ТЕОРИЯ, КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Издание второе, переработанное и дополненное

Под научной редакцией проф. докт. техн. наук В. А. КРИВАНДИНА

ТОМ I

В. А. Кривандин, Ю. П. Филимонов

ТЕОРИЯ И КОНСТРУКЦИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебника для учащихся металлургических техникумов



МОСКВА
«МЕТАЛЛУРГИЯ»
1986

УДК 669.04.1(075)

Рецензент докт. техн. наук *Л. А. Шульц*

УДК 669.04.1(075)

Теория, конструкции и расчеты металлургических печей: Учебник для техникумов. В 2-х томах. 2-е изд., перераб. и доп. Т. 1. Кривандин В. А., Филимонов Ю. П. **Теория и конструкции металлургических печей.** М.: Металлургия, 1986. 479 с.

Во втором издании (первое — в 1978 г.) нашли отражение достижения теории и практики металлургической теплотехники за прошедший период. Существенно обновлен материал по механике жидкостей и газов, основам теплопередачи, элементам теории подобия и теории горения, по топливу и устройствам для сжигания. Расширен раздел, посвященный вопросам утилизации тепла уходящих газов и введен раздел по очистке газов, уходящих из печей различных производств черной металлургии. Приведены необходимые сведения об огнеупорных материалах. Рассмотрены элементы и конструкции топливных и электрических печей, используемых для получения чугуна и стали, нагрева металла с целью обработки давлением и термической обработки.

Книга предназначена для учащихся металлургических и машиностроительных техникумов. Ил. 166. Табл. 23. Библиогр. список: 6 назв.

Т $\frac{2602000000-058}{040(01)-86}$ 30—86

© Издательство «Металлургия», 1986

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 7

Глава I. Основы механики печных газов

§ 1. Элементы теории подобия 9
Основные понятия 9
Гидродинамическое подобие 11
Моделирование 13
§ 2. Общие сведения о свойствах и движении жидкостей и газов 13
Свойства жидкостей и газов 14
Турбулентное и ламинарное движения 17
Давление газов 19
§ 3. Статика газов 21
§ 4. Динамика газов 24
Элементы теории движения реальных газов 24
Применение уравнения Бернулли 28
Сверхзвуковое движение газов 34
§ 5. Движение газов в рабочем пространстве металлургических печей 38
Причины движения. Свободное и вынужденное движения . 38
Струи 39
Вентиляторы и дымососы 45
Движение газов и рациональный режим давления в печи . 46

Глава II. Основы теплопередачи

§ 1. Характеристика процессов теплообмена 50
Основные понятия теории теплообмена 50
Виды и основные законы процесса теплообмена 51
§ 2. Конвективный теплообмен 55
Физические основы теплообмена конвекцией 55
Применение теории подобия к изучению теплообмена . . 57
Свободная конвекция 59
Вынужденная конвекция 61
§ 3. Теплопроводность 64
Теплопроводность при стационарном состоянии 64
Теплопроводность при нестационарном состоянии . . . 67
§ 4. Теплообмен излучением 71
Основные понятия и законы 71
Теплообмен излучением между серыми поверхностями, разделенными лучепрозрачной средой 76
Теплообмен излучением между поверхностями, разделенными ослабляющей средой 85
Сложный теплообмен излучением и конвекцией 90

Глава III. Нагрев металла

§ 1. Окисление и обезуглероживание стали 91
Общие сведения 91
Окисление стали 92
Обезуглероживание стали 94
Защита стали от окисления и обезуглероживания . . . 95
§ 2. Основы рациональной технологии нагрева стали . . . 96
Процессы, протекающие внутри нагреваемого металла . . 96
Основные положения рациональной технологии нагрева стали 97

§ 3. Расчет нагрева металла 101
Характеристика методов расчета нагрева 101
Нагрев тел при краевых условиях третьего рода . . . 102
Принципы скоростного нагрева 109

Глава IV. Топливо и его сжигание

§ 1. Характеристика топлива 110
Газообразное топливо 114
Жидкое топливо 116
Твердое топливо 117
§ 2. Основы теории горения топлива 121
Характеристика процесса горения 121
Горение газообразного топлива 123
Горение жидкого топлива 126
Горение твердого топлива 127
Горение полное и неполное 128
Расчеты горения топлива 129
§ 3. Устройства для сжигания топлива 132
Общие принципы выбора рациональных методов сжигания топлива в печах 132
Устройства для сжигания газа (горелки) 133
Устройства для сжигания жидкого топлива (форсунки) . . 143
Комбинированные газомазутные горелки 148
Радиационные трубы 150

Глава V. Материалы и строительные элементы печей

§ 1. Огнеупорные материалы 153
Классификация огнеупорных материалов 153
Свойства огнеупорных материалов 156
Кремнеземистые огнеупорные материалы 161
Алюмосиликатные огнеупорные материалы 164
Магнийсодержащие огнеупорные материалы 169
Цирконистые огнеупорные материалы 178
Углеродсодержащие огнеупорные материалы 179
Карбидкремниевые огнеупорные материалы 181
Огнеупорные растворы, набивочные массы, обмазки и бетоны 182
Стоимость огнеупорных материалов 187
§ 2. Теплоизоляционные материалы 187
Требования, предъявляемые к теплоизоляционным материалам. Классификация и свойства материалов 187
Естественные теплоизоляционные материалы 189
Искусственные теплоизоляционные материалы 190
§ 3. Строительные материалы и металлы, применяемые для печей и их элементов 192
Строительные материалы 192
Металлы и сплавы 194
Материалы для нагревательных элементов электропечей сопротивления 195
§ 4. Строительные элементы печей 197
Фундаменты печей 197
Каркасы печей 199
Футеровка печей 201
§ 5. Сооружение печей 206
Порядок работ по сооружению печей 206
Техника безопасности при сооружении печей 210

Глава VI. Утилизация тепла в металлургических печах

§ 1. Характеристика методов утилизации тепла в металлургических печах 211
§ 2. Утилизация тепла отходящих дымовых газов с целью предварительного подогрева газа и воздуха 215
Регенеративные теплообменники 215
Рекуперативные теплообменники 221
§ 3. Утилизация тепла отходящих дымовых газов в теплосиловых устройствах 238
Котельные установки 238
Турбинные установки 245
§ 4. Охлаждение печей 248
Водяное (проточное) охлаждение 248
Испарительное охлаждение 249

Глава VII. Очистка дымовых газов

§ 1. Характеристика газоочистных устройств 256
Электроочистка 257
Сухая очистка газов 261
Мокрая очистка газов 269
§ 2. Очистка газов доменного производства 273
§ 3. Очистка газов в сталеплавильном производстве 278
§ 4. Очистка газов в ферросплавном производстве 289

Глава VIII. Топливные печи и конвертеры, применяемые в черной металлургии

§ 1. Классификация и общая характеристика тепловой работы печей 292
Классификация печей 292
Характеристика тепловой работы печей 296
§ 2. Доменные печи 303
Устройство и работа доменной печи 303
Теплообмен в доменных печах 306
Показатели работы доменных печей 309
§ 3. Сталеплавильные агрегаты 312
Теплотехника сталеплавильных процессов 312
Кислородные конвертеры 325
Мартеновские печи 334
Двухванные печи 341
§ 4. Нагревательные печи прокатных цехов 344
Характеристика нагревательных печей заводов черной металлургии 344
Печи для нагрева слитков (нагревательные колодцы) . . 345
Печи для нагрева блюмов и слябов 355
Печи трубо- и колесопрокатных цехов 378
§ 5. Термические печи прокатных цехов 383
Характеристика термических печей заводов черной металлургии 383
Печи для термической обработки сортового проката . . 388
Печи для термической обработки горячекатаных листов . 390
Печи для термической обработки холоднокатаных листов и ленты 394

Глава IX. Электрические печи, применяемые в черной металлургии

§ 1. Характеристика процесса электрического нагрева . . . 404
Особенности электрического нагрева 404
Методы генерации тепла за счет электрической энергии . . 405
Классификация электрических печей 410
Основные параметры и показатели работы электрических печей 413
§ 2. Дуговые и плазменные печи 416
Дуговые печи для производства ферросплавов 416
Дуговые сталеплавильные печи 421
Вакуумные дуговые печи 428
Плазменные дуговые печи 432
§ 3. Индукционные печи 434
Индукционные плавильные печи 434
Индукционные нагревательные печи 441
§ 4. Печи сопротивления 446
Плавильные печи сопротивления 446
Нагревательные печи сопротивления 448
§ 5. Электронно-лучевые печи 462

Глава X. Пуск, эксплуатация и ремонт печей

§ 1. Пуск и разогрев печей 463
§ 2. Эксплуатация печей и уход за ними 465
§ 3. Ремонт печей 467
§ 4. Техника безопасности при эксплуатации печей 469
Топливные печи 469
Электрические печи 470
Рекомендательный библиографический список 472
Условные обозначения 473
Предметный указатель 474

ПРЕДИСЛОВИЕ

В металлургии и машиностроении, при производстве строительных материалов и во многих других отраслях промышленности одним из основных видов оборудования являются печи-агрегаты, в которых осуществляется тепловая обработка различных материалов. Во многих производствах качество работы печей определяет качество готовой продукции. Печи являются весьма энергоемким оборудованием, потребляющим значительное количество твердого (кокса), газообразного и жидкого топлива, а также электроэнергии.

Первая попытка сформулировать принципы теории печей принадлежит известному русскому ученому В. Е. Грум-Гржимайло, создавшему «гидравлическую теорию печей», которая была опубликована в 1905—1911 гг. По мере развития металлургии развивалась и теория печной теплотехники. Большая заслуга в этом принадлежит М. А. Глинкову. В 1959 г. была издана его монография, в которой обобщены и сформулированы положения современной теории печей, наметившие развитие конструкций металлургических печей в направлении интенсификации процессов теплообмена при высокой степени механизации и автоматизации.

Создание общей теории печей базировалось на достижениях в области металлургической теплотехники советских ученых М. А. Глинкова, Н. Н. Доброхотова, Б. И. Китаева, Г. П. Иванцова, И. Г. Казанцева, И. С. Назарова, Н. Ю. Тайца, В. Н. Тимофеева и др. Трудно переоценить ту большую роль, которую сыграли в развитии теории печей работы М. В. Кирпичева, Л. С. Эйгенсона, А. А. Гухмана, М. А. Михеева по применению теории подобия для исследования печных процессов.

Заложенный учеными фундамент позволяет в настоящее время их ученикам и последователям (А. А. Скворцову, Н. У. Пуговкину, М. А. Кузьмину, Э. М. Гольдфарбу, В. И. Губинскому, Н. И. Иванову, Е. А. Капустину, А. Н. Минаеву, А. С. Телегину, В. М. Тымчаку, Ф. Р. Шкляру, Ю. Г. Ярошенко и др.) обеспечивать дельнейшее развитие теплофизики металлургического производства, готовить инженерные и научные кадры для эффективной деятельности на заводах, в научных и проектных организациях.

В настоящее время на заводах черной металлургии (а также на ряде крупных машиностроительных заводов) созданы специальные теплотехнические лаборатории и отде-

лы, коллективы которых успешно решают весьма сложные производственные задачи. Большую работу по созданию и усовершенствованию конструкций печей осуществляют Стальпроект, Гипромез, Теплопроект и др.

Второе издание учебника, так же как и первое, осуществлено в двух томах. Материал, представленный в первом томе, позволит учащимся получить необходимую теоретическую подготовку, изучить конструкцию современных печей и их элементов. Во 2-м томе учебника приведены расчеты, которые будут необходимы учащимся при выполнении домашних заданий, курсовых и дипломных проектов. Оба тома тесно связаны между собой и созданы с использованием современных представлений в области теории и практики металлургической теплотехники.

Том 1 учебника написан В. А. Кривандиным (главы I; II; III; IV; § 1 и § 2 главы VI; VIII; § 1—3 главы X; п. 1 § 4 главы X) и Ю. П. Филимоновым (главы V; IX; п. 2 § 4 главы X); том 2 написан Б. С. Мастрюковым. По просьбе авторов § 3 и 4 гл. VI и глава VII 1-го тома написаны В. В. Белоусовым.

Авторы выражают глубокую благодарность проф. Шульцу Л. А. за ценные замечания, сделанные при рецензировании рукописи учебника.

Глава I ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПЕЧНЫХ ГАЗОВ

§ 1. Элементы теории подобия

Основные понятия

В современной науке и технике, когда необходимо решить какие-либо задачи, прежде всего стремятся составить математические уравнения, описывающие эти задачи, и их решить. Если такие уравнения составить не удается или если они не решаемы, то для установления необходимых зависимостей между интересующими величинами проводят экспериментальные исследования. Однако в промышленности достаточно часто встречаются такие агрегаты, непосредственное исследование которых значительно затруднено или вообще невозможно. К таким агрегатам относятся и металлургические печи, работающие при высокой температуре рабочего пространства. В некоторых случаях единственно возможным методом исследования процессов, протекающих в рабочем пространстве, является метод исследования на модели печи. При этом процессы в модели должны быть подобны процессам, протекающим в печи. Для достижения этого необходимо, чтобы при создании модели и проведении опытов на ней были выдержаны условия, определяемые современной теорией подобия.

Какие условия необходимо соблюдать, чтобы добиться подобия двух физических явлений? Основными условиями, вытекающими из теории подобия, являются следующие:

1. Должны быть тождественны (одинаковы) безразмерные математические уравнения, описывающие два явления. Это условие говорит о том, что такие два явления должны быть прежде всего схожи между собой в самом общем виде. Можно, например, искать подобие между движением газа по трубопроводу большого диаметра и воды в водопроводной трубе. Это возможно, поскольку физическая природа этих двух явлений аналогична. Но бессмысленно искать подобие между движением жидкости по трубе и распространением тепла в твердом теле, потому что природа этих явлений различна и математические уравнения, их описывающие, не могут быть тождественны. Однако обязательной тождественности основных уравнений еще недостаточно для обеспечения подобия двух физических явлений. Необходимо еще соблюдение второго условия.

2. Кроме тождественности основных безразмерных уравнений, для соблюдения подобия необходимо подобие условий однозначности. Условиями однозначности являются такие условия, которые из массы явлений, природа которых аналогична и которые описываются аналогичными уравнениями, выделяют какое-то конкретное явление. Одним из таких условий является, например, геометрическое подобие двух рассматриваемых явлений. Но этого еще недостаточно. Рассматриваемое ниже уравнение Бернулли для течения реальной жидкости справедливо для огромного множества видов течения различных жидкостей. Чтобы из этого множества течений выделить два подобных, необходимо (кроме геометрического подобия) подобие вязкостно-скоростных характеристик.

Справедливость обеспечения этих условий для достижения подобия может быть проиллюстрирована на примерах геометрического и гидродинамического подобия.

Остановимся сначала на той форме записи, которая используется в теории подобия. Вообще термин «подобие» заимствован из геометрии. При рассмотрении подобия двух треугольников ABC и $A'B'C'$ подобие в геометрии записывается так:

$$AB/A'B' = BC/B'C' = AC/A'C' = c.$$

Величину c называют константой подобия. Она вполне определенна для каждой пары подобных треугольников. Однако подобных треугольников может быть сколько угодно много, поэтому форма записи подобия через константу подобия не является достаточно универсальной. Для получения более универсальной записи воспользуемся методом масштабных преобразований. Выберем в качестве единицы измерения не стандартную единицу, метр, как это было сделано при определении константы подобия, а какие-либо сходственные отрезки. Допустим, в подобных треугольниках ABC и $A'B'C'$ единицами измерения являются стороны AC и $A'C'$. Тогда для этих треугольников можно написать:

$$AB/AC = A'B'/A'C' = \ldots = i_{AB} \text{ или } BC/AC =$$
$$= B'C'/A'C' = \ldots = i_{BC}.$$

Числа i остаются неизменными для всех подобных фигур и потому называются инвариантами подобия. Если константы подобия зависят от относительного размера подобных фигур, то инварианты подобия остаются неизменными для любого числа подобных фигур. Отрезки AC и $A'C'$, выбранные в качестве единиц измерения, называют масштабами, отсюда и название «метод масштабных преобразований».

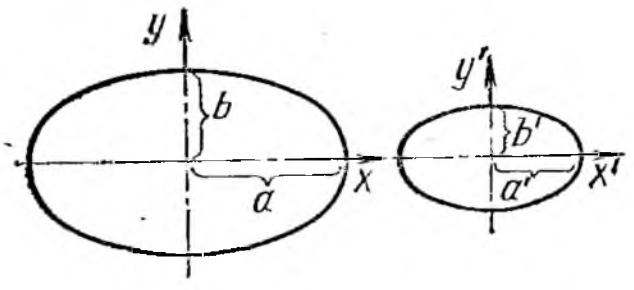


Рис. 1. Подобные эллипсы

С помощью метода масштабных преобразований можно показать, что уравнения, описывающие подобные системы после приведения их к безразмерному виду, тождественны. Как следует из теории подобия, тождественность безразмерных уравнений есть одно из главных условий подобия систем. Проиллюстрируем это следующим примером. Рассмотрим два подобных эллипса (рис. 1), которые описываются уравнениями

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \text{ и } \frac{x_1^2}{a_1^2} + \frac{y_1^2}{b_1^2} = 1.$$

Чтобы привести уравнения эллипсов к безразмерному виду в качестве масштабов измерения, возьмем сходственные полуоси a и a_1. Будем выражать инварианты подобия через X, Y, A, B. Таким образом,

$$X = x/a; \quad Y = y/a; \quad A = a/a; \quad B = b/a;$$
$$X_1 = x_1/a; \quad Y_1 = y_1/a_1; \quad A_1 = a_1/a_1; \quad B_1 = b_1/a_1.$$

Но поскольку эллипсы подобны, постольку равны их инварианты подобия, т. е.

$$X = X_1, \; Y = Y_1, \; A = A_1, \; B = B_1.$$

Выразим каждую величину, входящую в основные уравнения эллипсов, через соответствующие инварианты подобия:

$$x = aX; \quad y = aY; \quad b = aB;$$

$$x_1 = a_1 X_1; \quad y_1 = a_1 Y_1; \quad b_1 = a_1 B_1.$$

Подставляя эти значения в основные уравнения и имея в виду, что $A = A_1 = 1$, получаем тождественные уравнения для этих двух эллипсов:

$$X^2 + \frac{Y^2}{B^2} = 1; \quad X_1^2 + \frac{Y_1^2}{B_1^2} = 1.$$

Но соответствующие инварианты равны, поэтому для всех подобных эллипсов основные уравнения тождественны уравнению

$$X^2 + \frac{Y^2}{B^2} = 1.$$

Метод масштабных преобразований применим и к физическим явлениям, уравнения которых в отличие от геометрических уравнений включают величины, имеющие различную размерность. Поэтому при рассмотрении подобия физических явлений следует сравнивать величины с одинаковой разномерностью.

Гидродинамическое подобие

Для металлургической теплотехники наибольший интерес представляют гидродинамическое и тепловое подобия.

Если, подобно тому, как было сделано с уравнением эллипсов, привести к безразмерному виду основные уравнения гидродинамики, то для обеспечения подобия двух явлений необходимо равенство следующих безразмерных инвариантов подобия:

$$wl/\nu = w' l'/\nu' \text{ и } \Delta p/(\rho w^2) = \Delta p'/(\rho' w'^2),$$

где w — скорость движения среды; l — линейный размер; ν — коэффициент кинематической вязкости движущейся среды; ρ — плотность движущейся среды; Δp — разность давлений между двумя интересующими исследователя точками.

Такие безразмерные инварианты подобия получили название критериев подобия. Часто критерии подобия называют по фамилиям ученых, внесших большой вклад в развитие науки. Так, инвариант подобия wl/ν называют критерием Рейнольдса и обозначают Re, а инвариант $\Delta p/(\rho w^2)$ называют критерием Эйлера и обозначают Eu. Таким образом, из изложенного следует, что условиями гидродинамического подобия является равенство критерия образца (печи) и модели, т. е.

$$\mathrm{Re} = \mathrm{Re}' \text{ и } \mathrm{Eu} = \mathrm{Eu}'.$$

При различных гидродинамических исследованиях чаще всего необходимо определить изменение давления в зависимости от изменения скорости течения и других факторов. Поэтому целью и результатом таких исследований является отыскание зависимости величины критерия Эйлера от величины критерия Рейнольдса, т. е.

$$\mathrm{Eu} = f(\mathrm{Re}).$$

Таким образом, в результате экспериментального исследования на модели какой-либо гидродинамической задачи, которую нельзя было

решить ни математически, ни экспериментально непосредственно на агрегате, получаются эмпирические выражения типа

$$\mathrm{Eu} = c\,\mathrm{Re}^n,$$

где c, n — коэффициенты, определенные из опыта.

Такие выражения пригодны для соответствующих расчетов как печи в целом, так и отдельных (исследованных на модели) ее элементов. Такая критериальная форма записи результатов экспериментального исследования предпочтительна своей универсальностью. В этом не трудно убедиться. Представим себе, что нас интересует зависимость разности давлений между двумя точками печи $p_1 - p_2 = \Delta p$ от скорости движения среды w, ее вязкости ν и расстояния между этими точками l. Проводя такие исследования без использования критериальной записи, пришлось бы измерять перепад давлений Δp, сначала изменяя величину w при постоянных ν и l, затем изменяя величину ν при постоянных w и l и т. д. Соответственно этому очень громоздкой и неудобной была бы некритериальная форма записи результатов, которая могла бы выглядеть примерно так:

$$\Delta p = cw^n \text{ при } \nu = \text{const} \text{ и } l = \text{const};$$

$$\Delta p = c' \nu^{n'} \text{ при } w = \text{const} \text{ и } l = \text{const}$$

и т. д.

Такая форма записи требует нахождения очень многих опытных коэффициентов и практически исключает возможность определения величины Δp при одновременном изменении всех трех величин w, ν и l, входящих в критерий Re. Гораздо целесообразнее рассматривать зависимость перепада давлений Δp от критерия Re в целом. Ведь одно и то же численное значение Δp возможно при различных комбинациях значений w, ν и l. Следовательно, критериальная запись результатов эксперимента дает большое удобство и универсальность, так как достаточно изменять при проведении опытов значение Re, чем охватывать всю область интересующих значений w, ν и l без индивидуального поочередного их изменения с последующей обработкой опытных данных в громоздкой и неудобной для практического использования форме.

В силу отмеченных причин теорию подобия часто называют теорией эксперимента, подразумевая под этим возможность с применением теории подобия поставить достаточно точный (с точки зрения соответствия условиям, имеющим место на практике) и универсальный эксперимент, результатом которого явится эмпирическое уравнение, пригодное и удобное для практических расчетов.

Часто уравнение типа $\mathrm{Eu} = f(\mathrm{Re})$ используется для записи результатов экспериментов на действующих печах. Это позволяет распространить результаты экспериментов на ряд подобных печей других размеров.

Необходимо подчеркнуть, что теория подобия позволяет заменить математическое решение задачи экспериментальным. Это означает, что вместо формулы, полученной математическим решением системы уравнений, с применением теории подобия можно получить эквивалентную эмпирическую критериальную формулу. Это общее положение справедливо для всего многообразия явлений, попадающих под термин «физическое подобие». Применительно к задачам металлургической теплотехники это относится как к гидравлическому подобию (о чем шла речь выше), так и к тепловому подобию, которое рассматривается ниже и является основой изучения широкого круга задач в области теплопередачи.

Моделирование в области механики газов с использованием положений теории подобия имеет ряд особенностей, главной из которых является то, что характер зависимости $Eu=f(Re)$ может быть весьма различным. В некоторых случаях начиная с определенного значения Re критерий Eu перестает изменяться с изменением Re. Подобное значение критерия Re называют критическим. В области значений критерия Re выше критического при увеличении Re (иначе говоря, при возрастании скорости движения) характер движения не изменяется и поток (при различных Re) остается подобен сам себе, как бы моделирует сам себя. Такую область называют автомодельной областью. В автомодельной области достижение подобия возможно при неравенстве значений Re образца и модели. В этом случае процессы в модели подобны процессам в образце при обеспечении в модели числа Re, несколько меньшего, чем $Re_{кр}$. Понятие автомодельности широко используется в практике моделирования печей. Всякая модель печи создается в определенном геометрическом масштабе к образцу. Расход моделирующей среды (обычно воды или воздуха) определяется, исходя из равенства критериев $Re=Re'$, из которого находят скорость движения среды в модели:

$$w_1 = w\frac{\nu_1 l_1}{\nu l}. \qquad (1)$$

Если использовать величины масштаба вязкости $M_\nu = \nu'/\nu$ и линейного масштаба $M_l = l_1/l$, то $w_1 = wM_\nu M_l$.

В автомодельной области при $Re \neq Re_1$ можно использовать понятие масштаба чисел Re, т. е. $M_{Re} = Re_1/Re$.

При этом выражение для скорости движения среды в модели имеет вид

$$w_1 = M_\nu M_l M_{Re}. \qquad (2)$$

Поскольку M_{Re} обычно значительно меньше единицы, постольку скорость движения среды, подсчитанная по выражению (2), меньше значения, подсчитанного по выражению (1). Это обстоятельство является очень важным для практики моделирования, так как позволяет работать с меньшим расходом моделирующей среды, который, как известно, равен $V_1 = w_1 f_1$, где f_1 — сечение модели, которому соответствует скорость w_1.

Полученные на модели результаты (например, перепады давлений между выбранными точками) можно перенести на образец, используя равенство критериев Эйлера.

§ 2. Общие сведения о свойствах и движении жидкостей и газов

Многие важные процессы, протекающие в промышленных печах, зависят от характера движения газов (теплообмен, распределение температур и давлений, диффузионные процессы и др.). В топливных печах продукты сгорания топлива являются тем теплоносителем, от которого тепло передается обрабатываемому материалу. В электрических печах движение воздуха или специально созданной атмос-

феры способствует развитию теплообменных и диффузионных процессов. Большое влияние, которое оказывает движение газов на работу печи в целом, и есть та причина, по которой движение (механика) газов является одним из важнейших разделов металлургической теплотехники.

Свойства жидкостей и газов

Жидкости и газы. Гидромеханика и механика газов рассматривают жидкость и газ как сплошную легкоподвижную среду, в которой отсутствует молекулярное движение, а распределение вещества и физических свойств происходит непрерывно. Обычно нетвердые тела разделяют на среды несжимаемые (собственно жидкости) и среды сжимаемые (собственно газы). Однако это не всегда точно, так как капельные жидкости в ряде случаев обладают некоторой способностью сжиматься, а газы во многих практических случаях можно рассматривать как несжимаемые. Газы в печах находятся под давлением, которое менее чем на 0,2 % отличается от атмосферного. В этих условиях возможное изменение объема вследствие изменения давления ничтожно. Температура в печах в подавляющем большинстве случаев изменяется постепенно, что дает основание на отдельных участках пренебрегать влиянием температуры на объем газа и рассматривать газы как несжимаемые среды. Общим признаком несжимаемости газов является условие $\rho = \text{const}$. Поэтому в механике газов используются положения гидромеханики, гидравлики и аэродинамики. Явление сжимаемости газов проявляется при высоких (сверхзвуковых) скоростях движения. В этих условиях $\rho \neq \text{const}$.

Газы реальные и идеальные. Всем жидкостям и газам присуще свойство вязкости, т. е. способность оказывать сопротивление относительному движению (перемещению) частиц. Однако в некоторых газах (кислород, азот, оксид и диоксид углерода и др.) свойство вязкости проявляется слабо и им без большой погрешности можно пренебречь. Кроме того, как это видно из изложенного ниже, математическое описание движения сред с учетом изменения их вязкости столь сложно, что делает неразрешимыми составленные уравнения. Вместе с тем в ряде случаев разумное пренебрежение вязкостью открывает широкие перспективы для математического анализа и получения важных результатов при рассмотрении процессов движения газов. Эти обстоятельства и послужили причиной того, что

было предложено и применено понятие идеального газа (идеальной жидкости) — абстрактной среды, лишенной свойства вязкости. Понятие идеальной среды весьма продуктивно применяется в тех случаях, когда можно пренебречь вязкостью.

Важное значение имеют некоторые следствия из уравнения состояния идеальных газов. Из уравнения состояния идеальных газов (Клапейрона) для одного и того же количества газа следует

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{PV}{T} = \text{const}, \tag{3}$$

где V_0 — объем, занимаемый газом при нормальных условиях, т. е. при температуре $T_0 = 273$ К и при атмосферном давлении $P_0 = 101332$ Па; V — объем газа при давлении P и температуре $T = T_0 + t_1 = 273 + t_1$ (здесь t_1 — температура газа по стоградусной шкале, °С), м³. Из уравнения (3) получим

$$V = V_0 (1 + \alpha t_1) P_0 / P, \tag{4}$$

где $\alpha = 1/273$ — коэффициент объемного расширения, град$^{-1}$.

Учитывая, что отношение массы газа M к его объему V есть плотность ρ, из уравнения (4) найдем

$$\rho = \rho_0 \frac{P}{(1 + \alpha t_1) P_0}, \tag{5}$$

где ρ_0 — плотность газа при нормальных условиях, кг/м³; ρ — плотность газа при давлении P и температуре t_1.

Если давление газа остается неизменным и равным атмосферному, то уравнения (4) и (5) упрощаются и принимают вид

$$V = V_0 (1 + \alpha t_1) \text{ и } \rho = \frac{\rho_0}{1 + \alpha t_1}.$$

Если под V понимать секундный расход (объем) газа (м³/с) и учесть, что скорость газа представляет собой отношение секундного расхода газа к площади поперечного сечения канала F (м²), по которому он движется, то при $F = \text{const}$ зависимость скорости газа w от температуры и давления выразится уравнением

$$w = w_0 (1 + \alpha t_1) P_0 / P.$$

где w_0 — скорость газа при нормальных условиях, м/с.

Если давление равно атмосферному, т. е. $P = P_0$, то

$$w = w_0 (1 + \alpha t_1).$$

В реальных газах молекулы подвержены силам взаимодействия и эти газы обладают вязкостью, т. е. свойством оказывать сопротивление относительному движению (перемещению) частиц.

При движении газов свойство вязкости проявляется в возникновении сил внутреннего трения. Всякое трение сопровождается потерей энергии. Поэтому перемещение газов связано с затратой энергии.

Силу трения при движении газов (рис. 2) можно подсчитать по формуле Ньютона

$$\tau_* = \mu \Delta w / \Delta \delta,$$

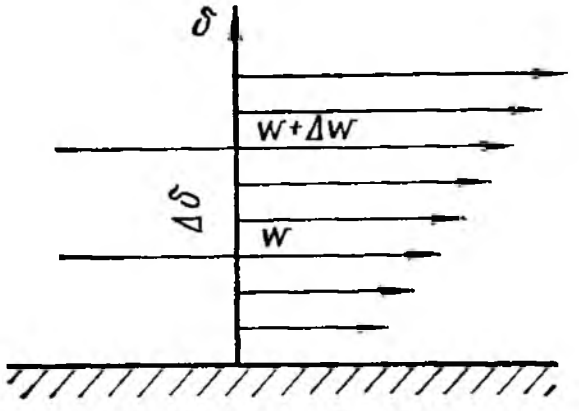


Рис. 2. Изменение скорости по сечению потока

где τ_* — сила трения, отнесенная к единице поверхности, разделяющей слои газа, Н/м^2; μ — коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом динамической вязкости, Па·с; Δw — разность скоростей на границах слоя толщиной $\Delta\delta$.

Наряду с коэффициентом динамической вязкости в механике газов пользуются коэффициентом кинематической вязкости ν, м^2/с

$$\nu = \mu/\rho,$$

где ρ — плотность газа, кг/м^3.

С увеличением температуры вязкость газов растет. Наличие вязкости и, как следствие, трения в реальных газах при их движении приводит к возникновению непосредственно около поверхности так называемого пограничного слоя, толщина которого составляет примерно 1 % всей толщины потока. В этом тонком слое жидкости происходит резкое изменение скорости от скорости потока на его внешней поверхности до нуля непосредственно на стенке. Несмотря на незначительные (относительно всего потока) размеры, пограничный слой играет огромную роль как в процессах гидро- и аэродинамики, так и в процессах теплообмена.

Статика и динамика газов. В металлургических печах встречаются такие случаи, когда заполняющий объем нагретый газ находится в покое. К этим случаям приложимы закономерности статики газов.

Однако гораздо более распространенным является движение газов (динамика газов).

В рабочем пространстве печей и дымовых каналах газ обычно движется при относительно невысоких скоростях (до 70—80 м/с) и небольших перепадах давления (до 100 Па). Изменение давления такого порядка практически не влияет на плотность газа, поэтому в этих случаях все рассуждения ведутся при постоянной плотности. Однако возможно весьма ощутимое изменение плотности в зависимости от температуры. Поэтому расчет обычно ведут, используя величину плотности, полученную на данном участке по среднеарифметической температуре газа и принимаемую неизменной.

В отдельных элементах печей (в форсунках, горелках) встречается движение газов с высокой скоростью, причем возможная величина скорости может изменяться в очень широких пределах: от 150—200 м/с до скорости звука и выше. При таких скоростях, связанных с большими перепадами давления, принимать плотность газа постоянной недопустимо.

Поэтому ниже рассматриваются закономерности движения газов как с низкой ($\rho=const$, несжимаемые газы), так и с высокой скоростью ($\rho\neq const$, сжимаемые газы).

Вместе с тем скорость движения газов оказывает влияние и на характер движения потока, который может быть ламинарным или турбулентным.

Турбулентное и ламинарное движения

В зависимости от характера движения различают ламинарное (или слоистое) и турбулентное (или вихреобразное) движения газов. Ламинарным называется такое движение, при котором струйки газа перемещаются параллельно одна другой, не пересекаясь.

Характерной особенностью ламинарного движения является параболическое распределение скоростей по сечению потока, обусловленное трением о поверхность прилегающего к ней слоя газа и последующих слоев друг о друга (рис. 3).

При турбулентном режиме в потоке возникает множество вихрей, что приводит к интенсивному перемешиванию газа. Распределение скоростей при этом более равномерно и имеет вид усеченной параболы.

Пределы существования ламинарного и турбулентного движения были установлены Рейнольдсом (1883 г.), который показал, что характер движения зависит от соотношения сил инерции и сил внутреннего трения. Это соотноше-

ние характеризуется безразмерным комплексом, названным впоследствии критерием Рейнольдса: $Re = wd_г/\nu$, где $d_г$ — гидравлический диаметр канала, $d_г = 4F/П$ (здесь F — площадь сечения; $П$ — периметр).

Установлено, что ламинарное течение имеет место при малых значениях критерия Рейнольдса, а турбулентное

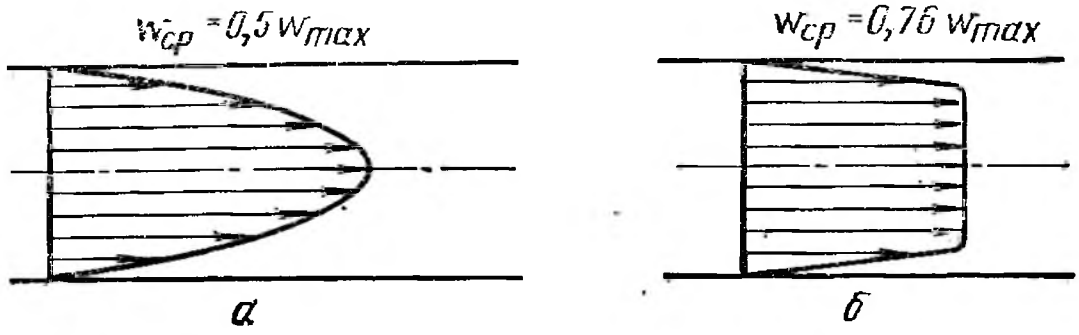


Рис. 3. Распределение скоростей при ламинарном (*а*) и турбулентном (*б*) движении газа (жидкости)

при относительно более высоких. Так, для случая течения жидкости в круглых трубах при $Re < 2100$ поток ламинарен, при $Re > 2300$ поток турбулентен. Из структуры критерия Рейнольдса видно, что турбулизации потока способствуют увеличение скорости и диаметра канала и препятствует увеличение коэффициента кинематической вязкости. При течении какой-то вполне определенной жидкости (газа) по каналу постоянного сечения характер потока зависит исключительно от скорости. При увеличении скорости поток может перейти из ламинарного в турбулентный, и наоборот.

Если обратить внимание на эпюру распределения скоростей при турбулентном пристеночном движении (см. рис. 3), то видно, что все сечение потока может быть разделено на две далеко не равные части: очень тонкий, пристеночный пограничный слой и основная часть потока. В пределах пограничного слоя резко изменяется (уменьшается к поверхности) скорость, а в пределах основного потока скорость практически неизменна.

Таким образом, при турбулентном движении основной части потока, где скорость практически неизменна, характерно отсутствие трения, т. е. в этой части потока вязкость среды на движение не влияет и можно применять закономерности, полученные для идеальной среды. Это обстоятельство является одной из причин целесообразности использования понятия идеальной среды, с помощью которого получено много практических решений, в частности в аэродинамике. Вместе с тем в тех случаях, когда нельзя

ограничиться рассмотрением только основной части турбулентного потока, приходится анализировать картину явлений в пограничном слое на основе теории пограничного слоя, получившей к настоящему времени значительное развитие.

