется на твердое, жидкое и газообразное, по происхождению – на естественное (природное) и искусственное (полученное переработкой естественного). Естественное топливо включает растительное, в основном древесное и ископаемое, т.е. добываемое из недр земли (ископаемые угли, торф, горючие сланцы, нефть, природные и попутные газы), а искусственное – кокс, древесный уголь, бензин, мазут, доменный, коксовый газы и др.).

В зависимости от характера использования различают энергетическое, технологическое и комплексное топливо. Энергетическое топливо применяют для получения тепловой энергии, технологическое – в плавильных, обжиговых и других промышленных печах. Комплексным называется топливо, из которого предварительно выделяют ценные вещества, используемые как химическое сырье (полукоксование, переработка горючих сланцев, перегонка нефти и др.), а остаточный продукт применяют как энергетическое топливо.

По поведению при нагревании топливо подразделяется на теплостойкое (кокс, древесный уголь) и нетеплостойкое (дрова, торф, сланцы, каменные угли), а по максимальной температуре, получаемой при полном сгорании, – высокой жаропроизводительности (более 2000 °С) и пониженной жаропроизводительности (бурые угли, торф, дрова).

По возобновляемости в природе топливо подразделяется на возобновляемое (древесина) и невозобновляемое.

## 1.2 Состав топлива

Топливо в том виде, в котором оно добыто, включает в себя органическую массу и балласт. Органической массой топлива считают ту часть, которая произошла из органических веществ: углерода, водорода, кислорода и азота; в балласт включают серу, минеральные примеси – золу и влагу топлива.

Твердое и жидкое топливо состоит из углерода С, водорода Н, органической серы  $S_0$  и горючей колчеданной серы  $S_K$ , кислорода О и азота N, находящихся в виде сложных соединений. Кроме указанных элементов твердого и жидкого топлива, составляющих *горючую массу топлива*, в состав топлива входит еще балласт – зола А и влага W.

Летучей, или горючей, серой называется:  $S_{л} = S_0 + S_K$ .

Состав топлива выражают в процентах по массе.

В топочной технике различают **рабочую, сухую, горючую и органическую массы** топлива. В связи с этим при буквенном обозначении вещества, входящего в состав топлива, вверху ставят буквы **р, с, г** или **о**. Под рабочей массой топлива понимают топливо в том виде, в каком оно поступает к потребителю. Состав рабочей массы топлива выражают так:

$$C^P + H^P + O^P + N^P + S_0^P + S_K^P + A^P + W^P = 100\%. \quad (1.1)$$

Если из топлива исключить балласт, то получаем горючую массу топлива

$$C^\Gamma + H^\Gamma + O^\Gamma + N^\Gamma + S_0^\Gamma + S_K^\Gamma = 100\%. \quad (1.2)$$

Сухая масса топлива соответствует обезвоженному топливу и состав ее следующий:

$$C^C + H^C + O^C + N^C + S_0^C + S_K^C + A^C = 100\%. \quad (1.3)$$

Органическая масса:

$$C^\circ + H^\circ + O^\circ + N^\circ = 100\%. \quad (1.4)$$

Пересчет состава топлива с одной массы на другую производят по формулам:

$$X^O = X^\Gamma \cdot \frac{100}{100 - S^\Gamma}; \quad (1.5)$$

$$X^O = X^C \cdot \frac{100}{100 - S^C - A^C}; \quad (1.6)$$

$$X^O = X^P \cdot \frac{100}{100 - S^P - A^P - W^P}; \quad (1.7)$$

$$X^\Gamma = X^C \cdot \frac{100}{100 - A^C}; \quad (1.8)$$

$$X^\Gamma = X^P \cdot \frac{100}{100 - A^P - W^P}; \quad (1.9)$$

$$X^C = X^P \cdot \frac{100}{100 - W^P}, \quad (1.10)$$

где  $X^P$ ,  $X^C$ ,  $X^\Gamma$ ,  $X^O$  – содержание элемента соответственно в рабочей, сухой, горючей и органической массе.

*Углерод и водород* – самые ценные части топлива.

*Углерод* содержится в значительном количестве в топливе всех видов: древесине и торфе 50-58 %, в бурых и каменных углях 65-80 %, в тощих углях и антрацитах 90-95 %, в сланцах 61-73 % в мазуте 84-87 % (цифры даны в процентах на горючую массу топлива). Чем больше углерода в топливе, тем больше топливо выделяет тепла при сгорании.

Состав рабочей массы топлива значительно зависит от величины балласта, поэтому чаще всего приводятся данные по составу горючей массы топлива, которая более стабильна для топлива каждого вида и месторождения.

*Водород* является второй важнейшей частью каждого топлива. В топливе водород частично находится в связанном с кислородом виде, составляя внутреннюю влагу топлива, вследствие чего понижается тепловая ценность топлива. Водород играет большую роль в образовании летучих веществ, выделяющихся при нагревании топлива без доступа воздуха. В состав летучих водород входит в чистом виде и в виде углеводородных и других органических соединений.

Содержание водорода в процентах от горючей массы топлива составляет: в дровах и торфе до 6, бурых каменных углях 3,8-5,8, горючих сланцах до 9,5, в антраците 2 и в мазу-

те 10,6-11,1.

*Кислород*, содержащийся в твердом топливе, является балластом. Не будучи теплообразующим элементом и связывая водород топлива, кислород снижает теплоту его сгорания. Содержание кислорода в органической массе топлива с его возрастом снижается с 41 % для древесины до 2,2 % для антрацита.

*Азот* также является балластной инертной составляющей твердого топлива, снижающей процентное содержание в нем горючих элементов. При сгорании топлива азот в продуктах сгорания содержится как в свободном виде, так и в виде окислов азота  $\text{NO}_x$ . Окислы азота относятся к вредным составляющим продуктов сгорания, количество которых должно быть лимитировано.

*Сера* содержится в твердом топливе в виде органических соединений  $S_0$  и колчедана  $S_K$ , объединяемых в летучую серу  $S_{Л}$ . Кроме того, сера входит в состав топлива в виде сернистых солей – сульфатов (например, гипса  $\text{CaSO}_2$ ), не способных гореть. Сульфатную серу  $S_a$  принято относить к золе топлива.

Высокое содержание серы приводит к сильному загрязнению продуктов сгорания топлива сернистым ангидридом  $\text{SO}_2$ . При наличии избыточного воздуха происходит частичное окисление  $\text{SO}_2$  до  $\text{SO}_3$  (соединяясь с  $\text{H}_2\text{O}$ , образуют  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).  $\text{H}_2\text{SO}_4$  вызывает коррозию поверхности нагрева, разрушает металл оборудования, попадая в атмосферу, вредно действуют на живые организмы и растительность. Содержание окислов серы в продуктах сгорания значительно повышает температуру точки росы (иногда до 140-150 °С), что ограничивает возможную глубину охлаждения дымовых газов по условиям коррозии и тем самым снижает экономичность котловых агрегатов, а также возможность использования дополнительного оборудования для использования теплоты дымовых газов. Поэтому сера – крайне нежелательный элемент для топлива. Сернистые газы, проникая в рабочие помещения, могут вызвать отравление обслуживающего персонала.

*Зола* топлива представляет собой балластную смесь различных минеральных веществ, остающихся после полного сгорания всей горючей части топлива. Зола топлива влияет на качество сгорания топлива отрицательно.

Различают три разновидности золы по ее происхождению: первичная – внутренняя, вторичная и третичная зола. Первичная зола образуется из минеральных веществ, содержащихся в растениях. Содержание ее в топливе незначительно и распределение равномерно. Вторичная зола получается вследствие заноса растительных остатков землей и песком в период пластообразования. Третичная зола попадает в топливо во время его добычи, хранения или транспортировки.

Зола является нежелательным балластом топлива, снижающим содержание в нем других горючих элементов. При этом, чем больше зольность топлива, тем значительней потери от механической неполноты сгорания топлива. С увеличением количества золы в топливе повышается и потеря с физическим теплом очаговых остатков.

Содержание золы в процентах от рабочей массы топлива составляет: в дровах 0,6, торфе 5-7, в бурых и каменных углях от 4 до 25, в мазуте 0,3.

*Влага* топлива складывается из внешней, или механической, вызванной поверхностным увлажнением кусков топлива и заполнением пор и капилляров, и равновесной, называемой гигроскопической, которая устанавливается в материале при длительном соприкосновении с окружающим воздухом.

При влажности твердого топлива выше 60 % сжигание его в большинстве случаев становится невозможным, так как количество выделенного топливом тепла не может нагреть продукты горения даже до температуры 900 °С, при которой еще возможен устойчивый топочный процесс. С увеличением влажности топлива уменьшается теплота сгорания рабочего топлива.

С увеличением влажности топлива объем водяных паров возрастает, а следовательно возрастает и объем газов, приходящихся на 1000 кал теплоты сгорания топлива. Увеличенный объем продуктов сгорания, проходящих по газоходам, вызывает увеличение температуры уходящих газов, а следовательно и большие потери с ними. Одновременно повышается и расход электрической энергии на тягу как в связи с возросшим объемом газов, так и в связи с ростом сопротивлений из-за увеличения скоростей в газоходах.

Кроме того, затрата тепла на испарение влаги топлива и увеличенный объем продуктов сгорания (при повышенной влажности) являются причиной снижения температуры в печи, замедленного выделения летучих, весь процесс ухудшается, и поэтому увеличиваются потери от химической неполноты сгорания.

Для оценки качества топлива и условий горения большое значение имеет *выход летучих веществ*. Если нагревать топливо без доступа воздуха, то под воздействием высокой температуры (от 200 до 800 °С) происходит разложение его на газообразную часть – летучие вещества (водород, метан, тяжелые углеводороды, окись углерода, немного двуокиси углерода и некоторые другие газы, т. е. в основном газообразные горючие вещества) и твердый остаток – кокс. Выход летучих определяется в процентах к горючей (т.е. безводной и беззольной) массе топлива.

Выход летучих веществ, их состав, а также температура, при которой они начинают выделяться, определяются химическим возрастом топлива: чем топливо старше по возрасту, тем меньше выход летучих и выше температура начала их выделения. Например, выход летучих торфа составляет приблизительно 70 % общей массы горючей части топлива, они начинают выделяться при 120-150 °С; выход летучих бурых и молодых каменных углей уменьшается приблизительно от 13 до 58,5 %, они начинают выделяться при 170-250 °С, а антрацита – до 4 % при температуре начала выделения газов около 400 °С.

Летучие вещества оказывают большое влияние на процесс горения топлива: чем больше выход летучих, тем ниже температура воспламенения и легче зажигание топлива и тем больше поверхность фронта пламени. Топливо с большим выходом летучих (торф, бурый уголь, молодой каменный уголь) легко загорается и сгорает быстро с малой потерей тепла. Топливо с малым выходом летучих, например антрацит, загорается значительно труднее, горит медленнее и сгорает не полностью.

При прочих равных условиях, чем больше выход летучих, тем меньше потери от механической неполноты сгорания топлива и тем меньшими могут быть выбраны коэффициенты избытка воздуха, что положительно скажется на экономичности печного агрегата.

Кокс, оставшийся после полного выделения летучих, состоит из углерода и минеральных топливных примесей.

Газообразное топливо представляет собой простую механическую смесь горючих и негорючих газов. В горючую часть могут входить окись углерода (CO), водород (H<sub>2</sub>), метан (CH<sub>4</sub>), тяжелые углеводороды (C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>), и иногда сероводород (H<sub>2</sub>S).

В негорючую часть могут входить кислород (O<sub>2</sub>), азот (N<sub>2</sub>) и двуокись углерода (CO<sub>2</sub>). В состав газообразного топлива, кроме того, входят и примеси – водяные пары, смолы, пыль и т.п.

Газообразное топливо принято характеризовать составом сухой газообразной части в % по объему. Содержание влаги определяет масса воды в единице объема сухого газа (W, г/м<sup>3</sup>). При анализе газообразного топлива влага не учитывается, поэтому сухое топливо пересчитывают на влажное, используя следующие зависимости:

$$X^{\text{вл}} = X^{\text{сух}} \cdot \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot W}; \quad (1.11)$$

$$H_2O = 0,1242W \cdot \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot W} \quad (1.12)$$

Рассмотрим подробнее состав отдельных видов топлива.

*Древесина* – это твердое топливо, используемое преимущественно в мелких котельных установках. Широкое применение имеют отходы деревообделочного производства: щепы, стружки, опилки, кора и др. Дрова применяют режу.

Влажность воздушно-сухих дров не превышает 25 %, полусухих – 35 %, свежесрубленных – 50 %. Опилки обычно имеют влажность 45-60 %. К полусухим относят дрова весенней заготовки, пролежавшие не менее 6 месяцев после рубки, в том числе не менее двух летних месяцев. К сухим относят дрова, пролежавшие после рубки около года в лесу и влажность которых не превышает 30 %.

Дрова как топливо характеризуются высоким выходом летучих горючих веществ – до 85 % и незначительным содержанием золы – в среднем до 1 %, лишь в сплавных дровах зольность повышается до 5 %. Следовательно, балласт дров определяется в основном их влажностью, от которой и зависит теплота сгорания. Теплота сгорания мало зависит от породы дров.

При пониженной теплоте сгорания дрова имеют преимущества: легкую воспламеняемость, отсутствие серы и малую зольность, что позволяет ограничиваться простыми топочными устройствами, работающими эффективно.

*Торф* как топливо по своим свойствам близок к дровам. Влажность торфа колеблется в зависимости от способа добычи, условий сушки и хранения от 30-40 до 50-55 %. Зольность торфа колеблется от 7 до 15 %.

*Ископаемые угли разделяют на бурые, каменные и антрациты.*

*Бурый уголь* содержит много влаги, соединяется легко с кислородом воздуха и при длительном хранении на воздухе сильно выветривается и рассыпается в порошок. Кроме того, он обладает большой склонностью к самовозгоранию. По своей структуре отличается повышенным содержанием балласта и необычно высокой гигроскопичностью, вследствие чего влажность бурых углей 17-55 %. Бурые угли не спекаются, отличаются большим выходом летучих (33,5-58,5 %) на горючую массу и зольностью на сухую массу (10,5-34 %), высоким содержанием серы (0,6-5,9 %).

*Каменный уголь* подразделяется: на длиннопламенный, газовый, паровичный жирный, коксовый паровичный спекающийся и тощий. Выход летучих 3,5-45 %.

Каменный уголь применяют непосредственно как топливо или перерабатывают на кокс. По виду кокса различают угли неспекающиеся (порошкообразный кокс) и спекающиеся (сплавленный кокс, иногда вспученный). Каменные угли довольно плотны и малопористы и содержание внешней влаги в них значительно ниже, чем в бурых углях. Многие каменные угли обладают повышенной механической прочностью. В хранении они более устойчивы, меньше подвержены самовозгоранию, а некоторые их виды совсем не самовозгораются.

*Антрацит* относится к старейшим по происхождению каменным углям, отличается большой твердостью, трудно загорается, горит коротким пламенем, хорошо выдерживает перегрузки и перевозки. Переходным между каменными углями и антрацитом является полуантрацит. Антрацит и полуантрацит не самовозгораются.

Марки углей отличаются одна от другой выходом летучих и степенью спекаемости. Различают следующие марки углей: Д (длиннопламенные), Г (газовые), Ж (жирные), КЖ (коксовые жирные), К (коксовые), С (отошенные спекающиеся), Т (тощие), СС (слабоспекающиеся). Все виды углей по размеру кусков делят на классы.

*Горючие сланцы* являются продуктами разложения растительных остатков, осевших

на дне больших водоемов; смешиваясь с минеральными осадками, образовывалось илистое вещество – сапропель, которое обогащалось водородом, уплотнялось и превращалось в горючие сланцы.

При сжигании сланцев образуется очень большое количество золы (64,5 %). Выход летучих у сланцев очень высок – до 90 %, влажность 13 %. Сланцы являются местным топливом.

*Газообразное топливо* по сравнению с жидким и твердым топливом обладает преимуществами: возможностью лучшего смешения газа с воздухом и, следовательно, сжиганием с меньшим избытком воздуха; легкостью подогрева перед сжиганием; отсутствием золы в топливе; транспортабельностью и удобством учета расхода газа; простотой обслуживания горелочных устройств и т. д.

Одновременно с указанными преимуществами газообразное топлива имеет и ряд недостатков: взрывоопасность; малая объемная масса, что создает дополнительные затруднения при хранении газа.

В этом отношении газ уступает и твердому, и жидкому топливу.

Однако перечисленные преимущества и сравнительно низкая стоимость добычи способствуют широкому внедрению газа и постепенному вытеснению твердого и жидкого топлива в различных отраслях промышленности.

*Природный газ* состоит главным образом из метана и некоторого количества тяжелых углеводородов. Балластом в газе являются азот, двуокись углерода и влага. Виды газа бывают различные как по месторождению, так и по составу.

Одним из преимуществ природного газа является отсутствие в его составе сернистых соединений, что для металлургической промышленности имеет особое значение.

К искусственным газам, применяемым в качестве топлива, относят коксовый, доменный и генераторные газы.

*Коксовый газ* является продуктом коксования углей и представляет собой те летучие продукты, которые получаются при термическом разложении угля (сырой или прямой газ). Сырой коксовый газ содержит ряд ценных примесей и балласт: смолу, аммиак, воду, сероводород и т.д., которые конденсируют и улавливают при первичной очистке газа. Газ, прошедший первичную очистку, называется обратным. Обратный газ подвергают дополнительной очистке для извлечения из него циана, окислов азота и серы. Удаление серы необходимо, так как ее присутствие в газе значительно снижает качество газа и сужает область его применения. Полученный газ называют очищенным коксовым газом. Состав и выход коксового газа зависит от вида коксуемых углей и режима коксования.

Коксовый газ применяется в чистом виде или в смеси с доменным газом.

*Доменный газ* получается как побочный продукт доменного производства. Состав доменного газа зависит от температуры дутья, обогащения его кислородом, состава и расхода кокса, состава шихты, давления на колошнике, применения природного газа.

Доменный газ содержит значительное количество пыли (60-70 г/м<sup>3</sup>), поэтому его необходимо подвергать очистке. Доменный газ применяется в воздухонагревателях доменных печей, в котельных установках, в печах с более высокой температурой (мартеновских и прокатных) доменный газ применяется в смеси с коксовым газом.

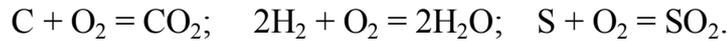
*Генераторный газ* - это продукт полного превращения твердого топлива в горючий газ под воздействием кислорода. Остатком при процессе газификации является только зола или шлак.

Генераторные газы могут быть получены в любом месте, где добывается или куда может быть завезено топливо. Процесс газификации проводится в специальных устройствах-газогенераторах.

### 1.3 Теплота сгорания топлива

Наиболее важной характеристикой топлива является теплота сгорания – количество тепла, получаемого при сжигании 1 кг твердого или жидкого топлива или 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива в кДж/кг (ккал/кг) или кДж/м<sup>3</sup> (ккал/м<sup>3</sup>): 1 ккал = 4,1868, или 4,19, кДж.

Как указывалось ранее, к горючим элементам в топливе относят углерод С, водород Н и летучую горючую серу S<sub>л</sub>. Элементарно их горение может быть представлено следующими уравнениями:



Различают высшую и низшую теплоту сгорания.

**Высшей теплотой сгорания** топлива называют все количество тепла, выделенное при сгорании 1 кг твердого или жидкого топлива, или 1 м<sup>3</sup> газообразного (при нормальных условиях) и превращении водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания, в жидкость.

На практике, однако, не удается охладить продукты сгорания до полной конденсации и потому введено понятие **низшей теплоты сгорания**, которую получают, вычитая из высшей теплоты сгорания теплоту парообразования водяных паров как содержащихся в топливе, так и образовавшихся при его сжигании.

Уравнение связи между высшей и низшей теплотами сгорания твердого и жидкого топлива:

$$Q_n^p = Q_v^p - 25 \cdot (9 \cdot H^p + W^p), \quad (1.13)$$

где  $Q_n^p$  - низшая теплота сгорания, кДж/кг;

$Q_v^p$  – высшая теплота сгорания, кДж/кг;

25 – теплота парообразования при температуре 0°С и атмосферном давлении, кДж/кг;

9 – коэффициент, показывающий, что при сгорании 1 кг водорода в соединении с кислородом образуется 9 кг воды.

Если известен элементарный состав топлива, то низшая теплота сгорания твердого и жидкого топлива, кДж/кг или ккал/кг, может быть определена по эмпирической формуле, предложенной Д. И. Менделеевым:

$$Q_n^p = 339 \cdot C^p + 1256 \cdot H^p - 109 \cdot (O^p - S_n^p) - 25,14 \cdot (9 \cdot H^p + W^p). \quad (1.14)$$

Низшая теплота сгорания газообразного топлива, кДж/м<sup>3</sup>, может быть определена из выражения:

$$Q_n^p = 127 \cdot CO + 108 \cdot H_2 + 358 \cdot CH_4 + 590 \cdot C_2H_4 + 555 \cdot C_2H_2 + 635 \cdot C_2H_6 + 913 \cdot C_3H_8 + \\ + 1185 \cdot C_4H_{10} + 1465 \cdot C_5H_{12} + 234 \cdot H_2S. \quad (1.15)$$

Сама по себе теплота сгорания топлива не влияет на экономичность процесса горения, однако величина теплоты сгорания в значительной степени зависит от содержания в топливе балласта (влаги, золы), влияние которого было рассмотрено выше. По этим причинам теплота сгорания топлива и рассматривается как один из факторов, определяющих экономичность горения.

Путем смешивания топлив разных марок можно значительно повысить экономичность процесса горения.

## 1.4 Условное топливо. Температура горения топлива

Расход топлива зависит от его теплоты сгорания, которая для различных топлив изменяется в больших пределах. Для сравнения по энергетической ценности и эффективности использования различных сортов топлив введено понятие об условном топливе, которому присваивается теплота сгорания, равная  $Q_{\text{усл}} = 29,33$  МДж/кг (7000 ккал/кг).

Тепло, выделяющееся при сгорании топлива, воспринимается продуктами сгорания, которые нагреваются до определенной температуры, называемой температурой горения. Различают калориметрическую, теоретическую и действительную температуры сгорания топлива.

Чтобы выявить потенциальные возможности топлива, вводят понятие горения без подогрева топлива и воздуха при идеальном адиабатическом процессе, т. е. горения с теоретическим количеством воздуха, без потерь теплоты и без теплообмена в топочном агрегате и с окружающей средой. Полученная в этих условиях температура продуктов сгорания называется *теоретической*.

*Калориметрическая температура* отражает влияние подогрева топлива и воздуха и коэффициента избытка расхода воздуха на температуру адиабатического горения. Повышение температуры подогрева топлива и воздуха увеличивает приход теплоты в зону горения и повышает температуру горения, а увеличение коэффициента избытка воздуха вызывает увеличение объема продуктов сгорания, что понижает температуру горения. Поэтому в зависимости от влияния этих факторов калориметрическая температура может быть выше или ниже теоретической.

Отношение действительной температуры горения топлива к теоретической называется *пирометрическим коэффициентом*.

### Контрольные вопросы

- 1 Что такое топливо?
- 2 По каким критериям классифицируется топливо?
- 3 Каков состав различных видов топлива?
- 4 Что подразумевают под горючей и негорючей частью топлива?
- 5 Как зольность и влажность влияют на теплотехнические свойства топлива?
- 6 Чем отличается высшая теплота сгорания топлива от низшей?
- 7 Что такое условное топливо?
- 8 Что понимают под температурой горения топлива?
- 9 Чем отличается теоретическая температура горения от калориметрической?
- 10 Что понимают под пирометрическим коэффициентом?

## 2 Принципы сжигания топлива

Чтобы топливо и кислород вступили в реакцию, они должны быть предварительно перемешаны и смесь должна иметь температуру воспламенения.

Различают два способа сжигания топлива – факельный и слоевой. По *факельному способу* сжигается газообразное, жидкое и пылевидное топливо. По *слоевому способу* сжигают твердое топливо. В большинстве печей топливо сжигается факельным способом. Слоевого способ используется в доменной и агломерационной печи, вагранках, паровых котлах небольшой мощности.

### 2.1 Факельное сжигание топлива

Факел образуется при смешении газового и воздушного потоков. По месту встречи и характеру перемешивания потоков различают три метода сжигания газов:

**1 метод.** Газ и воздух встречаются вне горелочного устройства (в рабочем пространстве печи) и перемешиваются в рабочем пространстве печи в процессе горения. Воздух и газ могут быть нагреты до высокой температуры.

**2 метод.** Газ и весь воздух, необходимый для полного горения топлива, перемешиваются друг с другом до выхода в рабочее пространство печи. Это возможно, если температура образующейся смеси меньше температуры воспламенения, тогда газ не может гореть внутри горелочных устройств, если скорость распространения пламени меньше скорости истечения смеси. Длина факела весьма мала и способ называют беспламенным или бесфакельным.

**3 метод.** Предварительное перемешивание газа с частью воздуха, необходимого для полного сжигания топлива. Окончательное перемешивание смеси с остальной частью воздуха происходит в рабочем пространстве печи в процессе горения. Регулируя процесс предварительного перемешивания можно управлять длиной факела.

Различают ламинарный и турбулентный факел. При *ламинарном факеле* контакт горючего с кислородом воздуха происходит на поверхности струи. Внутренние слои газа не соприкасаются с кислородом, что хорошо видно на рисунке 2.1 (темная полоска первичного газа охвачена светлой оболочкой горящего слоя).

В ламинарном факеле по его сечению можно выделить две зоны: зону горючего газа и зону продуктов сгорания. На границе зон происходит горение топлива. Таким образом, имеет место послойное включение слоев газа в процесс горения. Фронт горения постепенно приближается к оси струи.

При *турбулентном факеле* отсутствует послойное выгорание газа в струе. Внешний вид и структура факела определяется свойством турбулентной струи захватывать окружающую среду, перемешиваться с этой средой и проталкивать ее вперед. Поэтому турбулентная струя газа после выхода из сопла горелки – устройства для сжигания газообразного топлива – приобретает форму конуса. По своей структуре турбулентная струя представляет совокупность хаотично перемещающихся макрочастиц, объединенных в одно целое силами вязкости и общим направлением движения.

При поджигании турбулентной струи горючего газа процесс горения начинается на поверхности струи. Образующиеся здесь продукты сгорания вовлекают в свое движение макрочастицы воздуха и вместе с ними проникают вглубь струи. Таким путем постепенно очаги горения возникают и внутри струи. Процесс горения из поверхностного превращается в объемный. Вследствие хаотичности турбулентного перемешивания очаги горения в каждом элементарном объеме факела возникают дискретно. Они то появляются, то исчезают. При зрительном восприятии большого числа близко расположенных и дискретно по-

являющихся очагов горения в объеме факела они сливаются воедино, и турбулентный факел представляется в виде сплошной конусной струи горящего газа.

Для уяснения динамики перехода ламинарного факела в турбулентный рассмотрим изменение длины вертикального факела при возрастании скорости в сопле (рисунок 2.2). С ростом скорости истечения длина ламинарного факела сначала возрастает почти пропорционально скорости истечения  $W_{ист}$ , а факел имеет неизменную форму. При достижении критической скорости  $W_{кр}$  вершина факела становится неустойчивой и начинает пульсировать. При дальнейшем увеличении скорости эта неустойчивость развивается и факел как бы складывается из двух частей: нижней ламинарной и верхней турбулентной, что видно из фотографии, приведенной на рисунке 2.2.