При ламинарном движении пограничный слой всегда ламинарен.

Пограничный слой окаывает большое влияние не только на характеристики движения, но и на теплообмен между потоком газа и окружающей поверхностью. В ламинарном потоке тепло передается исключительно теплопроводностью, в турбулентном — теплопроводностью и конвекцией со значительным преобладанием последней. Поэтому при теплообмене между трубулентным потоком газа и поверхностью передача тепла через пограничный слой является наименее интенсивной и потому определяющей.

Давление газов

Как известно, давление есть сила, действующая на единицу площади. Различают давление абсолютное и избыточное. Избыточное давление представляет собой разницу между давлением в какой-либо емкости и в окружающей атмосфере. Если давление емкости меньше атмосферного (отрицательное избыточное давление), то его называют разрежением.

В металлургической теплотехнике пользуются избыточным (над атмосферным) давлением. Различают три основных вида: геометрическое, статическое, динамическое давление.

Геометрическое давление обусловлено стремлением горячих газов подняться вверх. Если в результате разности плотностей окружающего воздуха и газа последний переместится на высоту H, то геометрическое давление

$$h_г = gH(\rho_в - \rho_г), \qquad (6)$$

где g — ускорение силы тяжести, м/с^2; $\rho_в$ и $\rho_г$ — плотность соответственно воздуха и газа, кг/м^3; H — расстояние (высота), на которое переместился газ, м.

Статическое давление ($h_{ст}$) — есть разность давлений заключенного в сосуде газа и окружающей среды. Оно может быть как положительным, так и отрицательным. Его величина определяется непосредственно из опыта с помощью U-образного манометра (пьезометра). Манометр надо устанавливать так, чтобы один конец его сообщался с

атмосферой, а выходное отверстие другого конца было расположено перпендикулярно направлению потока газа (рис. 4).

Динамическое давление наблюдается при движении газа. Оно равно

$$h_{дин} = \rho w^2/2. \qquad (7)$$

Динамическое давление также может быть определено непосредственно из опыта (рис. 5). Для этого один конец манометра подсоединяют перпендикулярно, а другой — навстречу направлению потока. Сумма статического и ди-

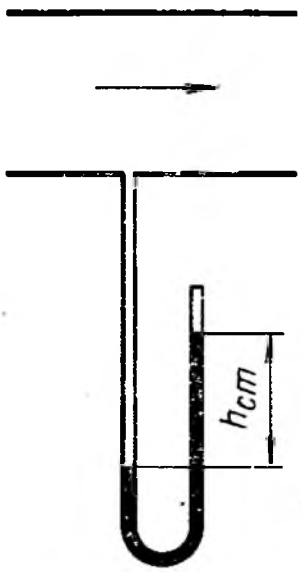


Рис. 4. Измерение статического давления

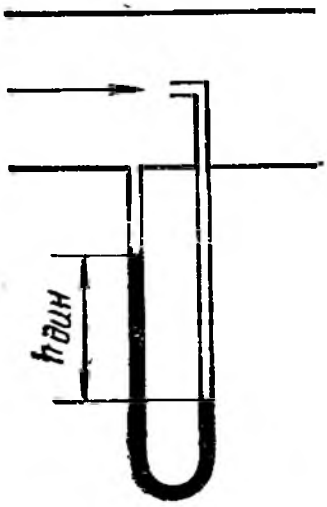


Рис. 5. Измерение динамического давления

намического давлений составляет полное давление $h = h_{ст} + h_{дин}$, которое и воспринимается трубкой, помещенной навстречу потоку. Но поскольку

$$h_{дин} = h_{\Sigma} - h_{ст}, \qquad (8)$$

постольку манометр в этом случае позволяет измерить динамическое давление.

Статическое давление характеризует тот запас потенциальной энергии, которым располагает 1 м^3 газовой системы. Динамическое давление — есть кинетическая энергия потока. В процессе движения газа на преодоление всевозможных сопротивлений затрачивается часть кинетической энергии, убыль которой восстанавливается за счет запаса потенциальной энергии. Эти процессы протекают одновременно, в результате чего приборами фиксируется лишь конечный результат, т. е. изменение энергии газа (изменение статического давления).

§ 3. Статика газов

Статика газов изучает равновесие (состояние покоя) жидкостей и газов. Теоретической базой этого раздела механики сплошных сред являются уравнения Эйлера, получаемые при составлении баланса сил, действующих на каждый элементарный объем покоящейся жидкости или газа. Все силы, действующие на объем газа (жидкости), можно разделить на объемные и поверхностные. К объемным относятся силы, действующие на каждую частицу объема: силы тяжести и силы инерции. Поверхностные силы действуют на единицу поверхности какого-то объема. Такими силами являются силы давления и трения. На любой объем покоящейся жидкости или газа действуют только силы тяжести и давления. Силы инерции и трения проявляются лишь при движении среды. Поэтому уравнения Эйлера для статики справедливы для идеальной и реальной жидкости (газа), так как свойство вязкости, характерное для реальной среды, проявляется только при ее движении. В неподвижном (покоящемся) объеме газа объемные силы — силы тяжести — действуют по вертикали, т. е. в направлении координатной оси z, и вызывают соответствующее изменение давления.

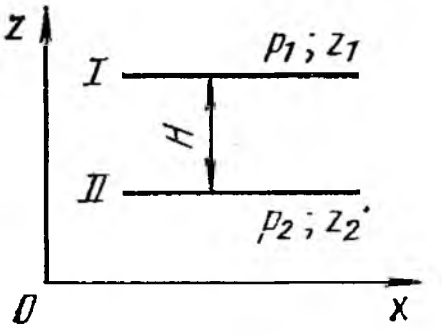


Рис. 6. Изменение давления по высоте столба газов

Уравнение Эйлера для статики жидкостей и газов, составленное как баланс изменения энергии 1 м³ газа в направлении координатной оси z, имеет вид

$$\rho g = dp/dz, \qquad (9)$$

где ρ — плотность жидкости (газа), кг/м³; g — ускорение силы тяжести, м/с²; dp — изменение (приращение) давления при изменении высоты столба жидкости на величину dz; dp/dz — градиент давления.

Как и следует из изложенного выше, уравнение (9) представляет собой баланс энергии, при котором изменение потенциальной энергии 1 м³ газа на отрезке dz (левая часть уравнения) приводит к соответствующему изменению давления (правая часть уравнения).

Если уравнение Эйлера (9) решать для каких-то двух сечений z_1 и z_2 (рис. 6), расположенных на расстоянии H друг от друга, при условии $\rho = \text{const}$ (газ как не-

сжимаемая жидкость), то можно получить основное уравнение статики жидкостей (газов):

$$p_2 = p_1 + \rho g (z_1 - z_2) = p_1 + \rho g H, \qquad (10)$$

где p_1 и p_2 — абсолютное давление соответственно в сечениях *I* и *II*, Па; $\rho g H$ — геометрическое давление, обусловленное силой тяжести и зависящее от плотности ρ и высоты H столба газа, Па; z_1 и z_2 — расстояние от произвольно принятого уровня отсчета *0—0* до соответственно сечений *I* и *II*, м; g — ускорение силы тяжести, м/с^2.

Как следует из определения, приведенного выше, разность между абсолютным статическим давлением $p_г$ газа в сосуде и давлением $p_в$ воздуха на том же уровне является статическим давлением:

$$h_{ст} = p_г - p_в. \qquad (11)$$

Если давление газа в сосуде меньше атмосферного, это означает, что сосуд находится под разрежением. Величина разрежения показывает, на сколько абсолютное давление газа в сосуде меньше атмосферного, т. е.

$$h_{раз} = -h_{ст} = p_в - p_г. \qquad (12)$$

Поверхность, в каждой точке которой статическое давление равно нулю ($h_{ст}=0$), называют уровнем нулевого избыточного давления.

Для печной теплотехники важное значение имеет исследование распределения избыточного давления на стенки сосуда, заполненного горячим газом (рис. 7). Величину избыточного давления на стенки сосуда можно найти с помощью основного уравнения статики газов (10).

Рассмотрим, как определить статическое давление применительно к сосуду, открытому снизу (рис. 7, *а*). В сечении *I* сосуд сообщается с атмосферой, поэтому давление со стороны газа $p_г$ равно давлению со стороны воздуха $p_в$ и, следовательно, $h_{ст1}=p_{г1}-p_{в1}=0$. В сечении *II* давление со стороны газа $p_{г2}=p_{в1}-\rho_г g H$, а со стороны воздуха $p_{в2}=p_{в1}-\rho_в g H$. Статическое давление в сечении *II* $h_{ст2}=p_{г2}-p_{в2}=gH(\rho_в-\rho_г)$. Из этого уравнения видно, что при $\rho_г<\rho_в$ стенки сосуда испытывают избыточное давление со стороны газа, величина которого прямо пропорциональна высоте H и разности плотностей воздуха $\rho_в$ и газа $\rho_г$. Избыточное давление, обусловленное разностью плотностей воздуха и газа, есть геометрическое давление $h_г$, которое в данном случае равно

$$h_{ст} = h_г = gH(\rho_в - \rho_г). \qquad (13)$$

Для сосуда, открытого сверху (рис. 7, *б*), давление газа в сечении *I* равно давлению атмосферного воздуха, следовательно:

$$h_{ст1} = p_{г1} - p_{в1} = 0.$$

Применяя уравнение (10), получаем

$$h_{ст2} = -gH(\rho_в - \rho_г)$$

или

$$-h_{ст2} = h_{раз2} = gH(\rho_в - \rho_г).$$

Это означает, что при $\rho_г < \rho_в$ избыточное давление в сосуде будет отрицательным, т. е. сосуд будет находиться под разрежением $h_{раз}$, абсолютное значение которого равно

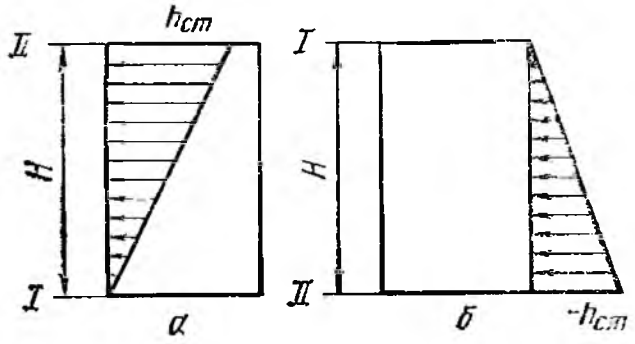


Рис. 7. Изменение избыточного давления по высоте сосуда:

а — открытого снизу; *б* — открытого сверху

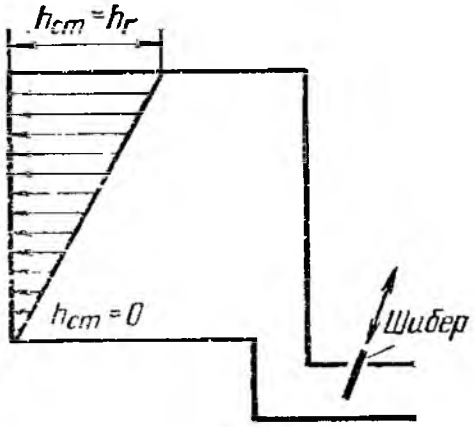


Рис. 8. Распределение давления горячего газа по высоте рабочего пространства печи

$h_г$, т. е. $h_{раз} = h_г = gH(\rho_в - \rho_г)$. Избыточное давление, обусловленное разностью плотностей воздуха и газа, играет важную роль в печах. Если нулевое давление ($h_{ст} = 0$) находится на уровне пода (рис. 8), то над уровнем пода давление в печи больше атмосферного. Это приводит к выбиванию горячих газов через отверстия и неплотности в стенках печи, что в свою очередь ухудшает условия службы металлических конструкций печи и вызывает перерасход топлива.

Если нулевое давление поддерживать несколько выше уровня пода, то часть печи, расположенная ниже нулевого давления, будет находиться под разрежением, что вызовет подсос холодного воздуха в печь. Холодный воздух, помимо перерасхода топлива, снижает температуру печи и увеличивает угар (окисление) металла. При нагреве металла вред от подсоса воздуха больше, чем от выбивания газов

из печи, поэтому, чтобы исключить подсос воздуха в печь, нулевое давление поддерживают на уровне пода или немного ниже, а для уменьшения выбивания газов из печи печь делают более герметичной.

§ 4. Динамика газов

Элементы теории движения реальных газов

При движении газа на каждый его объем будут действовать не только те силы, которые характерны для статики, но и другие, сильно усложняющие как явление в целом, так и его математическое описание. Для движения идеального газа этими дополнительными силами будут силы инерции, а для реального газа — силы инерции и трения (вязкости). В механике сплошных сред большое внимание уделяется выводу и использованию соответствующих математических уравнений, описывающих движение идеальных (уравнения Эйлера) и реальных сред (уравнения Навье — Стокса). Уравнения Навье — Стокса настолько сложны, что к настоящему времени решены лишь для крайне ограниченного числа случаев. Эта сложность вызвана сильным влиянием вязкости среды на различные аспекты процесса движения. В силу этого в допустимых случаях прибегают к решению уравнений Эйлера для движения идеальных сред с введением необходимых поправок и уточнений. Таким образом, получено одно из важнейших уравнений гидро- и аэродинамики — уравнение (закон) Бернулли.

Уравнение Бернулли. В практических условиях крайне распространенным является движение в трубах и каналах, когда газ через боковые стенки не расходуется. В таких случаях для расчетов применяется уравнение Бернулли, полученное для струйки тока (трубка тока), характерной тем, что расход газа в любом ее сечении остается неизменным (обмен газом между всем потоком и струйкой тока через ее боковые границы отсутствует).

Для несжимаемого газа (ρ=const) уравнение Бернулли при условии, что все его члены отнесены к единице объема, имеет вид

$$\rho g z + p + \rho w^2/2 = \text{const}. \qquad (14)$$

В соответствии с этим величина p является статическим давлением, величина $\rho g z$ — геометрическим давлением, величина $\rho w^2/2$ — динамическим давлением.

Уравнение Бернулли представляет собой закон сохранения энергии, поскольку сумма $p+\rho g z$ характеризует по-

тенциальную, а величина $\rho w^2/2$ — кинетическую энергию.

Как отмечалось выше, в металлургической теплотехнике в подавляющем большинстве случаев пользуются давлением, избыточным над атмосферным. Поэтому полезно уравнение Бернулли привести к такому виду, при котором все члены его были бы выражены в избыточных давлениях. Для этого представим себе канал, окруженный воздухом плотностью $\rho_в$, по которому движется газ плотностью $\rho_г$. Принимая плотности газа и воздуха неизменными, напишем уравнение Бернулли и для газа и воздуха применительно к сечениям канала z_1 и z_2.

Уравнение для газа

$$\rho_г g z_1 + p_{1,г} + \rho_г \frac{w_{1,г}^2}{2} = \rho_г g z_2 + p_{2,г} + \rho_г \frac{w_{2,г}^2}{2}.$$

Уравнение для воздуха (считаем, что воздух находится в спокойном состоянии)

$$\rho_в g z_1 + p_{1,в} + 0 = \rho_в g z_2 + p_{2,в} + 0.$$

Вычитая из первого второе, получаем уравнение Бернулли для газа в избыточных давлениях:

$$g z_1 (\rho_г - \rho_в) + (p_{1,г} - \rho_{1,в}) + \left(\rho_г \frac{w_{1,г}^2}{2} - 0\right) =$$

$$= g z_2 (\rho_г - \rho_в) + (p_{2,г} - p_{2,в}) + \left(\rho_г \frac{w_{2,г}^2}{2} - 0\right). \qquad (15)$$

Если перейти к ранее принятому обозначению через h, то уравнение можно соответственно переписать в таком виде:

$$h_{г1} + h_{ст1} + h_{дин1} = h_{г2} + h_{ст2} + h_{дин2} = \text{const}. \qquad (15')$$

Однако равенство $h_{\Sigma 1} = h_{\Sigma 2}$ строго справедливо лишь для идеальной среды, полностью лишенной вязкости. Но если по каналу перемещается реальная (вязкая) жидкость (газ), то часть энергии тратится на преодоление различных сопротивлений и происходит потеря энергии.

В этом случае при движении от сечения *I* к сечению *II*

$$h_{\Sigma 1} = h_{\Sigma 2} + h_{\text{потерь}} \qquad (16)$$

и окончательно закон Бернулли формулируется следующим образом: «При установившемся течении несжимаемой жидкости (газа) для различных сечений канала сумма давлений всех видов является постоянной».

Рассмотрим, что представляет собой потерянное давление, входящее в уравнение Бернулли.

При движении реального газа часть его энергии расходуется на преодоление различных сопротивлений.

Различают потери на трение и потери на преодоление местных сопротивлений. Потери на местные сопротивления возникают при резком изменении величины и направления скорости, при резком изменении сечения канала, при повороте канала или усложнении его сечения (трубчатый пучок). Величину потерь напора выражают в долях динамического давления.

Потери на трение $h_{тр}$ можно определить по формуле (Па)

$$h_{гр} = \lambda \frac{l}{d_г} \frac{w_0^2}{2} \rho_0 \frac{T}{T_0}, \qquad (17)$$

где λ — коэффициент трения; l — длина канала, м; $d_г$ — гидравлический диаметр канала, м (для некруглого сечения канала $d_г = 4F/П$, F — площадь сечения канала, м^2; $П$ — периметр канала, м); ρ_0 и w_0 — плотность и скорость жидкости (газа) при нормальных условиях, т. е. при атмосферном давлении и температуре T_0, равной 273 К; T — действительная температура жидкости или газа, К.

При ламинарном движении (Re$<$2300) коэффициент трения зависит от критерия Re

$$\lambda = 64/\mathrm{Re}. \qquad (18)$$

При турбулентном движении коэффициент трения зависит не только от критерия Re, но и от относительной шероховатости стенки канала (Δ/d), равной отношению абсолютной шероховатости Δ (в мм) к диаметру канала d:

$$\lambda = 0{,}11 \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{\mathrm{Re}} \right)^{0{,}25}. \qquad (18')$$

При приближенных практических расчетах коэффициент трения λ можно принимать постоянным и равным для кирпичных каналов 0,05, для металлических 0,04.

Потери на преодоление местных сопротивлений определяются по формуле (Па)

$$h_м = \xi \frac{w_0^2}{2} \rho_0 \frac{T}{T_0},$$

где ξ — коэффициент местных сопротивлений. Его величина зависит от формы местного сопротивления и, как правило, определяется опытным путем.

Важнейшим расчетом, который выполняется для подавляющего большинства печей, является определение суммарных потерь давления на пути движения дымовых газов от печи до дымовой трубы. Суммарные потери используются при определении размеров дымовой трубы, которая рассчитывается из условия, что разрешение, создаваемое дымовой трубой, должно быть по абсолютной величине больше суммы всех сопротивлений, возникающих в дымовом тракте печи (см. том 2-й настоящего издания).

Таким образом, уравнение (закон) Бернулли находит очень широкое применение. Наряду с уравнением Бернулли важную роль в гидро- и аэродинамике играют также уравнение сплошности и уравнение импульсов Эйлера.

Уравнение сплошности. В практических условиях наиболее распространенными являются такие процессы, при которых масса газа, протекающая по какому-то объему, остается неизменной. При этом, естественно, масса газа, втекающая в объем в единицу времени, должна быть равна массе вытекающего газа.

Следовательно, можно написать, что $m_1 = m_2$, или, учитывая, что масса есть произведение скорости, сечения потока и плотности, получаем

$$w_1 f_1 \rho_1 = w_2 f_2 \rho_2.$$

При условии постоянства плотности ($\rho_1 = \rho_2$) последнее выражение принимает вид

$$w_1 f_1 = w_2 f_2. \qquad (19)$$

Если в качестве скорости принимать среднюю скорость потока, то выражение (19) применимо для практических расчетов при течении в трубах и каналах, причем средняя скорость потока определяется как частное от деления секундного объема среды, проходящего через данное сечение, на величину площади сечения, т. е.

$$w = V/f.$$

Уравнение импульсов Эйлера. Уравнение импульсов (количеств движения) Эйлера имеет важное значение для некоторых практических расчетов. Это уравнение применимо к какому-то воображаемому контуру, выделенному в общем потоке газа, через боковую поверхность которого ни движения, ни массообмена не происходит.

В подобном контуре под действием внешних сил (в потоке газа под действием давления) происходит изменение количества движения газа. Если изменение импульсов про-

ходящего газа и изменение внешних сил отнести к единице времени, то теорема импульсов Эйлера может быть сформулирована следующим образом: «Изменение импульса всех сил, приложенных к газу, проходящему через выделенный контур, равно результирующей внешних сил, действующих на данный контур».

Записывается это уравнение так:

$$\Sigma\Delta(mw) = \Sigma P. \qquad (20)$$

Применение уравнения импульсов будет проиллюстрировано ниже при рассмотрении струйных аппаратов. Расчеты инжекторов и эжекторов с использованием выражений, полученных на основании применения уравнения импульсов Эйлера, приведены во 2-м томе настоящего издания.

Применение уравнения Бернулли

Трудно назвать раздел механики газов, где не использовалось бы в той или иной мере уравнение Бернулли. Познакомимся лишь с некоторыми наиболее важными случаями применения этого уравнения.

Истечение газов через отверстия и насадки

Истечение газов через отверстия и насадки наблюдается при работе горелок, форсунок, при выбивании газа через отверстия в стенах печи и в других случаях. Установим связь между количеством вытекающего газа и размерами отверстия и давлением, под которым происходит истечение. Для простоты возьмем истечение несжимаемого газа, температура которого в процессе истечения практически не изменяется.

Отверстия с острыми краями. Положим, что из сосуда очень больших размеров, давление в котором p_1, газ вытекает через отверстие сечением f_0 в среду с давлением p_2. Для определения скорости истечения газа w_2 напишем уравнение Бернулли для сечений *I* и *II* (рис. 9). Поскольку температура газа неизменна, постольку $h_{г1}=h_{г2}$. В этом случае, пренебрегая потерями, можно написать

$$p_1 + \frac{w_1^2}{2}\rho = p_2 + \frac{w_2^2}{2}\rho. \qquad (21)$$

Вследствие большого размера сосуда можно принять $w_1=0$.

Тогда

$$p_1 = p_2 + \frac{w_2^2}{2}\rho.$$

Отсюда

$$w_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \text{ м/с.} \qquad (22)$$

В силу инерции частичек истекающего газа сечение струи f меньше сечения отверстия f_0. Отношение $f/f_0 = \varepsilon$ называется коэффициентом сжатия струи. Скорость w_2

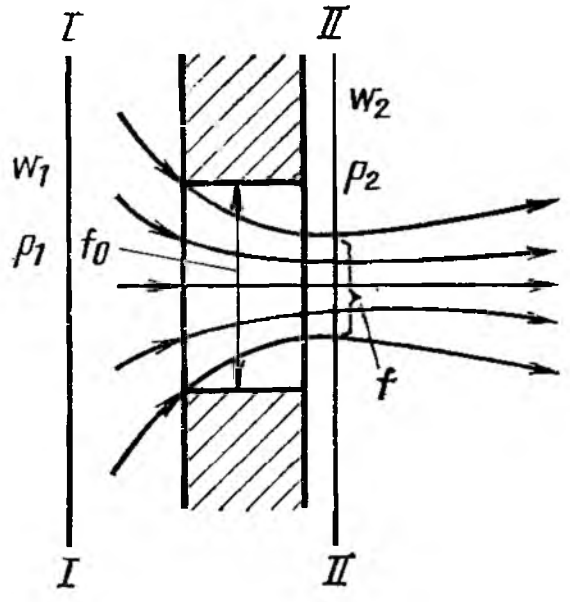


Рис. 9. Истечение газа из отверстия в тонкой стенке

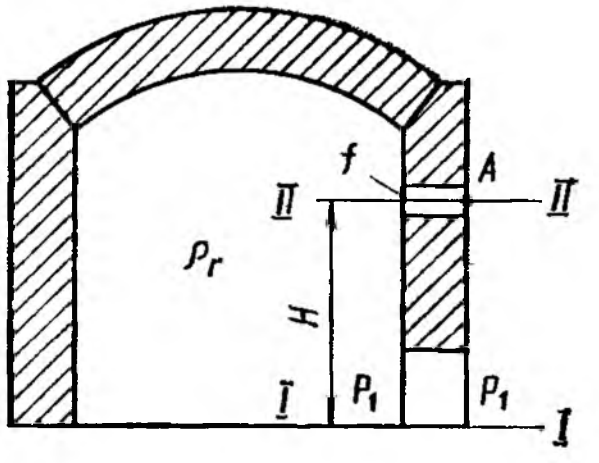


Рис. 10. Истечение из отверстия в стенке печи

фактически относится не ко всему сечению отверстия f_0, а лишь к сечению струи f. Для определения расхода газа через отверстие f_0 найдем $V = w_2 f$. Но $f = \varepsilon f_0$, следовательно,

$$V = \varepsilon f_0 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}. \qquad (23)$$

С учетом гидродинамических потерь при истечении через отверстие выражение (23) принимает вид (м³/с)

$$V = \varphi\varepsilon f_0 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} = \mu f_0 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}. \qquad (24)$$

Смысл коэффициентов φ и μ ясен из следующего примера.

Истечение из отверстия в стенке печи (рис. 10) — весьма распространенный на практике случай. Рассмотрим по-

добный случай истечения (с учетом потерь) из отверстия сечением f, расположенного на высоте H от уровня пода печи. Напишем уравнение Бернулли для сечения I и точки A в сечении II:

$$p_1 + \frac{w_1^2}{2}\rho_г = p_2 + \frac{w_2^2}{2}\rho_г + H\rho_г + h_{потерь}.$$

Скорость движения газов в отверстии w_2 много больше скорости w_1; исходя из $w_2 \gg w_1$, принимаем $w_1 = 0$.

Как следует из изложенного выше, потери на местные сопротивления могут быть определены как

$$h_{потерь} = \xi \frac{w_2^2}{2}\rho_г.$$

Так как печь сообщается с атмосферой на уровне пода, то статическое давление газа внутри печи и давление воздуха снаружи равны между собой и равны p_1.

Давление p_2 в точке A соответствует атмосферному давлению на высоте H от уровня сечения I, т. е.

$$p_2 = p_1 + Hg\rho_в \text{ и } p_1 - p_2 = Hg\rho_в.$$

С использованием этих зависимостей уравнение Бернулли принимает вид

$$Hg\rho_в = \frac{w_2^2}{2}\rho_г + Hg\rho_г + \xi \frac{w_2^2}{2}\rho_г$$

или

$$\frac{w_2^2}{2}\rho_г (1 + \xi) = Hg(\rho_в - \rho_г).$$

Отсюда

$$w_2 = \sqrt{\frac{1}{1+\xi}} \sqrt{\frac{2Hg(\rho_в - \rho_г)}{\rho_г}}. \qquad (25)$$

Величина $\varphi = \sqrt{\frac{1}{1+\xi}}$ учитывает гидравлическое сопротивление отверстия, через которое происходит истечение.

Количество истекающей из рассматриваемого отверстия среды (м³/с) $V = w_2 f_2$, где f_2 — сечение струи, м².

Но если использовать понятие коэффициента сжатия струи $\varepsilon = f_2/f$, то

$$V = w_2 \varepsilon f = \varphi\varepsilon f \sqrt{\frac{2Hg(\rho_в - \rho_г)}{\rho_г}}.$$

Произведение $\varphi\varepsilon = \mu$ называют коэффициентом расхода.

Истечение через насадки. Насадком называют короткий патрубок, присоединенный к отверстию в тонкой стенке. Длина насадка обычно составляет 3—4 его диаметра. Количество газа, протекающее через насадок, при прочих равных условиях зависит от формы входных кромок и

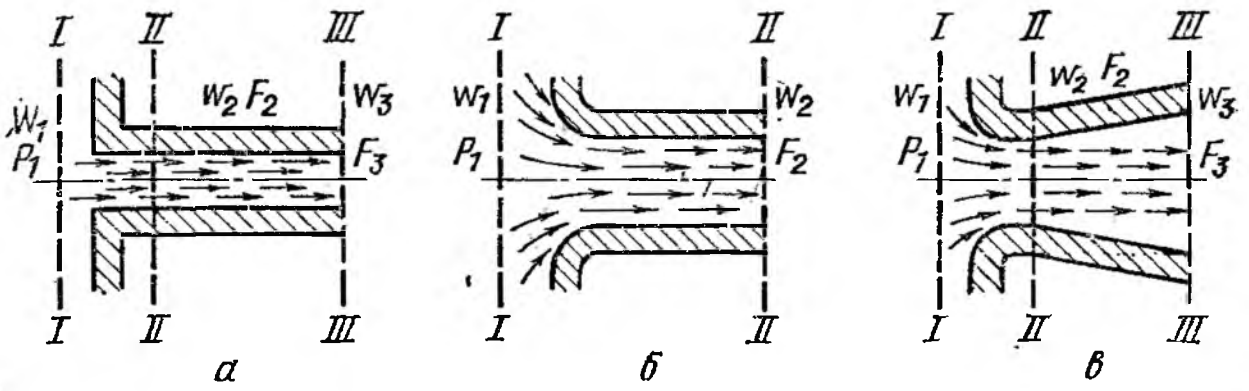


Рис. 11. Истечение газа через цилиндрические насадки:
а — с открытыми кромками; *б* — с закругленными краями; *в* — диффузор

формы самого насадка. Рассмотрим насадки трех видов, представленные на рис. 11. Пользуясь уравнением (22), получим для них следующие расчетные формулы:

для насадки с открытыми кромками

$$w_3 = 0{,}85\sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}; \quad \varepsilon = 0{,}85 \tag{26}$$

$$V = 0{,}85F_3\sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}. \tag{27}$$

Для насадков с закругленными кромками и диффузора

$$V = F_3\sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}. \tag{28}$$

Для этих насадков в сечении *III* сечения струи и отверстия равны друг другу и поэтому здесь $\varepsilon = 1{,}0$. Сравнение выражений (26), (27) и (28) показывает, что наибольший расход при одинаковом значении $p_1 - p_2$ и при одинаковом минимальном сечении насадков получается при истечении газа через диффузор, так как площадь выходного сечения у диффузора F_3 больше, чем у насадков других типов. Угол конусности диффузора не должен превышать 6—7° во избежание отрыва потока от стенок диффузора.

Истечение газов через небольшие отверстия в стенках печи (например, гляделки) можно рассчитывать по формулам для цилиндрического насадка.

Дымовая труба. Дымовая труба служит для удаления продуктов сгорания из печи. Необходимое разрежение создается в дымовой трубе благодаря стремлению горячих газов подняться, обусловленному, как будет показано ниже, разностью плотностей холодного наружного воздуха и горячих газов.

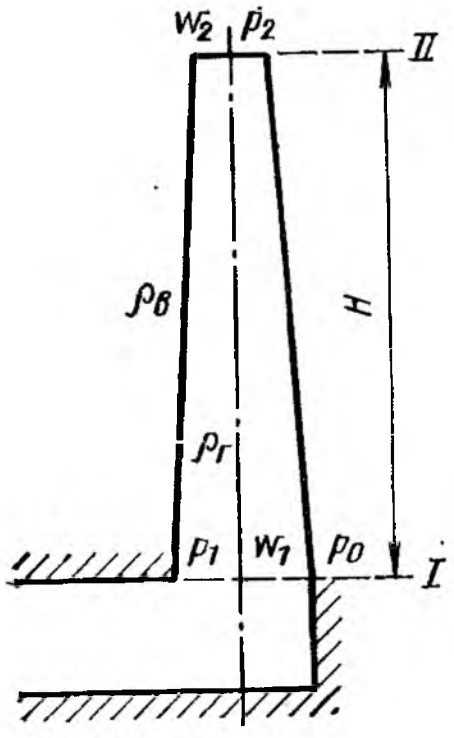


Рис. 12. Схема дымовой трубы

Найдем зависимость разрежения, создаваемого трубой, от высоты трубы H и температуры газов. На рис. 12 представлена схема дымовой трубы. За уровень отсчета принимаем сечение *II*. Напишем уравнение Бернулли в избыточных давлениях для сечений *I* и *II*:

$$h_{т1} + h_{ст1} + h_{д1} = h_{ст2} + h_{д2} + h_{пот}.$$

Труба в сечении *II* сообщается с атмосферой, поэтому $h_{ст2}=0$. Из приведенного выше уравнения следует, что статическое давление в основании трубы

$$h_{ст1} = -h_{т1} + h_{д2} - h_{д1} + h_{пот}.$$

Ввиду незначительных скоростей движения газов в трубе величины потерь, выражаемые в правой части приведенного выше уравнения тремя последними членами, значительно меньше абсолютной величины потери, выражаемой первым членом. Следовательно, статическое давление в основании трубы будет отрицательным, т. е. там будет разрежение. Умножив правую и левую части последнего уравнения на минус единицу, получаем

$$-h_{ст1} = h_{раз} = h_т - (h_{д2} - h_{д1}) - h_{пот}. \qquad (29)$$

Потери давления в трубе $h_{пот}$ складываются из потерь на трение $h_{тр}$ и потерь, возникающих при выходе газов из трубы в атмосферу и равных $\xi h_{д2}$. Учитывая, что коэффициент местного сопротивления на выходе из трубы равен единице ($\xi=1$), можно написать, что

$$h_{пот} = h_{тр} + h_{д2}.$$

Вследствие этого уравнению (29) можно придать следующий вид:

$$h_{разр} = h_г + h_{д1} - 2h_{д2} - h_{тр}. \qquad (29')$$

Для того чтобы получить окончательное выражение для $h_{разр}$, в уравнение (29) необходимо подставить все входящие в него величины. Температура газов по высоте дымовой трубы и ее сечение существенно изменяются, поэтому принимаемые в расчете плотность и скорость движения газов в дымовой трубе определяются по средней температуре по высоте трубы. Величина геометрического давления $h_г$, входящего в уравнение (29), выражается уравнением (13). Динамические давления будут соответственно равны

$$h_{д1} = \rho_1 w_1^2/2 \text{ и } h_{д2} = \rho_2 w_2^2/2.$$

Потери давления на трение находят по уравнению

$$h_{тр} = \lambda \frac{H}{d_{ср}} \frac{w_{ср}^2}{2} \rho_{ср}.$$

Подставив в уравнение (29′) значения $h_г$, $h_{д1}$, $h_{д2}$, $h_{тр}$ и выразив их через скорости и плотности при нормальных условиях (w_0 и ρ_0) по указанным выше выражениям, окончательно получаем (Па)

$$h_{разр} = gH\left(\frac{\rho_0^в}{1+\alpha t_в} - \frac{\rho_o^г}{1+\alpha t_г^{ср}}\right) + \frac{w_{01}^2}{2}\rho_0^г(1+\alpha t_{г1}) -$$

$$- \frac{w_{02}^2}{2}\rho_0^г(1+\alpha t_{г2}) - \lambda \frac{H}{d_{ср}} \frac{w_{0ср}^2}{2}\rho_0^г(1+\alpha t_г^{ср}), \qquad (30)$$

где $h_{разр}$ — действительное разрежение в основании дымовой трубы (сечение *I*), Па; $\rho_0^в$ и $\rho_0^г$ — плотность соответственно воздуха и газов при нормальных условиях, кг/м^3; $d_{ср}$ — средний по высоте диаметр трубы, м; w_{01} и w_{02} — скорость газов в сечениях *I* (в основании трубы) и *II* (в устье трубы) при 0 °С, м/с; $w_{0ср}$ — средняя скорость газов по высоте трубы при 0 °С, м/с; $t_в$ — температура окружающего воздуха, °С; $t_г^{ср}$ — средняя температура газов по высоте трубы, °С; $t_{г1}$ и $t_{г2}$ — температура газов в сечениях *I* и *II*, °С.

Если учесть, что

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1+\alpha t} = \rho_0 \frac{T_0}{T},$$

$$w_t = w_0(1+\alpha t) = w_0 \frac{T}{T_0},$$

где $T_0=273$ К, то выражение (30) может быть переписано следующим образом:

$$h_{\text{разр}} = gH\left(\rho_0^{\text{в}}\frac{T_0}{T} - \rho_0^{\text{г}}\frac{T_0}{T_{\text{г}}^{\text{ср}}}\right) + \frac{\omega_{01}^2}{2}\rho_0^{\text{г}}\frac{T_{\text{г}1}}{T_0} -$$

$$- \frac{\omega_{02}^2}{2}\rho_0^{\text{г}}\frac{T_{\text{г}2}}{T_0} - \lambda\frac{H}{d_{\text{ср}}}\frac{\omega_{0\text{ср}}^2}{2}\rho_0^{\text{г}}\frac{T_{\text{г.ср}}}{T_0}.$$

Отсюда

$$H = \frac{h_{\text{разр}} - \frac{\omega_{01}^2}{2}\rho_0^{\text{г}}\frac{T_{\text{г}1}}{T_0} + \frac{\omega_{02}^2}{2}\rho_0^{\text{г}}\frac{T_{\text{г}2}}{T_0}}{g\left(\rho_0^{\text{в}}\frac{T_0}{T_{\text{в}}} - \rho_0^{\text{г}}\frac{T_0}{T_{\text{г.ср}}}\right) - \frac{\lambda}{d_{\text{ср}}}\frac{\omega_{0\text{ср}}^2}{2}\rho_0^{\text{г}}\frac{T_{\text{г.ср}}}{T_0}}\ \text{м}, \qquad (30')$$

В расчетах разрежение в основании дымовой трубы принимают обычно с запасом, равным $h_{\text{раз}}=1{,}3\,\Sigma h_{\text{пот}}$. Величина $\Sigma h_{\text{пот}}$ представляет собой суммарные потери напора на пути движения газов от печи до основания дымовой трубы.