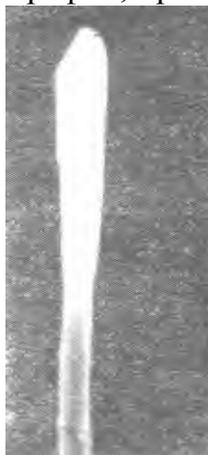


Рисунок 2.1 – Фотография ламинарного факела

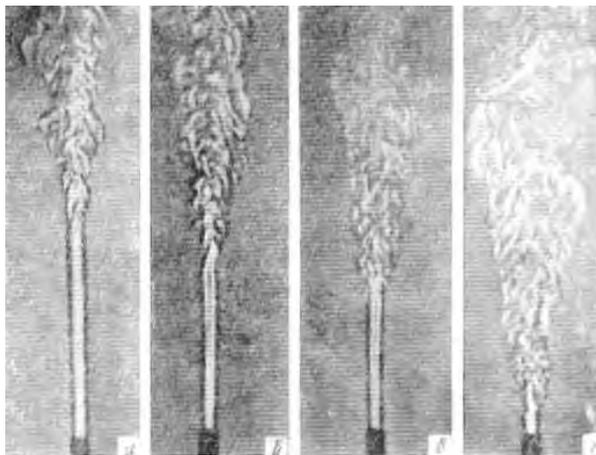


Рисунок 2.2 – Фотографии факелов при переходе от ламинарного факела к турбулентному при возрастании скорости

При еще большем увеличении скорости истечения длина факела начинает уменьшаться и граница раздела частей факела перемещается от вершины к соплу. При некотором значении скорости факел становится полностью турбулентным и дальнейшее увеличение вызывает противоположное явление – длина факела вновь начинает увеличиваться, но уже в более медленном темпе, чем при ламинарном режиме (рисунок 2.3).

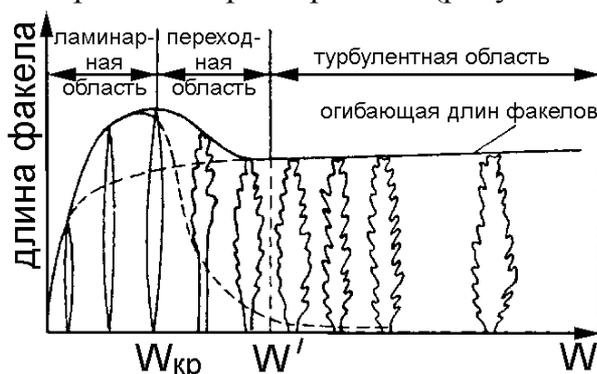


Рисунок 2.3 – Изменение длины факела при возрастании скорости

## 2.2 Устройства для сжигания газообразного и жидкого топлива.

### Классификация сжигающих устройств

Важнейшим элементом топливной печи являются устройства для сжигания топлива. Устройства для сжигания газа называются *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.

### 2.2.1 Виды горелок и форсунок. Требования, предъявляемые к горелкам и форсункам

Процесс сжигания газообразного 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.

Основное назначение горелок – организация процесса горения топлива таким образом, чтобы обеспечить заданный экономически целесообразный режим работы печи.

Для этого горелка должна обеспечивать:

- 1) подвод и смешение между собой необходимого количества топлива и воздуха;
- 2) полноту сжигания топлива в пределах рабочего пространства печи;
- 3) сжигание топлива с образованием такого пламени, которое может обеспечить требуемый по технологическим условиям уровень теплопередачи в рабочем пространстве печи.

Весь процесс сжигания топлива должен быть выполнен с наивысшей эффективностью и наивысшим коэффициентом полезного действия

В зависимости от организации смешивания газа с воздухом различают следующие конструкции горелок:

- 1) с предварительным смешиванием газа с воздухом;
- 2) без предварительного смешивания (с внешним смешиванием).

К горелкам с предварительным смешиванием относятся инжекционные (рисунок 2.4, 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. 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. Газо-воздушная 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 подогревать воздух и газ до высокой температуры, близкой к температуре воспламенения.

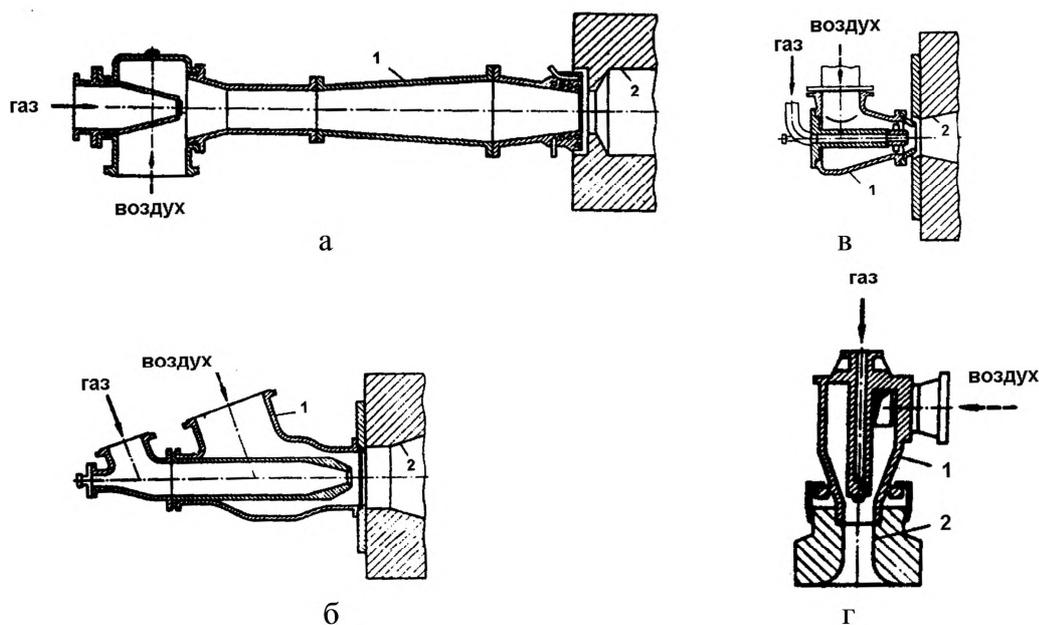
Преимуществом инжекционных горелок является полное сжигание газа с небольшим коэффициентом расхода воздуха, близким к единице, вследствие хороших условий смешивания компонентов горения.

На рисунке 2.4, б–г представлены конструкции двухпроводных горелок без предварительного смешивания. 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 пламенными.

Горелки типа «труба в трубе» с почти параллельными потоками газа и воздуха (рисунок 2.4, 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.

Дутьевые горелки для сжигания природного газа низкого давления (рисунок 2.4, 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 сменным: 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 (рисунок 2.4, 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 газо-воздушная смесь прижимается к стенкам огнеупорного туннеля, имеющего форму граммофонной трубы. Пламя размыкается 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.



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

Рисунок 2.4 – Виды горелок

В качестве жидкого топлива для отопления печей в металлургии используют, как правило, высоковязкие топочные мазуты. Мазуты характеризуются: вязкостью, температурой вспышки, температурой воспламенения, температурой застывания. Доля мазута сравнительно невелика, однако им отапливают высокотемпературные плавильные и реже нагревательные печи.

Также как и для факела газообразного топлива важнейшими характеристиками мазутного факела является его длина, распределение температуры по длине.

Для сжигания жидкого топлива используют форсунки различных конструкций, к которым предъявляют следующие требования:

- 1) хорошее распыление и перемешивание топлива с воздухом;
- 2) обеспечение устойчивого горения и незатухающего факела нужной длины;
- 3) надежность в эксплуатации, незасоряемость и удобство чистки.

Мазут перед сжиганием подвергают распыливанию, чтобы увеличить площадь контакта капель с кислородом воздуха. В металлургии для сжигания мазута применяют форсунки двух видов:

- 1) высокого давления;
- 2) низкого давления.

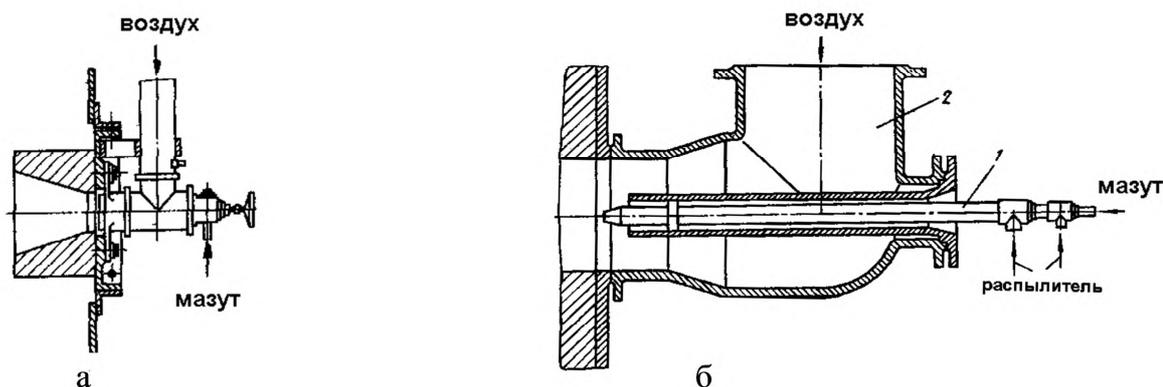
Распыливание происходит в результате взаимодействия струй мазута и распылителя, движущихся с разными скоростями.

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  $\sim 10$  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. Форсунка низкого давления представлена на рисунке 2.5, а.

В форсунках высокого давления 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 рисунке 2.5, б показана установка на печи форсунки высокого давления в форсуночной коробке, через которую подают вентиляторный воздух, необходимый для сжигания мазута.



а – форсунка низкого давления; б – форсунка высокого давления:  
1 – собственно форсунка; 2 – форсуночная коробка

Рисунок 2.5 – Виды форсунок

### 2.2.2 Комбинированное газо-мазутное отопление

В производственных условиях по различным причинам возможно изменение вида используемого топлива или добавление в случае нехватки одного вида топлива к другому

(чаще всего мазута к газу).

Данную задачу можно решить двумя способами. Первый связан с установкой на печи, как горелок для сжигания газа, так и форсунок на случай перевода печей на полное или частичное отопление мазутом. Очевидно, что такой способ не является рациональным, так как усложняет конструкцию самой печи и создает большие проблемы по обеспечению печи воздухом для горения.

Вторым, несомненно, более рациональным способом, является использование таких устройств, которые могут работать, как на газообразном и жидком топливе по отдельности, так и при комбинированном использовании. Создание таких устройств является сложной задачей, поскольку сжигание газообразного и жидкого топлива происходит в совершенно различных условиях.

Газообразное топливо готово к сжиганию и его необходимо лишь смешать для этого с воздухом. Оно легче воспламеняется, сжигается с меньшим коэффициентом расхода воздуха, сгорает быстрее и полнее. Жидкое топливо надо сначала распыливать, затем смешивать с воздухом, обеспечивая его испарение и горение. Для полноты сжигания мазута необходимо поддерживать более высокую величину коэффициента расхода воздуха. При одновременном сжигании газообразного и жидкого топлива горение последнего будет затягиваться, так как газообразное топливо будет употреблять кислород в первую очередь.

Горелки, рассчитанные на комбинированное сжигание газообразного и жидкого топлива, должны иметь воздухопроводы, способные обеспечить их воздухом при самом разнообразном топливе. Целесообразно использовать такие комбинации различных видов топлива, при которых расход воздуха в единицу времени оставался бы приблизительно постоянным. Все это усложняется и целесообразностью, а иногда и необходимостью, использования подогретого воздуха.

Мазут дает факел с высокой излучательной способностью, поэтому сжигание природного газа с карбюрацией факела мазутом является в настоящее время весьма распространенным. Расход мазута составляет обычно 25-40 % от всего расхода тепла на печь. Для этой цели применяют различные газо-мазутные форсунки, пример которой приведен на рисунке 2.6. В качестве распылителя используют сжатый воздух давлением 0,45 МПа.

В газо-мазутных форсунках мазут и газ подаются по не объединенным конструктивно трубкам, причем мазут – всегда по внутренней трубке, так как он труднее смешивается с воздухом. Для улучшения смешения устанавливают специальные закручивающие лопатки для воздуха, а газ выходит из трубок через многочисленные маленькие отверстия. В случае чисто газового отопления форсунка может быть вынута.

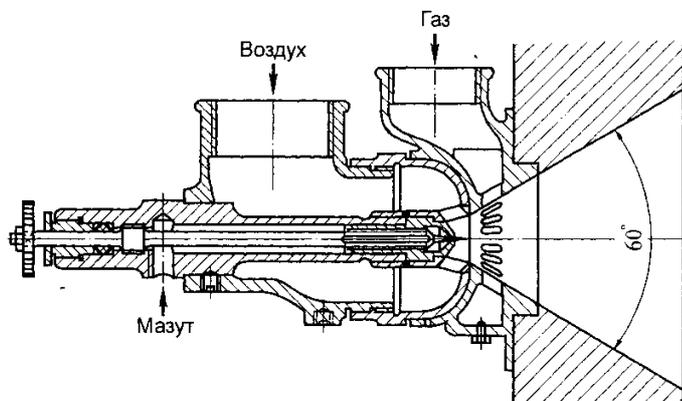


Рисунок 2.6 – Газо-мазутная форсунка

## Контрольные вопросы

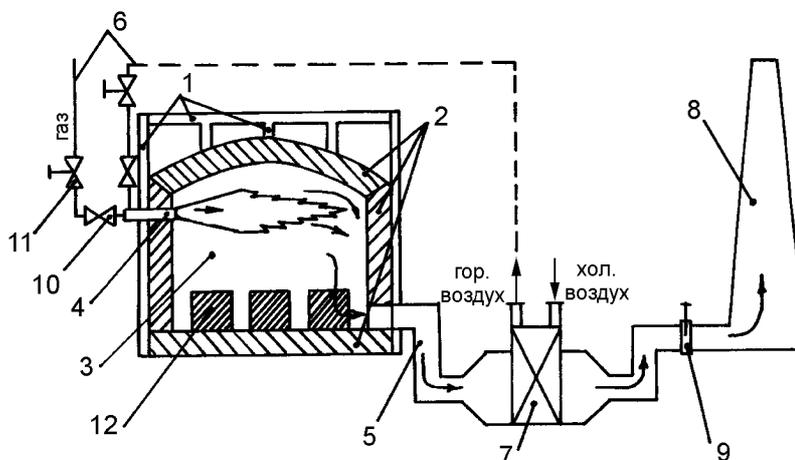
- 1 Какие существуют способы сжигания топлива?
- 2 Что подразумевают под факельным способом сжигания топлива?
- 3 Какие существуют виды факелов и чем они отличаются?
- 4 Какие устройства применяют для сжигания жидкого и газообразного топлива?
- 5 Какие требования предъявляют к устройствам для сжигания топлива?
- 6 Каковы особенности горелок с предварительным смешением топлива и воздуха? Их преимущества и недостатки.
- 7 Каковы особенности горелок без предварительного смешения топлива и воздуха? Их преимущества и недостатки.
- 8 Чем отличаются форсунки низкого давления от форсунок высокого давления?
- 9 Каковы особенности применения газо-мазутных форсунок? Их преимущества?

### 3 Огнеупорные и изоляционные материалы печей

#### 3.1 Конструктивные элементы печей металлургического производства и их назначение

Основными элементами печей (рисунок 3.1) являются:

- 1) металлический каркас – устройство для фиксации элементов печи при ее разогреве;
- 2) футеровка (огнеупорная кладка) – ограждение высокотемпературной зоны, состоящее из стен, свода и пода. Служит для отделения рабочей камеры от окружающего пространства и для уменьшения тепловых потерь. Уменьшение тепловых потерь позволяет получать высокую температуру внутри печи;
- 3) рабочее пространство печи – замкнутый объем, в котором располагается нагреваемый материал;



- 1 - металлический каркас; 2 - футеровка; 3 - рабочее пространство печи; 4 - горелка; 5 - борова; 6 – газозовдухопроводы; 7 - теплообменник; 8 - дымовая труба; 9 - дымовой шибер; 10 - дроссели; 11 - задвижки; 12 - нагреваемый материал

Рисунок 3.1 – Основные элементы печи

- 4) тепловырабатывающие устройства (горелки, форсунки) – устройства для подачи энергии в рабочее пространство печи и преобразования ее в теплоту;
- 5) борова – дымоотводящие каналы. Служат для удаления продуктов горения из рабочего пространства печи в дымовую трубу;
- 6) газозовдухопроводы – трубопроводная система для подачи газа и воздуха к горелкам;
- 7) теплообменник – устройство для нагрева воздуха и топлива за счет теплоты, уносимой продуктами горения из рабочего пространства печи (рекуператор или регенератор), а также за счет сжигания дополнительного топлива (воздухонагреватель доменной печи). Нагрев воздуха (газа) в теплообменнике позволяет получить высокую температуру в рабочем пространстве печи и снизить расходы топлива;
- 8) дымовая труба – устройство для удаления дыма из рабочего пространства печи в атмосферу. Дымовая труба выполняет две функции: теплотехническую (создание необходимого разрежения) и экологическую (рассеивание вредных выбросов);
- 9) дымовой шибер – устройство с центральным элементом в виде пластины для регулирования давления дыма в рабочем пространстве печи путем перекрытия поперечного сечения борова. В период максимальной подачи топлива в печь шибер находится в верхнем крайнем положении, т.е. максимально открыт. Шибер служит также для отключения печи

от дымовой трубы во время ремонтов печи;

10) дроссели и 11) задвижки – устройства для регулирования расхода газов. Дроссель – устройство для плавного регулирования расхода воздуха и газа через горелки. Задвижка – устройство для отключения газопроводов от печи на время её ремонта;

12) тягодутьевые устройства: вентиляторы, компрессоры, дымососы. Служат для подвода к печи газа и воздуха и отвода от печи дыма на дымовую трубу.

Перечисленные основные элементы присущи большинству печей. В отдельных печах встречаются дополнительные элементы, например, перекидные устройства в печах регенеративного типа, транспортирующие устройства для перемещения подины в кольцевых, роликовых печах и печах с шагающими балками и другие устройства.

## 3.2 Классификация огнеупорных и теплоизоляционных материалов

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 материалов.

Огнеупорные изделия являются наиболее дорогостоящими и важнейшими из материалов, применяемых в печестроении. От качества огнеупоров во многом зависит развитие металлургии, длительность работы печей, их технико-экономические показатели.

Огнеупорные материалы должны обладать следующими основами свойствами: высокой огнеупорностью (не ниже 1850 К); высокой механической прочностью при высоких температурах; способностью переносить температурные колебания не разрушаясь; химической стойкостью по отношению к компонентам металлургических процессов; постоянством форм и объема при нагревании; необходимыми физическими свойствами - пористостью, плотностью, теплоемкостью, теплопроводностью, электропроводностью.

Свойства огнеупорных изделий определяются, прежде всего, их химическим составом и технологией изготовления.

Главной рабочей характеристикой теплоизоляционных материалов служит предельная температура их применения. При выборе материала для тепловой изоляции печи необходимо следить, чтобы действительная температура службы изоляционного материала не превышала предельно допустимую величину. В противном случае теплоизоляция может оказаться химически или механически не устойчивой и выйдет из строя.

### 3.2.1 Классификация огнеупорных материалов

Применяемые в промышленности огнеупоры делят на изделия, которым при изготовлении придается определенная форма (кирпичи, фасонные изделия, крупные блоки) и неформованные материалы (бетоны, торкрет-массы, мертели).

В основу классификации огнеупорных изделий положено шесть основных признаков: химико-минеральный состав, огнеупорность, пористость, способ формования, термическая обработка, форма и размеры.

*1 По химико-минеральному составу* изделия делят на следующие группы, зависящие от содержания оксидов (%), определяющих их свойства:

а) кремнеземистые: диоксидные ( $\text{SiO}_2 \geq 93$ ); кварцевые ( $\text{SiO}_2 \geq 85$ );

б) алюмосиликатные: полукислые ( $\text{SiO}_2 < 85$ ), шамотные ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  28-45), муллитокремнеземистые ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  45-62), муллитовые ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  62-72), муллитокорундовые ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  72-90);

в) глиноземистые – корундовые ( $\text{Al}_2\text{O}_3 > 90$ );

- г) магнезиально-периклазовые (магнезитовые) ( $MgO \geq 85$ );
- д) магнезиальноизвестковые: периклазоизвестковые (магнезитодоломитовые) ( $MgO$  35-75;  $CaO$  15-40); известковопериклазовые (доломитовые) ( $MgO$  10-50;  $CaO$  45-85);
- е) периклазохромитовые ( $MgO > 60$ ;  $Cr_2O_3$  5-20); хромитопериклазовые ( $MgO$  40-60;  $Cr_2O_3$  15- 35); хромитовые ( $MgO < 40$ ;  $Cr_2O_3 > 30$ );
- ж) периклазошпинельные ( $MgO > 40$ ;  $Al_2O_3$  5-55); шпинельные ( $MgO$  25-40;  $Al_2O_3$  55-70);
- з) магнезиальносиликатные: периклазофорстеритовые ( $MgO$  65-85;  $SiO_2 > 7$ ); форстеритовые ( $MgO$  50-65;  $SiO_2$  25-40); форстеритохромитовые ( $MgO$  45-60;  $SiO_2$  20-30;  $Cr_2O_3$  5-15);
- и) углеродистые с огнеупорной основой (углеродсодержащие, неграфитированные, графитшамотные);
- к) карбидокремниевые с огнеупорной основой  $SiC$  (карбидокремниевые, карбидокремнийсодержащие);
- л) цирконовые с огнеупорной основой  $ZrO_2$  (цирконовые, циркониевые);
- м) окисные с огнеупорной основой  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $BeO$ ,  $HfO_2$  (корундовые, титановые, берилловые, гафниевые);
- н) неокислородные (нитридные, боридные, сульфидные).

На заводах применяют еще техническую классификацию, в соответствии с которой все огнеупоры разделяются на три группы:

- а) кислые (в составе преобладает кислый оксид  $SiO_2$ );
- б) нейтральные (содержащие высокий процент  $C$  или  $Cr_2O_3$ );
- в) основные (с преобладающим содержанием основных оксидов ( $MgO$ ,  $CaO$ )).

**2 По огнеупорности** все огнеупоры разделяют на три группы:

- а) огнеупорные (огнеупорность 1580-1770 °С);
- б) высокоогнеупорные (огнеупорность 1770-2000 °С);
- в) высшей огнеупорности (огнеупорность  $>2000$  °С).

**3 По пористости:**

- а) особоплотные (с открытой пористостью до 3 %);
- б) высокоплотные (3-10 %);
- в) плотные (10-16 %);
- г) уплотненные (16-20 %);
- д) среднепористые (20-30 %);
- е) повышеннопористые (30-45 %);
- ж) легковесные (с общей пористостью 45-85 %);
- з) ультралегковесные (с общей пористостью  $> 85$  %).

**4 По способу формования:**

- а) пластичноформованные;
- б) полусухого формования из масс малопластичных или из порошков с добавкой связующего материала, изготовленные путем механического, гидравлического или вибрационного прессования; при изготовлении крупных блоков применяется пресстрамбование;
- в) плавленые литые из расплава, получаемого обычно путем электроплавки;
- г) литые, изготовленные путем литья из жидкого шликера в специальные формы (пенноизделия);
- д) термопластичнопрессованные, изготовленные прессованием из шихты, в состав которой введены термопластичные добавки (парафин, воск и т.п.);
- е) горячепрессованные;
- ж) изготовленные горячим прессованием из масс, нагретых до пластичного состояния;
- з) пиленые из естественных горных пород или из специально изготовленных блоков;

и) волокнистые, полученные путем расщепления расплава струей острого перегретого пара.

**5 По термической обработке:**

- а) обожженные (обжигаемые в печах в процессе изготовления изделий);
- б) безобжиговые (не подвергавшиеся обжигу до употребления в кладку);
- в) плавленые (подвергнутые отжигу после отливки);
- г) горячепрессованные.

**6 По форме и размерам:**

- а) простые изделия (прямые и клиновые нормальных, малых и больших форматов);
- б) фасонные – простые, сложные, особо сложные и крупноблочные (массой > 60 кг);
- в) специальные – промышленного и лабораторного назначения (тигли, трубки, накопечники и т.п.).

Неформованные огнеупорные материалы классификации, установленной ГОСТ, не имеют.

### 3.2.2 Классификация теплоизоляционных материалов

Теплоизоляционные материалы делят по ряду признаков на следующие группы:

**1 по огнеупорности** – огнеупорные, выдерживающие рабочую температуру 800 °С, и неогнеупорные, которые могут быть использованы только при температурах ниже 800 °С.

**2 по происхождению** – естественные и искусственные;

**3 по форме и способу применения** – теплоизоляционные материалы выполняются в виде изделий (кирпичей, листов и т.д.) или в виде неформованных материалов (засыпки, ваты, волокон и др.);

**4 по жесткости**, которая измеряется значением относительно сжатия при заданных удельных нагрузках, теплоизоляционные материалы делятся на пять видов: мягкие, полужесткие, жесткие, повышенной жесткости и твердые.

К естественным теплоизоляционным материалам относятся: диатомит, инфузорная земля, трепел и вермикулит.

К искусственным теплоизоляционным материалам относятся пористые легковесные огнеупоры и изделия из различных волокон. Легковесные изделия могут изготавливаться из шамота, динаса, диатомита, высокоглиноземистого сырья и т.п.

## 3.3 Теплотехнические характеристики огнеупорных и теплоизоляционных материалов

### 3.3.1 Теплотехнические характеристики огнеупорных материалов

Все характеристики огнеупорных материалов можно разделить на две группы: рабочие и физические.

К рабочим относятся:

**Огнеупорность** определяется как температура  $T_{огн}$ , при которой происходит деформация стандартного образца в форме усеченной пирамиды при отсутствии механического и физико-химического воздействия. Предельная рабочая температура службы огнеупоров в условиях эксплуатации  $T_{max}$  значительно ниже, чем  $T_{огн}$ .

**Термостойкость** – 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, окалина, газов.

К физическим относятся:

**Плотность.** Объем огнеупора можно условно представить в виде суммы двух объемов: твердого тела и пор. Различают два вида плотности:

а) Истинная – отношение массы твердой части огнеупора к объему твердой части огнеупора.

б) Кажущаяся – отношение массы огнеупора на его полный объем.

**Пористость.** Поры являются неотъемлемой частью огнеупоров. Они могут занимать до 90 % общего объема изделий. Различают пористость 3 видов:

а) общая пористость – отношение объема всех пор к объему всего изделия;

б) кажущаяся – отношение объема открытых пор к общему объему изделия.

в) закрытая – отношение объема закрытых пор к объему изделия.

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

Пористость является одной из основных характеристик структуры огнеупоров

**Газопроницаемость** – способность огнеупорных материалов пропускать газ при наличии на них перепада давления. Т.к. в огнеупорах есть сквозные поры, то при наличии разности давлений между печным пространством и окружающей атмосферой, через них могут проходить газы.

С повышением температуры газопроницаемость понижается, т.к. вязкость газов увеличивается. В процессе службы газопроницаемость отдельных огнеупоров увеличивается, т.к. в них появляются дополнительные поры и трещины, а газопроницаемость огнеупорной кладки в целом уменьшается из-за забивания неплотностей кладки и отдельных пор огнеупоров технологической пылью.