При расчете дымовой трубы внутренний диаметр в устье ее $d_{\text{у}}$ (на выходе) принимают, исходя из скорости газов, равной 3—10 м/с (при скорости выхода газов, не меньшей 3 м/с, при ветре может происходить их задувание в трубу). Кирпичные и железобетонные дымовые трубы для большей устойчивости делают более широкими в основании. При расчетах внутренний диаметр в основании трубы d_0 принимают в 1,5 раза больше внутреннего диаметра устья трубы $d_{\text{у}}$, т. е. $d_0=1{,}5\,d_{\text{у}}$.

По условиям выполнения кладки $d_{\text{у}}$ для кирпичных труб не должен быть меньше 0,8 м.

Падение температуры газов на 1 м высоты трубы принимается для кирпичных и железобетонных 1,0—1,5 °С, а для металлических 3—4 °С. Ориентировочно высота трубы может быть определена по уравнению (30) без трех последних его членов.

Подсчитав сумму потерь всех видов на пути движения газов от печи до основания дымовой трубы, по уравнению (30′) находят расчетную высоту трубы H. Независимо от расчета высота дымовой трубы по правилам сантехники должна быть не менее 16 м и в 2 раза выше самого высокого здания, находящегося в радиусе 100 м вокруг трубы.

Сверхзвуковое движение газов

Общие сведения. В металлургических печах в ряде случаев применяются такие устройства, в которых газ дви-

жется с весьма высокой скоростью, превышающей иногда скорость звука.

Согласно современным представлениям, скорость звука определяют формулой Лапласа, по которой

$$a = \sqrt{\varkappa \frac{p}{\rho}}, \qquad (31)$$

где $\varkappa = c_p/c_V$ — коэффициент, равный отношению теплоемкости среды при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме.

Применяя формулу Клапейрона ($p/\rho = RT$), получим

$$a = \sqrt{\varkappa RT}. \qquad (32)$$

Из выражения (32) следует, что скорость звука зависит только от температуры и физических свойств газа.

Скорость газа может быть меньше скорости звука, больше и равна ей. Если скорость движения газа станет равной местной скорости звука, то такая скорость газа $w = a$ называется критической. Сечение потока, в котором достигается это равенство, называется критическим. Критическим называются также давление, плотность и температура в этом сечении.

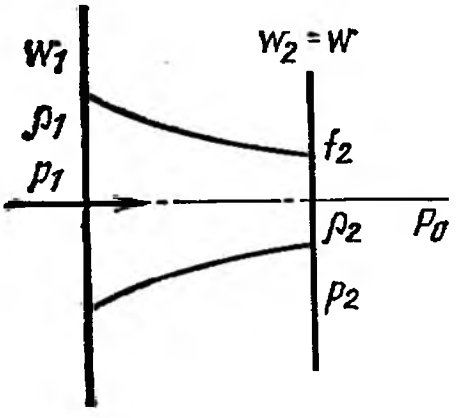


Рис. 13. Простое сопло

Отношение скорости движения газа w к местной скорости звука a называется числом (критерием) Маха M. При $M < 1$ поток дозвуковой, при $M = 1$ звуковой и при $M > 1$ сверхзвуковой.

Движение газа по трубе переменного сечения. Постепенно сужающаяся по ходу газа труба называется конфузором, а постепенно расширяющаяся — диффузором. Соотношение между скоростью движения газов и сечением канала (трубы) переменного сечения описывается уравнением Гюгонио, которое в конечных разностях может быть представлено следующим образом:

$$(M^2 - 1)\frac{\Delta w}{w} = \frac{\Delta F}{F}.$$

Величины Δw и ΔF представляют собой малые приращения (изменения) соответственно скорости движения среды и сечения канала, по которому эта среда движется.

Из этого уравнения можно сделать следующие выводы:

1) если $M < 1$, то знак Δw противоположен знаку ΔF.

Следовательно, при дозвуковом движении газа (как и несжимаемой жидкости) с возрастанием площади сечения трубы скорость движения уменьшается, и наоборот;

2) если $M>1$, то знак Δw одинаков со знаком ΔF. Следовательно, при сверхзвуковом движении в суживающейся трубе движение замедляется, а в расширяющейся трубе ускоряется. Это происходит в результате того, что при расширении газа плотность его настолько сильно уменьшается, что произведение ρF уменьшается, несмотря на увеличение F. Это в свою очередь приводит к увеличению w, поскольку $\rho F w = \text{const}$;

3) если $M=1$, то $\Delta F=0$ и соответствующее сечение будет критическим. Критическое сечение является минимальным, так как при подходе к нему дозвуковой поток замедляется, а сверхзвуковой ускоряется.

Простое сопло. Большую роль в технике играют устройства, обеспечивающие создание потока газа, истекающего с большой скоростью. Основным элементом таких устройств является сопло (рис. 13). При истечении газов через сопло происходит резкое изменение давления и, следовательно, объема. Поэтому уравнения движения и истечения, приведенные выше для несжимаемого газа, здесь неприемлемы.

Скорость истечения газов из сопла может быть дозвуковой, равной скорости звука и сверхзвуковой.

При установившемся движении в каждом сечении сопла поток газов будет характеризоваться определенными местными значениями скорости движения w, давления P, плотности ρ и температуры T.

Если в данном сечении скорость движения газа w равна скорости распространения звука, то скорость движения газа, давление и другие параметры, соответствующие этому условию, будут иметь критические значения $w_{кр}$ и $P_{кр}$.

Как видно из уравнения Гюгонио, особенностью газов является то, что при переходе от звуковой скорости движения к сверхзвуковой изменяется характер зависимости между давлением P и плотностью ρ и соответственно между сечением F и скоростью движения w.

В дозвуковой области давление и плотность газов связаны между собой так, что увеличение сечения канала вызывает соответствующее уменьшение скорости w, и наоборот. При сверхзвуковых скоростях связь между P и ρ такова, что увеличение F сопровождается увеличением скорости w.

Максимальная скорость истечения газа из обычного (суживающегося) сопла может достигать только критиче-

ского значения, но не выше, независимо от давления перед соплом. Критические параметры истечения из простого сопла могут быть определены из следующих выражений.

Критическая скорость истечения, м/с

$$w_{кр} = \sqrt{\frac{2\varkappa}{\varkappa+1}\frac{P_1}{\rho_1}}.$$

Критическое давление, Па

$$P_{кр} = P_1\left(\frac{2}{\varkappa+1}\right)^{\frac{\varkappa}{\varkappa-1}}.$$

Критическая масса газа, кг/с

$$G_{кр} = f_2\left(\frac{2}{\varkappa+1}\right)^{\frac{\varkappa+1}{\varkappa-1}}\sqrt{P_1\rho_1\varkappa}.$$

Коэффициент $\varkappa=1{,}4$ для двухатомных газов и $\varkappa=1{,}3$ для сжатого пара.

Сопло Лаваля. Сверхзвуковая скорость $w>w_{зв}$ может быть получена в сопле, состоящем из суживающейся и расширяющейся частей (рис. 14). Такое сопло называется соплом Лаваля по имени его создателя. Сопло Лаваля рассчитывают таким образом, чтобы скорость в самом узком критическом сечении его была критической, а в расширяющейся части превосходила звуковую, постепенно возрастая по мере приближения к выходному отверстию сопла. Если скорость в критическом сечении $f_{кр}$ сопла будет меньше критической, то в расширяющейся части она будет уменьшаться, а не увеличиваться, т. е. будет изменяться так же, как и в обычном сопле.

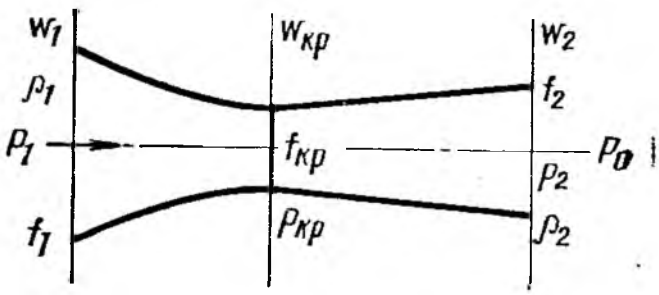


Рис. 14. Сопло Лаваля

В сопле Лаваля выравнивание (уменьшение) давления в критическом сечении до P_c происходит не за соплом, а в расширяющейся части сопла, и сопровождается увеличением скорости истечения. Соответственно возрастает кинетическая энергия струи, которая используется для совершения полезной работы. В этом преимущество сопла Лаваля перед обычным соплом.

Максимум полезно используемой энергии достигается при условии, что длина расширяющейся части сопла Лаваля не больше и не меньше, чем это требуется для полного

выравнивания (уменьшения) давления. Если это условие не выполняется, то эффективность применения сопла Лаваля уменьшается.

Характеристики истечения из сопла Лаваля могут быть определены из следующих выражений:

критическая скорость, м/с

$$w_2 = \sqrt{2\frac{\varkappa}{\varkappa-1}\frac{P_1}{\rho_1}\left[1-\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}}\right]};$$

критическая масса, кг/с

$$G_2 = f_2\sqrt{2\frac{\varkappa}{\varkappa-1}P_1\rho_1\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{2}{\varkappa}}-\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}}\right]};$$

площадь сечения, м^2

$$f_2 = \frac{G_2}{\rho_1 w_2\left(\frac{P_2}{P_{кр}}\right)^{1/\varkappa}}.$$

Сопла Лаваля широко применяются при создании кислородных и газокислородных фурм для конвертеров, мартеновских и двухванных печей.

§ 5. Движение газов в рабочем пространстве металлургических печей

Причины движения. Свободное и вынужденное движения

Важнейшими процессами, протекающими в рабочем пространстве металлургических печей, являются процессы теплообмена. От них зависят все (или почти все) основные качественные и количественные показатели работы печей. Работа и конструкция печи должны выполняться так, чтобы в ее рабочем пространстве обеспечивался наиболее рациональный режим теплообмена. Достижению этого должны быть подчинены такие процессы, как процессы сжигания топлива, движения газа и т. п.

Процессы движения газов теснейшим образом связаны с процессами теплообмена. От них зависят интенсивность и равномерность нагрева металла, стойкость футеровки печи. Неправильная организация движения раскаленных газов в рабочем пространстве печи может служить причиной не только ухудшения работы печи, но и выхода ее из строя.

Движение газов в рабочем пространстве промышленных печей бывает естественное (свободное) и вынужденное. Причиной свободного движения является разность плотно-

стей объемов газа, находящихся при разной температуре. Это «вялое» движение с малыми скоростями. Вынужденное (принудительное) движение происходит под действием внешних сил (струи, вентилятор). Ему присущи высокие скорости, оказывающие влияние на процессы теплообмена. При этом струи топлива и воздуха, выходящие из форсунок и горелок, являются в современных печах основным фактором, влияющим на характер движения газов. Это не означает, конечно, что естественное движение в печах не существует. Оно существует, но играет подчиненную роль. По мере развития печей изменялась и роль дымовой трубы. Из устройств, оказывающих большое влияние на движение газов в печи и одновременно с этим предназначенных для удаления дымовых газов, современные дымовые трубы выполняют, по существу, только вторую роль. В настоящее время в ряде случаев, когда необходимо создать большое разрежение, применяют различные дымососы (прямого и непрямого действия), оставляя дымовой трубе роль канала, через который удаляется дым в атмосферу в соответствии с санитарными нормами. Это делается в тех случаях, когда пришлось бы строить крайне дорогие чрезмерно высокие дымовые трубы или когда дымовая труба вообще не приемлема.

В связи с изложенным выше прежде всего остановимся на рассмотрении струй и дымососов прямого и не прямого действия.

Струи

При отоплении современных металлургических печей жидким и газообразным топливом часто применяется так называемый факельный метод сжигания. Факелом называют промышленное пламя, образованное струями топлива и воздуха. В силу этого аэродинамической основой теории факела является теория струй.

Различают струи свободные, ограниченные и частично ограниченные. К свободным относятся струи, которые истекают в пространство, не ограниченное стенками. Ограниченные струи развиваются в пространстве, стесненном стенками.

Свободные струи. Свободная струя называется затопленной, если она истекает в среду с той же плотностью. Это условие выполняется в печах лишь частично, так как рабочий объем печи обычно заполнен раскаленными продуктами сгорания. Поэтому возможны такие случаи, когда среда струи имеет плотность, отличающуюся от плотности среды,

в которой она распространяется. Если ось затопленной струи является продолжением оси насадка, из которого она истекает, то при неравенстве плотностей ось искривляется вверх (плотность струи меньше плотности среды) или вниз (плотность струи больше плотности среды).

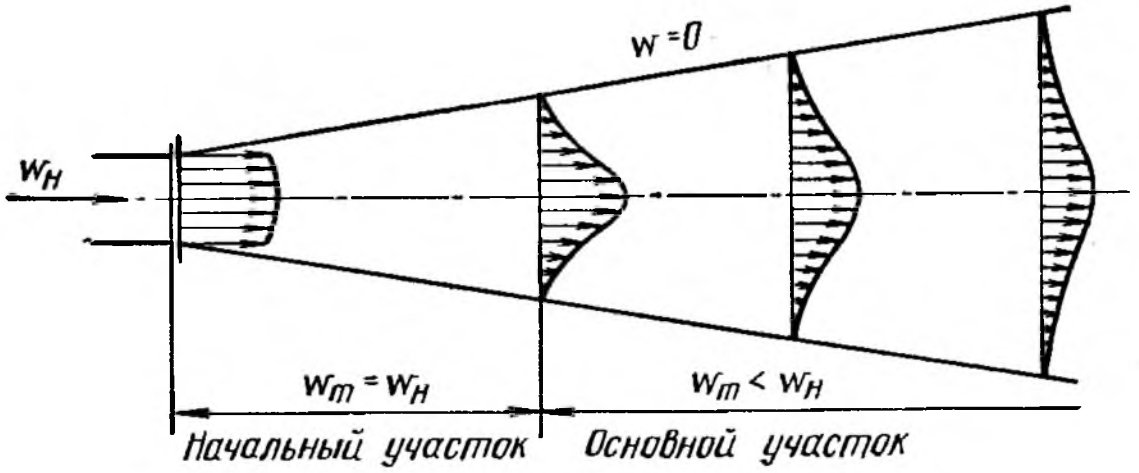


Рис. 15. Схема распределения скоростей в различных сечениях свободной струи

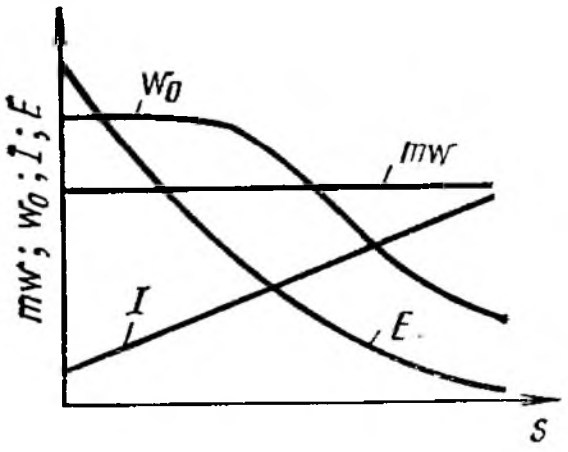


Рис. 16. Характеристики свободной струи

Свободная затопленная струя (рис. 15) обладает рядом характерных свойств, одним из которых является постоянство количества движения по длине струи, т. е. $mw = \text{const}$.

При движении турбулентной струи в результате поперечных пульсаций развивается массообмен между окружающей средой и струей. В результате этого масса струи по ее длине увеличивается. Процесс турбулентного перемешивания, сопровождающийся увеличением массы струи, требует определенных затрат энергии (окружающая среда относительно неподвижна). Поэтому кинетическая энергия и скорость струи по мере удаления от выходного сечения постепенно падают (рис. 16). Однако падение кинетической энергии и осевой скорости струи происходит неодинаково. Объясняется это тем, что скорость начинает уменьшаться прежде всего на периферии струи. Постепенное падение скорости распространяется по всей толщине струи и достигает ее оси. Поэтому в начале струи осевая скорость на определенном участке остается неизменной и равной скорости истечения. Этот участок называется начальным участком

струи, тогда как следующая за ним вся остальная часть струи называется основным участком.

Наряду с постоянством количества движения отличительной особенностью свободной затопленной струи является также постоянство давления в ее объеме. Опыты показывают, что центральный угол раскрытия круглой струи может изменяться в пределах от 20 до 24°, а изменение относительной скорости по длине струи подобно для любых начальных скоростей и любых сопел. Таким образом, для всех этих случаев зависимость $\frac{w}{w_н} = f\left(\frac{al}{2r_н}\right)$ будет иметь аналогичный характер. Здесь l — расстояние данного сечения от сопла струи, м; $r_н$ — радиус сопла, м; w — скорость в данном сечении, м/с; $w_н$ — начальная скорость истечения, м/с; a — экспериментальная константа для круглой струи, равная 0,07—0,08.

Изменение осевой скорости w_0 круглой струи может быть определено из формулы Г. И. Абрамовича:

$$\frac{w_0}{w_н} = \frac{0{,}96}{\frac{al}{r_н} + 0{,}29}.$$

При установке горелок в печи с точки зрения аэродинамики факела прежде всего представляют интерес два основных вопроса: какие поперечные размеры факела на всей его длине и какая его дальнобойность? Первый вопрос важен при определении расстояния между горелками, а второй при определении соотношения между длиной факела и размерами рабочего пространства печи, поскольку во избежание преждевременного износа кладки печи факел бить в нее не должен.

Частично ограниченные струи. Струйные аппараты (инжекторы и эжекторы). С практической точки зрения наиболее важное значение имеют два случая частично ограниченных струй: струи, соприкасающиеся со стенками, и струйные аппараты. В некоторых, например мартеновских, печах необходимо, чтобы факел на его определенной длине касался поверхности расплавленного металла и шлака. В этом случае возникает вопрос о дальнобойности струи при ее соприкосновении с поверхностью (рис. 17). Опытами установлено, что дальнобойность такой струи зависит от угла встречи струи и поверхности. Если струя направлена вдоль стенки и касается поверхности (угол встречи равен нулю), то такая струя более дальнобойная, чем сво-

бодная струя. Это объясняется тем, что поверхность соприкосновения струи с атмосферой в этом случае меньше и струя затрачивает меньше энергии на захват массы из окружающей среды. Если в дальнейшем увеличивать угол встречи струи и поверхности, то дальнобойность струи уменьшается и факел растекается по поверхности.

Свойство струй захватывать окружающую среду используют в струйных аппаратах. Простейший струйный аппа-

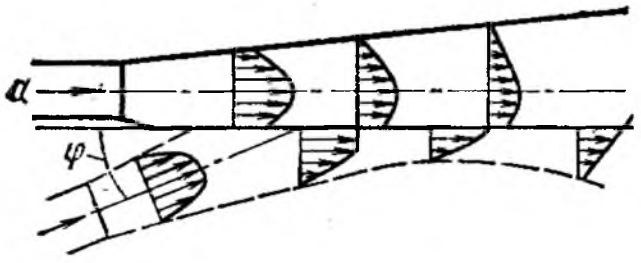


Рис. 17. Течение частично ограниченных струй:

а — вдоль параллельной стенки; *б* — под углом φ к плоской стенке

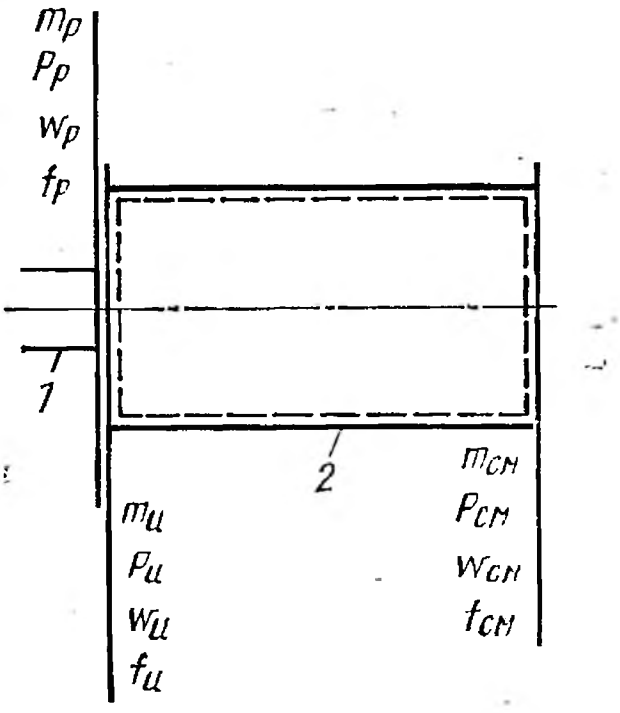


Рис. 18. Схема струйного аппарата:

1 — сопло; *2* — смеситель

рат состоит из смесителя и сопла (рис. 18). Поток, выходящий из сопла, называется рабочим. Рабочий газ (или жидкость), выходя из сопла с высокой скоростью, образует струю, которой стенки смесителя не позволяют захватывать окружающую атмосферу. Поэтому струя вовлекает в движение только среду, находящуюся перед входом в смеситель. Поток, вовлекаемый в смеситель, называется инжектируемым.

В отличие от свободной струи расход газа вдоль смесителя остается постоянным. Поскольку с удалением от сопла профиль скорости выравнивается, количество движения вдоль смесителя убывает. Но, согласно уравнению импульсов, это означает, что давление вдоль смесителя возрастает.

Название струйных аппаратов зависит от назначения. Аппараты, в которых создается высокое разрежение перед смесителем, называют эжекторами. Аппараты, в которых давлением инжектируемой среды изменяется незначительно, называют инжекторами.

Для расчета струйного аппарата применяют уравнение импульсов Эйлера. Проведем контур, как показано на рис. 18. С известным приближением будем считать, что скорости рабочего, инжектируемого и смешанного потоков в соответствующих сечениях распределены равномерно. Силами трения в смесителе пренебрегаем. Как и для свободной струи, можно принять, что $P_{см}=P_{и}$. Положим, что $f_{сопла}+f_{и}=f_{см}$. Для этих условий уравнение импульсов без учета потерь в струйном аппарате принимает вид

$$m_{см}w_{см}-(m_{р}w_{р}-m_{и}w_{и})=(P_{и}-P_{см})f_{см}. \qquad (33)$$

Уравнение (33) является основным для расчета струйных аппаратов. В зависимости от рода задачи, используя это уравнение, можно определить любую из входящих в него величин. Путем алгебраических преобразований уравнение (33) можно представить в форме

$$\frac{m_{р}w_{р}^2}{2}+\frac{m_{и}w_{и}^2}{2}=\frac{m_{см}w_{см}^2}{2}+\frac{m_{р}(w_{р}-w_{см})^2}{2}+$$

$$+\frac{m_{и}(w_{и}-w_{см})^2}{2}+(P_{см}-P_{и})\left(\frac{m_{р}}{\rho_{р}}+\frac{m_{и}}{\rho_{и}}\right). \qquad (34)$$

Последнее уравнение выражает закон сохранения энергии, согласно которому сумма секундных кинетических энергий рабочего и инжектируемого потоков равна секундной кинетической энергии смешанного потока плюс сумма секундных кинетических энергий потерянной скорости для рабочего и инжектируемого потоков, плюс секундная работа проталкивания, или, как ее часто называют, работа противодавления.

Важной характеристикой работы инжектора является объемная $k=V_{и}/V_{р}$ и массовая $n=\frac{V_{и}\rho_{и}}{V_{р}\rho_{р}}=\frac{m_{и}}{m_{р}}$ кратность инжекции.

Чем эффективнее работает струйный аппарат, тем выше кратность инжекции.

Чтобы увеличить кратность инжекции, входную часть смесителя выполняют в виде конфузора, а выходную — в виде диффузора. Конфузор позволяет уменьшить потери при входе инжектируемой среды в смеситель. При расширении в диффузоре хотя и уменьшается выходная скорость $w_{см}$, но значительно увеличивается выходное сечение, благодаря чему увеличивается $V_{см}$, что равноценно увеличению $m_{и}$ и, следовательно, k.

Размеры струйного аппарата зависят от его назначения. При малом значении $f_{см}/f_{р}$ аппараты высоконапорные. Но,

создавая значительный перепад давления по длине смесителя, они не могут развить большую кратность инжекции. При большом значении $f_{см}/f_р$ аппараты могут развивать значительную кратность инжекции и создавать относительно небольшой перепад давлений. Оптимальное отношение $f_{см}/f_р$, позволяющее получить максимальный перепад давлений при заданной кратности инжекции, можно определить с помощью рис. 19.

Остальные размеры диффузора (рис. 20) следующие:

Длина смесителя $l_{см}$ и длина диффузора $l_д$, см	(4—6) d
Угол раскрытия диффузора, град	6—9
Угол сужения входного конфузора, град	30—45
Длина входного конфузора, см	(0,5—1,5) d

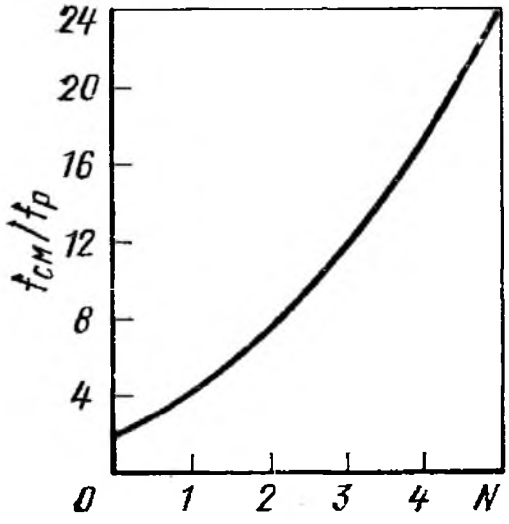


Рис. 19. Соотношения сечений смесителя и сопла

Основной целью расчета струйных аппаратов является определение скорости истечения рабочего газа из сопла $w_р$. Для успешной работы струйного аппарата эта скорость должна быть весьма большой (100 м/с и более). Обеспечение такой скорости требует весьма высокого давления газа. Это обстоятельство несколько сдерживает практическое применение подобных устройств.

Выражение для определения объема смеси может быть получено из уравнения (34) и выглядит следующим образом, м³/с:

$$V_{см} = \sqrt{\frac{2\Sigma h_{пот}}{\rho_з \left[\dfrac{2\beta(1+\alpha Kn) - 1{,}2\alpha^2 Kn}{\beta^2(1+K)(1+n)} - (2-\eta_{диф})\right]}}.$$

В этом выражении $\Sigma h_{пот}$ — сумма потерь напора в струйном аппарате: $\beta = f_р/f_{см}$; $\alpha = f_р/f_и$; $\eta_{диф} = 0{,}8 \div 0{,}85$.

Ограниченные струи. Характерной особенностью ограниченных струй является то, что они развиваются в камере, размеры которой соизмеримы с размерами струи (рис. 21). В начале камеры струя развивается аналогично свободной струе и также вовлекает в движение окружающую среду. Но поскольку стенки камеры препятствуют свободному притоку газа из атмосферы, в области корня струи создается разрежение. В конце струи, наоборот, наблюдается повышенное давление. Таким образом, ограниченная струя развивается в направлении повышения давления, что и соз-

дает возможность для возникновения циркуляционных потоков газа в направлении от хвоста струи к ее истоку. Для характеристики интенсивности циркуляции газов введена кратность циркуляции $K=m_2/m_1$, где m_1 — секундный

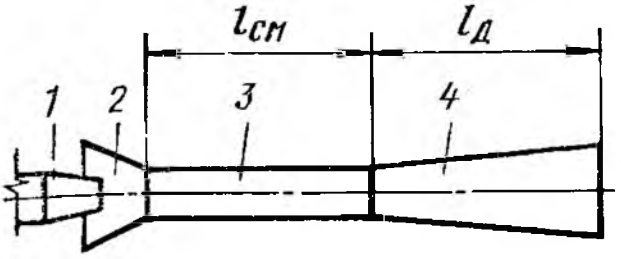


Рис. 20. Геометрические параметры инжектора:

1 — рабочее сопло; *2* — конфузор; *3* — смеситель; *4* — диффузор

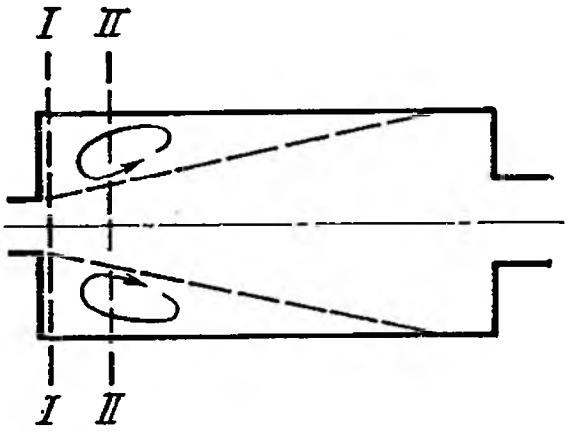


Рис. 21. Схема ограниченной струи

массовый расход газа в сечении *I—I* (см. рис. 21); m_2 — секундный массовый расход газа в сечении *II—II*; $m_2=m_1+m_ц$ ($m_ц$ — масса циркулирующего газа).

Вентиляторы и дымососы

В практических условиях часто встречаются случаи, когда необходимо нагнетание или отсасывание газа при помощи специальных устройств. К таким устройствам относятся вентиляторы и дымососы.

Применение искусственной тяги бывает необходимо при больших сопротивлениях дымового тракта или при недостаточной тяге существующей дымовой трубы. При низкой температуре дымовых газов (не более 673—723 К) обычно применяют центробежные дымососы (отсасывающие вентиляторы) прямого действия. При более высоких температурах используют косвенную тягу, при которой струя газов (воздух, пар) эжектирует (отсасывает) отходящие газы.

В качестве дымососов прямого действия (рис. 22) используют центробежные вентиляторы, обеспечивающие подачу воздуха под давлением, превышающим 10 000 Па. Вентиляторы, выполненные из обычной углеродистой стали, могут работать при температурах, не превышающих 523 К. Вентиляторы специальной конструкции, выполненные из жаропрочной стали, могут работать при температуре дыма до 673—723 К. Однако значительные затраты энергии и зачастую недостаточная долговечность работы ограничивают их применение. Вентиляторы выбирают по таблицам или номо-

граммам в зависимости от расхода газов (V_0, м³/ч) и суммарных потерь напора в сети с учетом запаса, равного 25 %.

Номограммы составлены для воздуха с температурой 293 К, поэтому при выборе вентиляторов для перемещения газа или воздуха с другой температурой заданное давление необходимо пересчитать по формуле (Па)

$$h = \frac{h_{пот}\rho_0^в}{\rho_t^г},$$

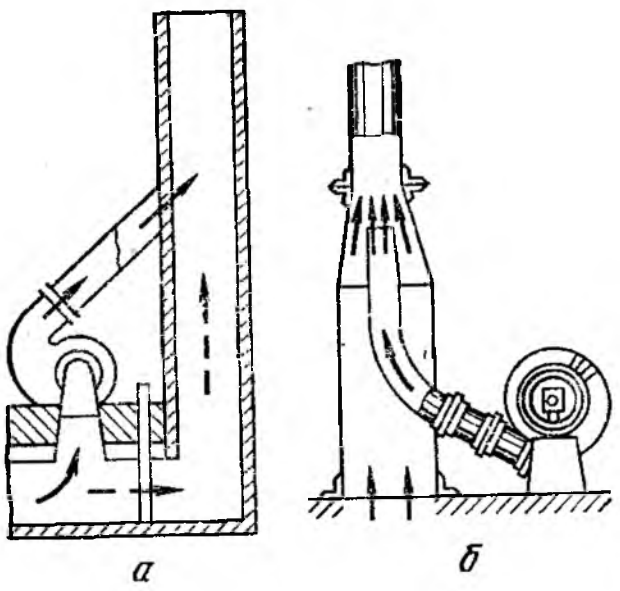


Рис. 22. Схемы работы дымососов прямого (*а*) и косвенного (*б*) действия

Мощность на валу вентилятора определяется по формуле (кВт)

$$N = \frac{V_0 h}{3600 \cdot 1000\eta},$$

где η — к. п. д. вентилятора.

Мощность электродвигателя обычно принимают на 15 % больше мощности на валу вентилятора.

В основе тяги косвенного действия (рис. 22, *б*) лежит принцип эжекции, сущность которого рассмотрена выше. Струйные аппараты могут быть использованы как на отсос, так и на нагнетание. Если осуществляется отсос дымовых газов, то струйный аппарат работает как дымосос косвенного действия.

Движение газов и рациональный режим давления в печи

В современных печах в качестве источника тепловой энергии в подавляющем большинстве случаев используется топливо или электрическая энергия. Среди топливных печей наибольшее распространение получили пламенные печи, в которых для сжигания газа или мазута применяется факельный (пламенный) метод. В пламенных печах характер движения газов в рабочем пространстве печи теснейшим образом связан с теплообменом, конструкцией и назначением печи. Он определяется в основном следующими обстоятельствами: расположением горелок (форсунок) и дымоотводящих каналов; динамическим воздействием струй, создаваемых горелками и форсунками; режимом давления в печи.

Наивысшая температура в печи развивается в том месте, где сжигается топливо, т. е. там, где установлены го-

релки (форсунки). Сжигание топлива в печи может быть сконцентрировано с одной стороны печи или рассредоточено по всей ее длине. Расположив соответствующим образом дымоотводящие каналы, получают методический или камерный режим работы печи. При методическом режиме (рис. 23, *а*) топливо сжигается с одной стороны печи (горелки установлены в торце выдачи металла), а дымовые газы удаляются с другой стороны печи. Продукты сгорания, проходя по печи навстречу металлу, постепенно отдают ему

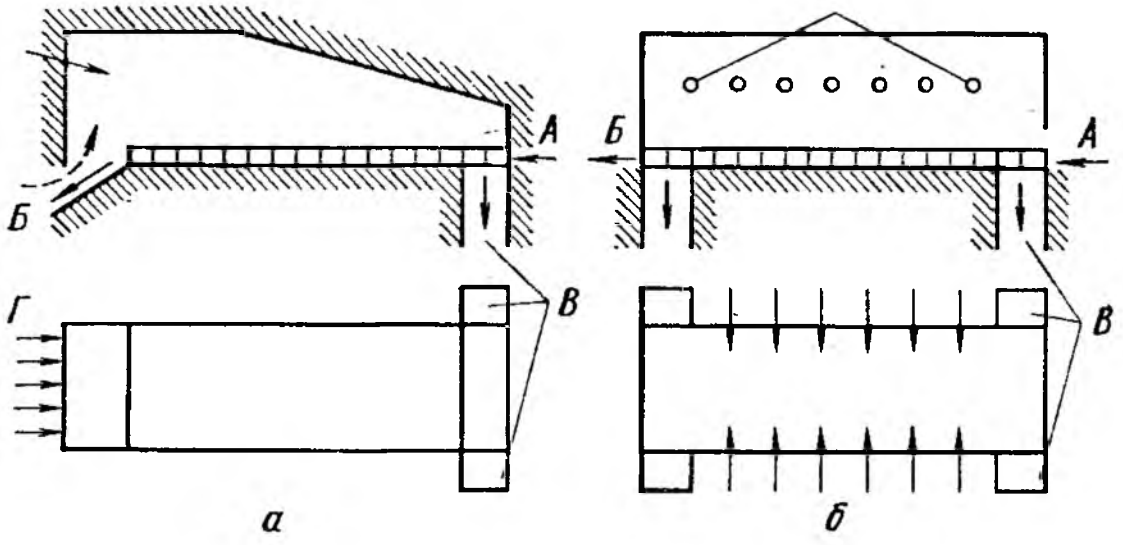


Рис. 23. Схемы отопления печей при методическом (*а*) и календарном (*б*) режимах:

А — загрузка металла; *Б* — выдача металла; *В* — дымоотводящие каналы; *Г* — горелки

часть своего тепла, а сами остывают. При этом температура газов уменьшается по мере удаления их от горелок, и температурный режим печи характеризуется изменением (падением) температуры по длине печи.

При камерном режиме работы нагревательной печи температура по ее длине остается практически постоянной. Для этого подвод тепла и дымоотводящие каналы надо рассредоточить по длине (рис. 23, *б*). В этом случае горелки устанавливаются по всей длине печи. Перемешивание отдельных струй, интенсивное движение газов — все это способствует выравниванию температуры в рабочем объеме печи.

В обеспечении равномерности нагрева важная роль принадлежит интенсивности движения газа, его циркуляции. Это особенно важно в средне- и низкотемпературных печах. В высокотемпературных печах (1473—1873 К) преобладает теплообмен излучением, в среднетемпературных (1073—1473 К) излучение соизмеримо с конвекцией, в низкотем-

пературных (до 1073 К) преобладает конвекция. Поскольку теплопередача конвекцией тем больше, чем выше скорость движения газов, постольку интенсификация движения газов в печах последних двух групп имеет важное значение. Для обеспечения циркуляции газов используют способность газовых струй создавать разрежение у своих истоков. С использованием этой особенности работают, в частности, термические печи с подподовыми топками (рис. 24). Струя, создаваемая горелкой, подсасывает продукты сгорания из рабочего объема и создает тем самым циркуляцию газов.

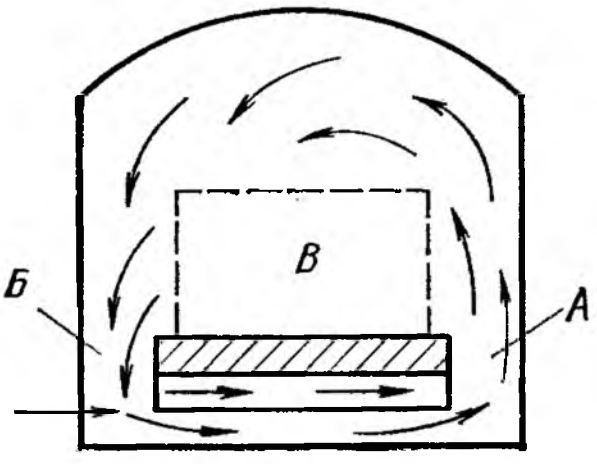


Рис. 24. Схема подподовой топки: *А* — выход дымовых газов из топки; *Б* — подсос остывших газов в топку; *В* — металл

В некоторых случаях при светлой термообработке и термохимической обработке металла необходима интенсивная циркуляция специальной атмосферы, в которой нагревается металл. Подобная циркуляция обеспечивается применением специальных вентиляторов, рабочее колесо которых вынесено непосредственно в печь. Интенсивная циркуляция специальной атмосферы повышает равномерность и скорость нагрева и обеспечивает значительное увеличение производительности печи.

Однако в некоторых печах соответствующее движение газов обеспечивает не только теплотехнические, но и чисто технологические цели. Примером может служить мартеновская печь, для работы которой большое значение имеет настильность (касание поверхности ванны) факела. При настильности интенсифицируется конвективный теплообмен и сопутствующий ему массообмен между факелом и ванной.

Для нормальной эксплуатации печи скорость выхода топлива и воздуха из горелки должна выбираться на основании данных по струям и быть такой, чтобы пламя не било в противоположную стенку. Горелки на противоположных стенках должны быть установлены в шахматном порядке. Не следует устанавливать горелки вблизи окон печи во избежание подсоса в печь холодного воздуха. В некоторых случаях, например в торцах выдачи методических печей (рис. 23, *а*), подсос холодного воздуха в печь через окно выдачи (пунктирная стрелка) не только снижает температуру печи и вызывает перерасход топлива, но и приводит к

образованию настылей окалины на поду печи, что вызывает перебои в ее работе.

Давление в рабочем пространстве печи определяется в основном двумя факторами: воздействием струй и влиянием дымовой трубы (дымососа). Рациональным режимом давления в рабочем пространстве печей является такой, при котором в печи поддерживается небольшое избыточное давление. Это относится как к топливным, так и к электрическим печам. Если печи работают с муфелированием металла, то под муфелем также поддерживается небольшое избыточное давление. Все это делается для того, чтобы избежать попадания в печь холодного воздуха, который резко ухудшает работу печи, так как, снижая температуру, вызывает перерасход топлива, приводит в нагревательных печах к излишнему окислению металла.

Работа дымовой трубы осуществляется так, чтобы на уровне пода печи поддерживалось нулевое давление. Выше уровня пода будет избыточное давление, ниже — разрежение. Разрежение нужно для того, чтобы дымовые газы отсасывались из печи через дымоотводы (борова), входное сечение которых обычно и располагается на уровне пода печи.

В процессе эксплуатации печи необходимо иметь возможность влиять на давление в печи и на разрежение в ее боровах. Для этой цели используют специальное устройство, называемое шибером. Шибер представляет собой искусственное местное сопротивление, величину которого можно регулировать подъемом или опусканием шиберной заслонки. При стремлении понизить давление в печи шибер надо открывать, при желании повысить давление, наоборот, прикрывать.

Современные печи — это высокомеханизированные, автоматизированные агрегаты. Во многих печах давление в рабочем пространстве поддерживается на нужном уровне автоматически при помощи регулятора давления, который управляет механизмом подъема и опускания шибера.

Правильный выбор режима давления в печи необходим, кроме того, как для увеличения долговечности службы арматуры и оборудования печи, так и для улучшения условий эксплуатации печи обслуживающим персоналом.

Иногда, стремясь избежать подсоса холодного воздуха в печь, поддерживают излишне высокое давление. Это приводит к чрезмерному выбиванию раскаленных газов из печи и, как следствие, к преждевременному выходу из строя арматуры печи и элементов ее оборудования.

Только в отдельных случаях (например, при заправке подин мартеновских печей), связанных с условиями работы обслуживающего персонала в непосредственной близости от печи, целесообразно поддерживать разрежение по всей высоте печи, полностью исключающее выбивание газов.

Глава II ОСНОВЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

§ 1. Характеристика процессов теплообмена

Основные понятия теории теплообмена

Теория теплопередачи рассматривает процессы передачи тепла из одной части пространства в другую.

Процесс теплообмена наблюдается тогда, когда тепло передается от одного, более нагретого тела, к другому, менее нагретому. Поток энергии, передаваемый частицами более нагретого тела частицам менее нагретого, называется тепловым потоком. Таким образом, для того чтобы происходил процесс передачи тепла от одного тела к другому, совершенно необходима разность температур тел, участвующих в теплообмене. Следовательно, тепловой поток всегда направлен в сторону меньших температур и, являясь величиной векторной, характеризуется не только абсолютной величиной, но и направлением.

Температура, являясь величиной скалярной, не зависит от направления и характеризуется лишь абсолютной величиной. Температура характеризует степень нагретости тела и измеряется в градусах стоградусной или абсолютной температурной шкалы.

Процесс передачи тепла развивается как во времени, так и в пространстве. Практически часто бывает необходимо знать температуру в различных точках изучаемого пространства в один и тот же момент времени. Подобное распределение температур называется полем температур или температурным полем.

Кроме изменения в пространстве, температурное поле и поле тепловых потоков может изменяться также и во времени. Таким образом, в общем случае температура T может являться функцией координат x, y, z и времени τ, т. е. $T=f(x, y, z, \tau)$.

Если температура (тепловой поток) с течением времени не претерпевает никаких изменений, то говорят о «стационарном тепловом состоянии». Если же температура изменяется со временем, то такой процесс называется нестационарным.

Различают полный и удельный тепловые потоки. Полный тепловой поток Q обычно относится к единице времени и измеряется в ваттах (Вт). Тепловой поток, отнесенный к единице поверхности, называется плотностью теплового потока q (Вт/м^2).

Таким образом, если F теплопередающая поверхность (м^2), то

$$Q = qF. \tag{35}$$

Иногда Q обозначает полное количество переданного тепла и выражается в джоулях (Дж) и тогда

$$Q = q\tau F, \tag{36}$$

где τ — время, с.

Виды и основные законы процесса теплообмена

Различают три основных вида передачи тепла: конвекцию, теплопроводность, тепловое излучение.

Конвективным теплообменом называют такой процесс, когда движущаяся жидкость или газ переносит тепло из более нагретых областей в менее нагретые. В технике чаще всего рассматривают конвективный теплообмен жидкости или газа с поверхностью твердых тел, при котором тепло транспортируется к поверхности (или от нее) движущимися объемами жидкости или газа. Если нет движения жидкости (газа), то нет и передачи тепла конвекцией. Математически процесс передачи тепла конвекцией описывается дифференциальным уравнением Фурье — Кирхгофа, характеризующим изменение температурного поля в движущейся жидкости.

Теплопроводность — передача тепла от одних частей тела к другим без заметного перемещения частиц. Передача тепла теплопроводностью наиболее характерно осуществляется в гомогенных непрозрачных твердых телах. В металлургической практике процессы передачи тепла теплопроводностью лежат в основе теории и практики нагрева металла. Передача тепла теплопроводностью возможна как при стационарном состоянии, так и при нестационарном.

При стационарном состоянии передача тепла от одной точки пространства к другой происходит без изменения их температуры во времени.

При нестационарном состоянии происходит изменение температуры тела во времени, т. е. тело или нагревается, или остывает. При этом его энтальпия или растет, или убывает, причем тело тем быстрее нагревается, чем выше его теплопроводность. Однако на интенсивность изменения энтальпии тела наряду с теплопроводностью тела оказывает влияние и величина теплоемкости тела. Но влияние это обратное. Чем выше теплоемкость тела, тем медленнее оно изменяет энтальпию и температуру. Таким образом, энтальпия тела изменяется тем быстрее, чем выше способность материала проводить тепло, т. е. чем больше коэффициент теплопроводности λ. Вместе с тем скорость изменения энтальпии тела обратно пропорциональна его аккумулирующей способности, которая определяется массовой теплоемкостью ρc. Таким образом, в общем скорость изменения энтальпии тела определяется соотношением величин λ и ρc, совместное влияние которых на нагрев или охлаждение тела выражается изменением коэффициента температуропроводности $a=\lambda/(\rho c)$ м^2/с, имеющим важное значение для нестационарных процессов передачи тепла теплопроводностью.

Природа теплового излучения принципиально отличается от передачи тепла конвекцией и теплопроводностью, при которых переход тепла связан с передачей энергии молекулами, образующими твердую, жидкую или газообразную среду. При тепловом излучении энергия передается электромагнитными волнами определенной длины (инфракрасные лучи). Тепловое излучение возможно даже в вакууме; оно не зависит от температуры окружающей среды.

Чтобы решить дифференциальные уравнения для конкретного случая, необходимо, кроме основного дифференциального уравнения, сформулировать дополнительные условия, характерные только для этого случая, которые называют краевыми условиями.

Начальные краевые условия показывают температурное состояние тела перед тем, как начался процесс нагрева. Это температурное состояние может быть различным, но оно обязательно должно быть задано в виде уравнения (в общем виде), дающего распределение температуры в теле по трем осям координат, т. е. при $\tau=0$ и $T_{\text{нач}}=f(x, y, z)$.

Наиболее простые и часто встречающиеся на практике временные условия показывают, что температура во всех

точках тела в начальный момент времени одинакова, т. е. при $\tau=0$ и $T_{нач}=\text{const}$.

Граничные условия могут изменяться более широко. Применительно к задачам теплопроводности различают следующие виды граничных условий:

1. Граничные условия I рода показывают, как изменяется в процессе нагрева тела температура его поверхности. Наиболее характерным примером граничных условий I рода можно считать, когда температура поверхности тела при постоянной скорости его нагрева возрастает по прямолинейному закону.

2. Граничные условия II рода представляют собой такие условия, при которых задается тепловой поток, проходящий через поверхность нагреваемого тела, в функции времени $q=f(\tau)$. Часто, например, принимают, что $q=\text{const}$. Применение граничных условий II рода позволило получить выражения для практических расчетов времени нагрева в печах с переменной температурой рабочего пространства (например, в нагревательных колодцах).

3. Граничные условия III рода соответствуют случаю задания температурного режима печи и закону теплообмена между окружающей средой и тепловоспринимающей поверхностью. Часто, например, задаются постоянством температуры печи, т. е. $T_{печи}=\text{const}$, и законом теплопередачи, т. е.

$$q=\alpha(T_{печи}-T_{пов}).$$

На практике встречаются случаи, когда температура в различных частях рабочего пространства печи почти одинакова (например, камерные печи), поэтому решения, полученные при граничных условиях III рода, нашли широкое практическое применение.

Рассмотренные краевые условия справедливы как для стационарного теплового состояния, так и для нестационарного, причем для нестационарного состояния краевые условия следует задавать в зависимости от времени.

Во всем многообразии различных случаев теплообмена в твердых, жидких или газообразных средах можно выделить две большие группы: 1) случаи теплообмена между жидкостью (газом), находящейся в движении, и какой-либо поверхностью и 2) случаи, когда происходит передача тепла в твердом теле или в покоящейся жидкости.

Применительно к этим широко распространенным случаям наукой сформулированы два основных закона теплообмена. Для теплообмена конвекцией (первая группа)

Ньютон в 1701 г. предложил формулу, носящую его имя, согласно которой количество передаваемого тепла прямо пропорционально имеющейся разности температур, теплоотдающей поверхности и времени процесса передачи, тепла, т. е.

$$Q = \alpha \Delta T F \tau, \qquad (37)$$

где Q — количество переданного тепла, Дж; F — поверхность теплообмена, м^2; ΔT — средняя разность температур, К; τ — время, с.

Коэффициент пропорциональности α называется коэффициентом теплоотдачи [Вт/(м^2·К)] и показывает, какое количество тепла передается с поверхности в 1 м^2 в течение 1 с при разности температур в 1 К.

Различают процессы теплоотдачи и процессы теплопередачи. Первый термин обычно применяется в том случае, когда рассматривается какая-то одна ступень теплообмена, например от газа к стенке, или наоборот. В таких случаях применяется коэффициент теплоотдачи α.

Процесс теплопередачи включает несколько ступеней передачи тепла, например передача тепла от газа к газу через разделительную стенку Этот процесс слагается из трех ступеней передачи тепла: 1) от газа к стенке; 2) через стенку и 3) от стенки к другому газу. Каждая из этих ступеней характеризуется своим коэффициентом теплоотдачи α. Весь процесс передачи тепла характеризуется суммарным коэффициентом теплопередачи, который обычно обозначается буквой K и имеет ту же размерность, что и коэффициент теплоотдачи α.

Для второй группы случаев теплообмена, когда тепло распространяется теплопроводностью, важнейшим законом является закон Фурье, который для одномерного потока записывается следующим образом:

$$q = -\lambda (dT/dx), \qquad (38)$$

где q — удельный тепловой поток, Вт/м^2; dT/dx — градиент температуры, показывающий падение температуры в направлении оси x, К/м.

Знак минус в выражении (38) указывает, что тепло распространяется в сторону убывания температуры.

Коэффициент λ называется коэффициентом теплопроводности [Вт/(м·К)] и определяет количество тепла, которое передается в единицу времени через единицу поверхности при разности температуры в 1 К на расстоянии в 1 м.

В ряде случаев при расчете процессов теплообмена ис-

пользуется понятие теплового сопротивления R [м²·К/Вт], т. е. величины, обратной коэффициенту теплоотдачи $R = 1/\alpha$.

При передаче тепла теплопроводностью тепловое сопротивление

$$R = \frac{1}{\lambda/S} = \frac{S}{\lambda},$$

где S — толщина стенки, через которую происходит передача тепла, м.

§ 2. Конвективный теплообмен

Физические основы теплообмена конвекцией

Выше отмечалось, что конвективный теплообмен происходит при движении жидкости или газа, движущиеся частицы которых и являются теплоносителями. Каждая такая частица, соприкоснувшись с тепловоспринимающей поверхностью, в момент контакта передает определенное количество тепла и, не останавливаясь, движется дальше. На ее место подходит другая, не остывшая частица, которая также отдает часть своего тепла и следует дальше, и т. д.

Когда нет движения и частицы жидкости или газа не выполняют роль движущихся теплоносителей, тогда нет и теплопередачи конвекцией. В подобных случаях тепло передается (в отсутствие теплового излучения) исключительно теплопроводностью.

Вместе с тем следует отметить, что при конвективном теплообмене при движении среды всегда происходит передача тепла теплопроводностью. В зависимости от свойства среды и условий движения доли тепла, передаваемого конвекцией и теплопроводностью, в общем процессе теплообмена будут различны.

Таким образом, теплопередача конвекцией — это очень сложный процесс, зависящий от большого числа факторов, таких, как условия движения жидкости или газа, их теплопроводности, формы поверхности нагрева и др.

На теплопередачу конвекцией сильно влияет природа возникновения движения, иначе говоря, силы, вызывающие движение. Эти силы могут зарождаться в самой среде, а могут быть приложены и извне. В первом случае наблюдаются свободное движение и свободная конвекция, во втором — вынужденное движение и вынужденная конвекция.

Свободное движение возникает вследствие разности плотностей нагретых и холодных частей среды. В результа-

те соприкосновения с нагретой поверхностью жидкость нагревается, температура ее по сравнению с температурой остальной массы повышается, а плотность уменьшается. Вследствие разности плотностей нагретых и более холодных частей среды возникает подъемная сила, которая создает свободное движение и вызывает конвективный теплообмен определенного вида — свободную конвекцию. Таким образом, первопричиной возникновения свободной конвекции является температурный напор ΔT, т. е. разность между температурой поверхности нагрева и температурой среды. Этот температурный напор и определяет коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции.

Вынужденная конвекция наблюдается при движении, вызванном внешними силами (насос, вентилятор), и зависит от ряда факторов, из которых главными являются скорость и режим движения жидкости или газа. Наряду с вынужденным движением одновременно возможно возникновение и свободного движения. В таком случае влияние свободного движения тем больше, чем меньше его скорость и выше температурный напор ΔT. При больших скоростях вынужденного движения значение свободной конвекции становится ничтожным.

При ламинарном движении отдельные слои между собой не перемешиваются и передача тепла в таком потоке возможна только теплопроводностью от слоя к слою. Скорость на интенсивность теплопередачи, а следовательно, на величину α практически не влияет.

При турбулентном движении, когда основная масса потока интенсивно перемешивается, определяющее значение имеет скорость движения, увеличение которой вызывает увеличение коэффициента α. При турбулентном движении около поверхности стен, ограничивающих поток, образуется тонкий слой жидкости, в котором благодаря вязкости сохраняется ламинарное движение. Этот тонкий ламинарный слой жидкости называют пограничным слоем; он оказывает решающее влияние на процесс теплообмена. Передача тепла в турбулентном потоке осуществляется в результате интенсивного перемешивания. Передача тепла в пределах пограничного ламинарного слоя происходит только теплопроводностью. Поэтому для большинства теплоносителей (газы, вода, масло и др.) интенсивность теплоотдачи в основном определяется термическим сопротивлением пограничного слоя, величина которого значительно превышает тепловое сопротивление потока. При увеличении скорости движения среды толщина пограничного слоя умень-

шается, что и вызывает увеличение коэффициента теплоотдачи α.

Применение теории подобия к изучению теплообмена

Так же, как и при гидродинамическом подобии, условием теплового подобия является равенство соответствующих инвариантов или критериев подобия.

Как показывает теория, для достижения теплового подобия при вынужденном движении необходимо равенство следующих критериев подобия двух явлений:

Фурье

$$\mathrm{Fo} = \mathrm{Fo}' \text{ или } a\tau/l = a'\,\tau'/l';$$

Пекле

$$\mathrm{Pe} = \mathrm{Pe}' \text{ или } wl/a = w'\,l'/a';$$

Нуссельта

$$\mathrm{Nu} = \mathrm{Nu}' \text{ или } \alpha l/\lambda = \alpha'\,l'/\lambda',$$

где w — скорость движения среды (жидкости или газа), м/с; l — характерный геометрический размер, м; τ — время, с (ч); λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); a — коэффициент температуропроводности, м^2/с; α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·К).

На практике часто производят различные преобразования с критериями. Так, критерий Пекле может быть записан следующим образом:

$$\mathrm{Pe} = \frac{wl}{a} = \frac{wl}{\nu} \cdot \frac{\nu}{a} = \mathrm{Re}\,\mathrm{Pr}.$$

Отношение $\nu/a = \mathrm{Pr}$ представляет собой критерий Прандтля.

Все критерии имеют определенный физический смысл, в соответствии с которым они применяются.

Критерий Фурье часто называют безразмерным временем, поскольку в числителе этого критерия стоит время τ. В стационарных процессах критерий Fo опускается. Выше отмечалось, что коэффициент температуропроводности a характеризует интенсивность изменения энтальпии тела, т. е. интенсивность его нагрева или охлаждения. Таким образом, в целом критерий Фурье характеризует связь между скоростью изменения температуры тела, его физическими характеристиками и размерами.

Физический смысл критерия Пекле становится ясным, если написать его несколько иначе:

$$\mathrm{Pe} = \frac{wl}{a} = \frac{w\rho c}{\lambda/l}.$$

При этом числитель представляет собой плотность (на единицу площади сечения) теплового потока, переносимого движущейся средой, а знаменатель — плотность теплового потока теплопроводностью. Поэтому критерий Пекле является показателем соотношения переноса тепла конвекцией и теплопроводностью.

Критерий Прандтля ($\mathrm{Pr}=\nu/a=\nu\rho c/\lambda$) является мерой подобия температурных и скоростных полей. Ниже будет показано, что между процессами теплопередачи и гидродинамики существует (в определенных условиях) подобие. При $\mathrm{Pr}=1$ поля температур и скоростей подобны.

Конвекция обязательно связана с движением, которое, как выше отмечалось, может быть вынужденным и свободным.

Критерий Re характеризует вынужденное движение:

$$\mathrm{Re} = \frac{wd}{\nu} = \frac{wd}{\mu/\rho} = \frac{\rho wd}{\mu}, \quad \frac{w}{w} = \frac{\rho w^2}{\mu w/d},$$

так как представляет собой отношение инерционных сил (ρw^2) к силам трения ($\mu w/d$).

Для свободного движения применяется критерий Грасгофа:

$$Gr = \beta \frac{g l^3}{\nu^2} \Delta T.$$

Свободное движение возникает как результат разности плотностей, определяемой перепадом температур ΔT. В результате наличия разности температур ΔT создается разность плотностей $\rho-\rho_0$, от которой зависит коэффициент объемного расширения $\beta=(\rho-\rho_0)/\rho$. Таким образом, критерий Gr характеризует меру отношения подъемной силы к силе вязкого трения при свободном движении.

Критерий Нуссельта $\left(\mathrm{Nu} = \frac{\alpha l}{\lambda} = \frac{\alpha}{\lambda/l}\right)$ характеризует связь между интенсивностью теплоотдачи и температурным полем в пограничном слое.

Следует отметить, что при нагреве различных материалов обычно различают так называемые внешнюю и внутреннюю задачи.

Внешняя задача рассматривает передачу тепла от элементов печи к поверхности материалов. Внешнюю задачу характеризует критерий Нуссельта, в котором λ—коэффициент теплопроводности газа (жидкости).

Внутренняя задача рассматривает передачу тепла от поверхности материала внутрь. В этом случае применяется критерий Био ($Bi=\alpha l/\lambda$), внешне похожий на критерий Nu. Но в критерии Био λ означает теплопроводность материала, а l — его толщину.

Чаще всего целью экспериментального изучения конвективного теплообмена является определение коэффициента теплоотдачи α. Поэтому опытные данные обычно обрабатывают в виде критериального уравнения

$$Nu = f(Fo, Re, Pe, Gr)$$

или

$$Nu = f(Fo, Re, Pr, Gr). \quad (39)$$

Для ряда конкретных задач это общее критериальное уравнение упрощается. Например, при стационарном состоянии выпадает критерий Fo:

$$Nu = f(Re, Pe, Gr);$$

при стационарном вынужденном движении, кроме критерия Fo, выпадает также критерий Gr:

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

Наоборот, при свободном стационарном движении выпадают Fo и Re:

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

Для газов с молекулой, состоящей из четырех и более атомов, $Pr=1$ и для вынужденного стационарного движения $Nu=f(Re)$, а для свободного стационарного движения $Nu=f(Gr)$.

Свободная конвекция

Обычно, говоря о свободной конвекции, различают два вида этого процесса в зависимости от его протекания в неограниченном или ограниченном пространстве. Различие между этими процессами заключается в следующем. Представим себе, что две поверхности участвуют в теплообмене: одна отдает тепло воздуху, т. е. происходит процесс нагрева воздуха, а другая, наоборот, отбирает тепло от подогретого воздуха и тем самым его охлаждает. Если обе поверхности значительно удалены одна от другой, то оба процесса (на-

грев и охлаждение воздуха) происходят, не влияя друг на друга. В этом случае можно говорить о свободной конвекции в неограниченном пространстве. Понятно, что, если протекает практически только один процесс (нагрев или охлаждение), то наблюдается теплоотдача в неограниченном пространстве. Если пространство ограничено, то процессы нагрева и охлаждения разделить невозможно и все явления надо рассматривать в целом.

Свободная конвекция в неограниченном пространстве. Типичным свободным движением в неограниченном пространстве для вертикальной нагретой поверхности является такое движение, когда около нижней части поверхности происходит ламинарное движение, а в верхней части — турбулентное. Вид движения зависит от разности температур стенки и воздуха. С изменением вида движения изменяется и вид теплоотдачи. Можно показать, что в нижней части толщина ламинарного слоя сначала увеличивается и коэффициент теплоотдачи уменьшается, а затем происходит стабилизация турбулентного движения и коэффициент теплоотдачи остается неизменным.

Свободная конвекция в неограниченном пространстве для тел самой различной формы в настоящее время хорошо изучена. Проведенная обработка результатов многочисленных исследований позволила сделать следующие выводы:

1) форма тела имеет второстепенное значение; режим движения определяется не формой тела, а температурными условиями;

2) при определенных условиях процесс теплообмена не зависит от геометрических размеров и его можно изучить на малых моделях;

3) для процесса теплоотдачи определяющим критерием является произведение GrPr. Зависимость между критериями подобия Nu, Gr и Pr может быть представлена в виде:

$$\mathrm{Nu} = C\,(\mathrm{Gr\,Pr})^n,$$

где C и n — опытные коэффициенты, значения которых следующие:

GrPr	$1 \cdot 10^{-3}$—$5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$—$2 \cdot 10^{7}$	$2 \cdot 10^{7}$—$1 \cdot 10^{13}$
C	1,18	0,54	0,135
n	1/8	1/4	1/3

Свободная конвекция в ограниченном пространстве. Поскольку для теплоотдачи в ограниченном пространстве нельзя получить верные коэффициенты теплоотдачи, постольку для облегчения расчета такой сложный процесс теп-

лообмена рассматривают как элементарное явление передачи тепла теплопроводностью, вводя при этом понятие эквивалентного · коэффициента теплопроводности $\lambda_{эк}$. Это позволяет избежать определения коэффициентов теплоотдачи α. Значение $\lambda_{эк}$ находят опытным путем.

Если эквивалентный коэффициент теплопроводности разделить на действительный коэффициент теплопроводности той же среды при ее средней температуре, то получаем новый коэффициент, который характеризует влияние конвекции и называется коэффициентом конвекции $\varepsilon_к = \lambda_{эк}/\lambda$.

Коэффициент $\varepsilon_к$ является функцией произведения GrPr, т. е. $\varepsilon_к = f(\mathrm{GrPr})$.

В подобной форме обрабатывают опытные данные для свободной конвекци в ограниченном пространстве.

При значениях произведения $\mathrm{GrPr} < 1000$ величина $\varepsilon_к = 1$. При значениях $\mathrm{GrPr} > 1000$ может быть использовано уравнение

$$\varepsilon_к = 0{,}18\,(\mathrm{Gr\,Pr})^{0{,}25}.$$

Получив значение $\lambda_{эк}$, нетрудно определить плотность теплового потока по уравнению Фурье, Вт/м²

$$q = \frac{\lambda_{эк}}{\delta}\,\Delta T;$$

где δ — толщина слоя, участвующего в теплообмене, м; ΔT — разность температур на границах слоя, К.

Вынужденная конвекция

При вынужденном движении теплоотдача конвекцией зависит главным образом от характера движения (ламинарное или турбулентное) и скорости.

В связи со сложностью явления эмпирические обобщения процесса теплоотдачи конвекцией при · вынужденном движении можно сделать только для каждого отдельного случая.

Теплоотдача при движении газа (жидкости) в трубах. Этот вид теплообмена весьма обстоятельно исследован М. А. Михеевым и другими учеными. Эмпирические расчетные выражения в этом случае получены как для случая, когда температура стенки трубы выше температуры жидкости ($T_{ст} > T_ж$, нагрев жидкости), так и для случая охлаждения жидкости, когда $T_{ст} < T_ж$. Так (при $1 < \mathrm{Pr} < 100$)

при $T_{ст} > T_ж$

$$\alpha = 0{,}023\,\frac{\lambda}{d_{экв}}\,\mathrm{Re}_ж^{0{,}8}\,\mathrm{Pr}^{0{,}4}\left(\frac{\mathrm{Pr}_ж}{\mathrm{Pr}_c}\right)^{0{,}06};$$

при $T_{ст} < T_{ж}$

$$\alpha = 0{,}023 \frac{\lambda}{d_{экв}} \mathrm{Re}_{ж}^{0,8} \mathrm{Pr}^{0,4} \left(\frac{\mathrm{Pr}_{ж}}{\mathrm{Pr}_{с}} \right)^{0,25}$$

Эмпирические выражения этого типа могут быть использованы для практических расчетов. Критерии вычисляют для средних значений температуры среды. Формула применима для труб любого сечения; в качестве определяющего размера следует выбирать диаметр для круглых труб или эквивалентный диаметр (для некруглых труб).

Теплоотдача при обтекании труб. Различие в значениях α при продольном и поперечном обтекании труб, а также при коридорном и шахматном расположении труб обусловлено режимами движения потока среды, омывающей трубы. В частности, следует отметить, что степень турбулизации потока при входе в трубный пучок с шахматным расположением труб больше, чем при входе в пучок с коридорным расположением труб. Кроме того, на величину α оказывает влияние направление теплового потока (от протекающей по трубе среды к стенке трубы, или наоборот), вид трубного пучка (прямые трубы или змеевики), угол атаки, т. е. угол между осью трубы и направлением потока среды, и другие факторы.

Теплоотдача в случае одиночной трубы при поперечном обтекании ее потоком. Этим вопросом занимались М. А. Михеев, Л. С. Эйгенсон и др.

Применительно к круглой трубе для определения величины α может служить формула

$$\mathrm{Nu} = \varepsilon C \mathrm{Re}^{n},$$

где C и n — постоянные коэффициенты; ε — поправка на угол атаки, значения которой следующие:

Угол атаки, град	20	30	40	50	60	70	80	90
ε	0,57	0,60	0,69	0,80	0,92	2,3	1,2	1,0

Значения коэффициентов C и n в зависимости от критерия Re приведены ниже:

Re	$1 \cdot 10^2$—$5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$—$5 \cdot 10^4$
C	0,59	0,197
n	0,47	0,60

Теплоотдача при обтекании пучка труб (рис. 25 и 26). В промышленной практике теплоотдача при обтекании пучка труб встречается часто в паровых котлах, теплообменниках, регенераторах, рекуператорах и т. п. Применяется ко-

ридорное и шахматное расположение труб в пучке. Для случая охлаждения потока предложены следующие расчетные выражения:

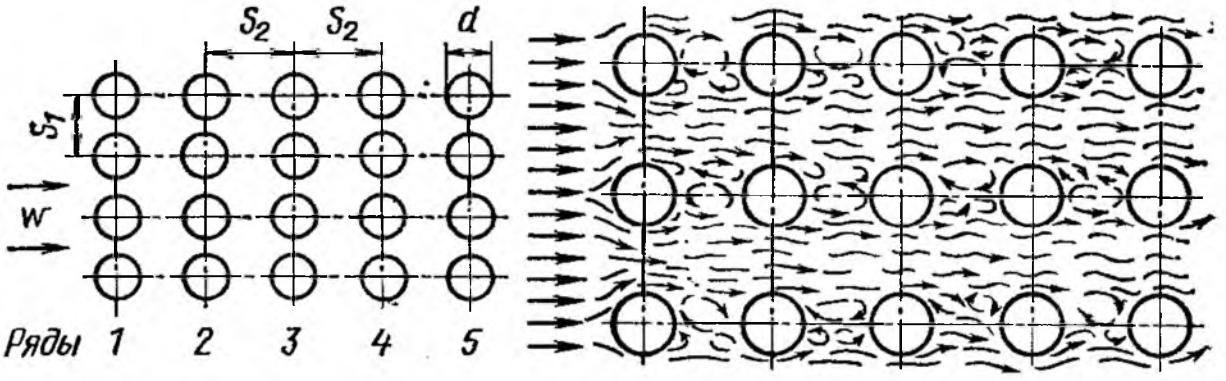


Рис. 25. Схема коридорного расположения труб и характер движения в пучках

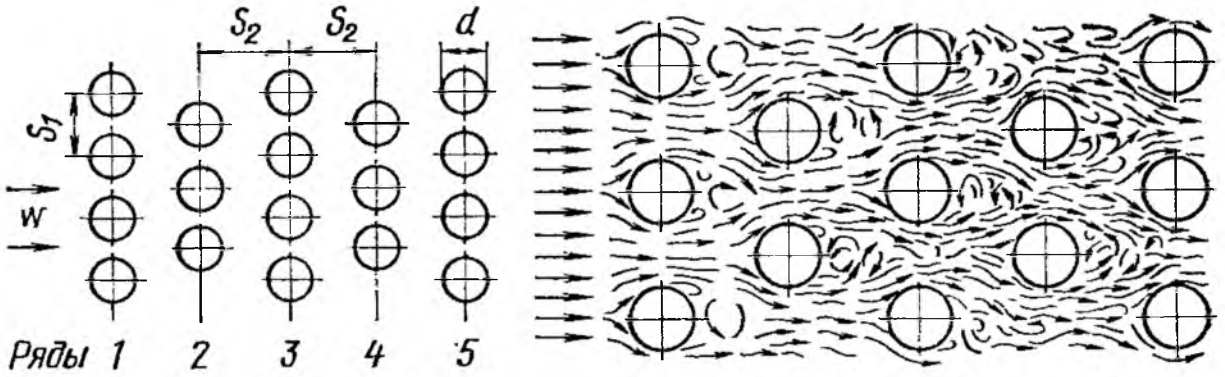


Рис. 26. Схема шахматного расположения труб и характер движения в пучках

коридорный пучок

$$\alpha = 0{,}177 \frac{\lambda}{d} \mathrm{Re}^{0{,}64} \eta_1 \eta_2 \eta_3 \ \text{Вт/(м}^2 \cdot \text{К)};$$

шахматный пучок при $\dfrac{S_1/d}{S_2'/d} \leqslant 0{,}7$

$$\alpha = 0{,}27 \frac{\lambda}{d} \mathrm{Re}^{0{,}6} \eta_1 \eta_2 \eta_3,$$

где η_1, η_2, η_3 — поправочные коэффициенты, учитывающие влияние шага по ширине и глубине и числа рядов пучка, значения которых следующие:

S_1/d	1	2	3	3,5			
η_1	1,0	1,1	1,24	1,3			
S_2/d	1	2	3	3,5			
η_2	1,05	0,94	0,87	0,85			
Число рядов в пучке	1	3	5	7	10	20	30
η_3	0,6	0,9	0,98	1,0	1,02	1,03	1,04

В случае нагревания потока коэффициенты теплоотдачи следует умножить на коэффициент, учитывающий влияние температурного фактора

$$\alpha_{\text{нагр}} = \alpha_{\text{охл}}\left(1{,}6 - 0{,}6\,\frac{T_{\text{г}}}{T_{\text{ст}}}\right),$$

где $T_{\text{г}}$ и $T_{\text{ст}}$ — температуры газового потока и стенки трубы, К.

§ 3. Теплопроводность

Теплопроводность при стационарном состоянии

При стационарном тепловом состоянии температура с течением времени остается неизменной. В практике металлургической теплотехники подобные случаи передачи тепла теп-

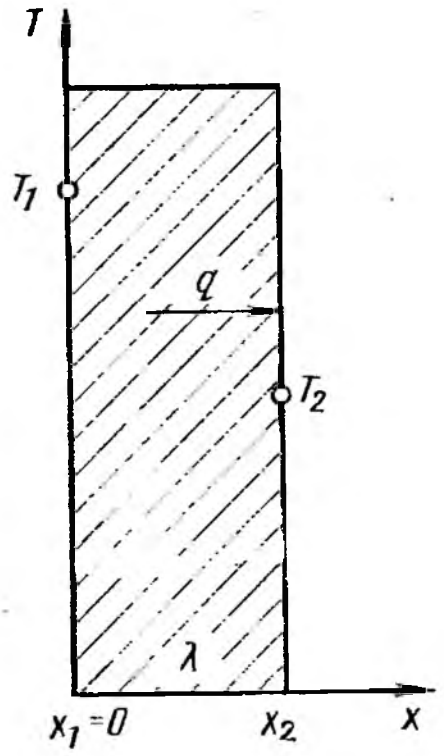


Рис. 27. Плоская однослойная стенка

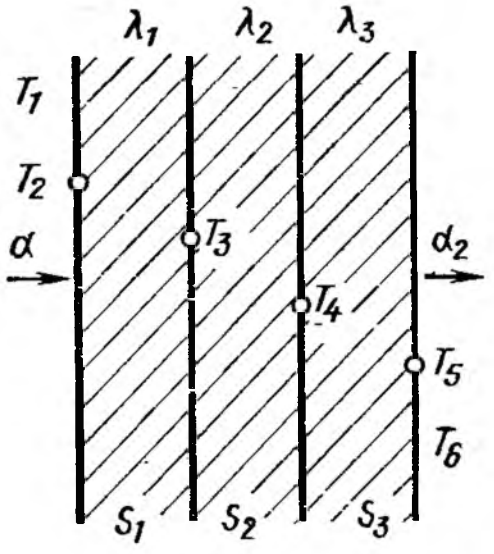


Рис. 28. Плоская трехслойная стенка

лопроводностью встречаются при передаче тепла через плоские стенки.