**Теплопроводность** зависит от природы материала, пористости и температуры. С повышением температуры теплопроводность возрастает. Увеличение пористости приводит к снижению теплопроводности.

**Теплоемкость** оказывает влияние на скорость нагрева футеровки, т.е. определяет при прочих равных условиях скорость вывода печи на рабочий режим. С повышением температуры теплоемкость огнеупоров повышается.

**Электропроводность.** Высокое электросопротивление огнеупоров, установленных в футеровке электропечей, предотвращает возможность короткого замыкания и связанной с этим серьезной аварии на печи.

Рассмотрим характеристики и область применения некоторых печных огнеупоров.

Динас содержит более 93 %  $\text{SiO}_2$  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  $\text{SiO}_2$  до 45 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . 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. Плавленные 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  $Cr_2O_3$ . Свойства этих огнеупоров существенно отличаются от периклазовых и зависят от соотношения хромита и магнезита. Максимальная термостойкость соответствует отношению  $Cr_2O_3:MgO = 30:70$ . 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  $\geq 3500$  °С. Они не смачиваются расплавами и поэтому устойчивы против них, имеют высокую термостойкость, но начинают окисляться в продуктах горения топлива при температуре  $\geq 600$  °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  $SiO_2$ , поэтому не окисляются как углеродистые. Имеют высокую прочность, износоустойчивость, термостойкость. Устойчивы против нейтральных и кислых расплавов, нестойки против основных. Применяются для изготовления трубок керамических рекуператоров, огнеупорных муфельей.

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  $H_3PO_4$ . Добавки могут регулировать скорость схватывания и твердения, улучшать пластические свойства, уменьшать усадку.

Широко распространены динасовые бетонные блоки и панели для стен нагревательных колодцев, глинистокварцевые 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.

В таблице 3.1 приведены свойства наиболее широко используемых печных огнеупоров.

Таблица 3.1 – Свойства огнеупоров, наиболее широко используемых в печах

№	Группа огнеупоров	Главные химические компоненты в % (мас.)	$T_{огн},$ °C	$T_{max},$ °C	Плотность $\rho,$ т/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности $\lambda,$ Вт/(м·К) при 100 °C	Удельная теплоемкость $c,$ кДж/(кг·К) при 100 °C
1	Динасовые	$SiO_2 \geq 93$	1690-1720	1650-1700	1,84-1,97	1,3	0,86
2	Шамотные	$30 \leq Al_2O_3 \leq 45$	1580-1750	1200-1400	1,83-1,95	0,9	0,9
3	Муллитовые	$62 \leq Al_2O_3 \leq 72$	1600-1800	1600-1650	2,34-2,52	1,2	0,86
4	Корундовые	$Al_2O_3 > 90$	1950-2000	1650-1800	2,89-3,12	2,1	0,83
5	Смолодоломитовые	$50 < MgO < 85$ $10 < CaO < 45$	1800-1900	1300-1400	2,7-2,8	3,4	0,96 при 1000 °C
6	Периклазовые (магнезитовые)	$MgO \geq 85$	2200-2400	1650-1700	2,6-2,8	4,5	1,08
7	Периклазохромитовые	$MgO \geq 60$ $5 \leq Cr_2O_3 \leq 20$	2000	1650-1700	2,95-3,04	2,5	1,0
8	Хромитопериклазовые	$40 \leq MgO \leq 60$ $15 < Cr_2O_3 < 35$	1920-2000	1700	2,9-3,15	2,0	1,8 - 1,15 (20-1000 °C)
9	Цирконовые	$ZrO_2 > 50,$ $SiO_2 > 25$	2000-2300	1900-2000	3,48-3,83	1,4	0,64
10	Карбидкремниевые	$SiC > 70$	2000	1800-2000	2,35-2,54	9,3 при 1000 °C	0,97

### 3.3.2 Теплотехнические характеристики теплоизоляционных материалов

К теплоизоляционным материалам предъявляются следующие требования:

- они должны иметь как можно более низкую теплопроводность;
- хорошо противостоять относительно высоким температурам, при которых прогревается внутренний огнеупорный слой;
- их строительная прочность должна быть достаточной, чтобы не разрушаться под действием веса теплоизоляционного слоя;

- должны иметь небольшую удельную теплоемкость, чтобы обеспечить минимальные потери тепла на аккумуляцию;

- стоимость материалов должна быть по возможности невысокой.

Для тепловой изоляции металлургических печей применяются три вида изделий: 1) легковесные пористые огнеупорные кирпичи: шамот-легковес, динас-легковес, диатомитовый и другие; 2) теплоизоляционные засыпки; 3) изделия в виде плит, ваты, войлока, картона, изготовленные на основе керамического волокна в смеси со связующим материалом, так называемые волокнистые огнеупоры. Волокнистые огнеупоры являются относительно новыми теплоизоляционными материалами.

Легковесные огнеупорные кирпичи обладают большой пористостью и поэтому меньшей плотностью и теплопроводностью, чем обычные огнеупорные кирпичи (таблица 3.2). Марка кирпича в таблице 3.2 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 3.2 – Свойства легковесных огнеупорных изделий

№	Тип и марка изделия	Плотность $\rho$ , т/м <sup>3</sup>	$T_{\text{раб}}^{\text{max}}$ , °С	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость $c$ , 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 качестве засыпок используются, в основном, естественные теплоизоляционные материалы: диатомит, инфузорная земля, трепел и вермикулит. Первые три материала имеют состав  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ .

Диатомит – продукт разложения водорослей, имеет рыхлую землистую структуру. Применяют в виде порошка или изделий, изготовленных на глинистой связке: плотность изделий 500, 600 и 700 кг/м<sup>3</sup>, коэффициент теплопроводности соответственно равен 0,18, 0,21, 0,27 Вт/(м·К). Коэффициент теплопроводности засыпки из диатомита колеблется в пределах 0,12-0,16 Вт/(м·К). Предельная температура применения диатомитовых изделий 1000 °С, засыпки 900 °С.

Инфузорная земля является продуктом разложения животных организмов; применяют чаще в виде порошка.

Трепел – продукт выветривания горных пород, пористый материал с низкой теплопроводностью; применяют в виде порошка или изделий. По свойствам изделия из трепела близки к диатомитовым.

Вермикулит – это разновидность слюды, имеющая способность при нагреве значительно увеличивать свой объем. Используют вермикулит в виде засыпки или в виде плит.

Применяется до температуры 700-900 °С. В обожженном виде носит название – зонолит. Предельная температура применения зонолита 1000-1100 °С. Коэффициент теплопроводности вермикулита и зонолита 0,1 Вт/(м·К).

К неогнеупорным изоляционным материалам относится асбест. Асбест является водным силикатом магния состава  $3\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , имеет волокнистое строение, пористый. Применяют в виде крошки для засыпки или в виде изделий – шнура, картона, плит, ткани и ваты.

### 3.3.3 Новые материалы, используемые в металлургических печах

В таблице 3.3 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 3.3 – Виды волокнистых огнеупорных изделий

№	Тип и марка изделия	Толщина, мм	Плотность $\rho$ , т/м <sup>3</sup>	$T_{\text{раб}}^{\text{max}}$ , °С	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К) при 600 °С	Удельная теплоемкость $c$ , 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

### 3.4 Кладка печи. Конструкции сводов, окон и вспомогательных узлов печи

Ограждение печей из огнеупорных и теплоизоляционных материалов называется кладкой или футеровкой. Футеровка является ответственной частью всех промышленных печей. От ее службы зависит надежность работы печи и длительность кампании. Элементами футеровки являются под, стены и свод.

Кладка должна быть, по возможности, непроницаемой для расплавленных металлов и шлаков, а также для печных газов.

В зависимости от требуемой тщательности работы кладку разделяют на категории, для каждой из которых допустимая толщина шва строго регламентирована:

а) особо тщательная, со швами толщиной не более 1 мм – для футеровки плавильных печей в местах возможного контакта с жидкой средой;

б) тщательная, со швами толщиной не более 2 мм – для футеровки, подвергающейся истирающему воздействию и для нагревательных печей с температурой до 1400 °С;

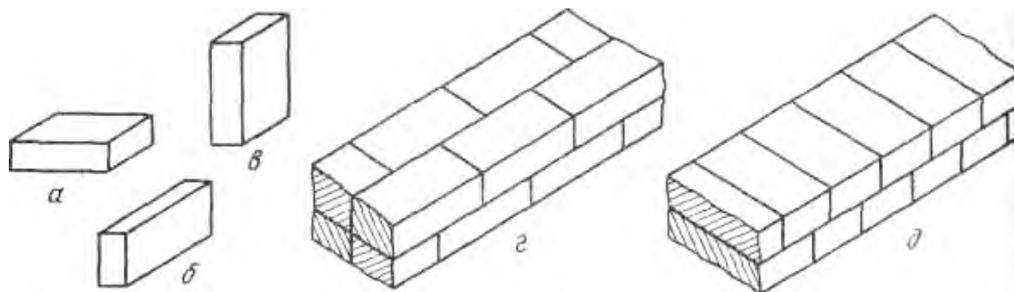
в) обыкновенная, со швами толщиной не более 3 мм – для футеровки, не контактирующей с жидким металлом и шлаком, и для нагревательных печей с температурой до 1200 °С;

г) простая, со швами толщиной до 4 мм – для выполнения нижних слоев пода.

Рабочий слой футеровки в местах, где требуется наибольшая плотность, выкладывают

особенно тщательно со швами не более 0,5 мм. При кладке борцов допускается шов толщиной до 5 мм, а при наружной облицовке печи красным или изоляционным кирпичом толщину шва принимают равной 8-10 мм. Кирпич в кладке может располагаться по-разному – на плашку, на торец или на ребро (рисунок 3.2) с обязательным смещением швов (с перевязкой). Это делает кладку более устойчивой и плотной. Огнеупорный слой кладки с теплоизоляционным обычно не перевязывают, так как они имеют разные коэффициенты термического расширения, что при нагреве кладки может привести к ее разрушению.

Для компенсации термического расширения кладки в ней предусматривают температурные швы, размеры которых зависят от рабочей температуры и от применяемого для кладки материала. Ширина термических швов колеблется в пределах от 5 до 15 мм на 1 м кладки.



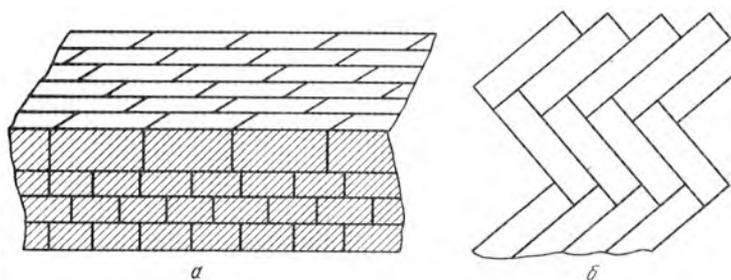
а – на плашку; б – на ребро; в – на торец; г – ложка кладка; д – тычковая кладка  
Рисунок 3.2 – Расположение кирпича в кладке

### Под печи

Под печи выкладывают или прямо на фундамент или на стальные листы, опирающиеся на балки. Воздушный зазор, образующийся при этом между подом и фундаментом, предохраняет последний от перегрева.

Под печи часто подвергается механическим ударам загружаемых материалов и химическому действию окислы или жидкого металла, поэтому его всегда выполняют многослойным.

Нижние ряды кладут на плашку из теплоизоляционного или красного кирпича. Верхние ряды выполняют из огнеупорных материалов, выбираемых в соответствии с условиями службы. Кладку ведут на ребро или торец с обязательным соблюдением перевязки швов. Иногда верхний ряд пода выкладывают «в елку». В плавильных печах рабочий слой обычно выполняют бесшовным – набивным или наварным. Кладка пода приведена на рисунке 3.3.



а – простая на ребро; б - в елку  
Рисунок 3.3 – Кладка подины нагревательных печей

В доменных печах под (лещадь) выполняют из блоков. Толщина пода термических и нагревательных печей, в зависимости от их размеров и рабочей температуры составляет 230-465 мм. В плавильных печах она достигает 1200 мм, а в доменных печах лещадь кла-

дут толщиной 5 м и более.

### Стены печи

Кладку стен ведут, как и пода, с перевязкой швов, для чего меняют положение кирпича, чередуя тычковые и ложковые ряды (кирпич, уложенный длинной стороной параллельно плоскости стены, называется ложковым, а уложенный перпендикулярно – тычковым).

Кладку стен нагревательных печей ведут строго вертикально, а стены плавильных печей, с целью повышения их стойкости, часто делают наклонными с толщиной, уменьшающейся кверху.

Стены выполняют двух- или трехслойными. Внутренний рабочий слой выкладывают из огнеупорного материала, отвечающего требованиям, зависящим от характера работы печи. Он должен иметь необходимую огнеупорность, химическую и механическую стойкость. Наружный слой делают из теплоизоляционного материала, назначение которого снизить потери тепла через кладку теплопроводностью.

Иногда стену выполняют из нескольких слоев (например, динас-шамот-изоляционный). Каждый слой кладут самостоятельно и только при высоте стен более 2,5-3,0 м огнеупорную кладку для повышения прочности перевязывают с изоляционной через каждые 5-6 рядов. Для повышения стойкости стен большой высоты в ряде случаев применяют анкерное крепление кладки.

Толщина стен нагревательных печей колеблется от 0,345 до 0,565 м, плавильных 0,9-1,1 м; доменных печей 1,1-1,6 м.

В печах периодического действия стены, по возможности, выполняют из легковесных материалов с целью снижения потерь на аккумуляцию тепла кладкой. При выполнении футеровки электрических печей для экономии электрической энергии слой тепловой изоляции делают толще, чем в топливных печах.

### Свод печи

Своды печей выполняют арочными, купольными или подвесными.

Арочные своды применяют при ширине пролета до 3 м. Для металлургических печей преимущественно применяют арочные своды с центральным углом 60, 90, 120 и 180° (рисунок 3.4 а-г).

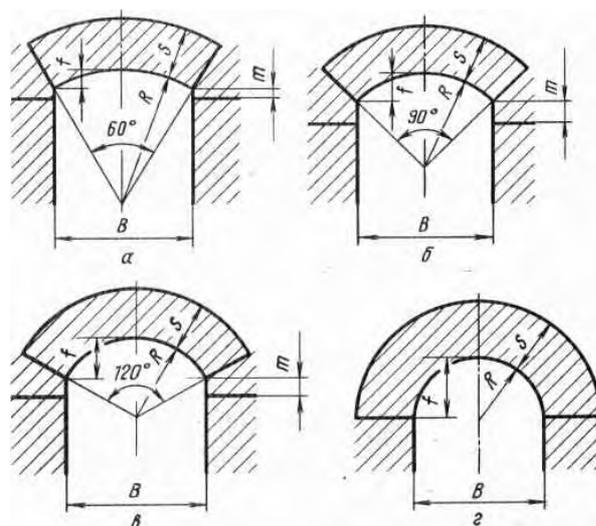


Рисунок 3.4 – Схемы сводов

Толщина свода  $S$  обычно равна длине кирпича – 230, 250 или 300 мм. Если свод выполняют из двух рядов кирпича по толщине, то ряды (акаты) не перевязывают друг с другом. Своды нагревательных печей выполняют с изоляцией, применяя для этого засыпку толщиной 65-230 мм. Своды плавильных печей обычно делают без тепловой изоляции во избежание перегрева и быстрого их износа.

Купольными сводами называются своды круглых печей. Их выполняют целиком из фасонного кирпича.

Подвесные своды нагревательных печей применяют при ширине пролета более 3 м. Для их выполнения используют фасонные кирпичи из шамота класса А и каолина, в местах пережимов (криволинейные участки сводов методических печей) применяют высокоглиноземистые кирпичи. Примеры выполнения подвесных сводов показаны на рисунке 3.5. Как правило, подвесные своды выполняются однослойными без применения теплоизоляции во избежание перегрева металлических элементов, на которых крепятся фасонные кирпичи, с последующим обрушением сводов.

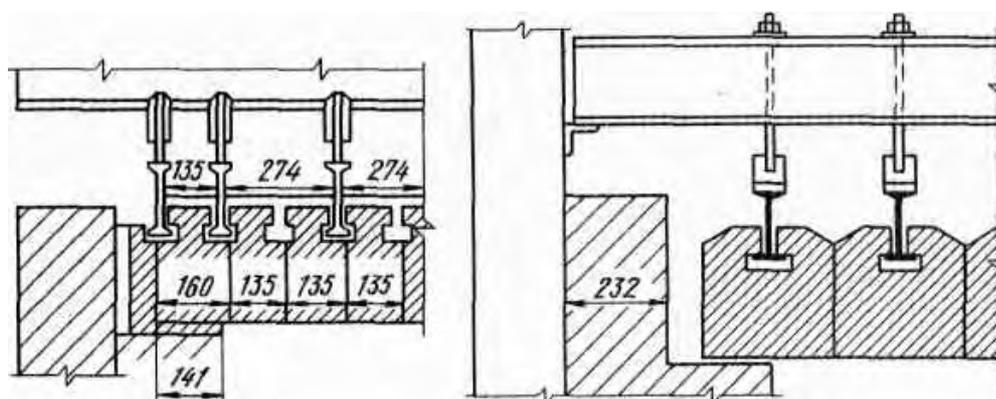


Рисунок 3.5 – Примеры выполнения подвесных сводов нагревательных печей

Своды плавильных печей очень массивны, поэтому их выполняют распорно-подвесными, при этом часть веса свода передается через подпятовые балки на стойки каркаса. Часто, во избежание перегрева сводов плавильных печей, устраивается принудительное воздушное охлаждение наружной поверхности свода с использованием вентилятора.

Съемные своды электрических печей или крышки нагревательных колодцев монтируют в специальных металлических рамах, воспринимающих все нагрузки и обеспечивающих их длительную службу.

### Контрольные вопросы

- 1 Каковы основные элементы печей, их назначение?
- 2 Что такое огнеупорные и теплоизоляционные материалы?
- 3 Какими характеристиками должны обладать огнеупорные материалы?
- 4 По каким критериям классифицируются огнеупорные материалы?
- 5 По каким критериям классифицируются теплоизоляционные материалы?
- 6 Каковы рабочие свойства огнеупорных материалов?
- 7 Каковы физические свойства огнеупорных материалов?
- 8 Какие существуют виды теплоизоляционных материалов?
- 9 какие требования предъявляют к теплоизоляционным материалам?
- 10 Каковы особенности футеровки пода, свода и стен печей.

## 4 Утилизация теплоты дымовых газов

### 4.1 Вторичные материальные и энергетические ресурсы

Технологические процессы черной металлургии характеризуются низким показателем использования энергии топлива основными его потребителями – металлургическими печами. В этой связи возникло понятие о вторичных энергетических ресурсах (ВЭР). ВЭР – часть энергии топлива, не использованная в технологическом процессе. Аналогично можно внести понятие о вторичных материальных ресурсах (ВМР), как отходах технологического процесса (например, пылевидные выбросы, вода, окалина, шлак). Совершенно очевидно, что использование ВЭР и ВМР не только экономит материально-энергетические ресурсы, но и уменьшает вредные выбросы и снижает загрязнение окружающей среды.

По виду энергии ВЭР делятся на горючие (топливные), тепловые и избыточного давления.

К горючим ВЭР относятся побочные газообразные продукты технологических процессов, которые могут быть использованы в качестве энергетического или технологического топлива. В черной металлургии к горючим ВЭР относят доменный, ферросплавный и конвертерный газы, а иногда также и коксовый газ.

Тепловые ВЭР представляют собой физическую теплоту основных и побочных продуктов, отходящих газов технологических агрегатов, а также систем охлаждения их элементов. Однако, если эта теплота используется для подогрева сырья или воздуха, т.е. возвращается в технологический процесс, то к ВЭР она не относится.

Доля тепловых ВЭР к общему их выходу составляет около 30 %. На рисунке 4.1 приведена классификация тепловых ВЭР.

ВЭР избыточного давления – потенциальная энергия газов, выходящих из технологических агрегатов с избыточным давлением, которое может быть использовано в утилизационных установках для получения других видов энергии.

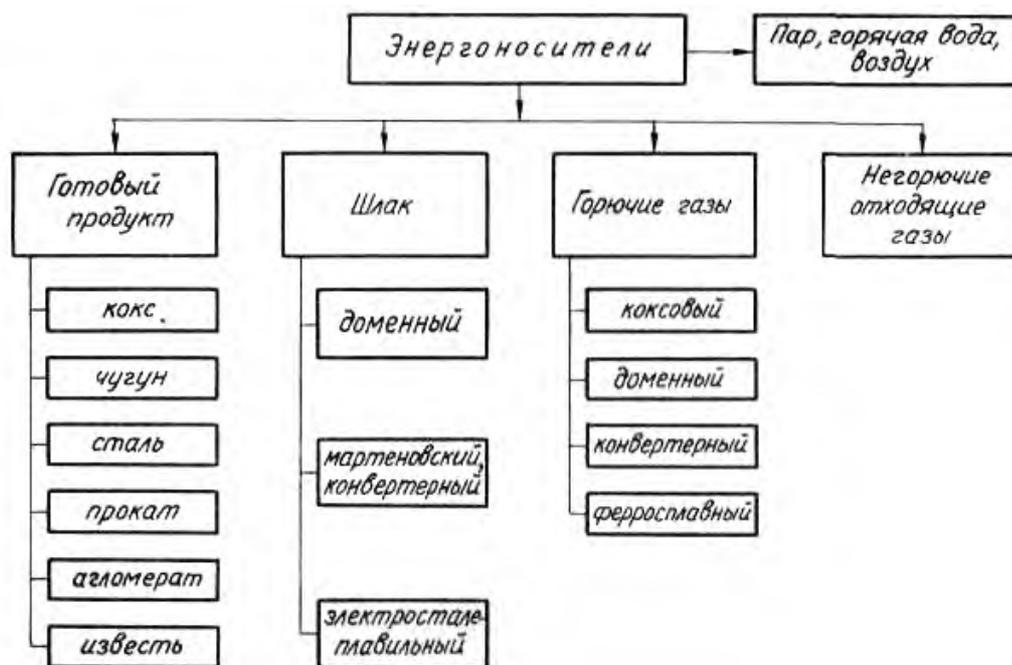


Рисунок 4.1 – Классификация тепловых ВЭР

В таблице 4.1 приведена классификация ВЭР по видам и способам их использования.

Таблица 4.1 – Виды ВЭР и способы их использования

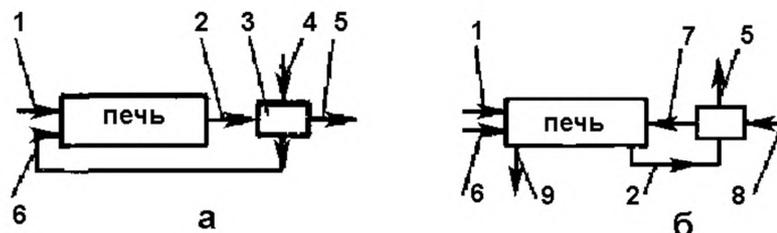
Виды ВЭР	Носители ВЭР	Способ использования
Горючие	Газообразные отходы	Сжигание в топливоиспользующих установках
Тепловые	Отходящие газы, готовая продукция и отходы производства, теплоносители систем охлаждения	Выработка в теплоутилизационных установках водяного пара, горячей воды
	Отработанный и попутный пар	Покрытие теплопотребности, выработка электроэнергии в конденсационном или теплофикационном турбоагрегате
Избыточного давления	Газы с избыточным давлением	Выработка электроэнергии в газовом утилизационном турбоагрегате

Количество ВЭР, образующееся в технологическом агрегате, называют выходом ВЭР. Эту величину относят либо к единице времени работы агрегата – источника ВЭР, либо в удельных показателях – к единице продукции.

#### 4.2 Схемы использования теплоты уходящих газов в печах. Принципы утилизации теплоты

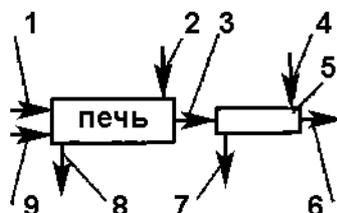
Использование физической теплоты отходящих газов осуществляется по трем схемам: 1) технологической (замкнутой и разомкнутой), 2) энергетической и 3) комбинированной.

Технологическая схема предусматривает использование этой теплоты для технологических процессов, как правило, в той же теплотехнологической установке. По такой схеме нагревают воздух, а также в некоторых случаях и газообразные топлива, предварительно подогревают обрабатываемый в печи материал или производят химико-термическую переработку некоторых шихтовых материалов, используемых в данном процессе. При отоплении печей природным газом к технологической схеме относится также термохимическая регенерация теплоты отходящих газов, используемая для конверсии метана. Описанные схемы являются замкнутыми, они обеспечивают экономию топлива в самом технологическом агрегате (рисунок 4.2). Теплоту отходящих газов можно использовать и в другой печной установке с меньшим температурным уровнем процесса. Такая схема является разомкнутой (рисунок 4.3). В этом случае экономится топливо в установке, использующей теплоту отходящих газов. Возможно также последовательное использование теплоты в основном в низкотемпературных агрегатах.



а - для подогрева воздуха; б - для предварительного нагрева материала; 1 - подвод топлива в печь; 2 - отвод газов из печи; 3 - рекуператор; 4 - подвод воздуха в рекуператор; 5 - отвод дыма; 6 - подвод воздуха в печь; 7 - подача подогретого материала в печь; 8 - подача холодного материала; 9 - выдача материала

Рисунок 4.2 – Замкнутые технологические схемы использования теплоты отходящих газов

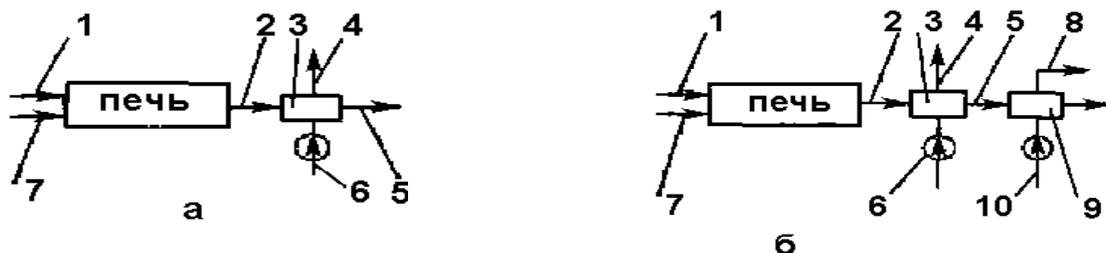


1 - подвод топлива; 2 - подача материала в основную печь; 3 - отвод газов из основной печи; 4 - подача материала в низкотемпературную печь; 5 - низкотемпературная печь; 6 - отвод газов из низкотемпературной печи; 7 - выдача материала из низкотемпературной печи; 8 - выдача материала из основной печи; 9 - подвод воздуха

Рисунок 4.3 – Разомкнутая технологическая схема использования теплоты отходящих газов

Применение замкнутой технологической схемы повышает эффективность использования топлива в технологическом агрегате, т.е. снижает выход ВЭР.

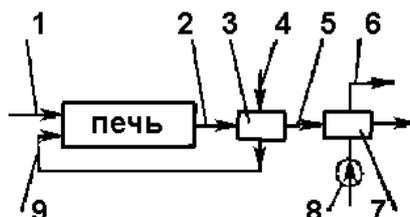
Энергетическая схема предусматривает использование теплоты отходящих газов в энергетических установках для производства каких-либо энергоносителей (теплоты, электроэнергии, холода и др.). Возможно последовательное размещение нескольких теплоиспользующих установок, например, котлов-утилизаторов и экономайзеров для подогрева сетевой воды. Таким образом, энергетическая схема является разомкнутой и позволяет сэкономить топливо, расходуемое на производство соответствующих видов и количеств энергоносителей за счет использования ВЭР технологического агрегата (рисунок 4.4).



а - для получения пара; б - для получения пара и горячей воды 1 - подвод топлива; 2 - отвод газов из печи; 3 - котел-утилизатор (КУ); 4 - отвод пара из КУ; 5 - отвод дыма из КУ; 6 - подвод питательной воды в КУ; 7 - подвод воздуха; 8 - отвод горячей воды; 9 - подогреватель сетевой воды; 10 - подвод воды в подогреватель

Рисунок 4.4 - Энергетические схемы использования теплоты отходящих газов

Комбинированная схема сочетает технологическую и энергетическую схемы и обеспечивает как уменьшение выхода ВЭР, так и более эффективное их использование (рисунок 4.5).



1 - подвод топлива в печь 2 - отвод газов из печи; 3 - рекуператор; 4 - подвод воздуха в рекуператор; 5 - отвод дыма из рекуператора; 6 - отвод пара из КУ; 7 - котел-утилизатор (КУ); 8 - подвод питательной воды в КУ; 9 - подвод воздуха в печь

Рисунок 4.5 - Комбинированная схема использования теплоты отходящих газов

Каждая из схем имеет достоинства и недостатки. Основным критерием для их сравнения является достигаемая экономия топлива. Однако этот критерий еще не дает основания для окончательной оценки схем. Здесь необходим технико-экономический расчет, учитывающий капитальные и эксплуатационные затраты, устойчивость потребления энергоносителей, полученных за счет теплоты отходящих газов, и др.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Что такое вторичные энергетические ресурсы?
- 2 Что относят к горючим вторичным энергетическим ресурсам?
- 3 Что относят к тепловым вторичным энергетическим ресурсам?
- 4 Что относят к вторичным энергетическим ресурсам избыточного давления?
- 5 Какие схемы использования теплоты отходящих газов существуют и каковы их особенности?

## 5 Рекуперативные теплообменники

Покидающие рабочее пространство печи дымовые газы уносят с собой значительное количество тепла, которое тем больше, чем выше температура газов и чем ниже коэффициент использования тепла в печи. Поэтому целесообразно часть тепла отходящих газов вернуть обратно в печь с тем, чтобы повысить к.п.д. печного агрегата, сэкономить топливо и повысить температуру горения. Для этого необходимо тепло, отобранное в теплообменнике, передать воздуху или газу, подаваемому в печь для горения. Подобным образом, с передачей тепла воздуху или газообразному топливу работают теплообменники рекуперативного и регенеративного типов.

Подогрев воздуха и газа за счет тепла отходящих из рабочего пространства печей дымовых газов дает значительный теплотехнический эффект, так как позволяет экономить топливо и при неизменной теплоте сгорания топлива повысить температуру его горения.

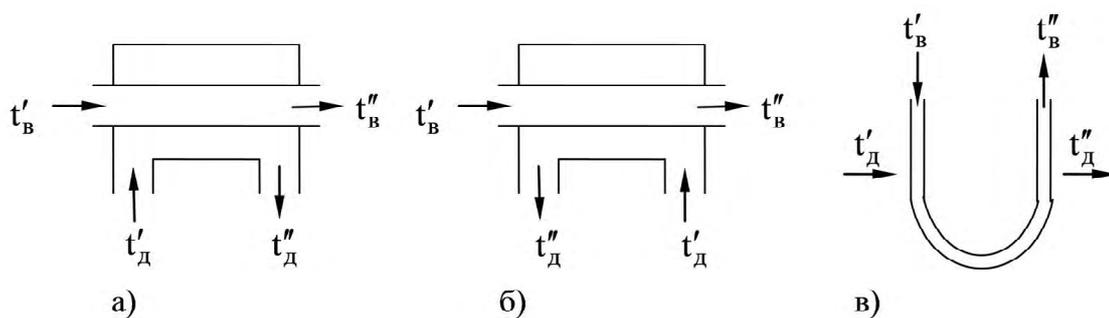
Эффективность утилизации теплоты уходящих газов оценивают степенью рекуперации (регенерации):  $\eta_{\phi} = \frac{Q_{\phi.в} + Q_{\phi.г}}{Q_{\phi.ух}}$ , которая показывает, какую долю теплоты уходящего дыма удастся вернуть в рабочее пространство с нагретым воздухом и газообразным топливом.

### 5.1 Схемы работы рекуператоров. Виды рекуператоров

Рекуператоры применяют, в основном, в нагревательных печах различного назначения.

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  $F$ ,  $m^2$ . Чаще всего стенка имеет цилиндрическую форму, т.е. выполняется в виде трубы, внутри которой протекает один теплоноситель, а снаружи – другой.

По схеме движения горячего и холодного теплоносителей различают рекуператоры прямоточные, противоточные и перекрестного тока (рисунок 5.1).



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

Рисунок 5.1 – Схемы движения теплоносителей в рекуператоре

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

В зависимости от материала стенки различают керамические и металлические рекуператоры.

Материалом для металлических рекуператоров служат хромоникелевые стали типа X18N10T, X25N20C2 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.

### 5.1.1 Теплообмен и температурные поля в рекуператорах

Рассмотрим схему теплообмена при передаче теплоты через стенку рекуператора (рисунок 5.2). 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  $\alpha_d^{луч}$  и конвективную  $\alpha_d^к$  составляющие:  $\alpha_d = \alpha_d^{луч} + \alpha_d^к$ , тогда как со стороны воздуха только конвективную  $\alpha_b = \alpha_b^к$ .

Тепловой поток от дыма к воздуху преодолевает три тепловых сопротивления: от дыма к стенке –  $1/\alpha_d$ , внутреннее сопротивление стенки –  $S/\lambda$  и от стенки к воздуху –  $1/\alpha_b$ . Как известно коэффициент теплопередачи  $k$  (Вт/( $m^2 \cdot K$ ),) для плоской стенки будет равен

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_d} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_b}}, \quad (5.1)$$

а тепловой поток  $Q$  (Вт) через стенку площадью  $F$  ( $m^2$ )

$$Q = k \cdot \overline{\Delta t} \cdot F, \quad (5.2)$$

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

Выражение (5.2) называют уравнением теплопередачи в рекуператоре, а  $\overline{\Delta t}$  – средним «температурным напором», который находят по формуле среднего логарифмического

$$\overline{\Delta t} = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}}. \quad (5.3)$$

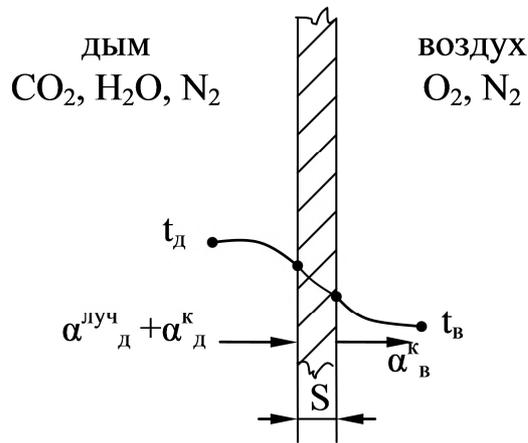
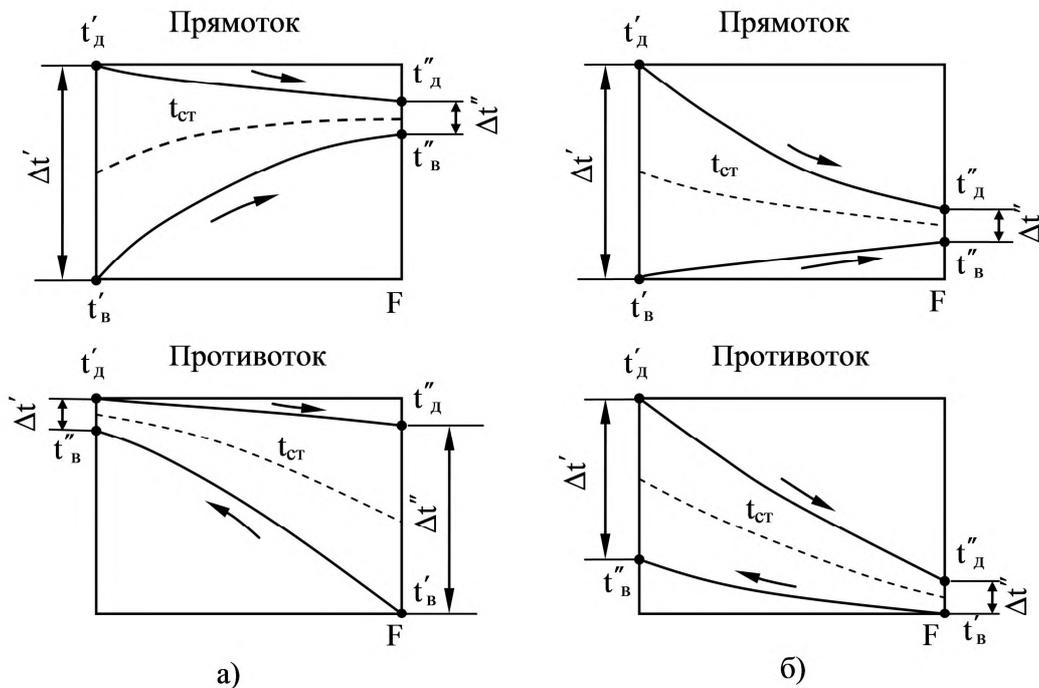


Рисунок 5.2 – Схема теплопередачи через стенку рекуператора

Обозначения величин  $\Delta t'$  и  $\Delta t''$  показаны на рисунке 5.3.  $\Delta t'$  и  $\Delta t''$  представляют разности температур дыма и воздуха через разделительную стенку на входе и выходе дымовых газов из рекуператора.



а – при  $G_{\text{д}} \cdot \bar{c}_{\text{д}} > G_{\text{в}} \cdot \bar{c}_{\text{в}}$ ; б – при  $G_{\text{д}} \cdot \bar{c}_{\text{д}} < G_{\text{в}} \cdot \bar{c}_{\text{в}}$ ;

$t_{\text{ст}}$  – температура разделительной стенки рекуператора

Рисунок 5.3 – Температурные поля рекуператоров вдоль поверхности F разделительной стенки рекуператора

Характер температурных полей на рисунке 5.3 определяется уравнением теплового баланса рекуператора

$$G_{\text{д}} \cdot (i'_{\text{д}} - i''_{\text{д}}) \cdot (1 - \eta_{\text{пот}}) = G_{\text{в}} \cdot (i''_{\text{в}} - i'_{\text{в}})$$

или

$$G_{\text{д}} \cdot \bar{c}_{\text{д}} (t'_{\text{д}} - t''_{\text{д}}) \cdot (1 - \eta_{\text{пот}}) = G_{\text{в}} \cdot \bar{c}_{\text{в}} (t''_{\text{в}} - t'_{\text{в}}), \quad (5.4)$$

где  $G_{\text{д}}$  и  $G_{\text{в}}$  – массовые расходы дыма и воздуха, 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;

$\eta_{пот} = 0,05-0,1$  – коэффициент потерь теплоты в окружающую среду.

Из уравнения теплового баланса (5.4) для идеального рекуператора (при  $\eta_{пот} = 0$ ) получаем соотношения

$$\frac{G_d \cdot \bar{c}_d}{G_b \cdot \bar{c}_b} = \frac{t''_b - t'_b}{t'_d - t''_d} \quad (5.5a)$$

или

$$t'_d - t''_d = (t''_b - t'_b) \cdot \frac{G_b \cdot \bar{c}_b}{G_d \cdot \bar{c}_d}. \quad (5.5b)$$

По физическому смыслу,  $G_d \cdot \bar{c}_d$  и  $G_b \cdot \bar{c}_b$  – это теплоемкости секундного расхода дыма и воздуха. Из (5.5б) следует: чем больше теплоемкость теплоносителя, тем меньше изменяется его температура в рекуператоре.

На рисунке 5.3 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 рисунок 5.3, можно увидеть, 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 экономически обоснованным считается предельное значение  $t''_b \leq 0,5t''_d$ .

### 5.1.2 Схема расчета рекуператора

Цель расчета рекуператора 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 рекуператора используются два уравнения: теплового баланса и теплопередачи.

Из уравнения (5.4) находят неизвестную температуру дыма на выходе из рекуператора  $t''_d$  и количество передаваемой воздуху теплоты  $Q = G_b \cdot \bar{c}_b (t''_b - t'_b)$ .

Из уравнения (5.2) определяют искомую величину поверхности теплообмена

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

Коэффициент теплопередачи « $k$ » находят по формуле (5.1). В металлических рекуператорах внутреннее тепловое сопротивление стенки  $S/\lambda$  пренебрежимо мало по сравнению с величинами  $1/\alpha_d$  и  $1/\alpha_b$ , поэтому формула (5.1) упрощается  $k = \alpha_d \cdot \alpha_b / (\alpha_d + \alpha_b)$ .

## 5.2 Конструкции рекуператоров

К конструкциям рекуператоров предъявляют следующие требования:

- 1) обеспечение максимально возможной степени утилизации тепла дымовых газов;
- 2) достаточная стойкость против воздействия дымовых газов с высокой температурой;
- 3) высокая удельная поверхность нагрева;
- 4) наивысший суммарный коэффициент теплопередачи;
- 5) наименьшее гидравлическое сопротивление;
- 6) достаточная герметичность.

Металлические рекуператоры работают в условиях высоких температур при окисляющем действии дымовых газов. Стойкость металлов определяет работоспособность рекуператора. Для их изготовления применяют обыкновенные углеродистые стали, а также легированные стали и чугуны. Углеродистые стали могут работать при температуре стенки 450-500 °С и обеспечивают подогрев воздуха до 250-300 °С, а серые чугуны – при температуре стенки 500-550 °С. И в том, и в другом случае температура дымовых газов на входе в рекуператор не должна превышать 700-750 °С.

Для увеличения стойкости рекуператора и температуры подогрева воздуха применяют чугуны и стали, легированные в основном хромом, кремнием и алюминием. Это позволяет повысить температуру подогрева воздуха, но вместе с тем приводит к резкому увеличению стоимости рекуператоров. Часто для уменьшения стоимости из жаропрочного металла делают только ту часть рекуператора, которая работает при наиболее высоких температурах; остальные части выполняют из углеродистого металла.

В настоящее время широкое распространение получили трубчатые, игольчатые и радиационные металлические рекуператоры.

**Трубчатые рекуператоры** выполняют из цельнотянутых труб различного диаметра. Часто применяют рекуператоры с прямыми трубами. В этом рекуператоре воздух проходит между трубами, а дымовые газы – внутри труб (может быть и наоборот). На пути воздуха может быть несколько поворотов, тогда рекуператор работает как многоходовый теплообменник. Подобные рекуператоры обеспечивают подогрев воздуха до 300-400 °С при температуре дымовых газов 800 °С.

Следует отметить, что в процессе работы (особенно разогрева) происходит термический рост рекуператора в тем большей степени, чем длиннее трубы. Поэтому такие рекуператоры часто «подвешивают», т.е. закрепляют их только в верхней части.

Кроме рекуператоров из прямых труб, в боровых печах удобно размещать рекуператоры с петлеобразной формой труб. Этот рекуператор можно с успехом использовать на печах небольших размеров, в нем можно обеспечить подогрев воздуха до 400 °С при температуре дымовых газов 800-850 °С. Устройство висящих труб у рекуператора дает возможность обойтись без применения компенсаторов термического расширения.

**Игольчатые рекуператоры** собирают из отдельных литых игольчатых труб, изготавливаемых в серийном порядке. Трубы выполняют из жаростойкого кремнистого чугуна с шаровидным графитом марки ЖЧС-5,5 (2,4-3,2 %; 5-6 % Si; 0,5-1,2 % Mn). Такие рекуператоры можно применять при температуре стенки до 600-650 °С и при температуре продуктов сгорания ~800 °С.

Основная часть игольчатых рекуператоров – игольчатая труба. Иглы могут быть выполнены как на внутренней, так и на наружной стороне. Иглы позволяют увеличить действительную поверхность нагрева и турбулизировать поток газов, что приводит к увеличению коэффициента теплопередачи. Обычно внутри труб пропускают воздух, а снаружи – дымовые газы.

Иглы, находящиеся на дымовой стороне рекуператоров, быстро засоряются, вследст-

вие чего в последнее время используют игольчатые рекуператоры с иглами только на воздушной стороне.

Весь игольчатый рекуператор собран из отдельных труб с фланцами, соединяемыми при помощи болтов. Крайнюю трубу прикрепляют к специальной раме, а затем к каркасу. Таким образом, между фланцами труб игольчатых рекуператоров есть большое число стыков, вследствие чего газоплотность всего рекуператора невысокая. Если рекуператор состоит из крупных секций (по 80-100 труб в каждой), то утечка воздуха может достигать 20-30 %, что необходимо учитывать при расчете рекуператора. Игольчатые рекуператоры, так же как и керамические, не пригодны для нагрева газообразного топлива.

**Радиационные рекуператоры.** В последние годы все шире применяют радиационные металлические рекуператоры, в которых благодаря значительной толщине слоя излучающих газов их тепловое излучение является определяющим видом теплоперехода на дымовой стороне рекуператора. В радиационных рекуператорах дымовые газы, нагретые до высокой температуры, проходят с малой скоростью в каналах большого сечения.

Применение радиационных рекуператоров целесообразно при температуре дымовых газов не ниже 800 °С, так как до этой температуры тепловое излучение относительно невелико. В радиационных рекуператорах воздух движется со скоростью 20-30 м/с и выше, что обеспечивает весьма высокие коэффициенты теплоотдачи на воздушной стороне и позволяет получать значительную тепловую нагрузку поверхности нагрева. Однако благодаря интенсивному теплообмену от стенки к воздуху высокая тепловая нагрузка не вызывает опасного перегрева материала рекуператора. Температура стенки рекуператора обычно превышает температуру воздуха на 100-150 °С.

Важнейшим фактором, обеспечивающим эффективную работу радиационных рекуператоров, является развитый теплообмен на воздушной стороне, который тем интенсивнее, чем выше скорость движения воздуха. Однако обеспечение высокой скорости движения воздуха требует соответствующего повышения его давления, что в свою очередь предъявляет дополнительные требования к строительной прочности радиационных рекуператоров.

Для повышения эффективности утилизации тепла отходящих из печей дымовых газов иногда бывает целесообразно выполнять рекуператор **комбинированным**, состоящим из двух частей: конвективной и радиационной. В таком рекуператоре холодный воздух поступает в конвективный, трубчатый рекуператор, а затем переходит для окончательного нагрева в радиационный рекуператор.

Работа керамического рекуператора в значительной мере зависит от того, из какого материала выполнены его элементы. Работая при весьма высоких температурах, материал рекуператора должен обладать достаточной огнеупорностью, хорошей термостойкостью, высокой температурой начала деформации при нагрузке, высокой теплопроводностью, необходимыми механическими свойствами, низким коэффициентом линейного расширения и быть достаточно стойким против воздействия железистых шлаков.

Эффективность работы керамических рекуператоров определяется в основном величиной суммарного коэффициента теплопередачи, герметичностью и удельной поверхностью нагрева ( $\text{м}^2$  на  $1 \text{ м}^3$  насадки рекуператора). Конструктивные формы сильно влияют как на эти основные характеристики, так и на работу рекуператора в целом. Керамические рекуператоры собирают из отдельных труб или блоков, поэтому в насадке много швов, что отрицательно влияет на их герметичность.

При нагреве рекуперативная насадка расширяется, поэтому для компенсации этого расширения верхняя часть насадки не должна быть жестко связана с окружающими стенками. С этой целью предусмотрены специальные затворы (часто песочные), позволяющие расширяться рекуперативной насадке, но перекрывающие зазор и препятствующие утечке воздуха через этот зазор на дымовую сторону. Применяют шамотные блочные рекуперато-

ры и карбошамотные рекуператоры из восьмигранных трубок.

**Шамотный рекуператор** собирают из фасонных кирпичей четырех марок. Основной его частью являются устанавливаемые вертикально фасонные блоки. Воздух движется снизу вверх по четырем каналам внутри блока. Дымовые газы направляются между блоками, совершая петлеобразное движение и омывая их с двух сторон. Такой рекуператор обеспечивает подогрев воздуха до 500-600 °С при температуре дымовых газов 1000-1100 °С.

**Карбошамотный трубчатый рекуператор** применяют для нагревательных колодцев, а также методических печей. Этот рекуператор собирают из восьмигранных трубок, которые располагают в шахматном порядке и соединяют между собой шамотными восьмигранными муфтами. В верхней части рекуператора предусмотрен специальный песочный затвор. Дымовые газы движутся внутри трубок сверху, воздух омывает керамические трубки снаружи. Воздух движется перпендикулярно дымовым газам и поднимается снизу вверх, причем для протекания его из одного хода в другой в перегородках опускают необходимое число промежуточных вставок.

Рекуператор данной конструкции используют на печах, температура отходящих дымовых газов которых составляет 1100-1400 °С для подогрева воздуха до 800-900 °С.

У рекуператора два основных недостатка – низкая герметичность и засорение (ошлакование) верхней части рекуперативных трубок. Низкая герметичность карбошамотного рекуператора является его наибольшим недостатком; утечка иногда достигает 40 % всего воздуха, поданного в рекуператор. Ошлакование (засорение) происходит вследствие того, что дымовые газы несут частички сажи, окалины и коксика (на нагревательных колодцах), которые, осажаясь на раскаленной поверхности керамики, привариваются к ней и зачастую полностью забивают трубки.

Конструкции рекуператоров разнообразны. Ниже представлено описание принципа работы рекуператоров трех конструкций.

Петлевой трубчатый рекуператор перекрестного тока (рисунок 5.4) выполняется из металлических труб диаметром 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.

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.

Струйный радиационный рекуператор (рисунок 5.5) имеет плоскую поверхность теплообмена в виде металлического листа.

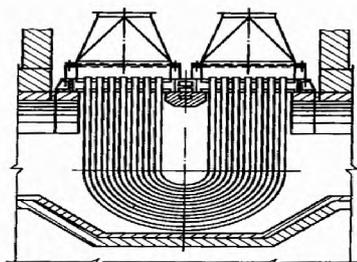


Рисунок 5.4 – Петлевой трубчатый рекуператор

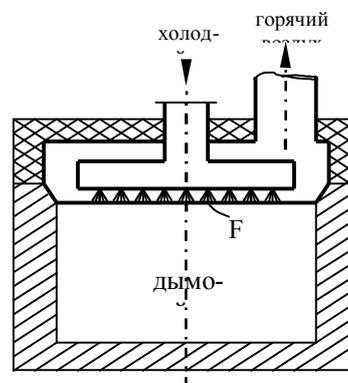


Рисунок 5.5 – Схема струйного радиационного рекуператора

Струйный рекуператор 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 от поверхности к воздуху происходит более интенсивно, чем при движении воздуха вдоль поверхности теплообмена.

Керамический трубчатый рекуператор (рисунок 5.6) 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.

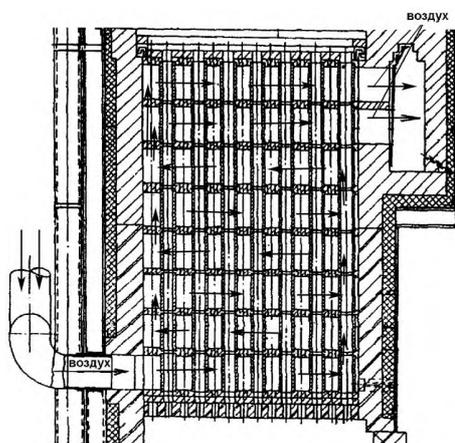


Рисунок 6.6 – Керамический трубчатый рекуператор

### Контрольные вопросы

- 1 Что такое рекуператор?
- 2 Какие существуют виды рекуператоров в зависимости от схемы движения горячего и холодного теплоносителей?
- 3 Виды рекуператоров в зависимости от материала стенки? Преимущества и недостатки этих видов рекуператоров.
- 4 Каковы цель и принцип расчета рекуператоров?
- 5 Каковы конструкции рекуператоров и особенности их тепловой работы?

## 6 Регенеративные теплообменники

### 6.1 Характеристика регенераторов. Схема работы регенераторов

Регенераторы нашли применение, как в плавильных, так и в нагревательных печах.

Регенератор металлургической печи представляет собой камеру, заполненную многорядной решеткой (насадкой) из огнеупорного кирпича, чаще всего динасового и шамотного, или из других штучных изделий. Сначала через регенератор пропускают дым, а затем в обратном направлении – воздух или газообразное топливо. Существует оптимальное в теплотехническом отношении время между перекидкой клапанов, т.е. между следующими друг за другом изменениями поступления газообразных сред.

В работе регенератора различают два рабочих периода времени –  $\tau_1$  и  $\tau_2$ . В течение периода  $\tau_1$  через регенератор проходит горячий теплоноситель – дым, который нагревает кирпичную насадку. Это дымовой период или период нагрева насадки. В течение периода  $\tau_2$  через регенератор пропускают 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 доменные печи 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.

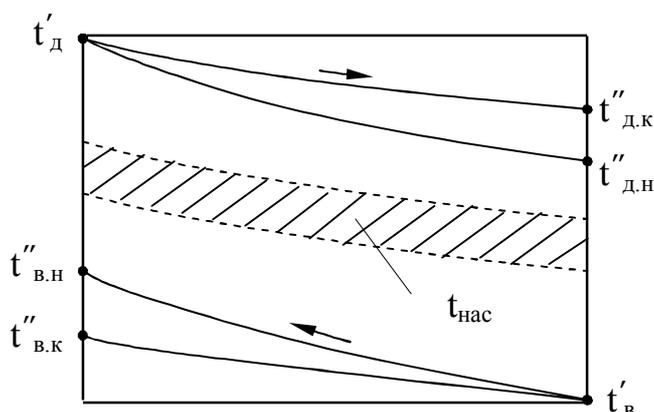
Преимущество регенераторов состоит в возможности работы в условиях более высоких температур, при сохранении герметичности даже при высоком давлении теплоносителей. В доменных воздухонагревателях и в мартеновских печах температура дыма на входе в насадку  $t'_d = 1400-1600$  °С, она ограничивается свойствами керамической насадки: огнеупорностью, термостойкостью, шлакоустойчивостью. Температура нагрева воздуха достигает значений  $t''_b = 1300-1400$  °С.

Недостатком регенераторов является необходимость перекидки клапанов и колебание температуры нагретого воздуха (топлива).

Температурное поле регенератора представлено на рисунке 6.1. При постоянной температуре дыма  $t'_d$  и воздуха  $t'_b$  на входе в насадку температуры  $t''_d$  и  $t''_b$  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 рисунке 6.1 температура дыма на выходе из насадки в начале дымового периода  $t''_{д.н}$  меньше, чем в конце  $t''_{д.к}$  этого периода.

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



$t'_д, t'_в$  – 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»

Рисунок 6.1 – Температурное поле регенератора

Чтобы не допускать значительного колебания температуры нагрева воздуха или топлива, перекидку клапанов делают через несколько минут. Уменьшение длительности периодов  $\tau_1$  и  $\tau_2$  полезно с точки зрения уменьшения объема насадки. Недостатком является снижение срока службы механических перекидных устройств.