Однослойная стенка. Чтобы получить выражения, позволяющие определить распределение температур в стенке и количество передающегося через нее тепла, необходимо решить дифференциальные уравнения теплопроводности совместно с краевыми условиями I рода. Применительно к этому случаю (рис. 27), когда тепло передается через стенку толщиной $s = x_2 - x_1$ от поверхности с температурой

T_1 к поверхности с температурой T_2, изменение температуры по толщине стенки описывается уравнением

$$T = \frac{T_2 - T_1}{s} x + T_1, \qquad (40)$$

а плотность теплового потока, проходящего через стенку, Вт/м²

$$q = \lambda \frac{T_1 - T_2}{s}.$$

Следует заметить, что выражение (40) представляет собой уравнение прямой линии, следовательно, распространение температуры в однослойной плоской стенке при $\lambda = \text{const}$ имеет прямолинейный характер. Если λ зависит от температуры, то распределение температуры имеет криволинейный характер, причем кривая выгибается вверх, когда λ увеличивается с повышением температуры, и вниз, когда λ уменьшается с увеличением температуры.

Многослойная стенка. Рассмотрим плоскую стенку, состоящую из трех слоев (рис. 28). Можно принять любое число слоев, причем каждый из них может обладать своими физическими свойствами. Чтобы получить выражение, позволяющее определить количество тепла, проходящее через многослойную стенку, необходимо помнить, что для стационарного процесса плотность теплового потока, проходящего через каждый слой, одинакова, т. е. $q_1 = q_2 = q_3 = q$

$$q_1 = (\lambda_1/s_1)(T_2 - T_3), \quad q_2 = (\lambda_2/s_2)(T_3 - T_4),$$
$$q_3 = (\lambda_3/s_3)(T_4 - T_5)$$

или $qs_1/\lambda_1 = T_2 - T_3$, $qs_2/\lambda_2 = T_3 - T_4$, $qs_3/\lambda_3 = T_4 - T_5$.

После сложения этих уравнений получаем

$$q = \frac{T_2 - T_5}{(s_1/\lambda_1) + (s_2/\lambda_2) + (s_3/\lambda_3)}.$$

Как видно, знаменатель данного уравнения представляет собой сумму тепловых сопротивлений отдельных слоев.

Передача тепла от более нагретого газа к менее нагретому через плоскую стенку. На практике часто приходится определять количество тепла, которое требуется передать от одного газа к другому (или к жидкости) через стенку (многослойную или однослойную), т. е. решать задачу, подобную изображенной на рис. 28.

Поскольку рассматривается стационарное тепловое состояние, постольку температуры теплоотдающего газа T_1 и

тепловосприпимающего газа T_6, так же как и величины T_2, T_3, T_4 и T_5, остаются во времени неизменными. Соблюдение постоянства температуры окружающей среды — есть условие, присущее граничным условиям III рода. Процесс теплообмена определяется в данном случае коэффициентами теплоотдачи α_1 и α_2.

Плотность теплового потока, который отдается более нагретым газом, может быть определена по выражению

$$q_1 = \alpha_1 (T_1 - T_2).$$

Плотность теплового потока, который передается через стенку, была определена в предыдущем разделе:

$$q_2 = \frac{T_2 - T_5}{(s_1/\lambda_1) + (s_2/\lambda_2) + (s_3/\lambda_3)}.$$

Плотность теплового потока, передаваемого от стенки к менее нагретому газу:

$$q_3 = \alpha_2 (T_5 - T_6).$$

При стационарном состоянии

$$q_1 = q_2 = q_3 = q.$$

Следовательно, $q(1/\alpha_1) = T_1 - T_2$;

$$q[(s_1/\lambda_1) + (s_2/\lambda_2) + (s_3/\lambda_3)] = T_2 - T_5;$$

$$q(1/\alpha_2) = T_5 - T_6.$$

После сложения этих трех уравнений, получаем

$$q = \frac{T_1 - T_6}{(1/\alpha_1) + (s_1/\lambda_1) + (s_2/\lambda_2) + (s_3/\lambda_3) + (1/\alpha_2)}. \qquad (41)$$

Как указывалось выше, величина обратная коэффициенту теплоотдачи $1/\alpha_1$ (или s/λ), выражает тепловое сопротивление. Следовательно, знаменатель уравнения (41) представляет собой сумму тепловых сопротивлений различных звеньев передачи тепла. Уравнение (41) может быть записано в виде:

$$q = K(T_1 - T_6),$$

где $K = \frac{1}{(1/\alpha_1) + (s_1/\lambda_1) + (s_2/\lambda_2) + (s_3/\lambda_3) + (1/\alpha_2)}$.

Величину K называют коэффициентом теплопередачи. Напомним, что разница между терминами «теплоотдача» и «теплопередача» заключается в том, что термин теплоотдача применим для какой-либо одной ступени передачи тепла, например от газа к стенке, от стенки к газу и т. п. Термин

«теплопередача» применим для обозначения более сложного процесса передачи тепла, включающего в себя несколько ступеней этого процесса, например передачу тепла от газа к газу через стенку, где наблюдаются три ступени теплоперехода: от газа к стенке, через стенку и от стенки к другому газу. Подобным же образом можно объяснить различие между коэффициентом теплоотдачи α и коэффициентом теплопередачи K.

Теплопроводность при нестационарном состоянии

Основные решения. Как отмечалось выше, при нестационарном состоянии с течением времени происходит изменение температуры тела, т. е. $\partial T/\partial\tau \neq 0$.

Подобное изменение температуры тела возможно, когда тело остывает или когда оно нагревается. На практике это широко распространенный процесс нагрева металла. Решение дифференциального уравнения теплопроводности совместно с краевыми условиями представляет собой весьма сложную математическую задачу, поэтому остановимся лишь на решении при краевых условиях III рода, получившем наибольшее практическое распространение. На практике часто встречаются печи, в которых нагрев металла происходит при неизменной температуре рабочего пространства. Некоторые печи с изменяющейся температурой по длине печи можно условно разделить на расчетные участки с приближенно неизменной температурой в пределах каждого участка и к каждому из них применить решения, полученные при краевых условиях III рода.

Приведем без вывода окончательное решение дифференциального уравнения теплопроводности для бесконечной плиты при краевых условиях III рода, которое имеет следующий вид:

$$T = T_0 (T_0 - T_{\text{нач}}) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin \delta}{\delta + \sin \delta \cdot \cos \delta} e^{-\frac{\delta^2 a \tau}{S^2}} \cos\left(\delta \frac{x}{S}\right), \tag{42}$$

где T_0 — температура печи (среды), К; $T_{\text{нач}}$ — температура металла в начальный момент нагрева, К; a — коэффициент температуропроводности, м^2/с; τ — время нагрева (или охлаждения) тела, с; S — расчетная толщина нагреваемого тела, м; δ — величина, зависящая от $\alpha S/\lambda$; α — коэффициент теплоотдачи (от газа к металлу), Вт/(м^2·К); x — расстояние от центра тела до той точки, для которой определяют температуру T, м.

Анализируя уравнение (42), можно видеть, что температура нагрева металла T зависит от трех безразмерных комплексов: критериев $a\tau/S^2$, $\alpha S/\lambda$ и x/S и что уравнение (42) может быть заменено критериальным уравнением следующего вида:

$$\theta = (T_0 - T_{кон})/(T_0 - T_{нач}) = \Phi\left(\frac{a\tau}{S^2}; \frac{\alpha S}{\lambda}; \frac{x}{S}\right) =$$

$$= \Phi\left(Fo; \text{ Bi}; \frac{x}{S}\right), \qquad (43)$$

где θ — безразмерный температурный критерий; T_0 — температура среды (печи); $T_{нач}$ и $T_{кон}$ — температура нагреваемого тела соответственно начальная и конечная.

В зависимости от условий решения уравнения $T_{кон}$ может представлять собой как конечную температуру поверхности тела (при $x/S=1$), так и конечную температуру в центре тела (при $x/S=0$).

Безразмерный комплекс $a\tau/S^2$ представляет собой известный критерий Фурье, а безразмерный комплекс $\alpha S/\lambda$ — критерий Био.

Безразмерный геометрический симплекс x/S определяет собой местоположение точки в теле, для которой определяют температуру. Так, для центра нагреваемого тела $x=0$ и $x/S=0$, для поверхности тела $x=S$ и $x/S=1$.

Таким образом, решая уравнение (43) для поверхности тела ($x/S=1$), получаем температурный критерий

$$\theta_{пов} = \left(T_0 - T_{пов}^{кон}\right)\left(T_0 - T_{нач}\right),$$

а для центра ($x/S=0$)

$$\theta_{ц} = \left(T_0 - T_{ц}^{кон}\right)\left(T_0 - T_{нач}\right).$$

Характер нагрева тел существенно зависит от критерия Bi. Данное решение (42) целесообразно использовать при Bi$>$0,5.

Аналогичные решения уравнения (42) могут быть получены с краевыми условиями I и II рода, расчеты по которым рассмотрены во II томе данного учебника. Для инженерных расчетов зависимости типа (43) обычно представляются в графическом виде.

В металлургии и машиностроении распространенным процессом нестационарной теплопроводности является процесс нагрева металла перед обработкой давлением и для термической обработки. В процессе нагрева изменяется не только температура металла, но и его физические свойства (λ, c, ρ) и коэффициент теплоотдачи. Однако аналитические

решения типа (42) и (43) получены при условии, что эти величины не изменяются во времени. Поэтому для получения надежных результатов весь период нагрева целесообразно разбивать на интервалы и в пределах каждого интервала температуру усреднять и по ней выбирать и определять λ, c, ρ и α.

Метод конечных разностей. Некоторые практические задачи могут быть решены с применением приближенных методов. К их числу относится метод конечных разностей (метод Шмидта), который часто применяют для нагрева или остывания огнеупорной футеровки печи. Этот метод основан на том, что в дифференциальном уравнении теплопроводности бесконечно малые величины заменяют малыми, но уже конечными величинами. Дифференциальное уравнение теплопроводности для одномерного потока имеет вид

$$\frac{dT}{d\tau} = a\,\frac{d^2T}{dx^2}.$$

Если бесконечно малые приращения dT, $d\tau$, dx заменить конечными малыми приращениями, то уравнение можно записать так:

$$\frac{\Delta T}{\Delta \tau} = a\,\frac{\Delta^2 T}{\Delta x^2}. \qquad (44)$$

В этом уравнении конечные малые приращения представляют собой: $\Delta\tau$ — отрезок времени, в течение которого происходит изменение температуры ΔT, с; Δx — толщину элементарного слоя нагреваемого материала, на протяжении которой происходит изменение температуры в течение времени $\Delta\tau$, м.

Для практического применения этого метода необходимо выбрать значения величин Δx и $\Delta\tau$

Для определения Δx всю стенку конечной толщины следует произвольно разделить на некоторое число равных по толщине слоев и таким образом определить величину Δx, выраженную в метрах, а следовательно, и число слоев $m = x/\Delta x$. Отсчет слоев Δx следует вести от более нагретой стороны стенки к менее нагретой: Δx_1 — слой, расположенный непосредственно у более нагретой поверхности, а Δx_m — слой, расположенный около холодной поверхности.

Отрезок времени $\Delta\tau$ определяют в зависимости от величины по выражению

$$\Delta\tau = \frac{\Delta x^2}{2a}\,c,$$

где a — коэффициент температуропроводности, м²/с.

Задача расчета заключается в том, чтобы установить распределение температур в стенке по истечении определенного времени τ, прошедшего с момента начала нагрева. Таким образом, частное $n = \tau/\Delta\tau$ дает число расчетных отрезков времени, из которых $\Delta\tau_1$ — начальный, а $\Delta\tau_к$ — конечный отрезок времени, ч.

В начале нагрева, т. е. в начале отрезка, характеризующего время $\Delta\tau_1$, температура нагреваемого тела в пределах каждого отрезка Δx считается неизменной. Обычно нагрев подобного рода происходит с одной стороны, поэтому для расчета необходимо знать температуру поверхности или закон изменения температуры поверхности с более нагретой стороны. Как более нагретой, так и менее нагретой поверхности

стенки приписывается роль отдельных очень тонких слоев. Так, индекс Δx_0 обозначает более нагретую поверхность, прилегающую к слою Δx_1. Индекс Δx_{m+1} обозначает менее нагретую поверхность.

Методом конечных разностей наиболее часто пользуются для расчета прогрева стен в печах периодического действия, где зачастую представляется возможным задать изменение температуры поверхности стен с внутренней стороны, поскольку температура собственно поверхности бывает близка к температуре раскаленных газов, заполняющих печь. Однако температуру поверхности можно определить и расчетным путем по выражению

$$T_{\Delta\tau_n;\ \Delta x_{m+1}} = \frac{\alpha\Delta x T_2 + \lambda T_{\Delta\tau_n;\ \Delta x_m}}{\lambda + \alpha\Delta x}, \qquad (45)$$

где $T_{\Delta\tau_n;\ \Delta x_{m+1}}$ — температура поверхности Δx_{m+1} в любой отрезок времени, К; T_2 — температура газовой среды, омывающей стенку, К; α — коэффициент теплоотдачи от стенки к газу, Вт/(м²·К); λ — коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/(м·К).

Температура в каждом слое стенки в определенный отрезок времени может быть определена как полусумма температур предыдущего и последующего слоев в предшествующий отрезок времени. Так

$$T_{\Delta\tau_1;\ \Delta x_1} = \frac{T_{\Delta\tau_1;\ \Delta x_0} + T_{\Delta\tau_1;\ \Delta x_2}}{2};$$

$$T_{\Delta\tau_2;\ \Delta x_2} = \frac{T_{\Delta\tau_1;\ \Delta x_1} + T_{\Delta\tau_1;\ \Delta x_3}}{2};$$

$$T_{\Delta\tau_n;\ \Delta x_m} = \frac{T_{\Delta\tau_n;\ \Delta x_{m-1}} + T_{\Delta\tau_n;\ \Delta x_{m+1}}}{2}.$$

Таким образом, можно получить распределение температур в плоской однородной стенке. Однако если стенка состоит из двух различных материалов (например, шамот+тепловая изоляция), то в расчет необходимо внести некоторые дополнения. Первую стенку x, как и в случае однородной стенки, следует разделить на определенное число элементарных слоев Δx, причем отрезки времени должны быть получены из уравнения

$$\Delta\tau_x = \frac{\Delta x^2}{2a}.$$

Эти отрезки времени должны быть, естественно, одинаковыми для первой и второй стенок, т. е. $\Delta\tau_x = \Delta\tau_y = \Delta\tau$.

Поэтому толщину элементарных слоев второй стенки y нельзя выбирать произвольно; ее следует определять по выражению

$$\Delta y = \Delta x \sqrt{a_y/a_x},$$

где a_x и a_y — коэффициенты температуропроводности первой и второй стенок, м²/с.

В пределах каждой из двух стенок температуру элементарных слоев определяют, как и для однородной стенки. Температуру поверхности также определяют по выражению (45).

В месте соприкосновения двух материалов температуру можно найти по выражению

$$T_{\Delta\tau_n;\ xy} = \frac{R_1 T_{\Delta\tau_n;\ \Delta y} + R_2 T_{\Delta\tau_n;\ \Delta x}}{R_1 + R_2}, \qquad (46)$$

где $T_{\Delta\tau_n;\ xy}$ — температура в месте соприкосновения двух стенок в произвольный отрезок времени $\Delta\tau_n$, К; $T_{\Delta\tau_n;\ \Delta x}$ и $T_{\Delta\tau_n;\ \Delta y}$ — температура соприкасающихся слоев соответственно первой и второй стенок в тот же отрезок времени $\Delta\tau_n$, К; $R_1=\Delta x/\lambda_1$ и $R_2=\Delta y/\lambda_2$ — тепловое сопротивление элементарных слоев первой и второй стенок.

Выяснив таким образом, каково распределение температур, можно путем простого арифметического усреднения получить среднюю температуру прогретой стенки и определить то количество тепла, которое аккумулировано стенкой в процессе нагрева. Аккумулирование тепла кладкой является очень важной расходной статьей теплового баланса периодически действующих печей.

§ 4. Теплообмен излучением

Основные понятия и законы

Основные понятия. Передача тепла излучением осуществляется при помощи электромагнитных волн, распространение которых возможно даже в вакууме. Значения длины волны (мкм) электромагнитных волн приведены ниже:

Ультрафиолетовые	0,02—0,4
Световые (видимые)	0,4—0,76
Тепловые (инфракрасные) . . .	0,76—400

Любому телу свойственно тепловое излучение при условии, что его температура отлична от абсолютного нуля. Чем выше температура тела, тем больше его тепловое излучение.

Суммарное излучение, испускаемое телом по всему спектру (от $\lambda=0$ до $\lambda=\infty$), называют интегральным. Излучение, испускаемое при определенной длине волны, называют монохроматическим.

Тела могут поглощать, пропускать или отражать тепловые лучи. В природе можно найти много примеров таких тел, к которым применимы эти понятия.

В общем случае твердые тела поглощают лишь часть падающей на них тепловой энергии, часть лучей пропускают через себя и часть лучей отражают. Допустим, что на тело падает тепловой поток Q, часть которого $Q_п$ тело поглощает, $Q_{пр}$ пропускает через себя и $Q_о$ отражает. Следовательно:

$$Q = Q_п + Q_{пр} + Q_о.$$

Разделив левые и правые части этого уравнения на Q, получаем

$$Q_п/Q + Q_{пр}/Q + Q_о/Q = 1.$$

Поглощательная способность тела характеризуется отношением $A = Q_п/Q$. Пропускательная способность тела характеризуется отношением $D = Q_{пр}/Q$ и отражательная способность тела характеризуется отношением $R = Q_о/Q$. Отношения A, D и R представляют соответственно доли поглощенного, пропущенного и отраженного тепла.

Из изложенного следует, что сумма

$$A + D + R = 1,$$

т. е., что сумма поглощательной, пропускательной и отражательной способности тел равна 1.

Тело, поглощающее все падающее на него излучение, называется абсолютно черным телом. Понятие абсолютно черного тела является известной абстракцией, поскольку оно в природе не существует; однако это понятие играет чрезвычайно важную роль в теории теплового излучения.

Тело, которое отражает все падающие на него лучи, называют абсолютно белым или зеркальным телом; оно не существует в природе и понятие о нем также является абстракцией.

Реальные тела занимают промежуточное положение между абсолютно черными и абсолютно белыми телами и для них характерно частичное поглощение и частичное отражение тепловой лучистой энергии. В теории теплового излучения их обычно называют серыми телами. Некоторые из серых тел по своим свойствам близко подходят к абсолютно черным или абсолютно белым телам. Для решения ряда экспериментальных задач и градуировки оптических приборов необходимо пользоваться моделью абсолютно черного тела, которая может быть выполнена либо в виде полого шара с небольшим отверстием, либо в виде длинного цилиндра. Луч, войдя в такой шар или цилиндр, обратно не выйдет из него и, следовательно, сечение входного отверстия в такой шар или цилиндр подобно абсолютно черной поверхности.

Зависимость теплового излучения от температуры для абсолютно черного тела

Закон Планка. Интенсивность монохроматического (при определенной длине волны) излучения зависит от температуры и длины волны, т. е.

$$I_\lambda = f(T, \lambda),$$

где I — интенсивность излучения при длине волны λ, Вт/м^3; T — абсолютная температура, К.

Определение этой зависимости представляет собой очень важную задачу, которую в 1902 г. удалось решить Планку для абсолютно черного тела теоретическим путем. Закон Планка для интенсивности излучения абсолютно черного тела может быть записан в следующем виде, Вт/м^3

$$I_{\lambda,0} = 2\pi hc^2/\lambda^5 \left(e^{hc/(k\tau T)} - 1\right)^{-1}, \qquad (47)$$

где h — универсальная постоянная Планка, Дж·с; c — скорость света в пустоте, м/с; k — постоянная Больцмана, Дж/К.

На рис. 29 приведено графическое изображение уравнения (47). Можно показать, что из закона Планка следует, что абсолютно черное тело испускает лучи всех длин волн от $\lambda=0$ до $\lambda=\infty$ при всех температурах, отличных от абсолютного нуля. Вместе с тем из рис. 29 видно, что для определенной длины волны интенсивность излучения возрастает с повышением температуры.

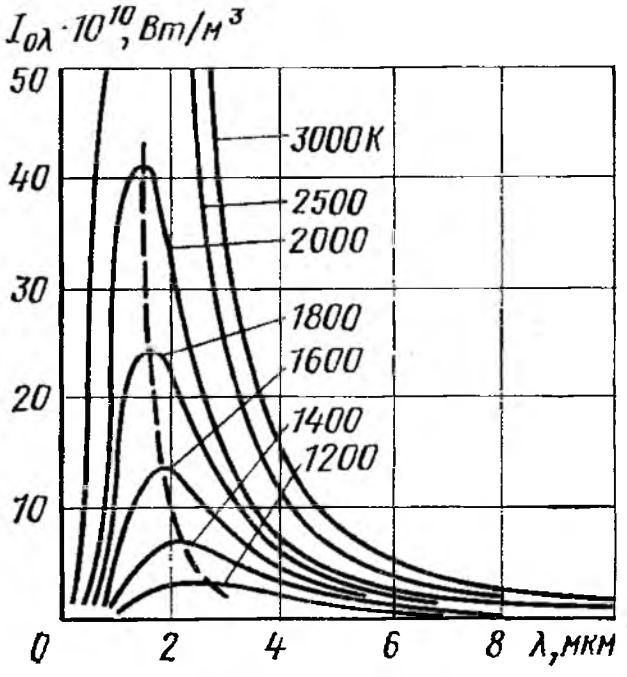


Рис. 29. Зависимость интенсивности излучения абсолютно черного тела от длины волны и температуры

Закон Стефана — Больцмана. Закон Планка устанавливает зависимость интенсивности излучения от температуры при определенной длине волны. Однако для реальных процессов представляет интерес полное излучение, т. е. суммарное излучение при всех длинах волн.

Следовательно, если надо получить полное (по всему спектру) излучение для абсолютно черного тела, то необходимо просуммировать значения $I_{\lambda,0}$ для всех без исключения длин волн от $\lambda=0$ до $\lambda=\infty$.

Если выполнить такое суммирование, то можно получить выражение

$$q_0 = \sigma_0 T^4, \qquad (48)$$

где q_0 — плотность теплового потока абсолютно черного тела, Вт/м^2; σ_0 — коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный $5{,}7 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м^2·К^4).

Это выражение называют законом Стефана — Больцмана, из которого следует, что излучательная способность абсолютно черного тела прямо пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры.

Величина σ_0 весьма мала, и пользоваться ею при расчетах неудобно, поэтому закон Стефана — Больцмана обычно записывают в следующей форме:

$$q_0 = C_0 (T/100)^4, \qquad (48')$$

где $C_0 = 5{,}7$ Вт/(м$^2 \cdot$ К^4).

Величину C_0 обычно называют коэффициентом лучеиспускания абсолютно черного тела.

Зависимость излучения от температуры для реальных (серых) тел

Так называемое серое излучение характеризуется тем, что его интенсивность излучения составляет некоторую долю от интенсивности абсолютно черного тела, одинаковую для всех длин волн.

Величину, характеризующую излучательную способность серого тела по отношению к излучательной способности черного тела, называют степенью черноты. Степень черноты ε может быть определена как отношение излучения серого тела q к излучению абсолютно черного тела q_0 при определенной температуре, т. е.

$$\varepsilon = q/q_0 \text{ или } q = \varepsilon q_0. \qquad (49)$$

Если в это выражение подставить значение q_0 из выражения (48′), то получим выражение закона Стефана — Больцмана для серого тела:

$$q = \varepsilon C_0 (T/100)^4 \qquad (50)$$

или

$$q = C (T/100)^4, \qquad (50')$$

где $C = \varepsilon C_0$ — коэффициент лучеиспускания серого тела.

Величина C (так же, как и ε) не является постоянной и зависит не только от температуры, но и от физических свойств и состояния поверхности тела.

Из определения серого тела и из формулы (49) видно, что степень черноты ε для серых тел может изменяться от нуля до значений, близких, но меньших единицы. Это в свою очередь позволяет сделать очень важный вывод о том, что при одной и той же температуре максимально возможное количество тепловой энергии излучает абсолютно черное тело. Иначе говоря, в природе не может существовать

таких серых тел, которые могли бы при одинаковых температурах излучать энергии столько же или больше, чем абсолютно черное тело. Таким образом, для абсолютно черного тела характерна наибольшая излучательная и наибольшая поглощательная способность в сравнении со всеми реальными телами.

Зависимость между излучательной и поглощательной способностями тел

Связь между излучательной и поглощательной способностями тел устанавливает закон Кирхгофа, который формулируется следующим образом: «Отношение лучеиспускательной способности какого-либо серого тела к его поглощательной способности одинаково для всех тел, находящихся при одинаковой температуре, и равно излучательной способности черного тела при той же температуре». Если обозначить через q, q_1, q_2, q_3 и т. д. плотности тепловых потоков излучения различных тел при одной и той же температуре T, через A, A_1, A_2, A_3 и т. д. поглощательные способности тех же серых тел при той же температуре T и через q_0 плотность теплового потока абсолютно черного тела при той же температуре T, то закон Кирхгофа можно записать следующим образом:

$$q/A = q_1/A_1 = q_2/A_2 = q_3/A_3 = \ldots = q_0 = C_0(T/100)^4.$$

Отсюда следует, что

$$q = AC_0(T/100)^4. \qquad (51)$$

Если сравнить уравнения (50) и (51), то можно увидеть, что $A = \varepsilon$, и сделать вывод о том, что степень черноты численно равна поглощательной способности данного тела. Таким образом, степень черноты может характеризовать как излучательную, так и поглощательную способности тела. Если, например, степень черноты тела составляет 0,7, то это означает, что данное серое тело при одинаковых температурах излучает энергии на 30 % меньше, чем абсолютно черное тело, и что данное серое тело поглотит 70 % падающей на него тепловой энергии.

В дальнейшем буквой ε будем обозначать и степень черноты, и поглощательную способность, поскольку обе эти величины равнозначны. Закон Кирхгофа справедлив не только для полного, но и для монохроматического излучения, что позволяет установить следующее важное следствие из этого закона: «всякое тело при определенной температуре может испускать только лучи тех длин волн, которые оно способно поглощать при той же температуре».

Зависимость теплового излучения от геометрических факторов

Закон Ламберта. Закон Стефана — Больцмана позволяет рассчитать полное количество тепловой энергии, излучаемой какой-либо поверхностью по всей полусфере. Однако часто необходимо определить, какое количество тепла излучается под тем или иным углом к излучающей поверхности или ее нормали. Подобную зависимость выражает закон Ламберта, по которому

$$q_\varphi = q_n \cos\varphi = (q/\pi)\cos\varphi,$$

где q — плотность теплового потока излучения во всех направлениях площадки в соответствии с законом Стефана—Больцмана, Вт/м^2; q_n — плотность теплового потока по нормали, Вт/м^2; q_φ — плотность теплового потока под углом φ к нормали, Вт/м^2; φ — угол между направлением луча и нормалью, град.

Установлено, что q_n меньше q в π раз, т. е. $q_n = q/\pi$.

Закон квадратов расстояний. Плотность лучистого потока зависит от того, на каком расстоянии от источника излучения находится тепловоспринимающая поверхность.

Представим себе, что тепловую энергию излучает точечный источник в пределах некоторого угла в пространстве, заполненном средой, не поглощающей тепловые лучи. В этом случае по мере удаления тепловоспринимающей поверхности от источника излучения плотность теплового потока изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния между источником и приемником излучения, т. е.

$$q_l = q_1/l^2,$$

где q_1 — плотность теплового потока на расстоянии 1 м от источника излучения, Вт/м^2; q_l — то же, но на расстоянии l, м.

Этот закон строго справедлив для тех случаев, когда размеры излучателя малы по сравнению с расстоянием.

Теплообмен излучением между серыми поверхностями, разделенными лучепрозрачной средой

Угловые коэффициенты. На практике часто приходится решать задачу о том, какая доля тепла, излучаемого источником, попадает на ту или иную поверхность. Для решения таких задач пользуются понятием углового коэффициента или коэффициента облученности.

Для примера рассмотрим электрическую печь, поперечный профиль которой изображен на рис. 30. Электрические нагревательные элементы расположены на своде, излучающем тепловой поток Q во всех направлениях. Предположим, что свод плоский (подвесной конструкции). Допустим, свод излучает Q_1 и Q_2 соответственно на левую и правую боковую стенки и Q_3 на лежащий на полу металл. Таким образом, на левую стенку свод излучает часть тепла, равную Q_1/Q, на правую Q_2/Q и на металл Q_3/Q. Каждое из этих отношений называют угловым коэффициентом, который обычно обозначают буквой φ. Если обозначить свод индексом 4, то отношение $Q_1/Q=\varphi_{4,1}$ представляет собой угловой коэффициент от поверхности свода на левую стену. Соответственно $Q_3/Q=\varphi_{4,3}$ — угловой коэффициент излучения от свода на металл и т. д. Таким образом, угловой коэффициент показывает, какая часть всей излучаемой тепловой энергии одного тела (поверхности) попадает на другое тело (другую поверхность).

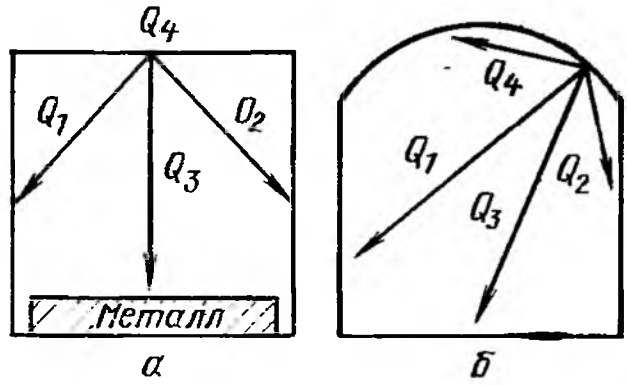


Рис. 30. Схемы электрических печей сопротивления:

а — с плоским сводом; *б* — с арочным сводом

Угловые коэффициенты связаны между собой определенными соотношениями. Рассмотрим основные из них.

1. *Правило замыкаемости.* Очевидно, что для замкнутой системы (рис. 30, *а*)

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q.$$

Разделив все члены этого уравнения на Q, получаем

$$(Q_1/Q) + (Q_2/Q) + (Q_3/Q) = Q/Q = 1.$$

Однако $Q_1/Q=\varphi_{4,1}$ и т. д., следовательно:

$$\varphi_{4,1} + \varphi_{4,2} + \varphi_{4,3} = 1.$$

Таким образом, сумма угловых коэффициентов для замкнутой системы равна единице, т. е. $\Sigma\varphi=1$. Понятно, что никакое значение любого углового коэффициента никогда не может быть больше единицы. Действительно, не может же сумма $Q_1+Q_2+Q_3$ быть больше Q.

2. *Правило взаимности.* Установлено, что если две поверхности F_1 и F_2 излучают друг на друга, то будет справедливо равенство

$$F_1 \varphi_{1,2} = F_2 \varphi_{2,1},$$

где $\varphi_{1,2}$ — угловой коэффициент с поверхности *1* на поверхность *2*; $\varphi_{2,1}$ — то же, с поверхности *2* на поверхность *1*.

Необходимо отметить, что возможны и такие случаи, когда лучистым теплом обмениваются элементы одной и той же поверхности. Если в приведенном выше примере свод был бы не плоским, а вогнутым (арочным), то наряду с излучением на другие поверхности свод излучал бы «сам на себя» (рис. 30, *б*). В этом случае применимо другое уравнение:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 0,$$

где Q_4 — тепловой поток, излучаемый всеми элементами поверхности свода друг на друга.

Соответственно угловой коэффициент $\varphi_{4,4}$, представляющий собой отношение Q_4/Q, также может быть назван угловым коэффициентом тела, излучающего само на себя.

Если в теплообмене излучением участвует вогнутая поверхность, правило замыкаемости следует писать обязательно с учетом углового коэффициента излучения само на себя, т. е. для нашего примера это правило можно записать следующим образом:

$$\varphi_{4,1} + \varphi_{4,2} + \varphi_{4,3} + \varphi_{4,4} = 1.$$

Угловой коэффициент $\varphi_{4,4}$ для плоского и выпуклого тел равен нулю.

Рассмотрим несколько примеров определения угловых коэффициентов (рис. 31), имеющих определенное практическое значение. Так, пример, показанный на рис. 31, *а*, достаточно точно соответствует соотношению для нагревательной печи с плоским подвесным сводом. Пример на рис. 31, *б* представляет собой некоторое подобие взаимного расположения факела (поверхность F_1) и обмуровки печи. Пример на рис. 31, *в* также представляет собой некоторое подобие взаимного расположения футеровки печи (F_2) и поверхности металлической ванны в мартеновской или двухванной печи.

Для этих примеров угловые коэффициенты имеют следующие выражения:

1. Две большие, близко расположенные друг к другу плоскости. Используя правило замыкаемости, можно напи-

сать $\varphi_{1,1}+\varphi_{1,2}=1$ и $\varphi_{2,2}+\varphi_{2,1}=1$; но если для плоскости $\varphi_{1,1}=0$ и $\varphi_{2,2}=0$, то $\varphi_{1,2}=\varphi_{2,1}=1$.

2. Две концентрические шаровые поверхности или два одноосных длинных цилиндра. По правилу замыкаемости $\varphi_{1,1}+\varphi_{1,2}=1$ и $\varphi_{2,2}+\varphi_{2,1}=1$. Но $\varphi_{1,1}=0$, следовательно, $\varphi_{1,2}=1$.

Отсюда, по правилу взаимности $F_1\varphi_{1,2}=\varphi_{2,1}F_2$, можно получить, что $\varphi_{2,1}=F_1/F_2$ и, наконец, $\varphi_{2,2}=1-(F_1/F_2)$.

3. Внутренняя поверхность F_2 сегмента длинного цилиндра и плоскость F_1, являющаяся основанием сегмента.

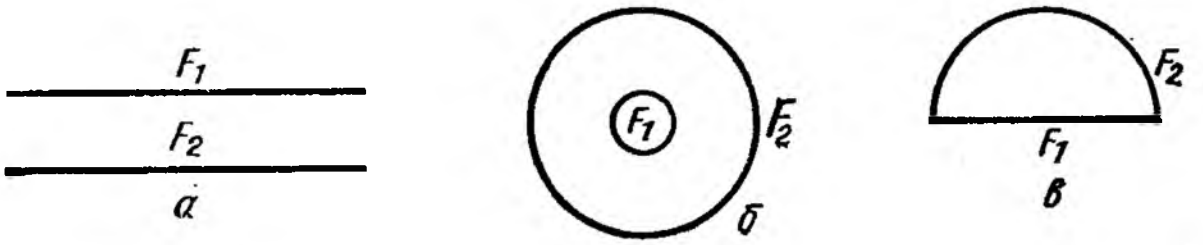


Рис. 31. Замкнутые системы из двух тел

Этот случай представляет собой некоторое подобие взаимного положения внутренней обмуровки печи и металла, заполняющего под печи. Повторив выкладки, приведенные для 2-го примера, получаем

$$\varphi_{1.2}=1;\ \varphi_{2.1}=F_1/F_2;\ \varphi_{2,2}=1-(F_1/F_2).$$

Угловыми коэффициентами, найденными расчетом, пользуются для решения практических задач.

Теплообмен излучением между серыми поверхностями, образующими замкнутую систему. Теплообмен между серыми поверхностями, образующими замкнутую систему, часто встречается на практике, причем теплообмен между серыми поверхностями, степень черноты которых меньше единицы, включает не только прямые потоки, но и отраженные. Если в состоянии теплообмена находится несколько серых поверхностей, то расчет значительно затруднен. Поэтому выведем общую формулу лучистого теплообмена только между двумя серыми поверхностями, воспользовавшись для этого методом сальдо-потока, разработанным советским ученым Г. Л. Поляком. Прежде всего уточним смысл некоторых терминов, для чего рассмотрим поверхность F, представленную на рис. 32, с температурой T и степенью черноты ε.