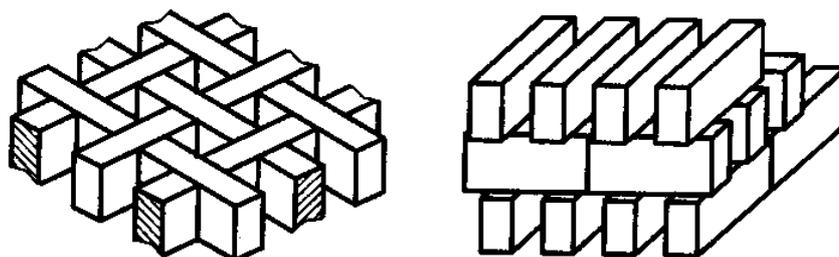
## 6.2 Конструкции регенераторов

Наибольшее распространение получили насадки (решетки) из обыкновенного кирпича – динасового и шамотного. В зависимости от способа укладки кирпичей различают насадки типа Сименс (рисунок 6.2,а) и типа Каупер (рисунок 6.2,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, но конвективная теплоотдача выше. Удельная поверхность насадок Сименса и Каупера находится на уровне  $15-20 m^2/m^3$  в зависимости от размера каналов для прохода газов (ячеек).

Специальный вид насадки из фасонных огнеупорных блоков для доменных воздушно-нагревателей 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 огне-

упорность 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.



а) насадка Каупера

б) насадка Сименса

Рисунок 6.2 – Регенеративные насадки из кирпича

### Контрольные вопросы

- 1 Что такое регенератор?
- 2 Каковы особенности тепловой работы регенераторов?
- 3 Каковы преимущества и недостатки регенераторов?
- 4 Каковы конструкции регенераторов, их преимущества и недостатки?

## 7 Основы тепловой работы печей

### 7.1 Классификация печей

#### 7.1.1 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, разнообразные печи прокатного и кузнечно-прессового производства: нагревательные колодцы, методические, кольцевые, роликовые печи, печи с выкатным подом.

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

В вертикальных шахтных печах с плотным слоем шихта, 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.

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 основном эти печи используют в цветной металлургии для обжига и сушки материалов.

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. В основном эти печи 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 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 печа-

ми.

**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.

### **7.1.2 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 свое 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 материалов, 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, 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 печах 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.

## 7.2 Понятия о тепловой мощности печи

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  $M_{\text{усв}}$ , другая часть вынужденно теряется в окружающую среду –  $M_{\text{пот}}$ . Поэтому принято называть тепловую мощность печи общей мощностью:

$$M_{\text{общ}} = M_{\text{усв}} + M_{\text{пот}}. \quad (7.1)$$

где  $M_{\text{общ}}$  – тепловая мощность печи, Вт.

Общая мощность топливной печи выражается через расход топлива, измеряемый расходомером в м<sup>3</sup>/ч (м<sup>3</sup>/с) – для газообразного топлива или в кг/ч (кг/с) – для жидкого топлива. Расход твердого топлива определяют путем взвешивания.

Если обозначить расход топлива через  $V$ , то

$$M_{\text{общ}} = V \cdot Q_{\text{н}}^{\text{p}}. \quad (7.2)$$

## 7.3 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 потери теплоты в рабочем пространстве составляют:

$$M_{\text{прп}} = M_{\text{ак.ф}} + M_{\text{пот.ф}} + M_{\text{окн}} + M_{\text{охл.в}}. \quad (7.3)$$

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

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 (7.1) будет равна  $M_{\text{пот}} = M_{\text{прп}} + M_{\text{ух}}$ . Тепловой баланс топливной печи будет таким

$$M_{\text{общ}} = M_{\text{усв}} + M_{\text{прп}} + M_{\text{ух}} \cdot \quad (7.4)$$

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:

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

Тепловой баланс топливной печи окончательно будет иметь вид:

$$M_{\text{общ}} = M_{\text{усв}} + M_{\text{прп}} + M_{\text{ух}} - M_{\text{ф.в}} - M_{\text{ф.т}} \cdot \quad (7.5)$$

В крупных печах, например, в мартеновских и двухваннах, 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.

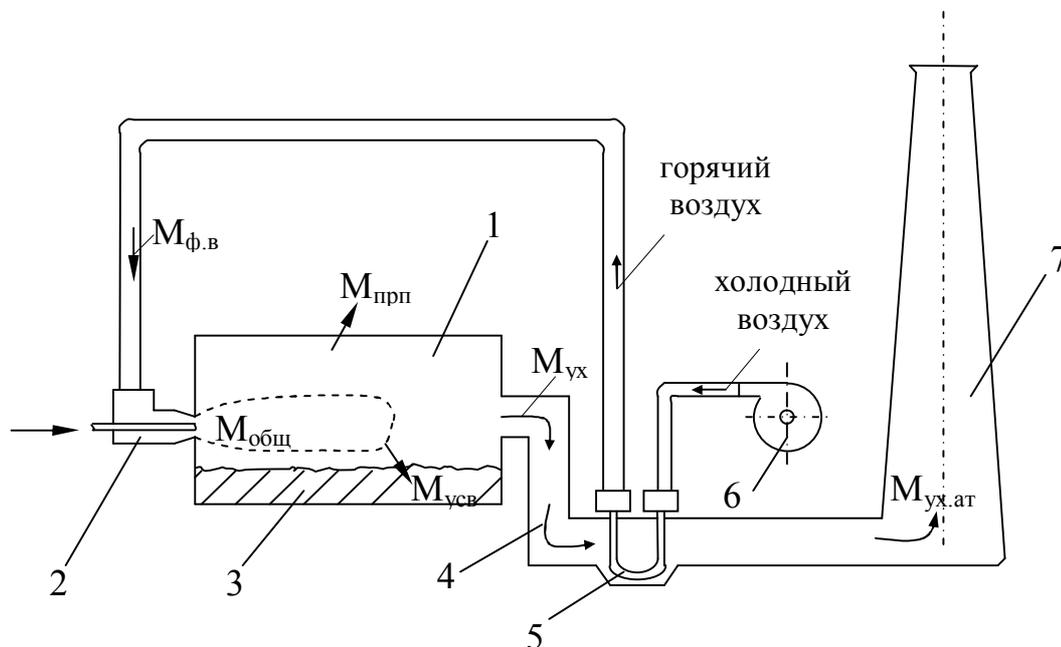
Существуют проекты так называемых безинерционных печей, ограждение которых отражает обратно в печь падающее на него из печи тепловое излучение, т.е. имеет свойство теплового зеркала. Существуют печи с испарительным охлаждением, в которых вода в водоохлаждаемых элементах печи превращается в пар, используемый 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 рисунке 7.1.

Тепловой баланс печи выражается уравнением, связывающим приход и расход теплоты в единицу времени

$$M_{\text{прих}} = M_{\text{расх}} \cdot \quad (7.6)$$

Баланс можно составлять для зон горения топлива, для рабочего пространства печи (зоны горения + зоны утилизации теплоты) и для печи в целом, включая внешние теплообменные устройства. Наилучшим образом характеризует тепловую работу печи баланс рабочего пространства. Для простоты в тепловом балансе будем считать нагрев металла и опустим слагаемые, связанные с окислением металла.



1 - рабочее пространство печи; 2 - горелка; 3 - нагреваемый материал; 4 - дымовой канал; 5 - утилизатор теплоты уходящего дыма (рекуператор); 6 - вентилятор; 7 - дымовая труба

Рисунок 7.1 – Поток теплоты в топливной печи

*Приход теплоты* чаще всего состоит из следующих частей:

- химическая теплота, выделяемая при сжигании топлива в единицу времени и называемая общей тепловой мощностью печи

$$M_{\text{общ}} = V \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}}; \quad (7.7)$$

- теплота, вносимая подогретым воздухом

$$M_{\text{ф.в}} = V \cdot L_{\text{п}} \cdot i_{\text{в}} = V \cdot Q_{\text{ф.в}}; \quad (7.8)$$

где  $i_{\text{в}}$  – удельная энтальпия подогретого воздуха, Дж/м<sup>3</sup>;

$L_{\text{п}}$  – действительный расход воздуха на 1 м<sup>3</sup> топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$Q_{\text{ф.в}} = L_{\text{п}} \cdot i_{\text{в}}$  – удельная физическая теплота подогретого воздуха;

- теплота, вносимая подогретым топливом

$$M_{\text{ф.т}} = V \cdot i_{\text{т}}; \quad (7.9)$$

где  $i_{\text{т}}$  – удельная энтальпия подогретого топлива, Дж/м<sup>3</sup>.

Часто эту величину называют удельной физической теплотой топлива и обозначают  $Q_{\text{ф.т}} = i_{\text{т}}$ .

*Расход теплоты* состоит из следующих частей:

- теплота, воспринятая нагреваемым металлом и называемая усвоенной тепловой мощностью

$$M_{\text{усв}} = P \cdot \Delta i, \quad (7.10)$$

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

$\Delta i$  – изменение удельной энтальпии металла в процессе нагрева, называемое тепловым дефицитом, Дж/кг;

- потери теплоты с уходящими продуктами горения

$$M_{yx} = B \cdot V_d \cdot i_{yx}, \quad (7.11)$$

где  $i_{yx}$  – удельная энтальпия дымовых газов на выходе из рабочего пространства печи, Дж/м<sup>3</sup>;

$V_d$  – объем дымовых газов, образующихся от сжигания 1 м<sup>3</sup> топлива м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$Q_{ф.уx} = V_d \cdot i_{yx}$  – удельная физическая теплота уходящих из печи газов Дж/м<sup>3</sup>;

- потери теплоты от химической неполноты горения топлива

$$M_{x.n} = B \cdot Q_{x.n}, \quad (7.12)$$

где  $Q_{x.n} = V_d \cdot (Q_{n(CO)}^p \cdot CO^d + Q_{n(H_2)}^p \cdot H_2^d) \cdot 0,01$  – удельная теплота недожога топлива в печи, Дж/м<sup>3</sup>;

$CO^d$  и  $H_2^d$  [%] – процентное содержание CO и H<sub>2</sub> в продуктах неполного горения;

$Q_{n(CO)}^p$  и  $Q_{n(H_2)}^p$  – низшая теплота сгорания CO и H<sub>2</sub>, Дж/м<sup>3</sup>;

- потери теплоты из рабочего пространства печи –  $M_{прп}$ , включающие в себя:

а) потери теплоты теплопроводностью через кладку;

б) потери теплоты излучением через открытые окна и щели;

в) потери теплоты с охлаждающей водой на охлаждение внутripечных металлических элементов;

г) потери на нагрев транспортных устройств;

д) потери с выбиванием дыма через неплотности кладки;

е) потери с механическим недожогом топлива, потери при диссоциации CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O;

ж) потери на нагрев подсасываемого в печь холодного воздуха и др.

Эти потери ( $M_{прп}$ ) принято называть мощностью тепловых потерь рабочего пространства печи.

Таким образом, уравнение теплового баланса можно представить в следующем виде:

$$M_{общ} + M_{ф.в} + M_{ф.т} = M_{усв} + M_{прп} + M_{уx} + M_{x.n}. \quad (7.13)$$

### Контрольные вопросы

- 1 По каким критериям классифицируются печи?
- 2 Какие существуют виды слоевых печей?
- 3 Что такое автогенные печи. Каковы особенности их тепловой работы?
- 4 Каковы виды электрических печей по способу преобразования электрической энергии?
- 5 Каково назначение плавильных и нагревательных печей?
- 6 Что такое печи непрерывного действия?
- 7 Что такое печи периодического действия?
- 8 Что понимают под тепловой мощностью печей?
- 9 Каковы тепловые потери в печах?
- 10 Перечислите статьи приходной и расходной частей теплового баланса печи.

## 8 Показатели тепловой работы печей

### 8.1 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  $E$  (кг), а продолжительность обработки материалов в печи (длительность плавки или нагрева металла) равна  $\tau$  (с), то

$$P = \frac{E}{\tau}. \quad (8.1)$$

Продолжительность обработки материалов в печи  $\tau$  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 (кг) получается с единицы площади пода или с единицы объема рабочего пространства за единицу времени (кг/(м<sup>2</sup>ч); т/(м<sup>3</sup>сутки)). 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.

### 8.2 Расход теплоты на единицу продукции

Сущность энергосберегающих мероприятий при эксплуатации печей состоит в сокращении расхода энергии на единицу продукции, который называют удельным расходом энергии « $b$ ». Чтобы вычислить « $b$ » в печи непрерывного действия, нужно  $M_{\text{общ}}$  разделить на производительность

$$b = \frac{M_{\text{общ}}}{P}, \text{ Дж/кг}. \quad (8.2)$$

Для печей циклического действия

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

где  $E$  - садка печи, т.е. масса металла находящегося на подине печи, кг;

$Q_{\text{общ}}$  - количество энергии, затраченное на тепловую обработку садки печи, Дж;

$\bar{M}_{\text{общ}}$  - средняя тепловая мощность печи за время тепловой обработки садки, Вт;

$\tau$  - время тепловой обработки садки (время полного цикла обработки садки), с.

Известно, что

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

поэтому

$$b = \frac{M_{\text{общ}}}{P} = \frac{P \cdot \Delta i}{P \cdot \eta_{\text{КИТ}}} + \frac{M_{\text{прп}}}{P \cdot \eta_{\text{КИТ}}} = \frac{\Delta i}{\eta_{\text{КИТ}}} + \frac{M_{\text{хх}}}{P}. \quad (8.3)$$

Полученная формула дает возможность проанализировать пути уменьшения удельного расхода энергии. Для печей циклического действия формула для «b» запишется аналогично (8.3)

$$b = \frac{\Delta i}{\eta_{\text{КИТ}}} + \frac{\overline{M_{\text{хх}}}}{P},$$

где  $\eta_{\text{КИТ}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{п}} + L_{\text{п}} \cdot \bar{i}_{\text{в}} + \bar{i}_{\text{т}} - V_{\text{д}} \cdot \bar{i}_{\text{ух}} - q_{\text{нед}}}{Q_{\text{н}}^{\text{п}}}$  - КИТ, усредненный за время тепловой обработки садки;

$\bar{i}_{\text{в}}$ ,  $\bar{i}_{\text{т}}$ ,  $\bar{i}_{\text{ух}}$  - усредненные значения удельной энтальпии подогретого воздуха, топлива и уходящих газов за время тепловой обработки садки;

$\overline{M_{\text{хх}}}$  - тепловая мощность холостого хода печи, усредненная за время тепловой обработки садки.

Формула (8.3) 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  $\Delta i / \eta_{\text{КИТ}}$  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  $\Delta i$  весьма велики: 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.

Второе слагаемое  $M_{\text{хх}} / P$  - «накладные расходы энергии» - зависит от производительности печи. Во время простоя печи, когда  $P = 0$ , а  $M_{\text{хх}} \neq 0$ , 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  $b = M_{\text{общ}} / P$  производительность (знаменатель) растет быстрее, чем мощность (числитель).

Однако с ростом  $M_{\text{общ}}$  рост производительности постепенно затухает (рисунок 8.1), так как с повышением мощности увеличивается температура печных газов и, следовательно, возрастают потери  $M_{\text{прп}}$ , которые пропорциональны температуре печных газов и уменьшается  $\eta_{\text{КИТ}}$ . Это значит, что при некоторой критической (оптимальной) производительности рост мощности холостого хода  $M_{\text{хх}} = M_{\text{прп}} / \eta_{\text{КИТ}}$  превышает прирост производительности печи и происходит увеличение удельного расхода энергии. Чтобы минимизировать «b», нужно эксплуатировать печь при оптимальной производительности и соответствующей оптимальной тепловой мощности.

Формула (8.3) показывает также, что сокращение  $M_{\text{прп}}$  и повышение  $\eta_{\text{КИТ}}$  однозначно приводят к снижению удельного расхода энергии. Снижение потерь теплоты в рабочем пространстве достигается путем изготовления тепловой изоляции из современных волокнистых изделий. Поверхности водоохлаждаемых балок и труб изолируются легкими во-

локнистыми муллитокремнеземистыми изделиями с оболочкой из огнеупорного бетона.

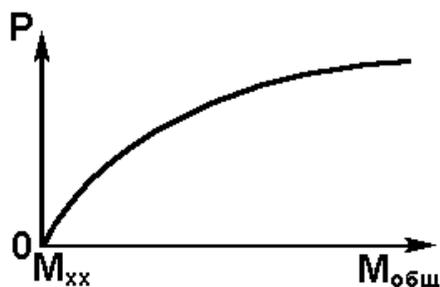


Рисунок 8.1 – Зависимость производительности печи от ее тепловой мощности

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<sup>2</sup> уменьшает расход природного газа, которым отапливается эта печь, на 43 %.

В топливных печах существенную экономию энергии можно получить путем повышения коэффициента использования теплоты КИТ.

### 8.3 Усвоенная тепловая мощность и КПД печи

Зная производительность печи  $P$  и тепловой дефицит  $\Delta i$ , можно найти усвоенную мощность, т.е. количество теплоты, поглощенное материалами в печи за единицу времени  $M_{\text{усв}} = P \cdot \Delta i$ , Вт.

Отношение усвоенной тепловой мощности  $M_{\text{усв}}$  к общей мощности, потребляемой печью  $M_{\text{общ}}$ , называют коэффициентом полезного действия печи (КПД)  $\eta_{\text{кпд}} = M_{\text{усв}} / M_{\text{общ}}$ . При этом не учитываются затраты электроэнергии на привод механизмов, обслуживающих печь: вентиляторов, дымососов, загрузочных и транспортирующих устройств. Поэтому  $\eta_{\text{кпд}}$  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 %.

### Контрольные вопросы

- 1 Что понимают под общей и удельной производительностью печи?
- 2 Что такое коэффициент использования теплоты?
- 3 Что понимают под коэффициентом полезного действия печи?
- 4 В чем заключается суть энергосберегающих мероприятий при эксплуатации печи?
- 5 Что такое усвоенная мощность печи?

## 9 Конструкции и тепловые режимы работы металлургических печей

### 9.1 Технологические цепочки в металлургии

Классическая технологическая цепочка металлургического комбината представлена на рисунке 9.1. На этом рисунке прямоугольниками обозначены основные типы (группы) печей, а овалами и кружочками – название используемого или образующегося материала. Для удобства пользования на схеме не показаны некоторые флюсующие материалы, используемые в ферросплавной, агломерационной, доменной и сталеплавильной печи, такие как бой шамотного кирпича, плавиковый шпат, боксит, песок, марганцевая руда и некоторые другие.

Технологическая цепочка (рисунок 9.1) постоянно совершенствуется. Например, всё шире используются, так называемые, печи металлизации, заменяющие коксовую и доменную печи. Постепенно, особенно при новом строительстве, нагревательные колодцы заменяются машинами непрерывного литья заготовок, чтобы исключить промежуточный продукт – слитки – перед получением заготовок.

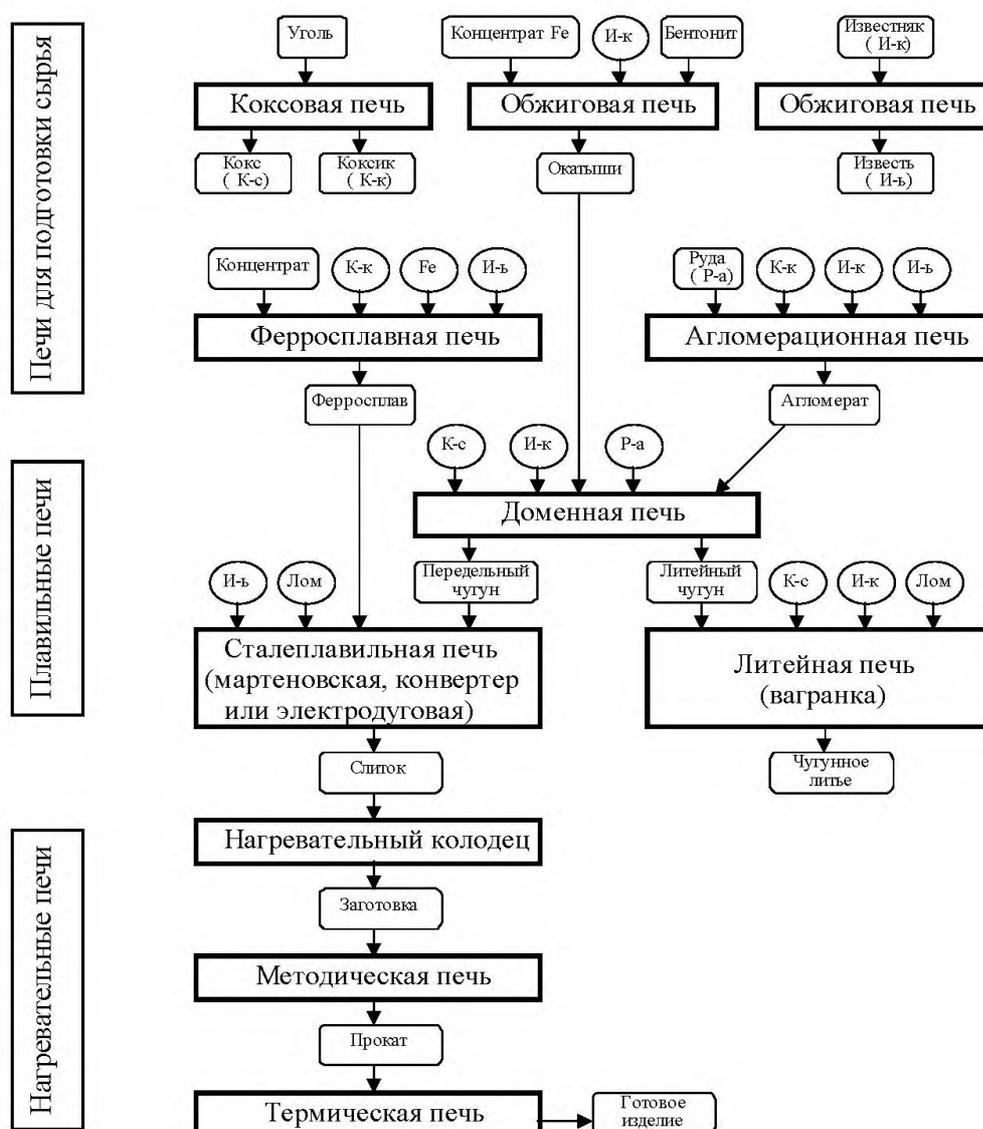


Рисунок 9.1 – Технологическая цепочка металлургического комбината

## 9.2 Нагревательные печи металлургии

Нагревательная печь – печь для нагрева твердых материалов с целью повышения пластичности или изменения структуры этих материалов.

Нагрев материалов с целью изменения их структуры производится в термических печах.

Нагревательные печи – самый распространённый класс печей, поскольку широко применяются не только в черной металлургии, но и в цветной металлургии, в машиностроении и т.д.

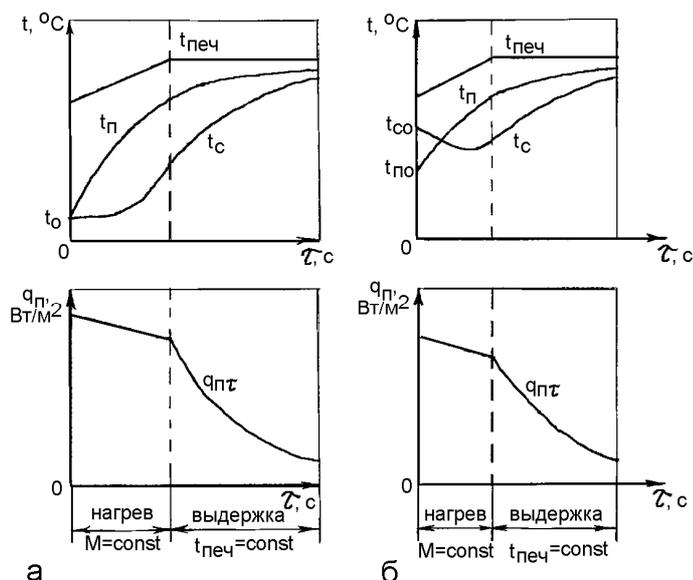
На заводах черной металлургии используются нагревательные колодцы и методические печи для нагрева слитков и заготовок.

## 9.3 Характеристика нагревательных колодцев

Нагревательный колодец – печь периодического действия (с верхней загрузкой и выгрузкой) для нагрева крупных стальных слитков перед прокаткой на обжимном стане. В колодце происходит нагрев слитков массой от 2-3 до 25 тонн. Толщина слитков обычно превышает 350-400 мм, поэтому нагрев ведут с 4 сторон, устанавливая слитки вертикально в рабочем пространстве колодца. Колодцы объединяют в группы (по 2 или 4 колодца) и для каждой группы предусматривается отдельная дымовая труба.

Нагревательный колодец является печью камерного типа. В нем поддерживается одинаковая температура по всему объему.

Принцип работы любого колодца следующий. Сверху открывается крышка и в камеру с помощью крана загружаются от 4 до 24 слитков. Эти слитки нагреваются до необходимой температуры, а после нагрева извлекаются поштучно и направляются для прокатки на обжимные станы (блюминги и слябинги). Далее цикл загрузки и нагрева слитков повторяется. Характерный температурный и тепловой режим нагрева слитков изображён на рисунке 9.2.



а - холодный посад; б - горячий посад;  $t_{печ}$  - температура печи;  $t_{п}$  и  $t_{с}$  - температуры поверхности и середины металла;  $q_{пт}$  - плотность теплового потока на поверхности металла  
Рисунок 9.2 – Режимы нагрева слитков в нагревательных колодцах

Нагрев имеет два периода. В первом периоде расход топлива или, другими словами, об-

щая тепловая мощность печи –  $M$ , поддерживается на максимальном уровне. К концу этого периода температура печи достигает такого уровня, который в дальнейшем гарантирует качественный нагрев металла. Качество нагрева обеспечивается выдержкой во 2-м периоде при условии постоянства температуры печи ( $t_{\text{печ}} = \text{const}$ ). В этом периоде достигается заданного значения температура поверхности металла (1200-1350 °С) и перепад температуры по сечению слитка. Известно, что удельный перепад температуры в конце нагрева должен быть не более 100-300 °С на 1 метр толщины слитка. Первый период называют периодом нагрева или  $M = \text{const}$ , а второй период – периодом выдержки или  $t_{\text{печ}} = \text{const}$ . Можно отметить, что тепловой поток на металл в начальном периоде ( $M = \text{const}$ ) несколько падает, а температура поверхности слитка повышается с постоянно снижающейся скоростью нагрева поверхности.

В нагревательные колодцы обычно поступает до 95 % слитков горячего посада с температурой поверхности, не превышающей 950-1000 °С.

Обычно на металлургических заводах нагревательные колодцы являются своего рода буфером для сжигания низкокалорийного газообразного топлива (доменный газ, коксодоменная смесь). В этом случае высокая температура в рабочем пространстве достигается путем подогрева воздуха, а в ряде случаев (при сжигании доменного газа) – путем подогрева и газа.

В зависимости от способа нагрева воздуха и газа различают регенеративные (самые давние колодцы) и рекуперативные нагревательные колодцы. Рекуперативные колодцы разделяют на колодцы с центральной и верхней (самые современные конструкции колодцев) горелкой. Преимущества одних колодцев перед другими можно оценивать по капитальным затратам, удобству эксплуатации и компактности расположения в цехе, поскольку характеристики топливоиспользования во всех колодцах близки между собой.