Рассмотрим, как происходит теплообмен у этой поверхности. К поверхности поступает падающий тепловой поток

$Q_{пад}$. Часть его поглощается поверхностью F и, следовательно, поглощенный поток $Q_{погл}=Q_{пад}\varepsilon$. Другая его часть отражается, и, следовательно, отраженный поток

$$Q_{отр}=Q_{пад}(1-\varepsilon).$$

Поскольку тело нагрето ($T>0$), оно излучает собственные лучи, образующие тепловой поток собственного излучения

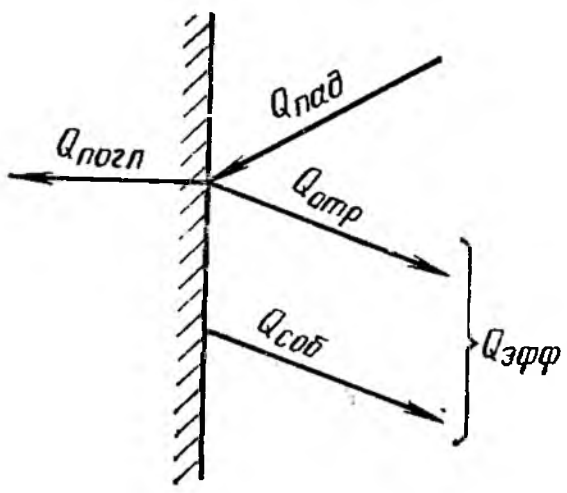


Рис. 32. Схема лучистых тепловых потоков около твердой поверхности

$$Q_{соб}=\varepsilon C_0(T/100)^4 F.$$

Сумма собственного излучения и отраженных потоков составляет эффективное излучение, т. е.

$$Q_{эф}=Q_{соб}+Q_{отр}.$$

Тело не только поглощает тепло $Q_{погл}$, но и отдает тепло в виде собственного излучения $Q_{соб}$. Поэтому можно говорить о результирующем тепловом потоке, или, иначе, о сальдо-потоке:

$$Q=Q_{погл}-Q_{соб}. \qquad (52)$$

Если $Q_{погл}>Q_{соб}$, то сальдо-поток имеет положительное значение; если $Q_{погл}<Q_{соб}$, то Q имеет отрицательное значение. Найдем связь между сальдо-потоком Q и эффективным излучением. Используем приведенное выше выражение (52). Учтя, что

$$Q_{погл}=Q_{пад}-Q_{отр} \text{ и } Q_{соб}=Q_{эф}-Q_{отр},$$

и подставив выражения для $Q_{погл}$ и $Q_{соб}$ в уравнение (53), получаем

$$Q=Q_{пад}-Q_{отр}-Q_{эф}+Q_{отр}=Q_{пад}-Q_{эф} \qquad (52')$$

или $Q_{эф}=Q_{пад}-Q$.

Однако $Q_{пад}=Q_{погл}/\varepsilon$ и тогда $Q_{эф}=(Q_{погл}/\varepsilon)-Q$.

По уравнению (52) $Q_{погл}=Q+Q_{соб}$. Следовательно:

$$Q_{эф}=\frac{Q+Q_{соб}}{\varepsilon}-Q=\frac{Q}{\varepsilon}-Q+\frac{Q_{соб}}{\varepsilon}$$

и окончательно

$$Q_{эф}=\left(\frac{1}{\varepsilon}-1\right)Q+\frac{1}{\varepsilon}Q_{соб}. \qquad (53)$$

Выражение (53) необходимо для дальнейших выкладок с целью получения расчетной формулы.

Так как мы выводим формулу для теплообмена излучением между двумя серыми замкнутыми поверхностями, прежде всего установим, какое количество тепла первое тело излучает на второе. Если эффективный поток от поверхности первого тела обозначим через $Q_{1,эф}$, то на второе тело будет падать часть этого потока, определяемая величиной углового коэффициента с тела первого на тело второе ($\varphi_{1,2}$), т. е. падающий тепловой поток на второе тело

$$Q_{2,пад} = Q_{1,эф}\,\varphi_{1,2}\,.$$

Аналогично этому можно написать, что падающий тепловой поток на первое тело

$$Q_{1,пад} = Q_{2,эф}\,\varphi_{2,1}\,.$$

Если $T_2 > T_1$, то количество тепла, которое первое тело будет получать от второго, соответствует сальдо-потоку Q_1, равному разности падающих тепловых потоков, т. е.

$$Q_1 = Q_{1,пад} - Q_{2,пад} = Q_{2,эф}\,\varphi_{2,1} - Q_{1,эф}\,\varphi_{1,2}\,.$$

Подставим в это выражение значение эффективных тепловых потоков по уравнению (53):

$$Q_1 = \left[\left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right) Q_2 + \frac{1}{\varepsilon_2} Q_{2,соб}\right] \varphi_{2,1} - \left[\left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right) Q_1 + \frac{1}{\varepsilon_1} Q_{1,соб}\right) \varphi_{1,2}\,. \qquad (54)$$

Но если рассматривается теплообмен между двумя телами в замкнутой системе, то сколько тепла отдаст второе тело, столько первое получит, т. е. $Q_1 = -Q_2$.

Заменив теперь в выражении (54) Q_2 на $-Q_1$, получаем одно уравнение с одним неизвестным Q_1, которое и решим относительно этого неизвестного:

$$Q_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right)\varphi_{1,2} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)\varphi_{2,1}} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} Q_{2,соб}\,\varphi_{2,1} - \frac{1}{\varepsilon_1} Q_{1,соб}\,\varphi_{1,2}\right). \qquad (55)$$

Если учесть, что

$$Q_{1,соб} = \varepsilon_1 C_0 (T_1/100)^4 F_1;\quad Q_{2,соб} = \varepsilon_2 C_0 \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 F_2;$$

$$F_1\varphi_{1,2} = F_2\varphi_{2,1}\,,$$

и подставить соответствующие выражения в уравнение (55), то получим

$$\left(\frac{1}{\varepsilon_2} Q_{2,\text{соб}}\, \varphi_{2,1}\, \frac{1}{\varepsilon_1} Q_{1,\text{соб}}\, \varphi_{1,2}\right) = C_0 \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 F_2 \varphi_{2,1} -$$

$$- C_0 \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 F_1 \varphi_{1,2} = C_0 \left[\left(\frac{T_2}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_1}{100}\right)^4\right] F_1 \varphi_{1,2}\,.$$

Следовательно, выражение для определения Q_1 можно представить в виде

$$Q_1 = \frac{C_0}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right)\varphi_{1,2} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)\varphi_{2,1}} \left[\left(\frac{T_2}{100}\right)^4 - \right.$$

$$\left. - \left(\frac{T_1}{100}\right)^4\right] F_1 \varphi_{1,2}\,,$$

или

$$Q_1 = C_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_2}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_1}{100}\right)^4\right] F_1 \varphi_{1,2}\,,$$

где $C_{\text{пр}}$ — приведенный коэффициент излучения, определяемый по уравнению

$$C_{\text{пр}} = \frac{C_0}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right)\varphi_{1,2} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)\varphi_{2,1}}\,. \qquad (56)$$

С использованием выражения (56) можно получить значения приведенных коэффициентов для конкретных случаев, рассмотренных в предыдущем разделе.

Так, для двух близко расположенных бесконечных плоскостей (пример 1, $\varphi_{1,2} = \varphi_{2,1} = 1$)

$$C_{\text{пр}} = \frac{C_0}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1}\,, \text{ но } \varepsilon_1 = C_1/C_0 \text{ и } \varepsilon_2 = C_2/C_0$$

и, следовательно:

$$C_{\text{пр}} = \frac{1}{1/C_1 + 1/C_2 - 1/C_0} \text{ или } \varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}\,.$$

Для примеров 2 и 3, когда $\varphi_{1,2}=1$, а $\varphi_{2,1}=F_1/F_2$, приведенный коэффициент излучения

$$C_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{C_1}+\frac{F_1}{F_2}\left(\frac{1}{C_2}-\frac{1}{C_0}\right)} \text{ или } \varepsilon_{\text{пр}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1}+\left(\frac{1}{\varepsilon_2}-1\right)\frac{F_1}{F_2}}.$$

Рассмотренный метод расчета применим для решения ряда технических задач теплообмена излучением в замкнутом пространстве (например, печи) между двумя телами.

Защита от излучения с помощью экранов. Для того чтобы ослабить лучистый поток, падающий на обслуживающий печь персонал, применяют тепловые экраны, выполняемые обычно из тонкого стального листа.

Предположим, что температура какой-либо теплоизлучающей поверхности равна T. Рядом с этой поверхностью помещен тонкий экран (рис. 33).

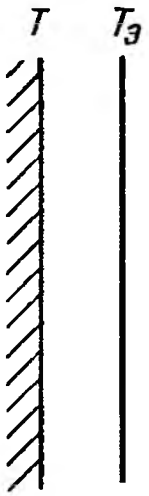


Рис. 33. Схема теплового экрана

Поверхность металлической обмуровки печи и поверхность экрана обычно весьма окислены, и поэтому их можно считать абсолютно черными, и тогда $C=C_э=C_0$. Площадь излучающей поверхности и площадь экрана равна F. Определим, насколько уменьшится тепловой поток излучением в результате применения экрана. Найдем прежде всего температуру экрана $T_э$. Для двух близко расположенных плоскостей применима формула

$$C_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}-\frac{1}{C_0}} \text{ или } \varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1}+\frac{1}{\varepsilon_2}-1}.$$

Так как в нашем случае $C_1=C_2=C_0$, то $C_{\text{пр}}=C_0$. Следовательно, тепловой поток, который получит экран от излучающей поверхности, равен, Вт

$$Q = C_0\left[\left(\frac{T}{100}\right)^4-\left(\frac{T_э}{100}\right)^4\right]F.$$

Но экран будет излучать в атмосферу цеха тепловой поток

$$Q = C_0 \left(\frac{T_э}{100}\right)^4 F.$$

Приравняем эти два выражения

$$C_0\left[\left(\frac{T}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_э}{100}\right)^4\right] F = C_0 \left(\frac{T_э}{100}\right)^4 F$$

и из этого равенства найдем, что

$$T_э = \sqrt[4]{\frac{1}{2} T^4}.$$

Используя полученное выражение для $T_э$, можно определить тепловой поток, излучаемый экраном в атмосферу цеха

$$Q = \frac{1}{2} C_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4 F.$$

Поскольку поверхность без экрана излучает тепловой поток Q_1, равный

$$Q_1 = C_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4 F,$$

то можно сделать вывод, что применение экрана уменьшило лучистый тепловой поток в два раза, т. е.

$$Q = Q_1/2.$$

Если установлено n экранов, то, рассуждая аналогичным путем, можно показать, что

$$Q_n = \frac{1}{n+1} Q_1,$$

где Q_n — тепловой поток, передаваемый излучением при наличии экранов; Q_1 — тепловой поток без экранов.

Если поверхность экранов не является черной, то приведенный коэффициент $\varepsilon_{пр}$ для числа экранов, равного n, может быть определен из выражения

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + 2\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\varepsilon_{э,i}} + \frac{1}{\varepsilon_2} - (n+1)},$$

где $\varepsilon_{э,i}$ — степень черноты каждого экрана.

Излучение в ослабляющей среде

В металлургической практике широко распространены такие случаи теплообмена излучением, когда излучающие поверхности разделены ослабляющей средой. Ослабляющей средой могут являться газы, излучающие и поглощающие тепловую энергию, а также газы с взвешенными в них частичками сажистого углерода и золы. В объемах, заполненных такой средой, проходящий лучистый поток будет ослабляться, так как частицы среды способны поглощать и рассеивать тепловую энергию. Наиболее часто встречаются такие случаи (газы, газы со взвешенными относительно мелкими частицами), для которых ослабление излучения происходит за счет поглощения, а рассеяние отсутствует вовсе или им можно пренебречь.

Закон Бугера—Бера. Согласно закону Бугера, относительное ослабление луча в слое среды пропорционально толщине этого слоя dx. Однако, согласно закону Бера, относительное изменение интенсивности луча в слое данной толщины пропорционально концентрации ослабляющего вещества μ. Отсюда следует объединенный закон Бугера—Бера

$$dJ_{\lambda,x}/J_{\lambda,x} = -k_\lambda \mu dx. \qquad (57)$$

Коэффициент пропорциональности k_λ характеризует способность частиц поглощать и рассеивать излучение волн длиной λ и называется спектральным коэффициентом ослабления.

Интегрированием выражения (57) можно найти интенсивность луча, прошедшего через слой толщиной S. Если k_λ и μ не зависят от x, то

$$J''_{\lambda,x} = J'_{\lambda,x} e^{-k_\lambda \mu S}, \qquad (58)$$

где $J'_{\lambda,x}$ и $J''_{\lambda,x}$ — интенсивность излучения в начале и конце слоя толщиной S.

Так как газовые среды практически не отражают падающее на них излучение ($R=0$), то, согласно определению, поглощательная способность равна отношению поглощенного потока к падающему:

$$a_{\lambda,x} = (J'_{\lambda,x} - J''_{\lambda,x})/J'_{\lambda,x}. \qquad (59)$$

Из выражений (58) и (59) следует, что для ослабляющей среды

$$a_{\lambda,x} = 1 - e^{-k_\lambda \mu S}. \quad (60)$$

Согласно закону Кирхгофа, для равновесной системы спектральные степень черноты и поглощательная способность равны. Поэтому можно записать

$$\varepsilon_{\lambda,x} = 1 - e^{-k_\lambda \mu S}. \quad (61)$$

Из формул (60) и (61) следует, что $a_{\lambda,x}$ и $\varepsilon_{\lambda,x}$ тем больше, чем больше произведение μS.

Поскольку одни и те же частицы реагируют на излучение волн разных длин неодинаково, то закон Бугера — Бера не всегда справедлив для интегрального излучения. Ослабление последнего происходит преимущественно в результате ослабления отдельных волн; другие волны могут вообще не ослабляться.

Закон Бугера — Бера достаточно точно соблюдается лишь при малых концентрациях поглощающего вещества, когда взаимодействие между частицами практически отсутствует. При больших концентрациях k_λ зависит от μ, а следовательно, степень черноты и поглощательная способность слоя зависят не только от μS, но и от μ.

Для упрощения практических расчетов обычно вводят понятие серый газ, т. е. такой газ, поглощательная способность (следовательно, и ε) которого во всех частях спектра одинакова.

Излучение газов

Спектр поглощения газов является селективным. Это означает, что газы поглощают тепловую энергию в определенных интервалах длин волн $\Delta\lambda$, определяющих так называемые полосы поглощения. Как следует из закона Кирхгофа, газы могут испускать лучи только с теми длинами волн, что и лучи, которые они поглощают. Поэтому излучение газов является также селективным. Не все газы практически излучают и поглощают тепловые лучи. Спектр встречающихся в составе печной атмосферы одно- и двухатомных газов (кислорода, азота, окиси углерода и др.) состоит из очень узких полосок, поэтому общее количество энергии, которое излучают эти газы, очень невелико, и практически можно считать, что они совсем не излучают тепла. Вместе с тем эти газы являются также лучепрозрачными и практически не нагреваются при прохождении через них лучей от других тел.

Трехатомные и многоатомные газы, наоборот, могут излучать и поглощать большое количество тепла. Наибольшее практическое значение имеет излучение углекислоты (CO_2) и водяных паров (H_2O), поскольку из них (наряду с азотом) в основном состоят дымовые газы. Спектры этих газов очень сложны. Для CO_2 обычно принимают три полосы излучения и поглощения, соответствующие следующим интервалам длин волн, мкм: 2,3—3,02; 4,01—4,80 и 12,5—16,5.

Для H_2O эти интервалы длин волн соответственно равны 2,24—3,27; 4,8—8,5 и 12,0—25,0 мкм.

Поглощение газами тепловой энергии зависит от температуры и концентрации газа, выражаемой его парциальным давлением и эффективной толщиной газового слоя, т. е. $A_г = f(T; pS_{эф})$.

Сохраняя единообразие записи с твердыми телами, можно написать то же самое для степени черноты газов:

$$\varepsilon_г = f(T;\ p\ S_{эф}),\ \text{поскольку}\ A_г = \varepsilon_г.$$

Излучение газами тепловой энергии, как показали исследования, для CO_2 пропорционально $T^{3,5}$, а для H_2O пропорционально T^3. Применение различных законов излучения для твердых и газообразных тел очень сильно затруднило бы расчет. Поэтому для практических расчетов теплового излучения газов применяют также закон Стефана — Больцмана, причем степень черноты газа также характеризует его излучательную способность. Таким образом, количество тепла, которое излучает газ на 1 м^2 окружающей его поверхности, в единицу времени может быть найдено из выражения

$$q = \varepsilon_г C_0 (T_г/100)^4.$$

Погрешность, вносимая допущением о том, что $q_г = f(T^4)$, учитывается при определении $\varepsilon_г$.

Определение степени черноты газов. Как указывалось выше, степень черноты газов зависит от температуры газа, его парциального давления и средней длины пути луча. Обычно температура газов известна. Парциальное давление газов можно получить из расчета горения топлива. Так, если в продуктах сгорания содержится 10 % CO_2 и 15 % H_2O, то, следовательно, их парциальные давления соответственно равны 0,1 и 0,15 общего давления печной среды, которое равно практически давлению атмосферы.

Среднюю длину луча можно определить по формуле

$$S_{эф} = \eta\,(4V/F), \qquad (62)$$

где V — объем, заполненный излучающим газом, м³; F — поверхность всех стенок, ограничивающих этот объем, м²; η — коэффициент, обычно принимаемый равным 0,9.

Для определения степени черноты газов пользуются графиками, приведенными на рис. 34—36, с помощью которых находят степень черноты ε_{CO_2} и условную степень чер-

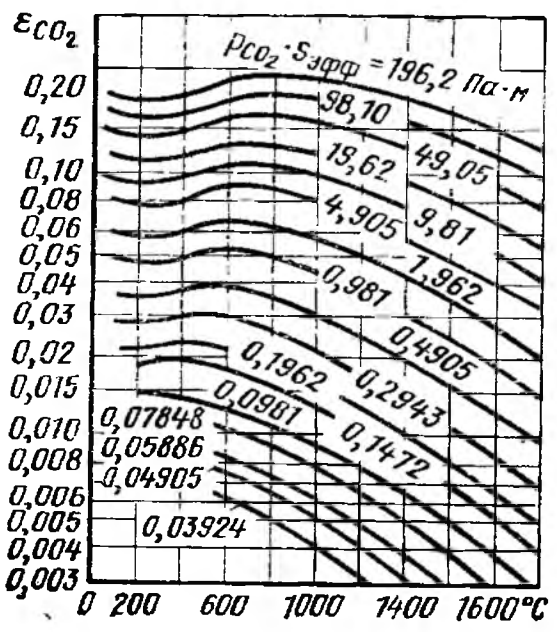


Рис. 34. Номограмма для определения степени черноты CO_2

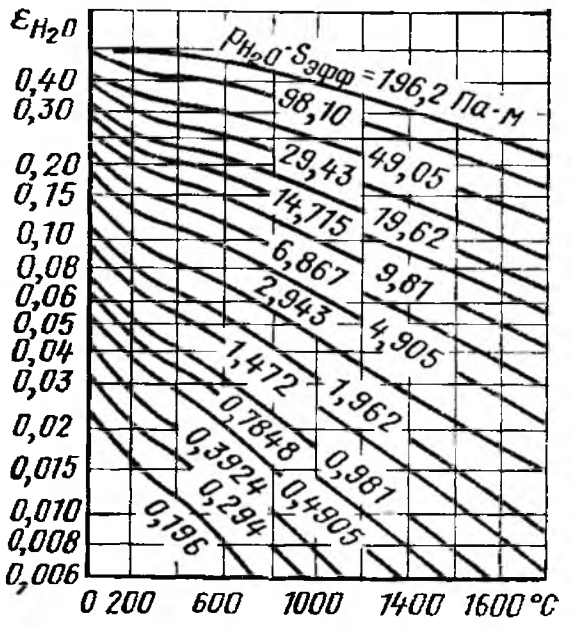


Рис. 35. Номограмма для определения степени черноты H_2O

ноты водяных паров ε'_{H_2O}. Степень черноты водяных паров необходимо умножить на поправку, которую находят по рис. 36, и в результате $\varepsilon_{H_2O} = \varepsilon'_{H_2O}\beta$.

Степень черноты газов находят суммированием полученных степеней черноты отдельных газов:

$$\varepsilon_г = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O} = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon'_{H_2O}\beta.$$

Теплообмен излучением между излучающим газом и стенками. Нагретый газ излучает на 1 м² поверхности окружающих его стенок количество тепла, определяемое по выражению

$$q_г = \varepsilon_г C_0 (T_г/100)^4.$$

С единицы поверхности стенок излучается тепловой поток с плотностью

$$q_{ст} = \varepsilon_{ст} C_0 (T_{ст}/100)^4.$$

Газ и стенки поглощают только часть лучей в соответствии с их степенями черноты. Часть лучей газами будет пропущена и попадает снова на стены, которые определен-

ную долю поглотят, а остальное снова отразят и т. д. Проанализировав весь ход этих многократных поглощений, отражений и пропусканий лучистых потоков, Г. Л. Поляк нашел следующую формулу для расчета теплового потока, передаваемого излучением от газов к стенкам (или от стенок к газу, если $T_г < T_{ст}$):

$$\Theta = \frac{C_0}{(1/\varepsilon_г) + (1/\varepsilon_{ст}) - 1}\left[\left(\varepsilon_г/\varepsilon_г^{ст}\right)\left(T_г/100\right)^4 - \right.$$
$$\left. - (T_{ст}/100)^4\right] F, \qquad (63)$$

где $\varepsilon_г$ — степень черноты газа при $T_г$, К; $\varepsilon_г^{ст}$ — то же, газа при $T_{ст}$, К; $\varepsilon_{ст}$ — то же, стенки при $T_{ст}$, К.

Теплообмен в замкнутой системе из двух поверхностей, разделенных ослабляющей средой (серый газ). Рассмотрим случай теплообмена двух серых поверхностей (см. рис. 31, *в*), образующих замкнутый объем, заполненный серым газом. Допустим, что поверхность F_2 адиабатная. Это означает, что эффективное излучение этой поверхности равно падающему на нее лучистому потоку. Поверхность F_1 по выбранной схеме представляет собой тепловоспринимающую поверхность (поверхность нагреваемого материала). Поэтому целью данного вывода является определение результирующего потока поверхности F_1.

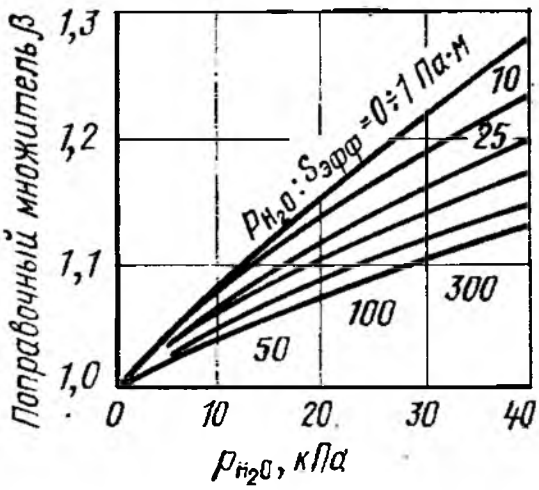


Рис. 36. Номограмма для определения поправочного коэффициента β

Падающий на поверхность F_1 поток равен излучению газа $\varepsilon_г \sigma_0 F_1 T_г^4$ плюс эффективное излучение поверхности F_2, попадающее на поверхность F_1 и ослабленное при прохождении через газ, $Q_{2,эф}\Phi_{2,1}(1-a_г)$.

Результирующий поток равен разности между падающим потоком и эффективным излучением. Таким образом, результирующий поток поверхности F_1

$$Q_{1,рез} = \varepsilon_г \sigma_0 F_1 T_г^4 + Q_{2,эф}\Phi_{2,1}(1 - a_г) - Q_{1,эф}. \qquad (64)$$

Эффективное излучение поверхности F_1 можно найти по формуле (53):

$$Q_{1,эф} = \sigma_0 F_1 T_1^4 + Q_{1,рез}\left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right).$$

Для нахождения $Q_{2,эф}$ воспользуемся тем, что поверхность F_2 адиабатная и ее эффективное излучение равно падающему потоку. Последний складывается из излучения газа на поверхность F_2, эффективного излучения поверхности F_1, ослабленного газом, и части $(\varphi_{2,2}=1-\varphi_{2,1})$ эффективного потока, излучаемого поверхностью F_2 самой на себя, также ослабленного при прохождении через газ. Таким образом,

$$Q_{2,эф} = \varepsilon_г \sigma_0 F_2 T_г^4 + Q_{1,эф}(1-\varepsilon_г) + Q_{2,эф}(1-\varphi_{2,1})(1-\varepsilon_г)$$

или

$$Q_{2,эф} = \frac{\varepsilon_г \sigma_0 F_2 T_г^н + Q_{1,эф}(1-\varepsilon_г)}{1-(1-\varphi_{2,1})(1-\varepsilon_г)}.$$

Подставляя значения $Q_{2,эф}$ и $Q_{1,эф}$ в уравнение (64) и учитывая, что для серого газа $a_г=\varepsilon_г$, после необходимых алгебраических преобразований получаем

$$Q_{1,рез} = \varepsilon_г \varepsilon_1 \frac{\varphi_{2,1}(1-\varepsilon_г)+1}{\varphi_{2,1}(1-\varepsilon_г)[\varepsilon_1+\varepsilon_г(1-\varepsilon_1)]+\varepsilon_г} \sigma_0 F_1 (T_г^4 - T_1^4). \quad (65)$$

Выражение (65) называют формулой Тимофеева В. Н. и широко применяют для расчета теплообмена в промышленных печах и топках котлов.

Сложный теплообмен излучением и конвекцией

Во всех устройствах, заполненных двигающимся газом, при наличии разности температур между газом и ограничивающими его поверхностями всегда происходит конвективный перенос тепла.

Допустим, требуется определить тепловой поток, проходящий через омываемую газом поверхность F, температура которой T. Приведенный коэффициент излучения газа на поверхность F равен $\sigma_{пр}$; коэффициент конвективной теплоотдачи к поверхности F равен $\alpha_к$.

Тепловой поток в результате излучения

$$Q_л = \sigma_{пр}(T_г^4 - T^4) F.$$

Тепловой поток в результате конвекции

$$Q_к = \alpha_к (T_г - T) F.$$

Суммарный поток тепла

$$Q = Q_л + Q_к = \sigma_{пр}(T_г^4 - T^4) F + \alpha (T_г - T) F =$$

$$= (T_г - T) F \left[\frac{\sigma_{пр}(T_г^4 - T^4)}{T_г - T} + \alpha_к \right].$$

Величину $\frac{\sigma_{пр}(T_г^4 - T)}{T_г - T} = \alpha_л$ с размерностью α называют коэффициентом теплообмена излучением, $\alpha_к$ — коэффициентом теплоотдачи конвекцией и $\alpha_\Sigma = \alpha_л + \alpha_к$ — суммарным коэффициентом теплоотдачи.

Количество тепла, переданное совместно излучением и конвекцией, определяется по формуле

$$Q = \alpha_\Sigma (T_г - T) F. \qquad (66)$$

Формулой (66) часто пользуются в практических расчетах. Однако надо помнить, что если $\alpha_к$ незначительно зависит от температуры, то $\alpha_л$ существенно возрастает с увеличением температуры.

Глава III НАГРЕВ МЕТАЛЛА

§ 1. Окисление и обезуглероживание стали

Общие сведения

Нагрев металла — это процесс либо предшествующий обработке металла давлением (прокатке, ковке), либо являющийся частью основного процесса термической обработки металла. Нагрев металла имеет важное значение, так как от его качества зависят качество конечной продукции и работа прокатного (кузнечного) оборудования. Нагрев металла проводят по определенной технологии, характер которой зависит от цели нагрева.

Процесс нагрева металла сопровождается некоторыми нежелательными явлениями, из которых наиболее характерными являются его окисление (угар) и обезуглероживание.

Необходимо отметить, что время нагрева, являющееся важным фактором технологии нагрева, определяет основные размеры рабочего пространства нагревательных печей.

Нагрев стали в печах прокатных, кузнечных и некоторых термических цехов проводят в атмосфере продуктов сгорания топлива. При этом происходит взаимодействие окружающих нагреваемую сталь газов с железом, углеродом и легирующими элементами, которое приводит к окислению и обезуглероживанию ее поверхности.

Вследствие окисления возникают невозвратимые потери металла, составляющие при каждом нагреве от 1—2 (в термических печах) до 5 % (в кузнечных печах). При этом увеличивается также трудоемкость последующей обработки изделий в связи с необходимостью удаления образовавшейся окалины. Повышенная твердость окалины вызывает более быстрый износ инструментов и увеличение брака при ковке и прокатке. Вследствие того что окалина по сравнению со сталью имеет меньшую теплопроводность, время нагрева металла в печах увеличивается, что приводит к снижению их производительности при прочих равных условиях; осыпающаяся окалина образует шлаковые наросты на

поду печей и вызывает необходимость более частых ремонтов и повышенный расход огнеупорных материалов.

Обезуглероживание поверхностного слоя металла ухудшает механические свойства стали, понижая ее пределы прочности, текучести и выносливости. Для получения заданных механических свойств изделия приходится удалять обезуглероженный слой (до 2 мм), что, естественно, увеличивает трудоемкость обработки изделия. Особенно нельзя допускать обезуглероживания изделий, которые в последующем подлежат поверхностной термической обработке.

При выборе режимов нагрева стали в печах необходимо принимать во внимание оба указанных выше процесса, так как они тесно связаны между собой.

Окисление стали

Окисление стали представляет собой процесс взаимодействия окисляющих газов с железом и легирующими элементами. Этот процесс определяется не только химическими реакциями окисления, но и закономерностями образования окисной пленки, которая по мере ее роста все более и более изолирует сталь от окислительных газов. Поэтому скорость роста окалины зависит не только от протекания химического процесса окисления стали, но и от условий передвижения ионов металла (от металла и внутренних слоев окалины к наружным) и атомов кислорода (с поверхности металла к его внутренним слоям), т. е. от условий протекания физического процесса двусторонней диффузии. Скорость диффузии какого-либо вещества выражается первым законом Фика:

$$m = -D\,(dc/dx),$$

где m — количество вещества, диффундирующего через единицу сечения в единицу времени, кг/(м²·с); D — коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом диффузии, м²/с.

Отношение dc/dx показывает, насколько изменяется концентрация диффундирующего вещества c при изменении толщины слоя, в котором происходит диффузия на величину dx. Таким образом, скорость диффузии увеличивается с возрастанием коэффициента диффузии и разности концентраций диффундирующего компонента. Коэффициент диффузии зависит от физических свойств взаимодействующих веществ и температуры.

Диффузионный механизм образования окалины обусловливает трехслойную структуру слоя оксидов, образующегося при нагреве стали в печах. Во внутреннем слое (примыкающем к металлу) содержится больше всего монооксида железа, образующегося по реакции

$$Fe + 0{,}5O_2 = FeO.$$

Средний слой — магнетит Fe_3O_4 — образуется при последующем окислении монооксида железа по реакции

$$3FeO + 0{,}5O_2 = Fe_3O_4.$$

В этом слое железа содержится меньше и в сравнении с первым слоем он обогащен кислородом, хотя и не в такой мере, как наиболее богатый кислородом Fe_2O_3, образующийся в третьем слое по реакции

$$2Fe_3O_4 + 0{,}5O_2 = 3Fe_2O_3.$$

Состав каждого из трех слоев не постоянен по сечению, а постепенно изменяется в результате взаимодействия с примесями компонентов окалины, более богатых кислородом вблизи поверхности.

Окисление стали при ее нагреве в печах происходит не только благодаря ее взаимодействию со свободным кислородом, но и со связанным кислородом, входящим в состав продуктов полного сгорания топлива в топливных печах: CO_2, H_2O и SO_2. Эти газы, так же как и O_2, называют окислительными в отличие от восстановительных CO, H_2 и CH_4. Азот, обычно присутствующий в продуктах сгорания или в воздухе, является нейтральным газом. Атмосфера в большей части топливных печей представляет собой смесь N_2, CO_2, H_2O, SO_2 с небольшим количеством свободного кислорода, поскольку только при полном сгорании топлива в печи развивается требуемая температура. Наличие большого количества восстановительных газов в печи свидетельствует о неполном сгорании и в обычных печах недопустимо, так как топливо используется не рационально. Этим объясняется то обстоятельство, что атмосфера обычных топливных печей имеет окислительный характер.

Окислительная и восстановительная способность всех перечисленных газов по отношению к стали зависит от их концентрации в атмосфере печи и температуры. Увеличение доли нейтрального газа в печной атмосфере уменьшает скорость окисления. Скорость окисления очень сильно зависит от содержания SO_2 и H_2S в печной атмосфере. Присутствие в печных газах даже очень небольших количеств SO_2 резко увеличивает скорость окисления, так как при температуре, превышающей 1373 К, на поверхности стали образуются легкоплавкие соединения из оксидов и сульфидов железа, ускоряющие процесс образования окалины.

Соединение H_2S может присутствовать и в восстановительной атмосфере; его воздействие на металл (наряду с SO_2) приводит к увеличению содержания серы в поверхностном слое. Качество стали при этом сильно ухудшается, причем особенно вредное влияние сера оказывает на легированные стали, так как они поглощают ее в большей мере, чем простые углеродистые стали, а никель образует с серой легкоплавкую эвтектику. Вредное влияние серы уменьшается при наличии восстановительных газов в атмосфере печи. При этом следует отметить, что вредное воздействие H_2S на сталь значительно слабее, чем влияние SO_2.

Толщина образующегося слоя оксидов на поверхности стали и его структура зависят не только от атмосферы, в которой нагревается металл, но и от ряда других факторов, к которым в первую очередь относятся температура и время. Чем выше температура металла, тем большее количество окалины образуется за одно и то же время его пребывания в печи. Экспериментально установлено, что скорость роста пленки оксидов $dx/d\tau$, как и во всяком диффузионном процессе, связана с температурой следующим уравнением:

$$dx/d\tau = Ae^{-Q/(RT)},$$

где R — газовая постоянная; T — абсолютная температура; Q и A — постоянные величины, зависящие от природы пленки оксидов и условий процесса.

Образование окалины при температуре до 873 К происходит с очень малой скоростью, а при температуре свыше 898—923 К скорость окисления стали резко возрастает и увеличивается согласно приведенному выше уравнению по экспоненциальному закону. Время пребывания металла в печи оказывает очень сильное влияние на количество образующейся окалины. Увеличение времени нагрева до заданной температуры приводит к росту слоя окалины, хотя скорость окисления несколько падает со временем вследствие увеличения толщины слоя и, следовательно, уменьшения скорости диффузии через него ионов железа и атомов кислорода. Время нагрева до заданной температуры может быть сокраще-

но увеличением температуры в печи (если получающаяся при этом скорость нагрева позволяет вести процесс без возникновения опасных напряжений в металле), что способствует уменьшению количества образующейся окалины.

Факторы, влияющие на скорость диффузии кислорода к поверхности нагреваемой стали из атмосферы печи, не оказывают существенного влияния на рост слоя оксидов. Это обусловлено тем, что диффузионные процессы в слое окалины протекают медленно и являются определяющими. Поэтому, например, увеличение скорости движения газов над поверхностью металла выше 0,1 м/с (скорость движения газов в печах обычно больше) не приводит к ускорению окисления стали. Однако движение продуктов сгорания в общем может оказывать заметное влияние на окисление, так как местные перегревы металла, обусловленные неравномерным полем температур газов в печи (это может быть вызвано большим углом наклона горелок, их неправильным размещением по высоте и длине печи и т. д.), неизбежно приводят к местному интенсивному окалинообразованию.

Условия перемещения стальных заготовок и деталей внутри печей, состав стали и качество ее поверхности также оказывают заметное влияние на скорость образования окалины. Так, при перемещении металла в печи может происходить отслаивание и отделение окалины, что способствует более быстрому последующему окислению незащищенных поверхностных участков. Состояние поверхности металла играет важную роль, так как образующийся на гладкой поверхности слой оксидов оказывается более плотным и прочным и защищает сталь от дальнейшего окисления. Наличие в стали некоторых легирующих элементов (Cr, Ni, Si и др.) может обеспечить образование тонкой и плотной, хорошо прилегающей к поверхности металла пленки оксидов, надежно предупреждающей последующее окисление. Такие стали, называемые жаростойкими, хорошо сопротивляются окислению при нагреве.

Следует отметить, что сталь с большим содержанием углерода в меньшей мере подвержена поверхностному окислению, чем малоуглеродистая. Углерод, содержащийся в стали, окисляясь, превращается в CO_2, диффундирующую к поверхности и препятствующую окислению железа. Окисление стали сильно увеличивается при плавлении окалины.