### 9.3.1 Устройство и работа регенеративных нагревательных колодцев

Регенеративный нагревательный колодец – нагревательный колодец, в котором подогрев газа и воздуха происходит в регенераторах. Схема этого колодца приведена на рисунке 9.3. Рабочее пространство имеет длину 3-6 м, ширину – около 2 м и глубину – 3-3,5 м. Масса садки около 45-80 тонн. Слитки располагаются по длине колодца вдоль стен. Колодец работает с реверсивным движением факела.

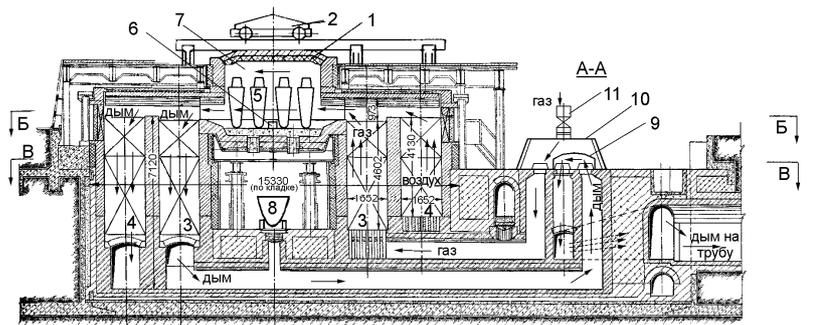
Регенеративные теплообменники представляют из себя камеры, заполненные огнеупорными кирпичами в определённом порядке. Система укладки кирпичей называется насадкой (решеткой). Чаще всего используются насадки Каупера и Сименса (рисунок 6.2).

В насадке Сименса идет чередование под прямым углом параллельных рядов кирпича. Между кирпичами и под кирпичами остаются проходы для газов. При закупорке одного из вертикальных каналов шлаковыми отложениями нижняя часть насадки продолжает работать. Это достоинство насадки Сименса. Одновременно с этим насадка имеет высокий коэффициент теплоотдачи и склонность к перегреву и оплавлению кирпича при насыщении его окислами железа.

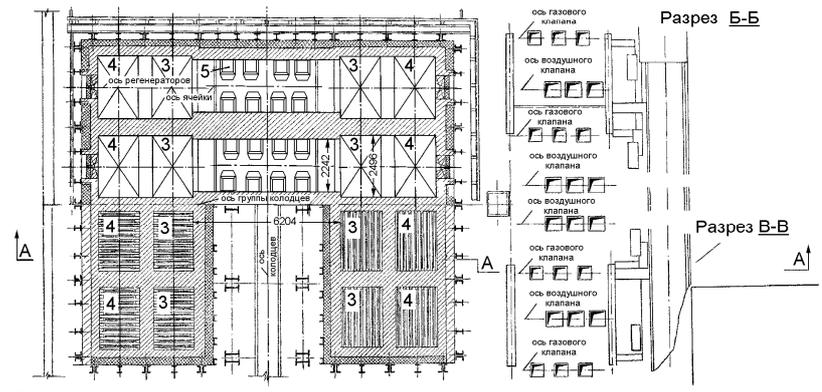
В насадке Каупера (рисунок 6.2) поверхность нагрева представляет собой сплошные вертикальные каналы с более низким коэффициентом теплоотдачи и с меньшей поверхностью теплообмена. Насадка Каупера более надёжна при высоких температурах, т.к. медленнее нагревается и имеет повышенную строительную прочность. Поэтому насадку Каупера используют для верхних рядов, а насадку Сименса – для средних и нижних рядов.

Принцип работы колодца следующий. Слитки холодного или горячего посада помещаются с помощью клещевого крана вдоль стенок рабочего пространства нагретой ячейки. Через одну из пар регенераторов (например, правую) подаётся воздух и газ, которые несколько перемешиваются в надрегенераторном пространстве и образуют факел в объёме

ячейки. Горячие газы (дым) уходят в левую пару регенераторов, подогревая их. После достижения верхними рядами регенеративной насадки предельной температуры (примерно через 15-30 минут) происходит перекидка газового и воздушного клапанов. В результате газ и воздух будут проходить через левые регенераторы и там нагреваться. Дымовые газы будут нагревать правую пару регенераторов. Через те же 15-30 минут снова произойдёт перекидка клапанов и цикл повторится. Время между перекидками клапанов влияет на расход топлива. С одной стороны, при коротких интервалах снижается температура дыма после регенератора и, соответственно, снижается расход топлива. С другой стороны, при коротких интервалах, увеличивается непроизводительный расход топлива, которое заполняет насадку газового регенератора перед перекидкой и вытесняется встречным потоком дыма в дымовую трубу.



а) продольный разрез (вид сбоку)



б) разрез в плане (вид сверху)

- 1 - крышка; 2 - механизм перемещения крышки; 3 - газовый регенератор; 4 - воздушный регенератор; 5 - слитки; 6 - шлаковая лётка; 7 – рабочее пространство (ячейка);
- 8 - шлаковая чаша; 9 - золотник газового клапана; 10 - газовый клапан;
- 11 - подвод газа к ячейке

Рисунок 9.3 – Схема регенеративного нагревательного колодца

После того как садка слитков нагреется до нужной температуры, слитки поштучно извлекают и отправляют на обжимной стан. Время нагрева металла зависит от начальной температуры слитков, размеров их сечения и составляет при холодном посаде обычных слитков 6-7 часов.

Температура нагрева слитков колеблется в зависимости от марки стали в пределах 1200-1350 °С. Максимальная температура дыма на входе в регенератор 1400-1450 °С, на выходе – 500-600 °С. Максимальная температура подогрева воздуха и газа 900-1000 °С.

Для изменения направления дыма, факела посредством изменения направления потоков газа и воздуха служат перекидные устройства: для газа – герметичный клапан золотникового типа (клапан Фортера), показанный на рисунке 9.3, а для воздуха – негерметичный клапан мотылькового типа (клапан «симплекс»). В клапане Фортера герметичность

достигается применением водяных затворов. Клапаны подсоединены к регенераторам колодца посредством системы дымоходов. К каждому клапану от регенераторов подходят два дымохода (левый и правый), расположенные под регенераторами в два этажа (рисунок 9.3). Между этими каналами на входе в клапан расположен центральный канал, связанный с дымовой трубой системой дымоходов.

В правые регенераторы поступают газ и воздух. Для этого золотник клапана Фортера и мотылек клапана «симплекс» перекрывают центральный и правый каналы в клапанах. По нижним дымоходам из левых регенераторов поступает дым в правый канал, а затем после разворота на  $90^\circ$  – в центральный канал. В период перекидки золотник и мотылек меняют свое положение. Теперь газ и воздух поступают в правые каналы клапанов и направляются для нагрева в левые регенераторы. Дым из правых регенераторов по верхним дымоходам поступает в левые каналы клапанов, а затем после разворота в центральный дымоход. Таким образом, в центральные каналы всё время поступает дым из регенераторов.

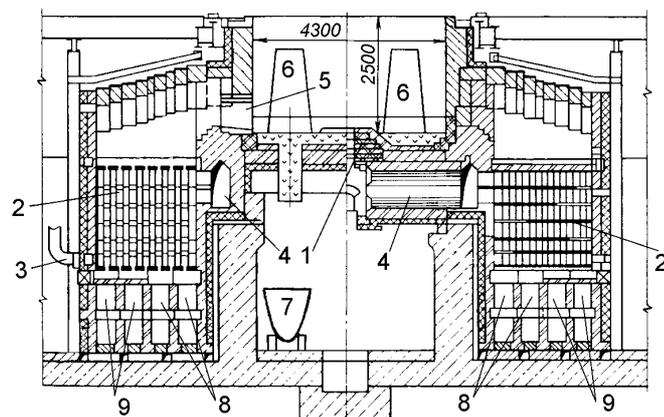
Дым из центрального канала направляется на дымовую трубу по следующей схеме. Сначала дым от каждой ячейки поступает в сборный дымоход для двух ячеек. Аналогично свой дымоход имеют и две другие ячейки. В общий дымоход перед дымовой трубой поступает дым от 4 ячеек через два сборных дымохода.

В дымоходе для каждой ячейки и в общем дымоходе для 4 ячеек установлены шиберы для регулировки тяги дымовой трубы. На группу из 4 ячеек установлен один вентилятор для подачи воздуха. В каждом воздухопроводе, идущем к клапану «симплекс», установлена поворотная заслонка.

Факел в регенеративном колодце находится достаточно близко к подине и обеспечивает температуру подины около  $1370^\circ\text{C}$ , что является пороговым значением для перевода шлака в жидкое состояние. Шлак состоит из окалины, осколков футеровки и некоторых легкоплавких соединений, остающихся в прибыльной части слитка после его разлива и охлаждения. Через шлаковую летку шлак удаляется с подины непрерывно, а также периодически при специальном нагреве пустого колодца.

### **9.3.2 Устройство и работа рекуперативных нагревательных колодцев с отоплением из центра подины**

Рекуперативный нагревательный колодец с отоплением из центра подины – нагревательный колодец, в котором воздух подогревается в рекуператоре, а подвод газа и воздуха осуществляется через отверстия в подине. Схема колодца представлена на рисунке 9.4. В квадратной ячейке нагреваются 10-14 слитков. Масса садки – 45-105 тонн. В центре ячейки расположена горелка, представляющая из себя газовое сопло, окруженное каналом для прохода горячего воздушного дутья. Воздух подаётся в ячейку своим вентилятором. Ширина рекуператора равна ширине ячейки (4-5 метров). Рекуператор собирают из восьмигранных керамических трубок. Трубки сочленяют между собой восьмигранными звездочками (муфтами), что усиливает прочность рекуператора и создает условия для перекрестного движения дыма и воздуха. Охлаждающийся дым движется по трубкам рекуператора сверху вниз. Воздух движется в горизонтальном направлении между трубками. Высота яруса для прохода воздуха обычно равна высоте трубки. Около каждой звездочки имеются 4 отверстия. Если отверстия заложены огнеупорными вставками, то воздух не может попасть на верхний ярус. В конце яруса отверстия возле каждой звездочки открыты и воздух переходит на следующий (верхний) ярус. Таким образом, в рекуператоре имеет место перекрестно-противоточное движение воздуха, что усиливает теплоотдачу от дыма к нагреваемому воздуху.



1 - горелка; 2 - керамический рекуператор; 3 - подвод холодного воздуха; 4 - канал для подвода горячего воздуха; 5 - каналы для отвода дыма; 6 - слитки; 7 - шлаковая чаша; 8 - дымовые каналы для отвода «своего» дыма; 9 - дымовые каналы для отвода «транзитного» дыма соседней ячейки

Рисунок 9.4 – Схема рекуперативного колодца с отоплением из центра подины

Диаметр воздухопровода между вентилятором и рекуператором 0,7 м. Рассредоточенная подача воздуха в рекуператор осуществляется тремя входными воздухопроводами. Диаметр подводящего воздухопровода от рекуператора к горелке 0,8 м. Поэтому сверху рекуператора имеется коридор, служащий для сбора нагретого воздуха. Колодец обычно отапливается коксодоменной или природнодоменной смесью. Газ может подогреваться в металлическом рекуператоре, располагаемом в общем дымоходе после керамических рекуператоров.

Группа колодцев состоит из 2 ячеек и обслуживается одной дымовой трубой.

Уборка шлака чаще всего осуществляется в сухом виде.

Принцип работы колодца следующий. Слитки загружаются сверху краном в рабочее пространство. Снизу в рабочее пространство подаются газ и воздух. Температура газа до 250-300 °С, температура воздуха до 750-800 °С. Образующийся при сжигании газа факел заполняет рабочее пространство, ударяется о крышку колодца, что способствует сокращению длины факела, но и снижению стойкости крышки. Пряди факела по стенкам опускаются вниз. Далее через два дымовых окна дым поступает в надрекуператорное пространство, а затем в трубки рекуператоров. По завершении нагрева слитков газ и воздух отключают, а слитки поштучно извлекают клещевым краном и отправляют на блюминг.

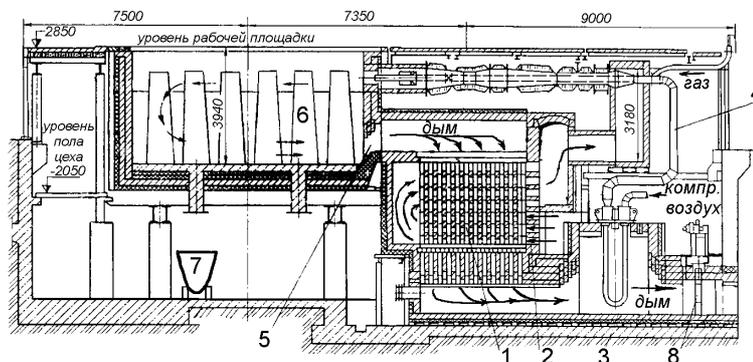
Недостатки колодца: а) неравномерность нагрева слитка по высоте в связи с недостаточно хорошим перемешиванием газа и воздуха перед горением; б) продолжительность нагрева слитков холодного посада и удельный расход топлива несколько выше, чем у регенеративных нагревательных колодцев и при этом колодцы требуют более калорийного топлива; в) нарушение герметичности рекуператора в процессе его эксплуатации, что приводит к потерям воздуха. Потери воздуха обусловлены значительным перепадом давления между воздушной и дымовой сторонами рекуператора. Этот перепад давления увеличивается в процессе работы колодца из-за зарастания пылью входных отверстий верхнего ряда трубок. В новом колодце утечка составляет 10-30 %, а в конце кампании – 50-60 %. Потери воздуха негативно сказываются на качестве сжигания топлива, величине тепловой мощности, длительности процесса нагрева, расходе топлива и на продолжительности кампании работы колодца. Рекуператоры необходимо переключивать каждые 1,5-2 года. Утечки воздуха разбавляют дым и снижают его температуру. Таким образом, снижается эффективность рекуператора. Если в первые недели работы рекуператора после ремонта температура подогрева воздуха составляет 750-800 °С, то в дальнейшем температура может снизить-

ся до 400-500 °С.

### 9.3.3 Устройство и работа рекуперативных нагревательных колодцев с верхней горелкой

Рекуперативный нагревательный колодец с верхней горелкой – нагревательный колодец, в котором воздух нагревается в рекуператорах, а подвод газа и воздуха для сжигания топлива осуществляется в верхнюю часть колодца. Схема колодца представлена на рисунке 9.5. Ячейка имеет в горизонтальной плоскости прямоугольную форму (ширина 2,2-3,3 м, длина 7-10 метров). Глубина ячейки до 4,4 м. Обычно в ней нагреваются 12-14 слитков. Общая масса садки – самая высокая из всех типов колодцев и составляет около 140 тонн. Колодец имеет один керамический рекуператор для нагрева воздуха до 700-750 °С и один металлический рекуператор для нагрева компрессорного воздуха высокого давления до 200-350 °С.

Обычно горелка представляет из себя газовую трубу (газовое сопло), по периферии которого подводится воздух. Смешение газа и воздуха происходит в ячейке. В качестве топлива используют газовые смеси.



- 1 - керамический рекуператор; 2 - каналы для холодного воздуха; 3 - металлический рекуператор; 4 - подвод компрессорного воздуха; 5 - дымовое окно; 6 - слитки;  
7 - шлаковая чаша; 8 - дымовой шибер

Рисунок 9.5 – Схема рекуперативного колодца с верхней горелкой

Особенность колодца: отсутствие вентилятора. Подача воздуха в горелку осуществляется с помощью инжектора. В качестве инжектирующей среды используется компрессорный воздух, количество которого составляет 25-30 % от общего расхода воздуха. Под действием разрежения, создаваемого инжектором, и из-за разогретого рекуператора, который работает как дымовая труба, атмосферный воздух сам по себе входит в рекуператор и далее поступает в смеситель инжектора.

В процессе работы колодцев инжектор может подсасывать через рекуператор больше воздуха, чем требуется по условиям качественного сжигания топлива. Для стабилизации расхода воздуха применяются специальные каналы для сброса излишков воздуха или создают повышенное давление в рабочем пространстве ячейки (при надлежащем уплотнении подкрышковой щели). Последнее позволяет регулировать противодавление работающего инжектора и, соответственно, расход воздуха.

Принцип работы колодца следующий. Слитки загружаются поштучно в рабочую камеру и располагаются вдоль обеих продольных стен. Включается подача компрессорного воздуха и газа, которые вместе с подсасываемым атмосферным воздухом дают длинный факел на выходе из горелки в рабочее пространство. После удара факела о торцевую стенку он меняет направление на обратное, и дым удаляется через дымовое окно, расположен-

ное ниже горелки. Таким образом, движение дыма в колодце носит подковообразный характер. С одной стороны, это приводит к сокращению расхода топлива за счёт утилизации теплоты дыма. Но с другой стороны, приводит к неравномерному нагреву садки. Слитки, стоящие около противоположной от горелки стенки, греются быстрее. Кроме того, верхняя часть слитков имеет более высокую температуру. Режим нагрева слитков ведут по слиткам, которые греются быстрее.

Дым, который удаляется из рабочего пространства, проходит последовательно керамический рекуператор, состоящий из восьмигранных керамических трубок, далее металлический трубчатый рекуператор, дымовой шибер и на дымовую трубу.

Поскольку температура подины низкая, то на колодце применяют сухое шлакоудаление.

Так же как и в колодцах с центральной горелкой верхний ряд трубок рекуператора за­растает пылью, выносимой из рабочего пространства с дымом. Это приводит к закупориванию дымовых каналов и преждевременному выходу рекуператоров из строя.

#### **9.4 Методические печи. Режимы нагрева заготовок в методических печах**

Методическая печь – проходная печь для нагрева заготовок перед обработкой давлением. В свою очередь проходной печью называется печь непрерывного действия, в которой нагреваемые заготовки движутся вдоль печи, перемещаемые толкателем, рольгангом или другими механизмами. Загрузка и выгрузка проходной печи производятся через окна в торцовых стенах печи или в боковых стенках вблизи торцов.

В методической печи заготовки обычно передвигаются навстречу движению продуктов сгорания топлива; при таком противоточном движении достигается высокая степень использования теплоты, подаваемой в печь. Заготовки проходят последовательно три зоны: методическую (зону предварительного подогрева), сварочную (зону нагрева) и томильную (зону выравнивания температур в заготовке). Иногда томильная зона может отсутствовать.

Методические печи классифицируют: а) по числу зон отопления в сварочной зоне плюс методическая зона, и, если есть, томильная зона (2-, 3-, 4-, 5-зонные); б) по способу транспортирования заготовок (толкательные, с подвижными балками и др.); в) по конструктивным особенностям (с нижним обогревом, с наклонным подом, с плоским сводом и т.д.).

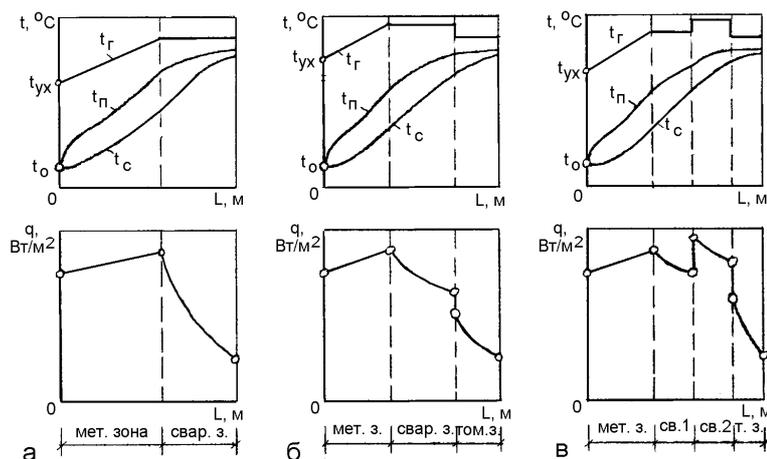
Методические печи отапливают газообразным или жидким топливом с помощью горелок или форсунок.

Стандартные режимы нагрева металла в двухзонных, трехзонных и многозонных методических печах приведены на рисунке 9.6. Можно отметить, что, в отличие от нагрева металла в колодцах, тепловой поток на поверхность металла в начальный период нагрева (методическая зона) нарастает. Одновременно температура поверхности сначала резко увеличивается (скорость нагрева максимальная), а затем повышается медленнее (скорость нагрева падает) с постепенным увеличением скорости к концу методической зоны.

Преимущество многозонных печей перед двухзонными: гибкость в регулировке режима нагрева и, соответственно, меньший расход топлива при высоком качестве нагрева металла. Недостаток: усложнение конструкции системы отопления.

Под качеством нагрева понимается: точность получения заданных температур в конце нагрева, величина окисления и обезуглероживания поверхности заготовок, точность сохранения формы заготовок после воздействия термических напряжений. Ориентировочные значения отдельных показателей качества: температура нагрева заготовок в методических печах – 1100-1250 °С; перепад температуры в конце нагрева –

400-1000 °С/метр толщины заготовки; количество окислившегося металла – 0,5-2%; толщина обезуглероженного слоя – 0,5-1,5 мм.



а - 2-зонная печь; б - 3-зонная печь; в - многозонная печь;  $t_r$  - температура дыма;  $t_{yx}$  - температура уходящего дыма;  $t_0$  - начальная температура металла;  $t_n$  - температура поверхности металла;  $t_c$  - температура середины металла;  $q_n$  - плотность теплового потока на поверхности металла

Рисунок 9.6 – Режимы нагрева заготовок в зависимости от числа зон методической печи (L - длина печи)

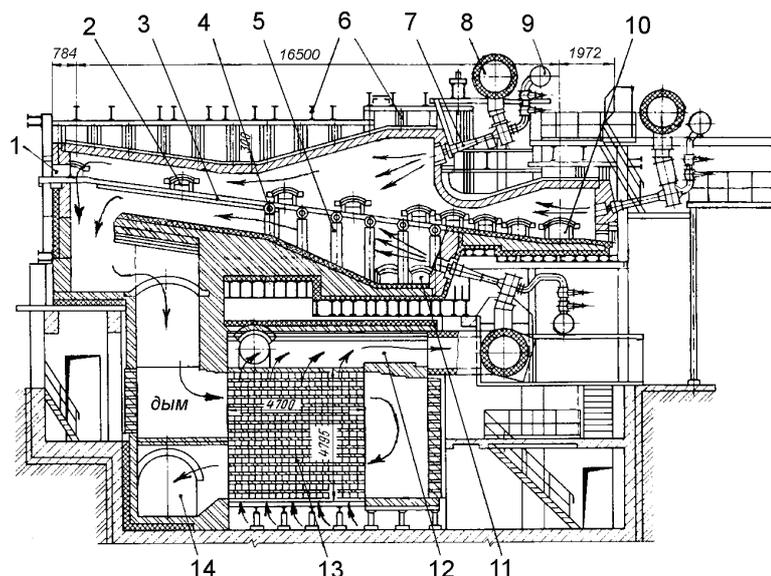
#### 9.4.1 Устройство и работа толкательных методических печей

Толкательная печь – методическая печь, в которой перемещение заготовок вдоль печи происходит с помощью внешнего устройства – толкателя. Это самый простой и недорогой способ транспортирования металла через печь.

В настоящее время разработано большое количество толкательных печей, отличающихся числом зон, наклоном подины, конструкцией свода и способом утилизации теплоты дымовых газов. Рассмотрим в виде примера трехзонную печь двухстороннего нагрева с наклонным подом, оборудованную керамическим блочным рекуператором для нагрева воздуха и инжекционными горелками (рисунок 9.7). Особенностью данной печи является отсутствие вентилятора. Воздух засасывается за счет разрежения, создаваемого активной струей газового топлива горелок. Кроме этого, разрежение создает разогретый рекуператор, который действует как дымовая труба. Подобный принцип подачи воздуха заложен и в конструкции нагревательного колодца с верхней горелкой.

Выдача нагретых заготовок в данной толкательной печи боковая с использованием дополнительного толкателя. Длина заготовок – 5-12 м. Соответственно и ширина печи достигает 12,5 метра. Печь рассчитана на сжигание доменного газа. Газ подогревается в металлическом рекуператоре до 200-250 °С.

Керамический рекуператор изготавливается из блоков размером примерно 300 × 250 × 250 мм. Конструкция блочного рекуператора очень простая. Внутри отдельных блоков имеются четыре отверстия для прохода воздуха, а наружная поверхность выполнена фигурной. В результате при сочленении блоков между ними появляются полости для прохода дыма в направлении, перпендикулярном движению воздуха. Достоинство блочного рекуператора в низком гидравлическом сопротивлении для прохода дыма и воздуха.



1 - окно посада; 2 - смотровые окна; 3,4,5 - продольные (гליссажные) поперечные и вертикальные опорные трубы; 6 - металлические балки каркаса; 7 - инжекционные горелки; 8 - трубопровод горячего воздуха; 9 - трубопровод газа; 10 - окно выдачи; 11 - окна для уборки шлака; 12 - сборный канал горячего воздуха; 13 - керамический рекуператор; 14 - дымовой боров

Рисунок 9.7 – Трехзонная толкательная печь

Принцип работы печи следующий. Заготовка подается внешним рольгангом к торцевому окну со стороны посада (на рисунке 9.7 – слева). Далее толкатель проталкивает заготовку в печь. При этом заготовка замещает предыдущую заготовку и проталкивает все заготовки, лежащие на подине. Заготовки лежат без зазоров, поэтому в расчетах нагрева садку печи можно считать монолитной пластиной. Подина выполнена наклонной для облегчения перемещения всей садки. В самом конце печи участок подины сделан горизонтальным. Крайняя нагретая заготовка, которая попадает на горизонтальный участок подины, будет выдана из печи боковым толкателем через боковое окно. Температура нагрева заготовок зависит от марки стали и колеблется от 1100 до 1250 °С. Нагрев заготовок происходит за счёт лучистого и конвективного теплообмена в системе «дым – кладка – металл».

Продукты горения (дым) образуются при факельном сжигании топлива в инжекционных горелках. Дым проходит навстречу металлу и удаляется с температурой 750-1000 °С возле окна посада вниз через полости в боковых стенах и через щели между заготовками и стенками печи. Далее дым проходит через двухходовый керамический рекуператор для подогрева воздуха и металлический трубчатый рекуператор для подогрева газа и выбрасывается без очистки в атмосферу посредством дымовой трубы.

В сварочной зоне печи металл проталкивается по водоохлаждаемым глиссажным (скользящим) трубам. Если смотреть на подину сверху (в плане), то можно увидеть, что глиссажные трубы выполнены в виде ряда параллельных продольных транспортных труб. Для уменьшения контакта металла с холодной частью продольных труб и для уменьшения истирания труб на них приваривается пруток-гребешок из жаропрочной стали или устанавливаются так называемые рейтеры, выполненные из жаропрочных сплавов на основе хрома. Глиссажные трубы поддерживаются опорными трубами, представляющими из себя систему поперечных (горизонтальных) и вертикальных водоохлаждаемых труб. Наличие глиссажных труб позволяет быстро нагреть заготовки (т.е. обеспечить высокую производительность) за счёт двухстороннего подвода теплоты к заготовкам. Глиссажные трубы

выгодно использовать при толщине заготовок больше 100 мм. В томильной зоне нагрев односторонний. Основное назначение томильной зоны – ликвидация «темных» пятен, образующихся на нижней поверхности заготовок при их движении по глассажным трубам. В томильной зоне заготовки движутся по неохлаждаемым массивным брускам.