Количество образовавшейся окалины можно определить по изменению массы окислившегося образца двумя способами: 1) по увеличению массы образца, покрытого окалиной (увеличение массы характеризует количество кислорода, входящего в состав окалины), и 2) по уменьшению массы образца после полного снятия слоя окалины (уменьшение массы показывает, какое количество железа входило в состав снятой окалины). Кроме этого, иногда проводят изучение микро- и макроструктуры слоя образовавшейся окалины и определяют ее химический состав.

Обезуглероживание стали

Обезуглероживание стали при нагреве происходит в результате взаимодействия печных газов с углеродом, который находится в стали или в виде твердого раствора, или в виде карбида железа Fe_3C. Реакции обезуглероживания в результате взаимодействия различных газов с карбидом железа следующие:

$$Fe_3C + H_2O = 3Fe + CO + H_2; \quad 2Fe_3C + O_2 = 6Fe + 2CO;$$

$$Fe_3C + CO_2 = 3Fe + 2CO; \quad Fe_3C + 2H_2 = 3Fe + CH_4.$$

Аналогичные реакции протекают при взаимодействии этих газов с углеродом, находящимся в твердом растворе. Установлено, что процесс обезуглероживания при взаимодействии газов с карбидом железа происходит при его предварительной диссоциации.

Скорость обезуглероживания определяется не только константами скорости записанных выше химических реакций, но также условиями процесса двусторонней диффузии.

Как константы скорости химических реакций, так и коэффициенты диффузии увеличиваются с повышением температуры. Поэтому глубина обезуглероженного слоя возрастает с увеличением температуры нагрева.

К числу газов, входящих в состав печной атмосферы и вызывающих обезуглероживание, относятся H_2O, CO_2, O_2 и H_2. Наиболее сильным обезуглероживающим воздействием на сталь обладает H_2O, а наиболее слабым H_2. Обезуглероживающая способность CO_2 увеличивается с ростом температуры, а обезуглероживающая способность сухого H_2 уменьшается. Водород в присутствии водяных паров оказывает очень сильное обезуглероживающее воздействие на поверхностный слой стали.

Степень обезуглероживания и глубину обезуглероженного слоя можно определить несколькими способами, из которых наиболее распространенными являются следующие: измерение твердости поверхности образца до нагрева и после него в данной атмосфере (твердость зависит от содержания углерода) и анализ микроструктуры, выявляющий картину происшедших в стали превращений. Возможно проведение химических анализов последовательно срезаемых слоев металла, а также нахождение изменения его массы.

Защита стали от окисления и обезуглероживания

Вредное влияние окисления и обезуглероживания стали при нагреве на ее качество вызывает необходимость принимать меры, предупреждающие эти явления. Наиболее полная защита поверхности стали достигается в печах, где исключается воздействие на нее окисляющих и обезуглероживающих газов. К таким печам относятся соляные и металлические ванны, а также печи, где нагрев ведется в контролируемой атмосфере. В печах подобного типа либо от газов изолируется нагреваемый металл, обычно закрываемый специальным герметичным муфелем, либо само пламя помещается внутрь радиационных труб, тепло от которых передается нагреваемому металлу без его контакта с окисляющими и обезуглероживающими газами. Рабочее пространство таких печей заполняют специальными атмосферами, состав которых выбирают в зависимости от технологии нагрева и марки стали. Защитные атмосферы приготовляют отдельно в специальных установках.

В последнее время широкое распространение получает способ создания безокислительной атмосферы непосредственно в рабочем пространстве печей без муфелирования металла или пламени. Это достигается при неполном сжигании топлива (с коэффициентом расхода воздуха 0,5—0,6). В состав продуктов сгорания при этом входят H_2 и CO наряду с продуктами полного сгорания H_2O и CO_2. При определенном соотношении этих газов в смеси нагрев стали происходит без окисления ее поверхности.

Уменьшение окалинообразования может быть достигнуто также в результате сокращения времени нагрева металла, что осуществляют установлением наиболее рационального теплового и температурного режимов работы печей.

§ 2. Основы рациональной технологии нагрева стали

Процессы, протекающие внутри нагреваемого металла

Важнейшими показателями процесса нагрева металла являются температура и скорость нагрева. Температурой нагрева называют конечную температуру, при которой металл выдают из печи и которая определяется целями дальнейшей обработки металла. Скорость нагрева — это изменение температуры металла во времени.

При термообработке температуру нагрева выбирают в соответствии с видом термообработки и критическими температурами, характерными для стали данной марки.

Обработка металла давлением требует такой температуры нагрева, при которой металл обладает необходимыми пластическими свойствами. Температуру нагрева металла следует выбирать с учетом того, какая минимальная температура допустима в конце обработки. На скорость нагрева накладывают ограничения те процессы, которые протекают внутри металла в процессе его нагрева. При термической обработке эти ограничения связаны со структурными изменениями металла; при нагреве перед обработкой давлением в металле возможны большая неравномерность нагрева по толщине металла и как следствие возникновение недопустимых внутренних напряжений. Чем выше скорость нагрева металла, тем больше перепад температур по толщине металла и тем значительнее возникающие при нагреве температурные напряжения.

Перепад температур связан со скоростью нагрева следующим выражением:

$$\Delta T = T_{\text{пов}} - T_{\text{ц}} = C_{\text{н}} S^2/(2a),$$

где $C_{\text{н}}$ — скорость нагрева, К/с; S — толщина металла, м.

Температурные напряжения в металле опасны до возникновения в нем пластических свойств. Для стали напряжения опасны в интервале температур 273—773 К. При температуре выше 773 К напряжения исчезают в результате возникновения пластической деформации. При нагреве малоуглеродистой стали, обладающей высокой пластичностью, возникающие напряжения не опасны даже при температурах ниже 773 К. Если толщина нагреваемого материала незначительна (например, у листа), то значительный перепад температур, а следовательно, и напряжения возникнуть не могут.

Таким образом, при нагреве углеродистых и легированных сталей в интервале температур от 273 до 773 К возни-

кающие напряжения не должны превышать максимально допустимых. Иными словами, скорость нагрева следует выбирать так, чтобы не возникали чрезмерные, недопустимые температурные напряжения, которые способны вызвать разрушение металла.

За допустимое напряжение следует принимать истинное сопротивление разрыву, на основании которого можно определить допустимую скорость нагрева.

Наибольшие по абсолютной величине напряжения сжатия, наблюдающиеся на поверхности нагреваемого металла в форме пластины, могут быть определены по формуле, Па

$$\sigma = \frac{\beta E}{1-\nu}\frac{C_{\text{н}} S^2}{3a} = \frac{\beta E}{1-\nu}\frac{2}{3}\Delta T = 0{,}95\beta E\Delta T, \qquad (67)$$

где β — коэффициент линейного расширения, 1/К; E — модуль упругости, Па; ν — пуассоново отношение; для стали принято $\nu = 0{,}3$; $C_{\text{н}}$ — скорость нагрева, К/с; S — толщина пластины, м; a — коэффициент температуропроводности, м²/ч; ΔT — перепад между температурой поверхности и центра в нагреваемом материале, К.

Если в формуле (67) σ принять за допускаемое напряжение $\sigma_{\text{д}}$, то для определения допустимой скорости нагрева стали получаем выражение

$$C_{\text{н}} = \frac{2{,}1a\sigma_{\text{д}}}{\beta E S^2}. \qquad (68)$$

Из формулы (68) вытекает, что допустимая разность температур

$$\Delta T_{\text{д}} = \frac{1{,}05\sigma_{\text{д}}}{\beta E}.$$

Для того чтобы уменьшить перепад температур по толщине металла и прогреть его более равномерно, осуществляют выдержку (томление), при которой температура поверхности металла не повышается, а тепло, поступающее на его поверхность, проникает внутрь и способствует повышению температуры его центра.

Основные положения рациональной технологии нагрева стали

На практике часто пользуются значениями температуры и времени (продолжительности) нагрева, а не скорости нагрева, поскольку при помощи этих параметров удобнее наблюдать и контролировать режим нагрева металла. Выбрать (разработать) рациональную технологию нагрева стали — это значит обеспечить нагрев металла в опти-

мальных условиях с точки зрения интенсивности и качества нагрева.

Условия, в которых происходит нагрев металла, можно разделить на две группы:

1. Условия, определяющие внешний теплообмен, т. е. теплоотдачу от печных газов и обмуровки к поверхности металла. К ним относят: температуру печи, металла в начале и конце периода нагрева, излучательную способность печных газов и обмуровки, размеры рабочего пространства печи.

2. Условия, определяющие внутренний (в металле) теплообмен, т. е. характеризующие передачу тепла теплопроводностью от поверхности металла внутрь него. К ним относят: теплопроводность и теплоемкость металла, его толщину и химический состав.

Количественное влияние перечисленных факторов на время нагрева рассматривается в гл. II. Здесь рассмотрим два дополнительных фактора внешнего теплообмена, заметно влияющих на нагрев металла: расположение заготовок в печи и изменение степени черноты металла в процессе его нагрева.

От расположения заготовок на поду печи в процессе их нагрева зависит, какая часть поверхности каждой заготовки способна воспринимать тепло. Возможны такие случаи, когда заготовки в той или иной мере экранируют одна другую и тем самым уменьшают общую тепловоспринимающую поверхность металла, что приводит к увеличению времени нагрева металла.

В прокатных печах с толкателями (методические печи) заготовки лежат, тесно соприкасаясь одна с другой, и могут обогреваться с одной или двух сторон, что приводит к увеличению времени нагрева.

В кузнечных печах камерного типа заготовки должны быть расположены на некотором расстоянии одна от другой, поскольку это благоприятно влияет на их нагрев.

Время нагрева заготовок при отношении их длины к толщине более трех не зависит от длины заготовок. При длине заготовки меньше трех диаметров (размеров ширины) следует учитывать нагрев с торцов заготовки. Если принять за единицу время нагрева заготовки, у которой длина равна трехкратной толщине, то при отношении длины заготовки к толщине, равном 2, коэффициент сокращения времени нагрева составит 0,8, а при отношении, равном 1, он будет равен 0,71.

Степень черноты поверхности металла в расчетах вре-

мени нагрева обычно принимают постоянной. В действительности степень черноты в процессе нагрева металла в пламенных печах претерпевает изменения, связанные с образованием окалины.

Проведенные исследования показали, что при нагреве стали в интервале температур 573—723 К происходит быстрое увеличение степени черноты на 80—90 % независимо от качества обработки поверхности перед нагревом. Это изменение степени черноты заметно влияет на время нагрева металла, вызывая ускорение нагрева образцов с черной окисленной поверхностью.

Таким образом, комбинируя условия внешнего и внутреннего теплообмена, можно разработать оптимальные условия нагрева, т. е. можно выбрать рациональную технологию нагрева металла.

В практических условиях встречается одно-, двусторонний, а иногда и многосторонний (в нагревательных колодцах) нагрев металла.

При дву- или многостороннем нагреве процесс ускоряется и его можно вести с меньшим перепадом температур по сечению металла, в результате чего обеспечивается большая равномерность нагрева.

Равномерность — весьма важный показатель нагрева металла. Равномерно нагретый металл имеет одинаковые пластические свойства и равномерно деформируется при обработке давлением.

В некоторых случаях применяют режимы нагрева в несколько ступеней.

Одноступенчатый нагрев применяют тогда, когда в печи поддерживают одинаковую температуру по всему ее объему и металл помещается сразу в среду с весьма высокой температурой. Такой метод нагрева применим для тонкого металла (листа, сутунок и т. п.), в котором не могут возникнуть значительный перепад температур и высокие температурные напряжения.

Часто такой режим применяют для нагрева металла при горячей посадке, т. е. такого металла, который при посадке в печь имеет достаточно высокую температуру..

При таком режиме нагрева в случае термической обработки металла иногда делают выдержку для полного завершения внутренних превращений в этом металле.

Двухступенчатый нагрев обычно складывается из периодов предварительного и интенсивного нагревов. Этот режим применяют для изделий из углеродистой и легированной стали значительной толщины.

Зона предварительного нагрева печи характеризуется относительно низкой температурой, что позволяет осуществлять нагрев в интервале 273—773 К с допустимой скоростью, без возникновения чрезмерных температурных напряжений.

В зоне интенсивного нагрева металл догревается до конечной температуры обязательно при достаточной равномерности нагрева (не более 200 К на 1 м толщины). Если при двухступенчатом режиме достаточная равномерность нагрева не обеспечивается, то необходимо добавить третью ступень нагрева.

В трехступенчатый режим нагрева, кроме рассмотренных выше двух степеней, входит еще и третья ступень — период выдержки при нагреве крупных заготовок. Назначение этого периода заключается в том, чтобы, не увеличивая температуры поверхности металла, прогреть его по толщине, т. е. уменьшить температурный перепад, возникший в зоне интенсивного нагрева.

Невыполнение необходимых технологических требований нагрева может привести к неблагоприятным последствиям. Это в первую очередь относится к правильному выбору температуры нагрева. Чрезмерное повышение температуры нагрева металла ведет к излишнему росту зерна, увеличивает угар и может вызвать также перегрев или пережог металла.

Перегрев металла наступает при таком значительном укрупнении зерен, когда связь между ними ослабевает, механическая прочность металла падает и становится возможным образование в нем трещин. Перегретый металл можно исправить нормальным отжигом до температуры, несколько превышающей температуру Ac_3. Пережог исправить нельзя, и такой металл отправляют в переплавку. При пережоге кислород проникает внутрь металла и как следствие этого происходит окисление и оплавление его зерен. В результате пережога настолько падает прочность металла, что он совершенно не выдерживает механической обработки. Практикой установлено, что температура нагрева при обработке давлением должна быть на 100—150 К ниже температуры, отвечающей кривой солидуса диаграммы Fe—C.

§ 3. Расчет нагрева металла

Характеристика методов расчета нагрева

Теоретической базой разработки методов расчета нагрева металла являются решения основных уравнений теплопроводности при различных краевых условиях. Наиболее широкую практическую реализацию имеют краевые условия III рода. Большую роль в расчетах времени нагрева металла играет критерий Bi. Напомним, что физический смысл и роль критерия Bi становятся ясными, если его значение записать в таком виде:

$$\mathrm{Bi} = \frac{\alpha s}{\lambda} = \frac{s/\lambda}{1/\alpha}.$$

Числитель этого выражения S/λ представляет собой тепловое сопротивление нагреваемого тела (поскольку s — толщина тела, а λ — его теплопроводность), а знаменатель $1/\alpha$ — также тепловое сопротивление, возникающее при переходе тепла от нагревающей среды к нагреваемому телу. Коэффициент теплоотдачи α, входящий в критерий Bi, характеризует интенсивность передачи тепла от печного пространства к поверхности нагреваемого металла.

При нагреве по толщине металла возникает перепад температур, величина которого тем больше, чем быстрее греется металл. При одних и тех же условиях нагрева перепад температур тем больше, чем толще нагреваемая заготовка. Вместе с тем иногда и массивная заготовка (значительной толщины) может нагреваться как тонкое тело, без возникновения существенного перепада температур. Это происходит в тех случаях, когда заготовка греется медленно, т. е. к поверхности заготовки поступает такое количество тепла, которое может быть передано от поверхности заготовки внутрь ее без существенного повышения температуры поверхности.

Таким образом, разделение тел в соответствии с их поведением при нагреве следует вести не только по их геометрической толщине, но и по тепловой «массивности», которая зависит как от условий нагрева, так и от геометрических размеров. Тепловая массивность должна определяться соотношением внешнего (по отношению к поверхности металла) теплового сопротивления $1/\alpha$ и внутреннего теплового сопротивления металла s/λ, которые и объединены в критерий Bi. В соответствии с этими соображениями к тонким телам относят такие, для которых $\mathrm{Bi} < 0{,}25$. При $\mathrm{Bi} > 0{,}5$ тела ведут себя как массивные. В пределах значений

Bi от 0,25 до 0,50 находится переходная область; при таких значениях целесообразнее вести расчет тела как массивного.

Нагрев тел при краевых условиях третьего рода

Тонкие тела. Обычно в печах передача тепла к поверхности нагреваемого изделия осуществляется конвекцией и излучением.

Если преобладает конвективный переход тепла и, следовательно, справедливо уравнение Ньютона

$$Q = \alpha (T_{\text{п}} - T_{\text{м}}) F\tau,$$

то время нагрева металла определяют по уравнению

$$\tau = \frac{Mc}{\alpha F} \ln \frac{(T_{\text{п}} - T_{\text{м.кон}})}{(T_{\text{п}} - T_{\text{м.нач}})} \text{ с}, \qquad (69)$$

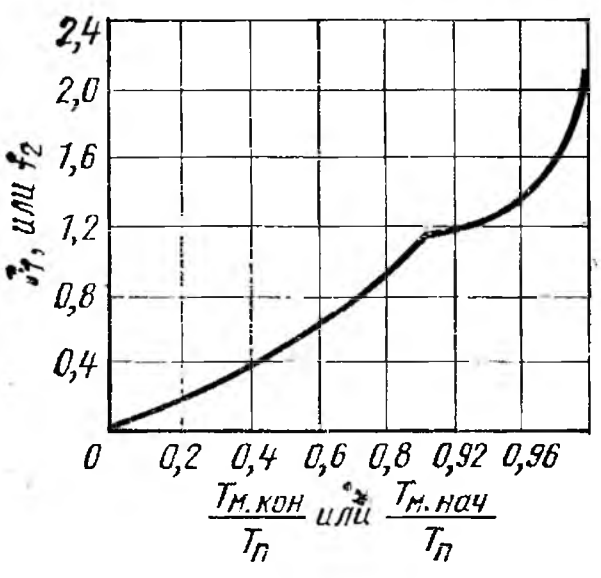


Рис. 37. График для определения функции $f(T_{\text{м}}/T_{\text{п}})$

где c — теплоемкость металла, Дж/(кг·К); M — масса находящегося в печи металла, кг; F — поверхность металла, воспринимающая тепло, м^2; α — коэффициент теплоотдачи к поверхности металла, Вт/(м^2×К); $T_{\text{п}}$ — температура печи, К; $T_{\text{м.нач}}$ и $T_{\text{м.кон}}$ — температура металла соответственно начальная и конечная, К.

В тех случаях, когда преобладает передача тепла излучением и справедлив закон Стефана — Больцмана, время нагрева тонких изделий следует определять по выражению, с

$$\tau = \frac{Mc}{C_{\text{пр}} F} \frac{100}{(T_{\text{п}}/100)^3} \left[f_1 \left(\frac{T_{\text{м.кон}}}{T_{\text{п}}} \right) - f_2 \left(\frac{T_{\text{м.нач}}}{T_{\text{п}}} \right) \right], \qquad (70)$$

где $C_{\text{пр}}$ — приведенный коэффициент излучения системы печь — металл, Вт/(м^2·К^4).

Значение функций f_1 и f_2 можно выбирать из графика, приведенного на рис. 37.

Массивные тела. Как показано выше, решение дифференциального уравнения теплопроводности для этих условий обычно представляют в виде следующего критериального уравнения:

$$\theta = f(\text{Fo}; \text{Bi}; x/s).$$

Решение этого уравнения для пластины (рис. 38) и цилиндра (рис. 39) было представлено Д. В. Будриным в графическом виде.

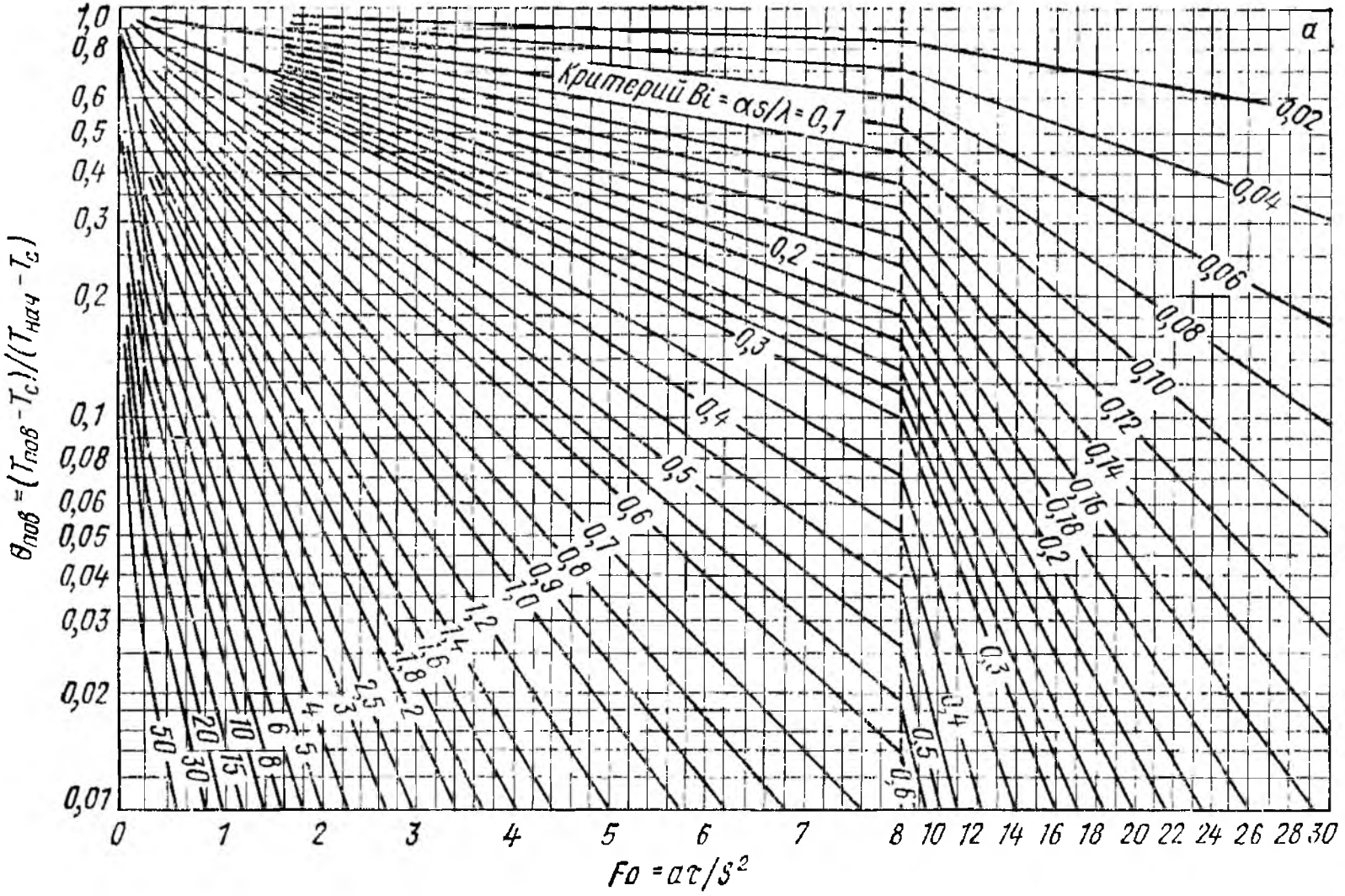
Из этих номограмм для определения времени нагрева необходимо найти критерий $Fo=a\tau/s^2$. Предварительно нужно определить температурный критерий θ и критерий Bi. При определении значения Bi, а затем и времени нагрева из критерия Fo необходимо правильно выбирать расчетную толщину нагреваемой заготовки. При двустороннем нагреве в качестве расчетной толщины надо принимать половину истинной (геометрической) толщины. При одностороннем нагреве в расчете необходимо учитывать полную толщину заготовки. Теплопроводность металла следует находить по средней его температуре за весь период нагрева. Теплоемкость металла принимают по конечной температуре нагрева металла.

Для определения значения Fo из точки на ординате (рис. 38 и 39), соответствующей найденному значению θ, проводят горизонтальную линию до пересечения с линией Bi, соответствующей найденному значению этого критерия. Из полученной таким образом точки пересечения двух линий опускают перпендикуляр и на абсциссе находят искомое значение Fo, из которого определяют время нагрева $\tau=Fos^2/a$.

Таким образом определяется время нагрева при условии, что температура в печи практически одинакова во всех точках рабочего пространства.

Несколько сложнее проводится расчет времени нагрева для печей с постоянной во времени, но переменной по длине рабочего пространства температурой. К таким печам относятся методические печи.

В методической зоне этих печей температура изменяется по длине. Чтобы к расчету времени нагрева в методической зоне можно было применить описываемый метод расчета при краевых условиях III рода, всю зону необходимо разбить на некоторое число участков с усреднением температуры печи в пределах каждого из них. Усредненную температуру следует принимать постоянной в пределах каждого участка и определять соответствующее этому участку время нагрева. Очевидно, что чем больше таких участков, тем более точным (но и тем более трудоемким) будет расчет. Обычно рекомендуется разбивать методическую зону на три участка и определять время нагрева на каждом участке. Таким образом, время нагрева в методической зоне определяется как суммарное время нагрева для всех участ-


Критерий Bi = αs/λ = 0,1
α
0,02
0,04
0,06
0,08
0,10
0,12
0,14
0,16
0,18
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
1,2
1,4
1,6
1,8
2
2,5
3
4
5
6
8
10
15
20
30
50
1,0
0,8
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0,08
0,06
0,05
0,04
0,03
0,02
0,01
0 1 2 3 4 5 6 7 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30
$\theta_{пов} = (T_{пов} - T_c)/(T_{нач} - T_c)$
$Fo = a\tau/s^2$

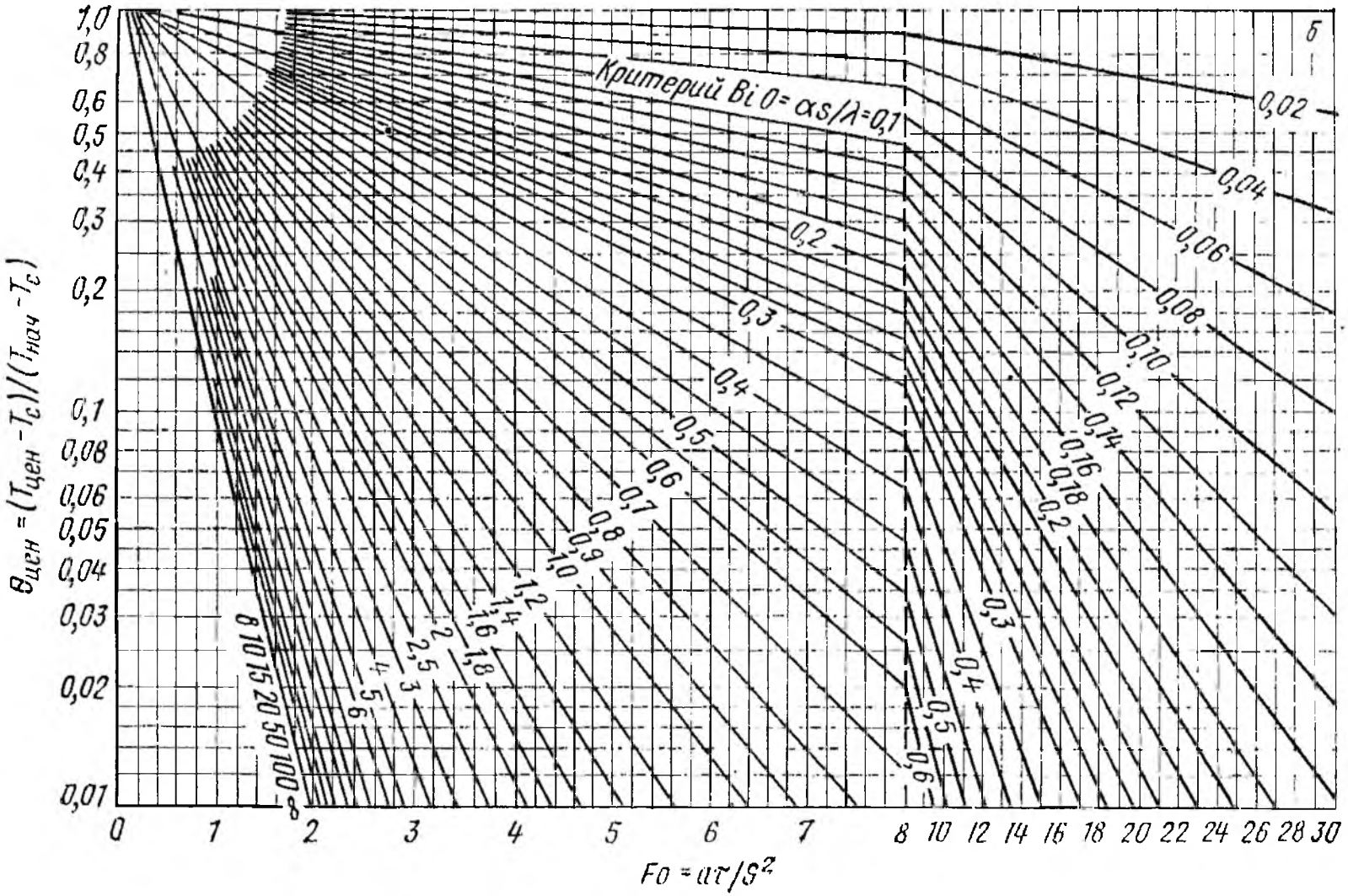
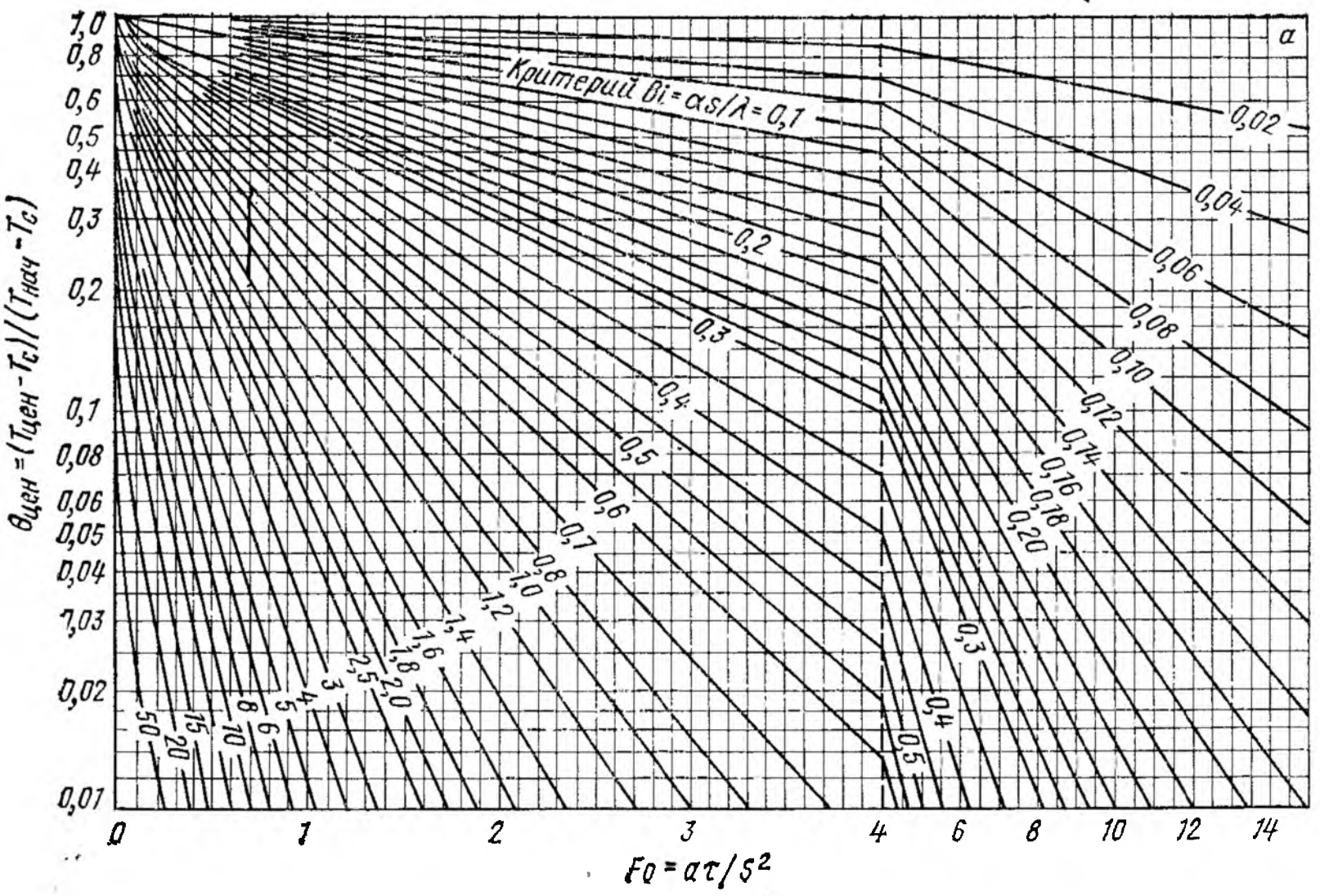


Рис. 38. Номограммы Д. В. Будрина для расчета нагрева пластины:
а — поверхность; *б* — центр


а
Критерий Bi = αs/λ = 0,1
0,02
0,04
0,06
0,08
0,10
0,12
0,14
0,16
0,18
0,20
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
1,0
1,2
1,4
1,6
1,8
2,0
2,5
3
4
5
6
8
10
15
20
50
0,3
0,4
0,5
1,0
0,8
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0,08
0,06
0,05
0,04
0,03
0,02
0,01
0
1
2
3
4
6
8
10
12
14
θцен = (Tцен - Tс)/(Tнач - Tс)
Fo = aτ/s²

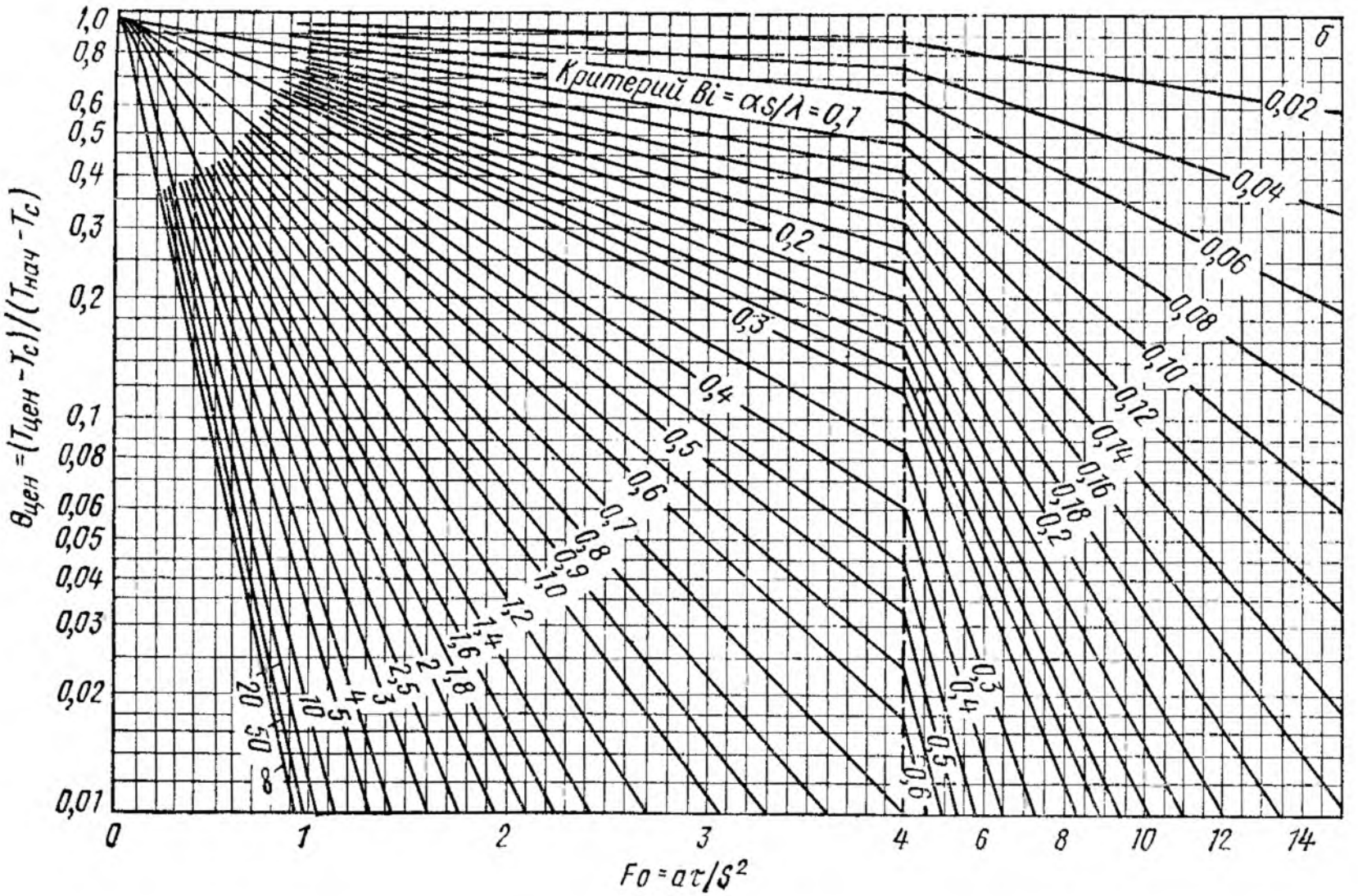


Рис. 39. Номограммы Д. В. Будрина для расчета нагрева цилиндра:
а — поверхность; *б* — центр

ков. Для того чтобы получить полное время нагрева металла в методической печи, надо суммировать время нагрева, полученное для методической и сварочных зон. В случае, если металл к концу зоны нагрева (сварочной зоны) прогрет по сечению недостаточно, необходимо осуществить его выдержку.