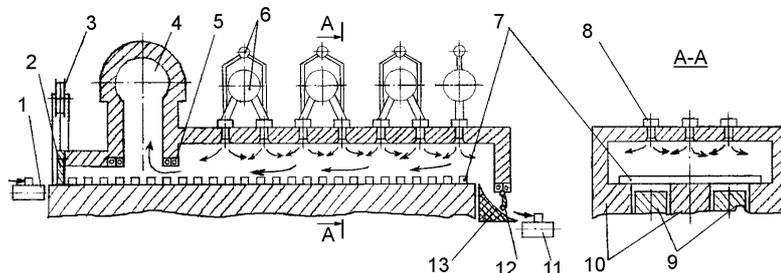
Угар (потери при окислении) металла в толкательных печах обычно составляет 1,5-2%. Удаление шлака (окалина) с подины производится периодически вручную через рабочие боковые окна нижней сварочной и томильной зоны.

#### 9.4.2 Устройство и работа методических печей с шагающим подом

Печь с шагающим подом – методическая печь, в которой перемещение заготовок происходит путем циклического поступательно-возвратного шагания пода.

Эти печи обладают рядом преимуществ перед толкательными печами: а) заготовки не трутся о подину и друг о друга и не получают механических повреждений; б) при ремонтах печь легко освобождается от заготовок; в) в печи легко варьируется односторонний и трёхсторонний нагрев заготовок; г) первоначально образовавшаяся окалина не осыпается и защищает заготовки от дальнейшего окисления, что снижает угар стали до 1 %; д) пониженный расход топлива за счёт отсутствия глассажных труб.

Схема печи с шагающим подом (ПШП) приведена на рисунке 9.8. Принцип работы печи следующий. Заготовки подаются внешним рольгангом к торцу посада и заталкиваются на подину с помощью торцевого толкателя. Далее заготовки проходят по печи с помощью специального механизма шагания, расположенного под подиной. Вся подина равномерно разделена на четное количество подвижных и нечётное количество неподвижных балок. Подсосы холодного воздуха в печь через щели между подвижными и неподвижными балками исключены за счёт использования водяных затворов.



1 - рольганг загрузки; 2 - заслонка; 3 - механизм подъёма заслонки; 4 - дымоотбор; 5 - поддерживающие кладку водоохлаждаемые трубы; 6 - газо- и воздухопроводы по зонам регулирования; 7 - заготовки; 8 - горелки; 9 - подвижные балки; 10 - неподвижные балки; 11 - рольганг выдачи; 12 - подвижная заслонка; 13 - склиз

Рисунок 9.8 – Схема печи с шагающим подом (ПШП)

В конце печи каждая нагретая заготовка при очередном цикле шагания попадает на склиз (лекальная наклонная плоскость) и через торец выдачи выскакивает на рольганг прокатного стана.

В ПШП очень удобным оказалось использование плоского свода с установленными в своде плоскопламенными горелками. Главное то, что в печи с такой конфигурацией легко можно осуществить многозонный режим нагрева. Недостаток сводового отопления в том, что половина длины печи со стороны посада находится под разрежением, а это вызывает подсосы воздуха через смотровые окна. Кроме этого, недостаточно отрегулированные плоскопламенные горелки могут вызвать местный перегрев металла.

Продукты горения образуются в зоне факела, прилегающего к своду, опускаются до

металла и далее проходят вдоль печи. Дым удаляется из печи через свод в районе торца посада и направляется в рекуператор для подогрева воздуха горения или в котел-утилизатор.

Удаление шлака (окалины) производится вручную через смотровые окна в сварочной и томильной зонах. В процессе шагания отдельные заготовки могут кантоваться и тем самым разбивать подину. Заправка (восстановление) подины также производится через смотровые окна вручную.

### 9.4.3 Устройство и работа методических печей с шагающими балками

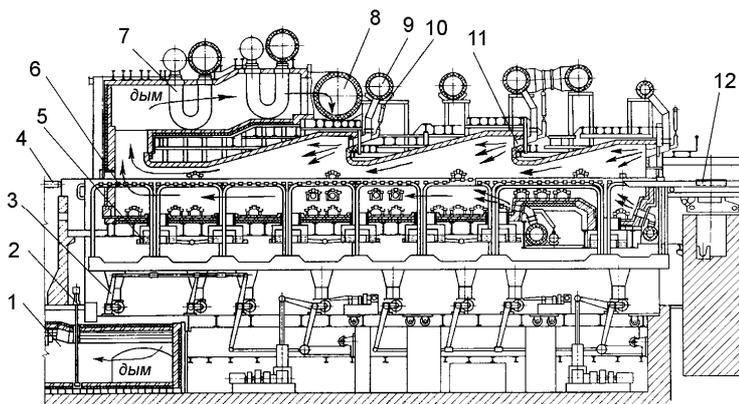
Печь с шагающими балками (ПШБ) – методическая печь, в которой транспортирование заготовок происходит путем циклического поступательно-возвратного движения водоохлаждаемых балок. Принцип перемещения заготовок аналогичен тому, что было в печи с шагающим подом. Все отличия связаны с наличием водоохлаждаемых балок.

Главное преимущество ПШБ – четырехсторонний, т.е. максимально быстрый нагрев заготовок. Главный недостаток – наличие разветвленной системы водоохлаждаемых балок (опорных труб) и, соответственно, большие потери теплоты с охлаждающей водой.

Схема печи с шагающими балками приведена на рисунке 9.9. На этом рисунке показана многозонная печь с торцевыми горелками. Отличительные особенности – верхний дымоотбор, два металлических трубчатых рекуператора, наличие рейтеров на продольных трубах.

Печь работает следующим образом. Заготовки подаются к торцу посада с помощью рольганга и сталкиваются с него на подину толкателем. На подине заготовки располагаются с зазором между собой. Подина состоит из системы опорных труб (балок) с установленными на продольных трубах рейтерами. Путем шагания балок заготовки перемещаются к торцу выдачи и там вытягиваются из печи механизмом поштучной выдачи при температуре 1150-1250 °С.

Печь отапливается двухпроводными горелками. Дым от сжигания топлива проходит сверху и снизу от заготовок и удаляется из печи в районе торца посада через свод при температуре 900-1100 °С. В верхнем строении печи находится дымоход с установленными в нём рекуператорами.



- 1 - дымовой боров; 2 - шибер; 3 - механизм шагания; 4 - загрузочный рольганг; 5 - водяной затвор; 6 - подина из труб с рейтерами; 7 - рекуператор; 8 - дымоотвод в боров; 9 - воздухопровод; 10 - газопровод; 11 - горелки; 12 - рольганг выдачи

Рисунок 9.9 – Схема печи с шагающими балками

Газоплотность узла сочленения вертикальных опорных труб и нижней футерованной плоскости обеспечивается гидравлическими затворами.

Удаление шлака (окалины) производится вручную механическим путём (скребки, пики и т.п.), а также путем применения компрессорного воздуха или кислорода, подаваемого с помощью переносных сопел. Очистка происходит через смотровые окна на уровне нижней отметки рабочего пространства.

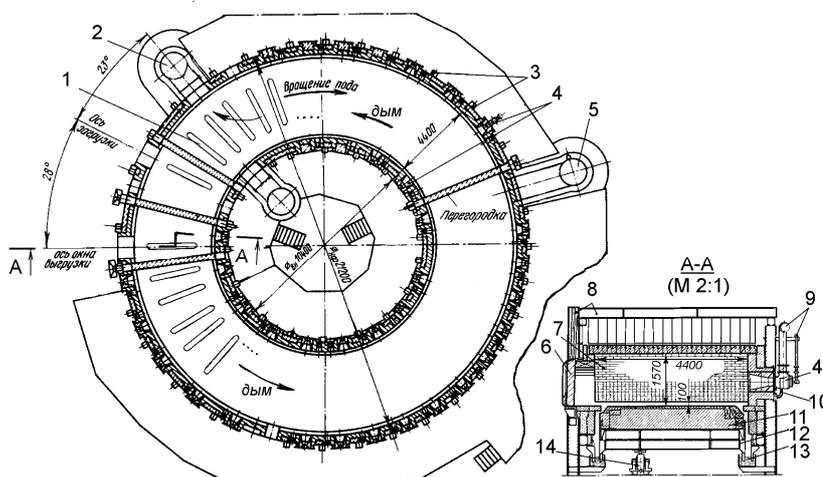
#### 9.4.4 Устройство и работа методических кольцевых печей

Кольцевая печь – методическая печь, в которой перемещение заготовок происходит за счёт вращения кольцевого пода. Поэтому иногда кольцевую печь называют печью с кольцевым подом или карусельной печью.

Преимущества кольцевой печи перед остальными методическими печами: а) заготовки лежат неподвижно на вращающемся поду, поэтому в них можно нагревать заготовки и круглого сечения; б) самый низкий угар металла (0,5-0,7 %); в) высокая равномерность нагрева по периметру заготовок круглого сечения; г) возможность перевода печи на камерный режим отопления.

Схема кольцевой печи приведена на рисунке 9.10. Печь работает следующим образом. Заготовки (трубные или колесные) загружаются в печь через окно загрузки с помощью внешних механических устройств. Далее за счёт периодического движения подины (на 10-12° при каждом движении) заготовки вместе с подиной проходят все необходимые зоны нагрева и выдаются через окно выгрузки также с помощью внешних механизмов. Угол между окнами загрузки и выгрузки в данном случае составляет около 28°. Время нагрева заготовки соответствует времени вращения подины на  $360-28 = 332^\circ$ . Скорость вращения подины может изменяться в зависимости от размеров заготовок и марки стали.

Печь отапливается газообразным топливом через горелки, расположенные в наружной и внутренней боковых стенах. Боковое расположение горелок, по аналогии со сводовым, позволяет достаточно просто организовать многозонный режим нагрева заготовок.



- 1 - заготовки; 2 - дымоотбор; 3 - стойки каркаса; 4 - горелки; 5 - промежуточный дымоотбор; 6 - заслонка; 7 - перегородка; 8 - каркас; 9 - воздухо- и газопроводы; 10 - водоохлаждаемые трубы, поддерживающие перегородку; 11 - вращающаяся подина; 12 - опорная рама подины; 13 - водяной затвор; 14 - механизм перемещения подины

Рисунок 9.10 – Схема кольцевой печи

Продукты горения от сжигания топлива движутся навстречу нагреваемому металлу (вращению пода) и проходят три условные зоны: томильную (1200-1250 °С), сварочную (1300-1350 °С) и методическую. В конце методической зоны дым с температурой 700-

900 °С удаляется через дымоход и направляется в металлический рекуператор (радиационный щелевой или трубчатый).

Газоплотность сочленения подины и стен обеспечивается применением песочных или водяных (гидравлических) затворов.

В отличие от других методических печей в кольцевой печи имеется возможность нагревать металл как по методическому, так и по камерному режиму. С этой целью в методической зоне предусмотрены горелки и между методической и сварочной зонами предусмотрен дополнительный дымоотбор. При камерном режиме нагрева заготовок включены горелки методической зоны и открыт шибер промежуточного дымоотбора.

Для поддержания определенных температурных и гидравлических условий в печи используются подвесные перегородки. Между подом и перегородкой остаётся зазор, необходимый для свободного перемещения заготовок. Обычно в печи от одной до четырёх перегородок. Перегородки изолируют окна загрузки и выгрузки, а также экранируют высокотемпературные зоны от низкотемпературных. С помощью перегородок создаётся необходимое гидравлическое сопротивление, направляющее продукты горения по большей дуге круга навстречу вращению подины.

Также как в печи с шагающим подом, в кольцевой печи возможен подсос холодного воздуха в методической зоне и в связи с этим – повышенный расход топлива.

Самая ответственная часть кладки – подина. Подина должна хорошо противостоять истиранию при посадке и выдаче заготовок, а также не взаимодействовать с окалиной, которая периодически удаляется вручную. Для повышения стойкости подины в ее составе должен быть большой процент  $Al_2O_3$ . Для уменьшения истирания подины печь оборудуется механизмами бережного посада и выдачи заготовок.

#### **9.4.5 Устройство и работа секционных печей**

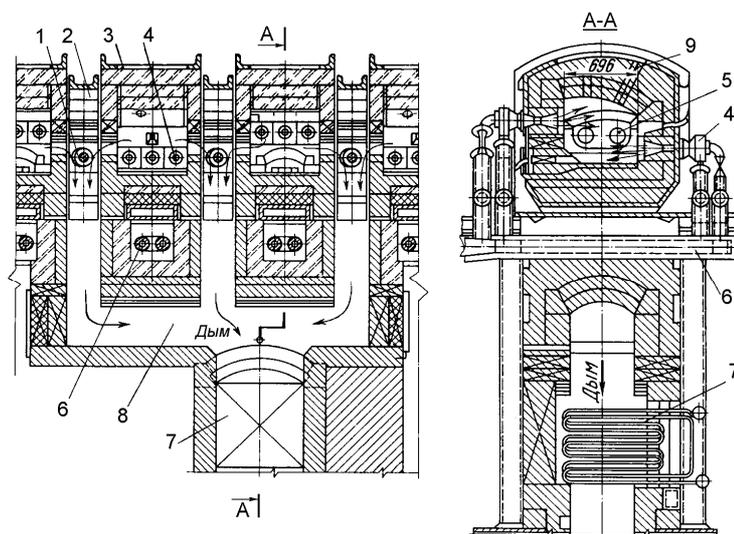
Секционная печь – проходная печь для скоростного нагрева перед прокаткой круглых заготовок длиной от 3 метров и диаметром до 200 мм и для термообработки длинных труб. Печь может быть использована и для подогрева полураската в линии прокатного стана.

Печь состоит из большого числа нагревательных секций с расположенными между ними (в тамбурах) вращающимися водоохлаждаемыми роликами. Ролики устанавливаются под углом к направлению движения изделия, что обеспечивает его вращение и равномерный нагрев. Скоростной нагрев обеспечивается в результате интенсивного теплообмена при высокой температуре печи. Секционные печи отапливаются газовым топливом.

Недостаток секционной печи – возможность перегрева металла при аварийных ситуациях, связанных с остановкой в его движении, из-за высокой теплоаккумулирующей способности футеровки секций.

Пример конструкции секционной печи приведён на рисунке 9.11. Особенность данной конструкции – расположение рекуператоров под печью. Печь по длине имеет несколько зон нагрева, по 4-6 секций на зону. Каждая зона соединена дымоходами со своим рекуператором. Всего в печи может быть любое количество секций от 1 до 20-40 штук. Длина одной секции составляет 1-1,5 метра, длина тамбура – 0,4-0,6 м.

Печь работает следующим образом. Заготовка подаётся рольгангом к первой секции и входит в неё консольно до контакта с роликами в тамбуре между 1-й и 2-й секциями. Поэтому, чтобы заготовка всегда имела опору на ролики, она должна быть достаточной длины (желательно не менее трёх расстояний между осями роликов). Проходя последовательно с одной и той же скоростью по всем зонам, нагретая заготовка выдаётся на рольганг прокатного стана. Иногда в последней зоне печи заготовка движется с более высокой скоростью.



- 1 - водоохлаждаемый ролик; 2 - тамбур; 3 - каркас; 4 - горелки; 5 - заготовки;  
 6 - воздухо- и газопроводы; 7 - рекуператор; 8 - сборный дымовой канал;  
 9 - отверстие для термопары

Рисунок 9.11 – Схема секционной печи

Продукты сгорания (дым) образуются при сжигании газа в двухпроводных факельных горелках. Горелки (обычно от 2 до 6 штук) расположены в противоположных стенках рабочей камеры в разных уровнях для обеспечения вихреобразного циркулирующего движения дыма вокруг нагреваемой заготовки. Такое движение дыма способствует увеличению конвективной составляющей теплового потока на металл, хотя лучистая составляющая играет преобладающую роль, а также повышает равномерность нагрева металла. Температура в секции (зоне) может достигать 1450-1500 °С.

Отработанный дым выходит из секции в относительно холодный тамбур, а оттуда вниз в дымоход. Вертикальные дымоходы от 3-5 тамбуров объединяются в один канал, в котором стоит металлический радиационно-конвективный рекуператор для подогрева воздуха до 350-400 °С. Для исключения пережога трубок металлического рекуператора дым перед рекуператором необходимо охлаждать холодным вентиляторным воздухом до 800-900 °С. Некоторое количество холодного воздуха засасывается в дым через щели между тамбуром и примыкающими к нему секциями. После рекуператора дым уходит к дымовой трубе по дымовому борovu.

Нагрев заготовок в секционной печи проходит в 2-3 раза быстрее по сравнению с нагревом в других методических печах и ограничен, главным образом, температурными напряжениями, возникающими в процессе нагрева заготовок. Ожидаемого в связи с этим резкого уменьшения окалинообразования не происходит. Дело в том, что поверхность заготовок больше времени находится при высоких температурах (1050-1250 °С) по сравнению с тем, что есть в других методических печах. Угар металла, нагреваемого в секционных печах перед прокаткой, составляет 0,7-1,5 %.

## 9.5 Характеристика термических печей

Термическая печь – печь для термической обработки металлических изделий. Термические печи классифицируются по технологическим признакам и назначению (закалочные, отжигательные, цементационные и др.), по способу нагрева (электрические, пламенные, косвенного нагрева), по среде рабочего пространства (воздух, газовая контролируемая сре-

да, жидкая среда), по конструкции (камерные, колпаковые, ваннные и т.д.), по режиму работы (периодического и непрерывного действия).

В процессе термической обработки повышается качество изделий или сообщаются дополнительные свойства, что обеспечивает сокращение расхода металла в процессе эксплуатации. Термической обработке подвергаются все виды горячекатаного и холоднокатаного проката: лист, уголок, проволока, рельс, труба, швеллер, лента и др.

Для нагрева под нормализацию и закалку применяют нагревательные проходные печи всех типов, описанных ранее. Кроме этих печей применяют специализированные проходные и камерные печи, предназначенные для термической обработки конкретных видов продукции.

Для нагрева под отжиг применяют камерные печи и для отдельных видов продукции – протяжные печи непрерывного действия (отжиг ленты, полосы, проволоки).

Специализированная на термической обработке печь должна обеспечивать заданный технологией температурно-временной режим обработки изделия и высокую равномерность нагрева изделия. Обычные нагревательные печи не всегда в состоянии обеспечить необходимую в термообработке равномерность и точность нагрева. Так, при нагреве слитков под обработку давлением удельный перепад температуры в конце нагрева должен быть не более 100-300 °С на 1 метр толщины, а при нагреве заготовок – не более 1000 °С на 1 метр толщины. Как при нагреве слитков, так и заготовок абсолютное значение перепада температуры составляет 50-70 °С. При термической же обработке металлопродукции перепад температуры по сечению в конце режима термообработки чаще всего должен вообще отсутствовать или составлять не более 5-10 °С. Когда говорят о перепадах температур, то в термических печах подразумевают перепад не по сечению, а по объему садки металла. Фактически – это разброс температуры по объему садки. Его величина обычно составляет 5-10 °С, в то время как в нагревательных печах разброс температур может быть 80-100 °С и больше. Поэтому и говорят, что при термообработке очень жесткие требования по равномерности нагрева.

## 9.6 Термические печи камерного типа

Камерная печь – печь с близкими по значению длиной, шириной и высотой рабочего пространства и с одинаковой во всех его точках температурой, предназначенная для нагрева или термической обработки материалов. Типичный представитель камерной печи для нагрева – нагревательный колодец. Из термических камерных печей известны камерные печи с выдвижным (выкатным) подом, камерные печи с неподвижным подом (с внешней механизацией) и колпаковые печи. Одно из основных отличий режимов нагрева и режимов термообработки в близких по конструкции печах состоит в том, что в термических печах часто реализуется режим: при заданном законе изменения температуры поверхности металла. Такой режим выдержать на практике гораздо труднее, т.к. он предполагает постоянную корректировку температуры печной атмосферы во времени.

Преимущество камерных печей – их универсальность в создании разнообразных температурно-временных условий. Недостатки: 1) большие потери теплоты на аккумуляцию кладкой при периодических загрузках – выгрузках металла; 2) печи не отвечают требованиям поточного производства.

Поэтому камерные печи применяются там, где нельзя использовать проходные печи, например, при сложных режимах термообработки, типа отжига.

Следует отметить особенности работы горелок в камерных термических печах.

Во-первых, в рабочем пространстве наблюдаются низкие рабочие температуры, находящиеся на уровне температуры воспламенения топлива и ниже. Поэтому для обеспечения

стабильной работы горелок их надо оснащать запальниками (чаще электрическими).

Во-вторых, в камерной термической печи сильно изменяется (в 10-20 и более раз) тепловая мощность и, соответственно, расход топлива. В период нагрева мощность максимальна, а в период выдержки может упасть почти до нуля. Стандартные же горелки нагревательных печей допускают регулирование расхода газа в диапазоне 1:4. Поэтому на камерных термических печах должны устанавливаться специальные горелки с широким диапазоном регулирования (1:10, 1:20 и выше).

В-третьих, в камерных термических печах, как правило, недопустима работа горелок непосредственно в рабочем пространстве, т.к. это вызывает неравномерность нагрева садки от факела. Поэтому горелки устанавливают или в подподовых топках или в форкамерных топках. Форкамерные топки – небольшие топки в боковых стенах для предварительного сжигания топлива с коэффициентом расхода воздуха 0,8. От этих топок дым вводится в рабочее пространство с помощью инжекционных устройств за счёт высокоскоростных струй воздуха, что создаёт хорошую циркуляцию дыма, омывающего садку.

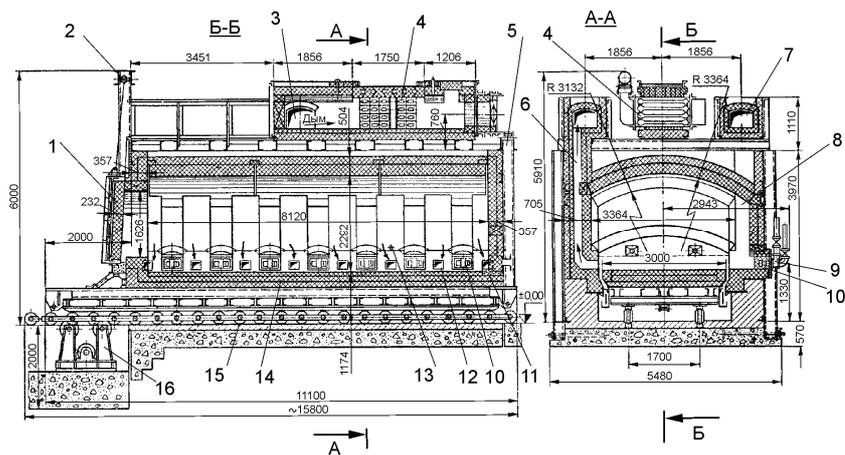
### **9.6.1 Устройство и работа камерной печи с выкатным подом**

Печь с выкатным подом – печь, в которой загрузка и выгрузка металла производятся цеховым краном на подину, выкатываемую относительно стен и свода печи. Эту печь используют в тех случаях, когда масса садки велика и имеет сложную «архитектуру», например, садка располагается в несколько слоёв.

Пример печи с выкатным подом приведён на рисунке 9.12. Печь работает следующим образом. В разогретой пустой печи поднимается заслонка и подина, опираясь на катки, выкатывается на площадку перед печью. Часто вместо катков используют колеса, прикрепляемые к раме подины и движущиеся по специально уложенным рельсам. С помощью подъёмного крана на выкатанную подину укладывается садка металла в определённом порядке. В это время горелки не работают, а стены и свод интенсивно отдают теплоту излучением на то место, где только что стояла подина. Поэтому место под подиной должно быть теплоизолировано. После загрузки всей садки подина вкатывается обратно, заслонка закрывается и включаются горелки. Горелки располагаются в нижней части боковых стен. Часто горелки располагаются в два ряда и сжигание топлива практикуется в форкамерах. В данном примере горелочные камни подобраны таким образом, что они создают факел под некоторым углом к стене для обеспечения интенсивной циркуляции дыма и максимальной равномерности нагрева садки. Продукты горения удаляются из рабочего пространства через дымовые окна в боковых стенках. Дым проходит по подъёмным дымовым каналам и поступает в сборные каналы, располагаемые вдоль стен печи над сводом. Из сборных каналов дым поступает в общий канал, в котором находится рекуператор для подогрева воздуха. Охлажденный в рекуператоре дым направляется в дымовую трубу и выбрасывается без очистки в атмосферу. После завершения процесса термообработки подина выкатывается и металл заменяется на холодный. Далее процесс повторяется.

Технологический процесс контролируется термопарами, вставляемыми через специально предусмотренные отверстия в стенах. Число смотровых и рабочих окон ограничено одним, закрытым в нормальном состоянии заслонкой.

Газоплотность печи обеспечивается системой песочных затворов, которые установлены между подиной и всеми стенами, а также между подиной и заслонкой.



- 1 - заслонка; 2 - механизм подъёма заслонки; 3 - дымовой канал для соединения сборных каналов; 4 - рекуператор; 5 - металлический каркас; 6 - подъемный дымовой канал; 7 - сборные каналы, располагаемые вдоль стен над сводом; 8 - рабочее пространство печи; 9 - горелки; 10 - горелочный камень; 11 - песочный затвор; 12 - дымовые окна; 13 - отверстие для термопары; 14 - подина; 15 - ролики (катки, колеса); 16 - механизм перемещения подины

Рисунок 9.12 – Камерная печь с выкатным подом

### 9.6.2 Устройство и работа камерной печи с неподвижным подом

Камерная печь с внешней механизацией – печь, в которой загрузка и выгрузка металла происходит за счет механических устройств, расположенных за пределами печи. Эта печь не имеет тех потерь теплоты, которые есть в печи с выкатным подом при погрузке металла на подину. Но, с другой стороны, загрузка металла в печь с внешней механизацией усложнена. Обычно для крупных печей используется мощная напольная загрузочная машина, перемещающаяся по рельсам вдоль торцов загрузки ряда печей и обслуживающая эти печи. Если на заводе (в цехе) планируется иметь 1-2 печи, то нет смысла иметь громоздкую напольную машину, а надо иметь печи с выкатным подом.

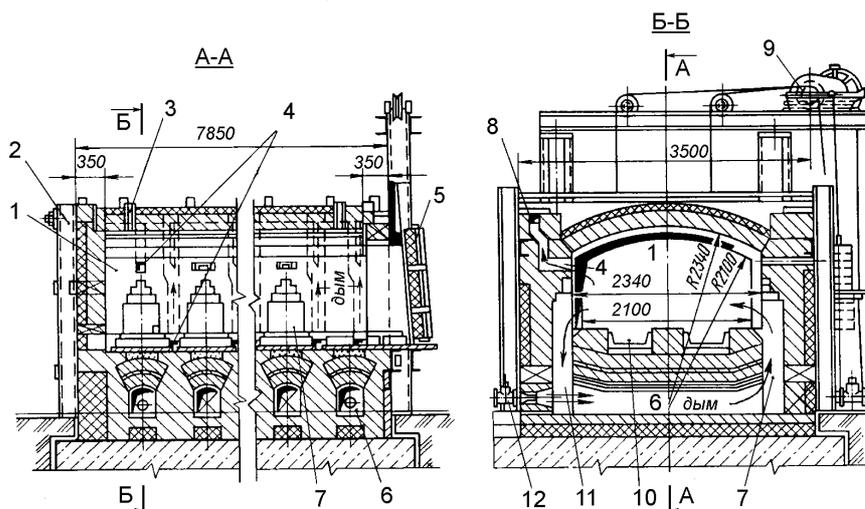
Пример печи с неподвижным подом представлен на рисунке 9.13. Особенность данной печи в наличии подподовой топки для сжигания топлива.

Принцип работы печи следующий. Перед загрузкой садку готовят, т.е. укладывают на специальные подставки. Далее лапы напольной машины пропускаются под эти подставки и вся садка полностью отвозится напольной машиной к нужной печи. В печи поднимается заслонка и на лапах напольной машины садка заносится в печь. После этого лапы опускаются в специально предусмотренные углубления в подине, передавая садку подине, и вытаскиваются из печи. Заслонка закрывается. Подставки, на которые укладывалась садка, остаются в печи на все время термообработки, используются многократно и поэтому они выполняются из жаропрочной стали.

После загрузки садки включаются горелки в подподовых топках. Образовавшиеся продукты горения проходят под подиной и поступают в рабочее пространство через канал 7. Через рециркуляционный канал 11 в подподовую топку подсасываются газы из рабочего пространства. В результате этого снижается уровень температуры газов, выходящих в рабочее пространство, и обеспечивается интенсивная циркуляция печных газов.

Отвод отработанного дыма происходит через отверстия в боковых стенках на уровне подины и возле свода. Отверстия и вертикальные каналы для отвода дыма хорошо видны на разрезе А-А пунктирными линиями. Дым с левой и правой стенок печи собирается в

один канал и далее через рекуператор уходит к дымовой трубе. Обычно несколько печей обслуживаются одной дымовой трубой.



1 - рабочее пространство; 2 - каркас; 3 - отверстия для термопар; 4 - дымоотводящие каналы; 5 - заслонка; 6 - подподовая топка; 7 - канал входа дыма в рабочее пространство; 8 - сборный канал для дыма; 9 - механизм подъема заслонки; 10 - углубления в подине для лап напольной машины; 11 - рециркуляционный канал; 12 - горелка

Рисунок 9.13 – Камерная печь с внешней механизацией

Печь достаточно газоплотна, единственный песочный затвор устанавливается между заслонкой и подиной. Как и другие камерные печи, печь не имеет дополнительных смотровых окон.

### 9.6.3 Устройство и работа колпаковой печи

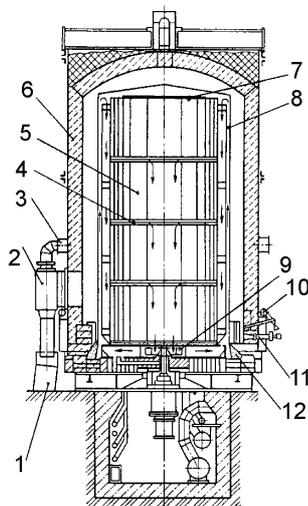
Колпаковая печь – печь периодического действия для термообработки рулонов ленты, листов и бунтов проволоки. Отличительная особенность колпаковой печи – наличие двух колпаков: внутреннего, предохраняющего металл от окисления (муфеля), и наружного, футерованного огнеупорным кирпичом, на котором монтируются горелки или электрические нагреватели. Муфель выполняется из жароупорной стали. Герметизация колпаковой печи достигается применением песочных затворов. Обычно для ускорения нагрева металла с помощью внутреннего циркуляционного вентилятора создают интенсивную циркуляцию защитного газа под муфелем.

Принципиальные отличия имеют колпаковые печи для отжига листов, уложенных в стопу; колпаковые печи одностопные, колпаковые печи трёхстопные и колпаковые печи для отжига распушенных рулонов. Из этого многообразия конструкций наиболее распространена одностопная печь. Она лучше других вписывается в поточное производство, нагревает металл достаточно равномерно и быстро, дает низкую себестоимость нагрева и довольно низкий расход топлива.

Пример одностопной колпаковой печи приведен на рисунке 9.14.

Время нагрева в колпаковой печи является главным фактором, влияющим на расход топлива. Время зависит от условий теплообмена на торцах и боковой поверхности рулонов металла. Известно, что для прогрева плотнотоматанных рулонов в радиальном направлении требуется времени в несколько раз больше, чем для прогрева в аксиальном направлении. Это связано с тем, что коэффициент теплопроводности в радиальном направлении для стали составляет только 1,5-4 Вт/(м·К), а в аксиальном направлении около 30 Вт/(м·К). Низкие значения коэффициента теплопроводности в радиальном направлении связаны с наличием

воздуха между витками рулона. Для обеспечения подвода необходимого количества теплоты к торцам рулонов служат специальные устройства, называемые конвекторными кольцами и размещаемые между рулонами. Они представляют собой набор узких параллельных спиралевидных каналов между плоскими пластинами. По каналам проходит горячий защитный газ, отдающий свою теплоту. Высота конвекторных колец – 50-120 мм.



- 1 - вход в дымовой боров; 2 - инжектор; 3 - кольцевой канал сжатого воздуха;  
 4 - конвекторное кольцо; 5 - рулон; 6 - нагревательный колпак; 7 - крышка; 8 - двойной муфель; 9 - рабочее колесо вентилятора; 10 - газопровод; 11 - горелка;  
 12 - песочный затвор

Рисунок 9.14 – Схема колпаковой печи

Равномерность нагрева металла определяется типом направляющего аппарата, расположенного в самом низу муфеля. Внутри аппарата располагается рабочее колесо циркуляционного вентилятора. Защитная атмосфера подсасывается в аппарат сверху вниз и распределяется по периферии.

Принцип работы колпаковой печи определяется технологическим процессом, который делится на три примерно одинаковые стадии: нагрев до 650-800 °С, охлаждение под муфелем до 150 °С и без него и последняя стадия –разгрузка и загрузка станда. Равенство времени по стадиям позволяет использовать три станда с одним нагревательным колпаком и двумя муфелями. Загрузка металла заканчивается опусканием на стенд поверх стопы рулонов муфеля и нагревательного колпака. После этого подаётся защитный газ (обычно смесь из 95 % N<sub>2</sub> и 5 % H<sub>2</sub>) и с помощью циркуляционного вентилятора осуществляется его циркуляция. Затем включаются горелки. Продукты горения проходят между нагревательным колпаком и муфелем и при помощи инжектора (инжектирующая среда – компрессорный воздух) удаляются в дымоотводы и в дымовой боров. Температура дыма перед инжектором около 630-660 °С. В колпаковых печах физическая теплота дыма обычно не утилизируется, что можно считать одним из недостатков печей.

Защитный газ подается циркуляционным вентилятором в зазор между муфелем и рулонами стопы. Газ равномерно распределяется по конвекторным кольцам и через них попадает во внутренние полости рулонов, омывая их. Опускаясь по внутренней полости стопы газ возвращается в циркуляционный вентилятор. Кольца получают теплоту от защитного газа конвекцией и нагревают рулоны. Муфель излучает на боковую поверхность металла, но тепловой поток несущественен для нагрева рулонов из-за отмеченного ранее низкого коэффициента теплопроводности в радиальном направлении. Исключение делается для верхнего рулона, который получает теплоту на свой торец. Поэтому верхний рулон всегда

греется быстрее других. В наихудших условиях нагрева и охлаждения находится нижний рулон. Проблемой является низкий коэффициент теплоотдачи от муфеля к защитному газу, в результате чего вынужденно поддерживаются высокими температура муфеля и температура дыма под нагревательным колпаком. Это приводит к повышенной температуре уходящих газов и высокому расходу топлива.

## 9.7 Термические печи проходного типа

Проходная термическая печь по принципу работы соответствует нагревательной проходной печи, но в силу некоторых причин для нагрева металла под деформацию не используется.

Основные типы узкоспециализированных проходных термических печей: конвейерная печь, роликовая печь и протяжная печь. Из этих печей конвейерная и роликовая печь могут быть применены для нагрева металла, но не используются по экономическим соображениям, т.к. имеют большие потери теплоты с транспортирующими устройствами (конвейер и ролики охлаждаются: конвейер – на воздухе, а ролики – водой или воздухом), а элементы конвейера и ролики имеют низкую стойкость при высоких температурах.

С другой стороны, обычные нагревательные печи (печи с шагающим подом, кольцевые печи, секционные печи и др.) используются при термической обработке металла с некоторыми изменениями в конструкции, такими, как замена горелок, исключение контакта металла с факелом, повышение герметичности кладки и т.п.

### 9.7.1 Устройство и работа конвейерной печи

Конвейерная печь – печь, снабженная внутренним конвейером (ленточным, люлечным, цепным, скребковым), перемещающим нагреваемые изделия от загрузочного отверстия печи к выгрузочному. В металлургии конвейерная печь чаще всего имеет цепной конвейер. Металл в такой печи нагревается до температуры 850-900 °С и реже до 1000-1050 °С. Эта температура ограничена сверху стойкостью конвейерной цепи и определяется маркой стали цепи.

Круговое движение цепи происходит за счет зубчатых колес (звездочек), расположенных в противоположных концах печи за пределами рабочего пространства.

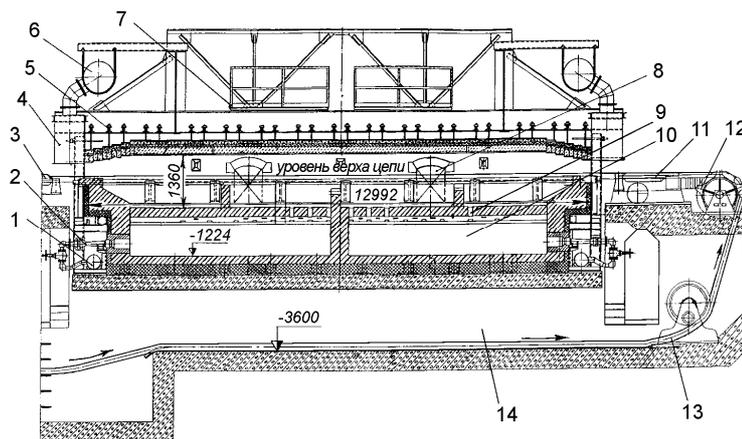
В качестве примера на рисунке 9.15 показана конвейерная печь. Особенности печи: а) нагрев и изотермическая выдержка рельсов; б) наличие инжекционных горелок в подподовых каналах; в) плоский подвесной свод; г) прямо-противоточный режим работы.

Печь работает следующим образом. Рельсы длиной 25 метров подаются рольгангом к торцу загрузки и передаются с рольганга на цепной конвейер. Проходя первую половину печи, рельсы нагреваются движущимися навстречу продуктами сгорания топлива до 450-600 °С. Во второй половине печи продукты горения движутся в одном направлении с металлом и таким образом поддерживается достигнутая температура металла. При выходе из печи рельс передаётся с цепного конвейера на отводящий рольганг.

Продукты горения образуются от сжигания топлива в подподовых топках с использованием инжекционных горелок. По длине печи имеются две топки, а по ширине печи – около 15 топок. Соответственно длина печи около 13 метров, а ширина около 27 метров. Дым поступает в рабочее пространство печи через специальные отверстия в сводах подподовых топок, омывает рельсы,двигающиеся на конвейере, и через металлические дымоотводы окна посадки и окна выдачи удаляются на дымовую трубу. Дым не используется для подогрева воздуха и газа. Печь отапливается коксодоменной смесью.

Недостатки конвейерной печи: 1) большой вынос теплоты из рабочего пространства

элементами цепи; 2) низкая стойкость цепи; 3) неравномерный прогрев металла в месте контакта с цепью.



- 1 - газопровод; 2 - горелка; 3 - отводящий рольганг; 4 - дымоотбор; 5 - держатели подвесного свода; 6 - дымовой канал; 7 - рабочая площадка; 8 - смотровое окно; 9 - отверстия в своде подподовой топки; 10 - подподовая топка; 11 - подводящий рольганг; 12 - привод; 13 - цепь; 14 - канал для возврата цепи
- Рисунок 9.15 – Схема конвейерной печи

### 9.7.2 Устройство и работа роликовой печи

Роликовая печь – проходная печь непрерывного действия, подина которой состоит из большого числа вращаемых специальным приводом роликов, выполненных из жаропрочной стали или водоохлаждаемых. Роликовые печи отапливаются, главным образом, газобразным топливом с использованием большого числа горелок или радиационных труб, расположенных на продольных стенах печи выше и ниже роликов; существуют также электрические печи. Роликовые печи применяют для термической обработки металлических изделий и, реже, для нагрева металла перед горячей обработкой давлением.

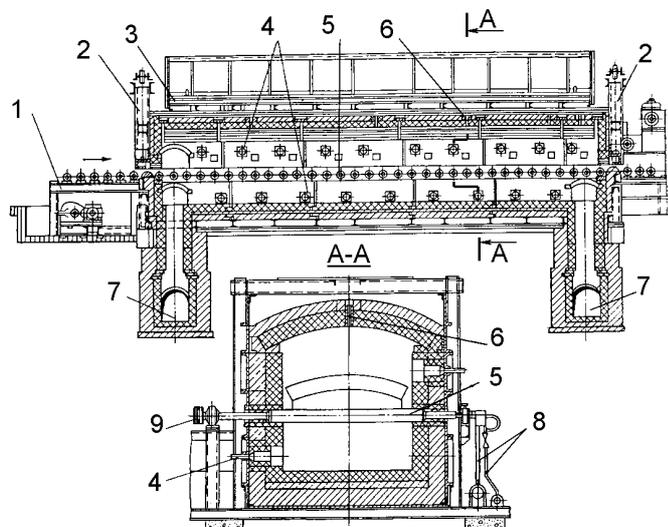
Преимущество роликовой печи перед другими печами проходного типа одно: роликовая подина наилучшим образом соответствует условиям поточного производства, т.к. она легко встраивается в цеховые рольганги.

Самым ответственным элементом роликовой печи являются ролики. Их стойкость зависит от температуры в печи и ширины печи. Печи с температурой газа 800-1000 °С оснащают неохлаждаемыми роликами, а с температурой 1000-1200 °С – роликами с водоохлаждаемым несущим валом, пространство между которым и бочкой заполнено теплоизолятором. В любом случае в роликах охлаждают цапфы (цапфа – часть оси или вала, опирающаяся на подшипник). В подавляющем большинстве случаев ролики делают водоохлаждаемыми, с гладкой бочкой из жаропрочной хромоникелевой стали. Во избежание деформации бочки ролика, он должен вращаться постоянно, – остановки допустимы не дольше, чем на 3-4 минуты.

Кладка рабочего пространства печи выполняется из шамотного кирпича (внутренний слой) и любого теплоизоляционного материала (наружный слой).

Пример роликовой печи приведен на рисунке 9.16. Печь предназначена для нагрева под закалку листов, пачек листов и сортового проката. Габариты рабочего пространства 2×2×20 метров. В отличие от обычных конструкций термических печей, в данной конструкции горелки создают факел прямо в рабочем пространстве, т.е. отсутствуют форкамеры, радиационные трубы и подподовые топки. Такая конструкция больше подходит для нагрева металла перед деформацией, но в отдельных случаях с особой осторожностью мо-

жет использоваться и для сложной термообработки типа отжиг. Потенциальные возможности данной печи для проведения качественной изотермической выдержки заложены в двустороннем по длине печи дымоотборе и организации прямо-противоточного режима тепловой обработки металла в среде продуктов горения.



1 - приёмный стол; 2 - механизм подъёма заслонки; 3 - площадка для обслуживания термопар; 4 - горелки; 5 - ролики; 6 - отверстия для термопар; 7 - дымовой бороз; 8 - подвод и отвод охлаждающей воды; 9 - устройство для вращения роликов  
Рисунок 9.16 – Схема роликовой печи

Печь работает следующим образом. Металл для термообработки поступает на приемный стол прямо с рольганга, если печь встроена в технологическую линию, или подаётся краном (например, пачки листов). Заслонка торца посада открывается и металл заходит в печь в дополнение к имеющейся садке; заслонка опускается. Металл постепенно проходит по постоянно вращающимся роликам и нагревается до необходимой температуры (1150 °С). Благодаря боковому расположению горелок, возможен не только простой нагрев под закалку (нормализацию) или высокий отпуск, но и более сложный изотермический отжиг (нагрев до 750-800 °С, выдержка, охлаждение до 600-700 °С, выдержка).

После завершения термообработки готовый металл выдается на рольганг выдачи, соединённый с камерой ускоренного водяного охлаждения (закалка). Таким образом, печь постоянно пополняется холодным металлом и постепенно выдаёт нагретый металл.

Продукты горения топлива образуются непосредственно в рабочем пространстве печи от работы двухпроводных пламенных горелок. Приблизительно до середины печи дым идёт навстречу металлу (в противотоке), а далее в прямотоке. Дым удаляется из печи вниз по вертикальным каналам в районе торцов печи, далее соединяется в единый поток, проходит рекуператор для подогрева воздуха и через дымовую трубу выбрасывается в атмосферу.

### 9.7.3 Устройство и работа протяжной печи

Протяжная печь – печь непрерывного действия для термической или химико-термической обработки металлической полосы (ленты) или проволоки, а также для нагрева штрипсов станов непрерывной печной сварки труб.

По конструктивному признаку протяжные печи делят на горизонтальные (одно- и многоэтажные) и вертикальные (башенные). Полосу протягивают в одну (однорядные протяжные печи) или несколько (многорядные протяжные печи) ниток. В протяжной печи для па-

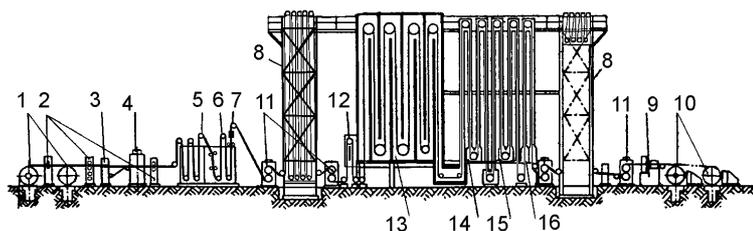
тентирования (патентирование – вид термообработки проволоки, при котором сталь нагревают до 870-950 °С, а затем быстро охлаждают в ванне до 500 °С, после чего охлаждают на воздухе) проволоку протягивают горизонтально в несколько ниток (до 24). Протяжные печи отапливаются газовым топливом, иногда мазутом; имеются протяжные печи с электрообогревом.

Отжиг металла в протяжных печах имеет ряд преимуществ по сравнению с отжигом в колпаковых печах:

- сокращение длительности отжига;
- более высокие механические свойства и качество поверхности за счёт высокой равномерности нагрева металла;
- включение отжига в непрерывный процесс очистки металла, травления, нанесения различных покрытий и т.д. За счет этого ликвидация затрат на транспортировку рулонов от агрегата к агрегату и промежуточным местам складирования.

Однако не любой металл можно пропускать через протяжные печи. Например, в вертикальных печах можно обрабатывать ленту толщиной до 1 мм из-за частых перегибов, а в горизонтальных печах – до 4-6 мм (протяжка прямолинейная, без перегибов). Достоинство вертикальных печей – меньшая производственная площадь и выравнивание поверхности ленты, которая перед термообработкой может быть волнистая или с помятостями.

В качестве примера на рисунке 9.17 приведена схема линии для отжига жести, имеющая в своем составе вертикальную протяжную печь.



- 1 - размотчики рулонов; 2 - тянущие ролики; 3 - ножницы для обрезки концов ленты; 4 - сварочная машина для сварки концов; 5 - ванна с раствором для очистки ленты; 6 - моеющее устройство; 7 - устройство для осушки ленты струями воздуха; 8 - петлевые башни; 9 - ножницы для вырезки сварных швов; 10 - сматыватели; 11 - натяжные устройства; 12 - регулятор натяжения ленты; 13 - камера восстановительного нагрева; 14 - камера выдержки; 15 - камера регулируемого охлаждения; 16 - камера ускоренного охлаждения

Рисунок 9.17 – Схема линии для отжига жести с вертикальной протяжной печью

В начале линии находятся два размотчика рулонов. Один работает, а соседний готовится. Лента должна проходить через печь непрерывно без остановок, длина ленты достигает 1 км, а скорость – 10 м/с. Поэтому когда заканчивается лента на одном размотчике, то обрезается задняя кромка этой ленты и кромка фиксируется на сварочной машине за счет подъема нижних роликов петлевой башни. Петлевые башни можно назвать буферами между печью и другими механизмами. В линию задается передний конец нового рулона, обрезается его кромка и на сварочной машине свариваются концы предыдущего и нового рулонов. Лента получает прежнюю скорость за счет опускания роликов петлевой башни. В процессе движения поверхность ленты очищается в специальной ванне, промывается, высушивается и после прохода петлевой башни попадает в протяжную печь, состоящую из камеры восстановительного нагрева, камеры выдержки, камеры регулируемо-

го охлаждения и камеры ускоренного охлаждения. Размеры печи: высота 15-20 метров, ширина 30-40 метров, толщина около 1,5 метра. Набор камер может быть разный на разных печах. Например, могут быть добавлены камера подогрева, камера нагрева продуктами неполного горения (т.е. камера безокислительного нагрева), камера для нанесения покрытий.

После печи располагается еще одна петлевая башня с поднимающимися и опускающимися нижними роликами, служащая для накопления металла на то время, пока ножницы вырезают сварной шов и происходит переключение с одного сматывателя на другой.

Камера восстановительного нагрева предназначена для нагрева металла до максимальной температуры, требуемой по технологии. В качестве нагревательных устройств камеры восстановительного нагрева обычно используются радиационные трубы. В камере выдержки технологический процесс поддерживается, например, электрорадиационными трубами, располагаемыми вдоль стен кладки. Задача электрорадиационных труб – компенсация тепловых потерь через кладку. В качестве охладителя камеры регулируемого охлаждения обычно используется рассредоточенная система труб, внутри которых пропускается воздух. В камере ускоренного охлаждения охладителем может быть система трубок струйного охлаждения, из множества отверстий которых на ленту истекает восстановительный газ.

Протяжная печь обычно заполнена защитной атмосферой, состоящей из азота и водорода, как продуктов диссоциации аммиака. Наиболее распространена нейтральная атмосфера: 4 %  $H_2$  и 96 %  $N_2$ . Содержание кислорода допускается не более 0,01-0,02%. Защитная атмосфера отсутствует в камере подогрева, в которой дожигаются продукты неполного горения камеры безокислительного нагрева.

Наиболее энергоемкой частью протяжной печи является камера восстановительного нагрева. Камера восстановительного нагрева наполнена защитной атмосферой, поэтому обогревается радиационными трубами. В отличие от колпаковой печи здесь закрыт муфелем огонь, а не металл.

Побудителями движения ленты являются тянущие ролики, расположенные за печью. Ролики в камере восстановительного нагрева являются поддерживающими. Они имеют посередине бочки утолщение для лучшей центровки ленты. В случае обрыва ленты ее можно снова завести через верхние и нижние люки, равномерно расположенные по оси роликов. В нормальном состоянии люки герметично закрыты. Для исключения попадания кислорода (воздуха) вместе с входящей лентой, устроен механический затвор обычно из отжимных роликов.

Камера восстановительного нагрева работает следующим образом. Лента входит через нижнее отверстие в камеру восстановительного нагрева и, проходя между роликами вверх-вниз, нагревается от радиационных труб излучением. Конвективная составляющая теплообмена мала, т.к. принудительного движения защитной атмосферы не предусмотрено. Температура нагрева ленты постоянно контролируется или контактными (скользящими) термомпарами или пирометрами или сочетанием этих способов. На выходе из камеры восстановительного нагрева лента с температурой 700-800 °С попадает в разделительный тамбур и далее в камеру выдержки. Радиационные трубы камеры восстановительного нагрева работают под разрежением на газовом топливе с встроенным рекуператором. Температура дыма на выходе из трубы 700-800 °С. Дым улавливается зонтами – воронками, которые рассчитываются таким образом, чтобы подсасываемый воздух разбавлял дым до 400 °С. Это необходимо для устойчивой работы дымососа. Дым от всех радиационных труб собирается вместе и удаляется через дымовую трубу в атмосферу.

Недостатки вертикальной печи:

- низкий уровень развития процессов теплообмена в камере восстановительного нагре-

ва. Коэффициент излучения составляет только  $1,5-2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ , в то время как в нагревательных печах он равен  $3,5-5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ . Доля теплоты, передаваемая конвекцией, не более 10-20 %. В конечном итоге камеры восстановительного нагрева являются очень громоздкими;

- при обработке отдельных типов стали (электротехническая и др.) на поверхности бочек роликов образуются наросты, которые царапают ленту и приводят к браку. Специальные покрытия бочки оксидом циркония уменьшают наросты, но и удорожают ролики;
- повышенные тепловые потери с дымом при форсированных режимах работы печи.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Каково назначение нагревательных печей?
- 2 Что такое нагревательный колодец? Каковы режимы нагрева металла в нагревательных колодцах?
- 3 Особенности тепловой работы регенеративных нагревательных колодцев?
- 4 Особенности тепловой работы рекуперативных колодцев с отоплением из центра подины?
- 5 Особенности тепловой работы рекуперативных колодцев с верхней горелкой?
- 6 Что такое методические печи? Каковы режимы нагрева металла в методических печах?
- 7 Виды методических печей в зависимости от способа перемещения заготовок в печи?
- 8 Каковы конструкция и принцип действия кольцевых печей?
- 9 Каковы конструкция и принцип действия секционных печей?
- 10 Какие существуют режимы термообработки?
- 11 Какие существуют виды термических печей?
- 12 Каковы виды и особенности тепловой работы камерных термических печей?
- 13 Каковы виды и особенности тепловой работы проходных термических печей?

## Список использованных источников

1. Губинский В.И. *Металлургические печи: Учебное пособие.* – Днепропетровск: НМетАУ, 2006.
2. *Металлургические печи.* Кривандин В.А., Мастрюков Б.С. – М.: *Металлургия*, 1977.
3. Свинолобов Н.П., Бровкин В.Л. *Печи черной металлургии: Учебное пособие.* – Днепропетровск: Пороги, 2004.
4. *Современные нагревательные и термические печи (конструкции и технические характеристики): справочник / В.Л. Гусовский, М.Г. Ладыжчев, А.Б. Усачев; под ред. А.Б. Усачева.* – М: *Машиностроение*, 2001.
5. *Теплотехника металлургического производства. Т.1. Теоретические основы: Учебное пособие для вузов / В.А. Кривандин, В.А. Арутюнов, В.В. Белоусов и др.* – М.: *МИСиС*, 2002.
6. *Теплотехника металлургического производства. Т.2. Конструкция и работа печей: Учебное пособие для вузов / В.А. Кривандин, В.А. Арутюнов, В.В. Белоусов и др.* – М.: *МИСиС*, 2002.

КУНИЦИНА НАТАЛЬЯ ГЕННАДЬЕВНА

## ТЕПЛОТЕХНИКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Учебное пособие  
по дисциплинам «Теплотехника», «Металлургическая теплотехника»  
для студентов направлений подготовки  
18.03.01 «Химическая технология»,  
15.03.02 «Технологические машины и оборудование»,  
22.03.02 «Металлургия»  
всех форм обучения

Подписано в печать 16.12.2015		
Формат 60x90 $\frac{1}{16}$ Рег.№ 79	Печать офсетная Тираж 30 экз.	Уч.-изд.л. 5,25

ФГАОУ ВПО

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Новотроицкий филиал

462359, Оренбургская обл., г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8.

E-mail: [nfmisis@yandex.ru](mailto:nfmisis@yandex.ru)

Контактный тел. 8 (3537) 679729.