Определение выдержки металла. Выдержку (томление) металла осуществляют для выравнивания температуры по его толщине. Для этого в зоне выдержки поддерживают температуру в печи приблизительно на 50 К выше температуры поверхности металла с тем, чтобы температура поверхности заметно не повышалась, а тепловой поток, падающий на поверхность металла, проникал бы внутрь и способствовал повышению температуры центра заготовки или слитка. Выдержку можно выполнить, используя графики (рис. 40), специально построенные для определения выдержки металла, т. е. при постоянной температуре поверхности металла. Если принять, что $\Delta T_{нач}$ — начальная разность температур поверхности и центра тела, а $\Delta T_{кон}$ — конечная разность этих температур, то отношение $\Delta T_{кон}/\Delta T_{нач}$ представляет собой степень выравнивания температуры, определяющую в основном выдержку металла.

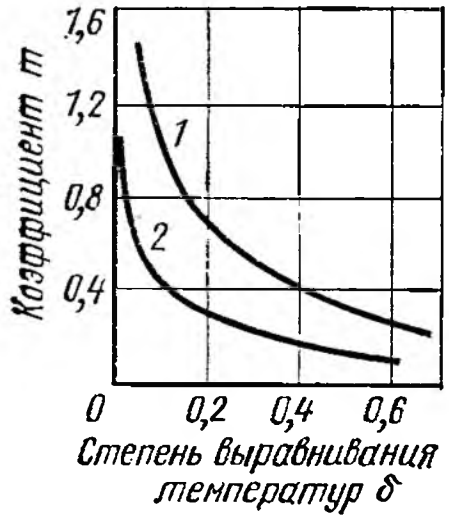


Рис. 40. График для определения продолжительности выдержки металла:

1 — пластина; *2* — цилиндр

Выдержка металла может быть определена по выражению, с

$$\tau_в = m \frac{S^2}{a},$$

где S — толщина заготовки, м; a — коэффициент температуропроводности, м^2/с; m — коэффициент, зависящий от степени выравнивания температур, который может быть определен по графику на рис. 40.

Во всех расчетах времени нагрева металла необходимо определять среднюю (для всего периода нагрева или для его интервала) величину коэффициента теплоотдачи излучением $\alpha_{изл}$. При краевых условиях третьего рода, т. е. при постоянстве температуры печи эта величина может быть найдена следующим образом:

$$\alpha_{изл} = \frac{C_0 \varepsilon_{пр} \sqrt{\left[\left(\frac{T_п}{100}\right)^4 - \left(\frac{T^м_{нач}}{100}\right)^4\right]\left[\left(\frac{T_п}{100}\right)^4 - \left(\frac{T^м_{кон}}{100}\right)^4\right]}}{\sqrt{(T_п - T^м_{нач})(T_п - T^м_{кон})}},$$

здесь $T_п$ — температура печи, К; $T_{нач}$ — температура металла в начале интервала нагрева, К; $T^м_{кон}$ — температура металла в конце интервала нагрева, К.

Принципы скоростного нагрева

Процесс нагрева металла складывается из внешнего и внутреннего теплообмена. В зависимости от теплового сопротивления металла всегда наблюдается определенное соотношение между внешним и внутренним тепловыми потоками. Чтобы достигнуть максимально возможной скорости нагрева металла, следует как можно быстрее повысить температуру его поверхности до требуемой величины. Иначе говоря, для обеспечения скоростного нагрева надо создавать максимально возможный внешний тепловой поток. Однако это не всегда допустимо.

При нагреве тонких тел (Bi<0,25) внутренний тепловой поток практически не ограничен и процесс нагрева определяется исключительно внешним тепловым потоком. В этом случае металл воспринимает практически любое количество тепла, поданное на его поверхность.

При нагреве массивных изделий важное значение имеет процесс распространения тепла по толщине материала. Быстрый нагрев поверхности металла до заданной температуры в массивных изделиях создает значительный перепад температур по толщине.

В некоторых случаях (при нагреве мягких сталей) этот не опасный и быстрый нагрев поверхности вызывает внутренний поток большой величины, что значительно ускоряет нагрев.

Во многих случаях быстрый нагрев поверхности металла до заданной температуры во избежание недопустимых напряжений оказывается возможным только после достижения массой металла 773—823 К.

Таким образом, при нагреве тонкого и массивного металла можно применять скоростной нагрев, для чего необходимо обеспечивать большой внешний тепловой поток.

В большинстве практических случаев скорость нагрева металла зависит от внешнего теплового потока, который часто бывает сравнительно малым. В ряде случаев тонкий

металл нагревается так, что внешний тепловой поток оказывается меньше возможного, т. е. на поверхность металла поступает тепла меньше, чем он может принять.

Для обеспечения скоростного нагрева в печи необходимо создавать весьма высокую температуру, обусловливающую большую разность между температурами печи и металла, и обеспечивать интенсивное движение раскаленных газов.

Для обеспечения скоростного нагрева можно использовать принципиально два метода создания значительного теплового потока на поверхность металла.

При первом методе эффект достигается за счет увеличения до максимально возможных пределов лучистой составляющей теплообмена, для чего в печи создается весьма высокая температура. Печи, построенные по такому принципу, имеют ряд недостатков, главными из которых являются тяжелые температурные условия, в которых работает кладка печи.

При втором методе, получившем название ударного нагрева, большой внешний тепловой поток обеспечивается за счет конвективной составляющей. Высокие значения $\alpha_{конв}$ [350—400 Вт/(м^2·К)] обеспечиваются при этом большими скоростями продуктов сгорания, которые направляются непосредственно на поверхность металла, разрушают пограничный слой и вызывают интенсивную теплоотдачу. Такой метод нагрева металла не вызывает перегрева кладки печи, но требует особых, весьма сложных по конструкции горелок.

Глава IV ТОПЛИВО И ЕГО СЖИГАНИЕ

§ 1. Характеристика топлива

Классификация топлива. В основном топливо классифицируют по его происхождению и агрегатному состоянию (табл. 1). В соответствии с этим топливо всех видов подразделяют на естественное и искусственное, каждое из которых в свою очередь подразделяют на твердое, жидкое, газообразное.

Химический состав топлива. Большинство видов топлива органического происхождения, поэтому основными его составляющими являются углерод и водород, которые находятся в топливе в виде различных соединений. В состав топлива обычно входят кислород, азот и сера. Все эти элементы образуют различные соединения, составляющие

Таблица 1. Общая классификация топлива

Агрегатное состояние топлива	Вид топлива по происхождению	
	естественному	искусственному
Твердое	Дрова, торф, бурый уголь, каменный уголь, антрациты, горючие сланцы	Древесный уголь, кокс, угольная пыль, термоантрацит, полукокс
Жидкое	Нефть	Бензин, керосин, мазут, спирт, каменноугольная смола и др.
Газообразное	Природный газ	Коксовый, доменный, светильный, генераторный, водяной газы

основу топлива. Кроме того, в топливе всегда присутствуют вода и зола.

Зола — это негорючая минеральная часть твердого и жидкого топлива, состоящая из Al_2O_3, SiO_2, CaO, Fe_2O_3 и др.

Содержащаяся в топливе сера может встречаться в виде органической серы ($S_о$), колчеданной ($S_к$) и сульфатной ($S_с$). Общее количество серы $S_{об}=S_о+S_к+S_с$.

Органическая и колчеданная сера участвует в процессах горения топлива, а сульфатная сера в горении не принимает участия.

Влага, которая содержится в топливе, подразделяется на гигроскопическую (химически связанную) и внешнюю, которая механически удерживается в топливе и теряется при сушке.

Чтобы установить состав топлива, проводят технический и химический (элементарный) анализ топлива. При техническом анализе определяют влагу, летучие и золу. Химический анализ топлива можно выполнить по элементарному составу (C, H, O, N, S) и определением содержания в топливе отдельных химических соединений (CO, CO_2, CH_4 и др.). Первый метод анализа применяют для твердого и жидкого топлива, второй — для газообразного топлива.

Элементарный анализ проводят с целью определения содержания углерода, водорода, кислорода, азота и серы в процентах по массе. Однако подобный метод анализа не дает возможности судить о том, из каких соединений этих элементов состоит топливо, а следовательно, и о многих свойствах топлива. Элементарный анализ дает представление о топливе как о механической смеси отдельных элементов, что достаточно для проведения необходимых расчетов сжигания топлива.

В соответствии с элементарным анализом в топливе различают органическую (C, H, O, N), горючую (C, H, O, N, S) и сухую (C, H, O, N, A) массы и рабочее топливо (C, H, O, N, A, W).

Органическая масса топлива дает возможность судить о его природе, а горючая масса — о топливе как о горючем.

При записи результатов анализа пользуются индексами, например: $C^о$ обозначает содержание углерода в органической массе; $S^г$ — содержание серы в горючей массе; $A^с$ — содержание золы в сухой массе и $W^р$ — содержание влаги в рабочем топливе. Естественно, что состав рабочего топлива записывают так:

$$C^р + H^р + O^р + N^р + S^р + A^р + W^р = 100\%.$$

Пересчет состава угля из одной массы в другую легко выполнить по следующим выражениям (%):

$$x^{o} = x^{г}\frac{100}{100 - S^{г}}; \qquad x^{г} = x^{c}\frac{100}{100 - A^{c}};$$

$$x^{o} = x^{c}\frac{100}{100 - (S^{c} + A^{c})}; \qquad x^{c} = x^{p}\frac{100}{100 - W^{p}};$$

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

где x^{c} — содержание какого-либо элемента в сухой массе, %; x^{p} — содержание какого-либо элемента в рабочем топливе, %; $x^{г}$ — то же, в горючей массе, %; x^{o} — то же, в органической массе, %.

Химический анализ газообразного топлива можно выполнить последовательным поглощением отдельных составляющих различными реактивами. Его результаты, выраженные в объемных процентах, показывают содержание составных частей газообразной смеси CO_2, CO, CH_4, O_2, C_mH_m. Количество N_2 определяют по разности.

Подобный анализ по химическим соединениям, составляющим топливо, позволяет судить о его свойствах. Анализ с последовательным поглощением отдельных составляющих характеризует состав сухого топлива, поскольку влага, содержащаяся в газе, в процессе анализа не учитывается. Вместе с тем в газах в большинстве случаев содержится влага, которую обычно определяют как массу воды в единице объема сухого газа W (г/м³). В связи с этим бывает необходимо пересчитывать состав сухого газа с тем, чтобы учесть влагу, т. е. определять состав влажного газа.

Теплота сгорания топлива. При сжигании топлива выделяется тепловая энергия. Количество выделившегося тепла связано с химическим составом топлива.

Количество тепла, которое выделяется при сжигании единицы топлива, называется теплотой сгорания топлива [кДж/кг; кДж/м³ или кДж/кмоль]. В технике различают высшую и низшую теплоты сгорания топлива.

Высшая теплота сгорания $Q_{в}^{p}$ соответствует условию, что все водяные пары, образовавшиеся при горении, доводятся до жидкого состояния при 273 К. При этом возвращается следующее количество тепла:

Скрытая теплота испарения 1 кг H_2O, кДж	2256,8
Теплота нагрева 1 кг H_2O от 273 до 373 К, кДж . . .	418,7
Итого	2675,5

Низшая теплота сгорания $Q_{н}^{p}$ соответствует условию, что содержащийся в продуктах сгорания водяной пар охлажден с 373 до 293 К. При этом высвобождается количество тепла, равное

$$1{,}0 \cdot 2{,}041\ (373 - 293) \approx 163{,}3 \text{ кДж/кг},$$

где 2,041 кДж/(кг · К) — теплоемкость паров воды.

Низшая теплота сгорания топлива больше соответствует действительности, так как практически при сжигании топлива пары воды в газообразном состоянии уносятся с продуктами сгорания.

Количественная разница между $Q_{в}^{p}$ и $Q_{н}^{p}$ на 1 кг H_2O составляет

$$Q_{в}^{p} - Q_{н}^{p} = 2675{,}5 - 163{,}30 \approx 2512{,}2 \text{ кДж/кг}.$$

Поскольку в продуктах сгорания содержится влага топлива W_1 и вода, полученная от сгорания водорода [$W_2 = H_2O/H_2 = (18/2)H = 9H$], разность между высшей и низшей теплотами сгорания на 1 кг топлива составляет

$$Q_в^р - Q_н^р = 2516{,}39\left(W_1 + W_2\right) = 2512{,}2\left(W_1 + 9H\right) \text{ кДж/кг}$$

или если W_1 и H выражены в процентах (т. е. $W^р$ и $H^р$), то

$$Q_в^р - Q_н^р = 25{,}122\left(W^р + 9H^р\right) \text{ кДж/кг}. \quad (71)$$

При использовании топлива для практических целей совершенно необходимо определять его теплоту сгорания. Теплоту сгорания топлива можно измерять сжиганием навески или определенного объема топлива в специальных приборах — калориметрах. В инженерной практике теплоту сгорания топлива часто определяют расчетом на основании данных элементарного анализа с использованием тепловых эффектов реакций горения отдельных составляющих топлива.

Теплоту сгорания твердого и жидкого топлива на основании элементарного анализа обычно определяют по формулам, полученным эмпирически. Для отечественных видов твердого и жидкого топлива достаточно точные результаты дает формула Д. И. Менделеева:

$$Q_в^р = 4{,}187\left[81C^р + 300H^р - 26\left(O^р - S^р\right)\right] \text{ кДж/кг}. \quad (72)$$

При определении низшей теплоты сгорания формула Д. И. Менделеева имеет вид

$$Q_н^р = 4{,}187\left[81C^р + 300H^р - 26\left(O^р - S^р\right) - 6\left(W^р + 9H^р\right)\right] \text{ кДж/кг}. \quad (73)$$

Теплота сгорания газообразного топлива может быть с достаточной точностью получена расчетом, поскольку могут быть известны соединения, составляющие горючую массу топлива, и теплоты сгорания этих соединений В табл. 2 приведены тепловые эффекты реакций окисления ряда соединений, входящих в состав топлива.

Следовательно, если известен состав газообразного топлива, то не представляет труда подсчитать его теплоту сгорания.

Условное топливо. Чтобы сравнить топливо различных видов, иногда используется понятие условного топлива, характеризуемого тепло-

Таблица 2. Тепловые эффекты реакций окисления

Реакция	Тепловой эффект реакции		
	кДж/моль	кДж/кг	кДж/м³
$C + O_2 = CO_2$	+408860	+34070	—
$CO + 0{,}5O_2 = CO_2$	+285640	—	+12645
$CO + (H_2O)_п = CO_2 + H_2$	+433590	—	—
$C + (H_2O)_п = CO + H_2$	−118897	−9902	—
$H_2 + 0{,}5O_2 = (H_2O)_ж$	+286223	+143112	+12770
$H_2 + 0{,}5O_2 = (H_2O)_п$	+241800	+121025	+10760
$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + (2H_2O)_п$	+805560	—	+35800
$C_2H_4 + 3O_2 = 2CO_2 + (2H_2O)_п$	+1341514	—	+59037
$H_2S + 1{,}5O_2 = (H_2O)_п + SO_2$	+519188	—	—

той сгорания 29300 кДж/кг. Для перевода любого топлива в условное следует разделить его теплоту сгорания на 29310 кДж/кг, т. е. найти эквивалент данного топлива.

В настоящее время в металлургической промышленности наиболее распространенным является газообразное топливо. Достаточно часто употребляется жидкое топливо. Практически единственным видом твердого топлива, которое употребляется в металургии, является кокс.

Газообразное топливо

Газообразное топливо по сравнению с жидким и твердым имеет ряд преимуществ, главные из которых: более простое смешение горючего и воздуха, позволяющее проводить сжигание газа с меньшим избытком воздуха; легкость транспортировки; простота обслуживания печей, работающих на газе. Все это приводит к тому, что газообразное топливо становится преобладающим. Газообразное топливо бывает естественное и искусственное. Естественными видами газообразного топлива являются природный газ и попутный газ, который улавливают при добыче нефти. Искусственными видами газообразного топлива являются коксовый и доменный газы, получаемые соответственно при коксовании угля и при доменной плавке. Кроме того, к искусственным относятся генераторные газы, которые в последние годы полностью вышли из употребления на предприятиях черной металлургии.

Природный газ. Природный газ — наиболее дешевое топливо. Себестоимость его значительно ниже себестоимости угля и нефти.

Природный газ основных месторождений СССР состоит главным образом из метана и содержит небольшой процент его гомологов. Содержание в нем балласта (N_2 и CO_2) невелико. Важно отметить, что природный газ большинства месторождений Советского Союза не содержит сероводорода и других сернистых соединений (табл. 3).

В связи с ростом добычи и переработки нефти соответственно возрастают ресурсы нефтепромысловых газов, добываемых попутно с нефтью. Нефтепромысловые газы отличаются от природных чисто газовых месторождений большим содержанием гомологов метана (этана, бутана и др.) и соответственно более высокой теплотой сгорания.

Таблица 3. Примерный состав сухих природных газов некоторых месторождений СССР

Месторождение	Состав, % (объемн.)							$Q_н^р$, кДж/м³
	метан	этан	пропан	бутан	тяжелые углеводороды	CO_2	N_2	
Елшанское (Саратовская область)	93,2	0,7	0,6	0,6	0,5	—	4,4	35196
Северное поле	97,7	—	—	—	—	0,7	1,6	35196
Дашава (Западная Украина)	97,8	0,5	0,2	0,1	0,05	0,05	1,3	36034
Шебелинское	93,5	4,0	1,0	0,5	0,5	0,1	0,4	38354
Газлинское	94,6	2,3	0,5	0,3	—	0,1	0,2	—

Искусственное газообразное топливо. Коксовый газ, получаемый при коксовании углей, играет очень важную роль в топливном балансе металлургических заводов. В табл. 4 приведен состав коксового газа.

Колебания в содержании отдельных компонентов объясняются различием в составе коксуемых углей, температурах и режимах коксования.

Доменный (колошниковый) газ получают в больших количествах (около 3 м³ на 1 кг чугуна) в процессе доменной плавки. На металлургических заводах доменный газ играет существенную роль в тепловом балансе, на его образование расходуется свыше 40 % теплоты сгорания кокса, загруженного в доменную печь. Доменные воздухонагреватели, печи коксовых и прокатных цехов в большей или меньшей мере отапливают доменным газом в смеси с коксовым или природным газом. Средний состав доменного газа ($Q_н^р$=3500÷3800 кДж/м³): 9—14 % CO_2, 25—31 % CO, 0,3—0,5 % CH_4, 2—3 % H_2, 57—58 % N_2.

Генераторные газы представляют собой продукты безостаточной газификации твердого горючего. Газификация может быть проведена при помощи кислорода, вводимого с воздухом, или водяного пара. Аппараты, в которых твердое топливо превращается в газообразное, называют газогенераторами, процесс газификации — газогенераторным.

На рис. 41 изображена схема газогенератора, который представляет собой шахту — железный кожух, изнутри футерованный огнеупорным кирпичом. Топливо загружают в газогенератор сверху через загрузочное устройство. Дутье (воздух, водяной пар) поступает снизу под колосниковую решетку). Образующиеся золу и шлак удаляют снизу. Полученный генераторный газ отводят из верхней части генератора над слоем топлива.

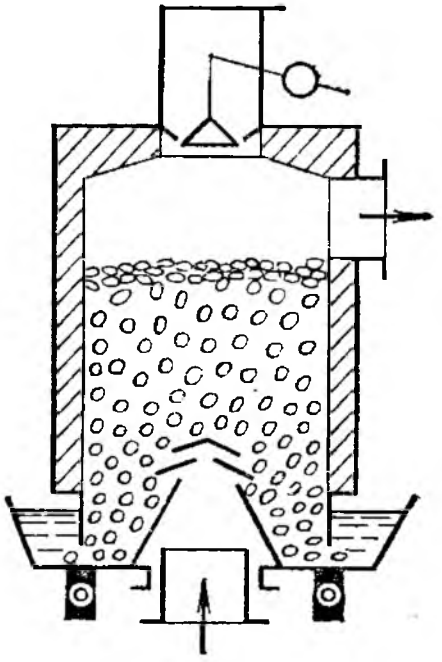


Рис. 41. Схема газогенератора

Воздух попадает в слой раскаленного кокса и вступает в реакцию с углеродом:

$$C + O_2 = CO_2.$$

Двуокись углерода и образующийся в результате испарения влаги топлива пар, захватываемые газовым потоком, восстанавливаются углеродом раскаленного кокса в окись углерода и водород:

$$CO_2 + C = 2CO \text{ и } H_2O + C = CO + H_2.$$

Высокие температуры в зоне реакций воздушного газогенератора обусловливают ряд трудностей при проведении процесса.

Понижение температуры в зоне реакций, следовательно, и понижение температурного уровня процесса во всем газогенераторе могут быть достигнуты совмещением воздушной и водяной газификации. В этом случае параллельно с экзотермическим процессом образования воздушного газа развивается эндотермический процесс газификации водяным паром. Регулирование развития того и другого процесса, достигаемое изменением соотношения воздуха и пара в смеси, поступающей в слой, позволяет непрерывно поддерживать температуру комплексного процесса на желательном уровне. Такая схема работы приводит к образованию смешанного газа. Этот вид газификации топлива наиболее распространен в промышленности, так как по схеме работы

Таблица 4. Состав коксового газа некоторых коксохимических заводов СССР, % (объемн.)

H_2	CH_4	$C_m H_n$	CO	CO_2	O_2	N_2	$Q_н^р$, кДж/м³
Печи с динасовой кладкой							
61,2	21,8	2,0	6,6	2,5	0,9	5,0	16 950
60,7	24,2	2,2	4,2	2,2	0,7	5,8	18 200
Печи с шамотной кладкой							
55,8	24,8	3,1	5,3	3,1	0,8	7,1	17 640

и конструкции устройства он близок к воздушной газификации, а по качеству получаемого газа ее превосходит.

Состав смешанных генераторных газов приведен в табл. 5.

Таблица 5. Состав смешанных генераторных газов, % (объемн.)

Топливо	CO_2	H_2S	$C_m H_n$	CO	H_2	CH_4	N_2+O_2	$Q_н^р$, кДж/м³	Выход сухого газа, м³/кг
Коксовая мелочь	5,0	0,3	0,0	28,5	13,0	0,7	52,4+0,2	5257	3,2
Донецкий газовый уголь .	5,0	0,3	0,3	26,5	13,5	2,3	51,9+0,2	5824	3,3
Подмосковный уголь	6,5	1,2	0,4	25,0	14,0	2,2	50,5+0,2	5970	1,4

Жидкое топливо

Естественное жидкое топливо. К естественным жидким топливам относят сырую нефть, которую как топливо используют очень ограниченно. Использование продуктов переработки нефти дает более высокий эффект, чем использование нефти в сыром виде.

Искусственное жидкое топливо. Основную массу искусственного жидкого топлива составляют продукты переработки сырой нефти.

Бензин представляет собой жидкое топливо, состоящее из наиболее легкокипящих фракций нефти (температура кипения до 473 К). Элементарный состав бензина зависит от содержания в нем различных углеводородов. Можно считать, что бензин в среднем состоит из 85 % С и 15 % Н. Низшая теплота сгорания составляет около 41900 кДж/кг. Бензин служит топливом для авиационных и автомобильных двигателей.

Несколько более высокую температуру кипения (473—493 К) имеет лигроин, используемый в качестве топлива для тракторных двигателей.

Керосин представляет собой фракцию, в основном кипящую при температуре выше 523 К. При дальнейшем повышении температуры из него отгоняется соляровый дистиллят.

В зависимости от типа нефти выход легких фракций при перегонке составляет 25—30 %. Остальная часть — это более тяжелые фракции (мазут). Мазут широко применяют для отопления металлургических печей.

Мазут различного происхождения по элементарному анализу мало отличается один от другого: 86,3—87,1 % C^r, 12,3—13,1 % H^r, 0—0,35 % O^r, 0,05 % N^r и 0—10 % W^p.

Содержание серы в мазуте, получаемом при переработке малосернистой нефти, составляет около 0,5 %: в мазуте, получаемом из высокосернистой нефти, содержание серы может быть около 4 %. Выпускают топочные мазуты марок 40, 100, 200 и МП (мазут для мартеновских печей). Для этих мазутов температура вспышки составляет 363—383 К, а температура застывания 283—298 К.

Важными показателями, характеризующими качество мазута, являются температура застывания и вязкость. Вязкость в значительной степени снижается при повышении температуры нефтепродукта. Поэтому для обеспечения возможности перекачивания и сжигания в форсунках вязкие мазуты приходится предварительно подогревать до 343—353 К.

Низшая теплота сгорания мазута в зависимости от его состава и содержания влаги колеблется в пределах 35615—39805 кДж/кг.

Большое значение жидкого топлива заставляет изыскивать пути для замены нефти другими видами горючих ископаемых, которые можно использовать для получения моторных топлив. Существует ряд методов переработки твердого топлива: гидрогенизация, синтез углеводородов и др.

В практике металлургического производства в качестве заменителя мазута в виде добавки к газообразному топливу (для увеличения излучательной способности факела) нередко применяют смолы, получаемые как продукт переработки твердых топлив.

Твердое топливо

Для естественного твердого топлива всех видов общим является не только одинаковое агрегатное состояние, но и общность условий происхождения. Твердое топливо естественного вида — растительного происхождения. Чем старше топливо, тем выше содержание углерода (табл. 6) и теплота сгорания.

Твердое топливо, кроме данных элементарного анализа, характеризуется также данными технического анализа, при котором определя-

Таблица 6. Характеристика твердого топлива основных видов

Вид топлива	Состав органической массы, %			Теплота сгорания органической массы, кДж/кг
	C	H	O	
Древесина	50	6	44	18 840
Торф	55—60	5,5—6	35—39	20 935—23 800
Бурые угли	67—78	5	17—28	27 200—30 900
Каменные угли . .	80—96	2—15	2—15	31 800—36 400

ют: содержание влаги, выход летучих веществ и кокса, зольность, количество серы, теплоту сгорания топлива.

Влажность является весьма важной характеристикой твердого топлива и в большой мере определяет эффективность его использования.

Летучие вещества выделяются из топлива при его термическом разложении без доступа воздуха. При этом происходит разложение неустойчивых молекул и выделение газообразных горючих веществ. Кроме летучих веществ, продуктом термического разложения являются также кокс — твердый остаток продуктов разложения. Летучие вещества играют весьма важную роль в процессе сгорания твердого топлива, ибо воспламеняются первыми и способствуют развитию процесса горения.

Твердое топливо содержит в составе негорючие элементы, составляющие основу золы. Чем выше количество этих негорючих элементов и выше зольность, тем ниже качество топлива.

Сера является крайне вредной примесью твердого топлива. При сжигании топлива, в состав которого входит сера, образуется оксид серы SO_2; он является очень сильным окислителем. При применении твердого топлива (кокса) в доменном производстве сера, содержащаяся в топливе, в значительной части переходит в чугун, понижая его качество и усложняя операции по его дальнейшему переделу в сталь.

Твердое топливо в металлургических печах практически не применяют. Исключение составляет кокс, необходимый для доменного процесса. Кокс получают в специальных печах — коксовых батареях из каменных углей, обладающих необходимыми свойствами (коксующиеся угли). Исходным материалом для производства кокса в коксовых батареях служат угли, дающие спекшийся кокс.

Процесс коксования состоит в следующем. Измельченную до кусков размером меньше 3 мм и увлажненную угольную шихту загружают через загрузочные люки в камеры коксовых печей, температура в которых поддерживается в пределах 1083—1273 К. В первый момент в камерах происходит испарение влаги. Затем наступает первая стадия пирогенетических процессов (процессов разложения без доступа воздуха), которая начинается с момента нагревания угля до 473 К. На этой стадии выделяются пары первичной смолы, состоящей главным образом из углеводородов жирного ряда. Эти соединения, проходя через раскаленную твердую массу топлива, превращаются в газы и ароматические углеводороды бензольного ряда.

Летучие продукты коксования направляют на химический завод для улавливания из них ценных продуктов. Газ, выходящий из коксовой камеры печи, называется прямым, а газ, из которого на химическом заводе выделили пары смолы, сырого бензола и аммиака, — обратным.

Каменноугольную смолу подвергают разгонке. В получаемых маслах и сыром бензоле содержатся ценные вещества, служащие сырьем для химической промышленности, например бензол, толуол, фенол, ксилолы, нафталин и другие соединения, из которых вырабатывают различные химические продукты.

Количество смолы, получаемой при коксовании, зависит от выхода летучих и составляет 2—3 % массы угля. Остающийся после перегонки смолы пек используют при производстве брикетов, толя, пластмасс и др.

При оценке кокса как топлива для доменных печей наибольшее значение имеют данные его технического состава и результаты исследования механической прочности. На основе технического анализа определяют содержание в коксе влаги, золы, серы и летучих. Количество

влаги в коксе зависит главным образом от способа тушения кокса при выдаче из печи. Нормально в коксе содержится 2—5 % влаги. Большое значение имеет зольность кокса, так как минеральная масса в коксе понижает его теплоту сгорания и вызывает повышенный расход флюсов в доменной шихте. Производительность доменных печей при работе на коксе с большим содержанием минеральной массы понижается, а расход топлива возрастает. Среднее содержание золы в донецком коксе составляет 9—10 %, в коксе из восточных углей 10—11 %.

Содержание серы в коксе всегда отрицательно влияет на его свойства. Предотвращение перехода больших количеств серы в металл связано с необходимостью увеличения количеств шлака и его основности, что неизбежно влечет за собой увеличение расхода горючего. В процессе коксования 80—85 % серы сырого угля удерживается в коксе.

Значительной сернистостью характеризуются коксы из донецких углей (1,5—2,0 %), малой — из кузнецких (0,5—0,7 %). Выход летучих из нормально выжженного кокса не превышает 1,4—1,8 %. По этой величине судят о завершении процесса коксования.

По назначению кокс подразделяют на доменный (пористость 45—55 %) и литейный для вагранок (пористость не более 45 %). Большое значение для доменного производства имеет механическая прочность кокса, подвергающегося в доменной печи ударам при падении и истиранию. Обладая высокой твердостью, кокс вместе с тем весьма хрупок.

Вторым по количественному выходу продуктом коксования является газ, вызываемый коксовым. Средний состав обратного коксового газа следующий: 57—60 % H_2, 24—26 % CH_4, 6,0—6,8 % CO, 2,2—2,5 % C_mH_n, 2—2,3 % CO_2+H_2S, 0,2—0,4 % O_2, 3,0—4,0 % N_2. В 1 м³ прямого газа, кроме перечисленных составляющих, содержится 100—125 г смолы, 25—40 г бензольных углеводородов, 5—15 г водорода и 5—10 г аммиака, в большей или меньшей мере улавливаемых при обработке газа на химическом заводе.

Как видно из приведенного состава, обратный газ — высокоценное горючее, его теплота сгорания составляет 16000—18000 кДж/м³. Основными его потребителями являются металлургические заводы.

Для получения кокса применяют специальные печи, одна из которых показана на рис. 42. Прямоугольные камеры для коксования длиной около 13, высотой 4,2—4,5 и шириной около 0,4 м собраны в батареи. Торцовые части камер закрываются дверями *6* и *9*. Угольную шихту в камеры для коксования загружают через люки *8* в сводах. Летучие продукты, образующиеся в процессе коксования, т. е. коксовый газ и пары смолы, отводят из камер через отверстие в своде *7* в стояк и газосборник. Воздух, подаваемый для сжигания газа, используемого для отопления печей, предварительно подогревают в воздушных регенераторах *5*, размещенных по камерам. Воздух поступает в низ регенераторов через подовый канал *10*. Нагретый в регенераторах воздух через косые ходы *3*, минуя блок *4*, направляется в нижнюю часть вертикальных отапливаемых каналов *2*, которые расположены между камерами коксования.

При отоплении коксовых печей доменным или генераторным газом осуществляют его подогрев в газовых регенераторах. Нагретый газ смешивается в отопительных каналах *2* с воздухом, где и сжигается, нагревая при этом боковые стенки камер коксования до температуры около 1573—1673 К. В случае применения коксового газа для отопления печей его направляют в горелки через специальные каналы.

Дымовые газы отводят через перекидные каналы *1* в верхнюю

Рис. 42. Печь для получения кокса

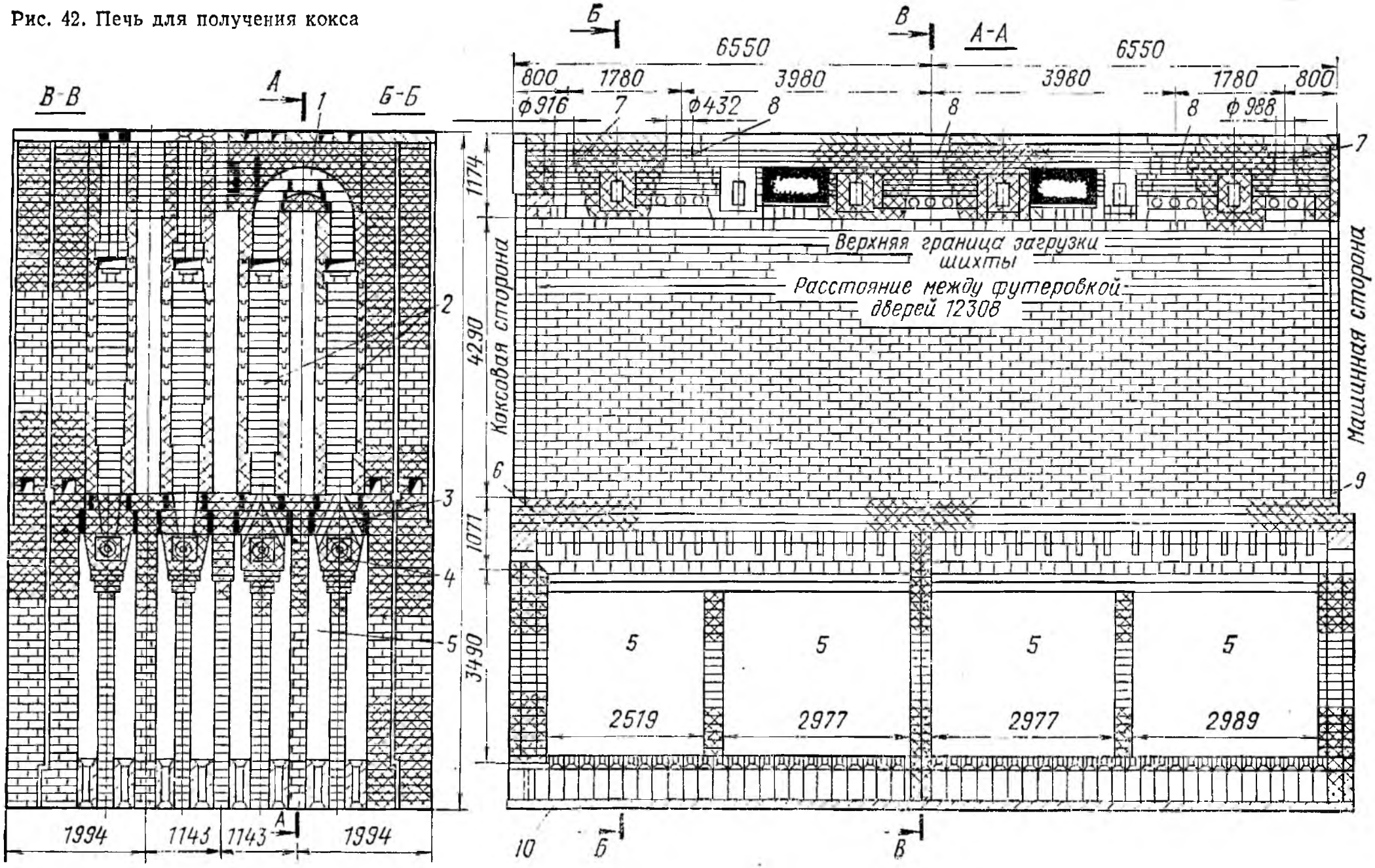


Таблица 7. Состав и пористость доменного кокса, %

Кокс	Влага	Летучие	Зола	Сера	Фосфор	Углерод*	Пористость
Донецкий .	7—14	0,6—1,2	9—10	0,8—2,0	0,03—0,05	75—93	46—55
Кузнецкий .	9	1,2—1,7	~10	~0,5	0,04	77	—

* Нелетучий.

часть смежных нагревательных каналов, а также через специальные косые ходы в верх регенераторов, где ими нагревается насадка регенераторов. Из нижней части регенераторов дымовые газы отводят в боров и дымовую трубу.

Воздушные регенераторы разделены на две батареи. Когда в нечетных регенераторах нагревается воздух, насадка четных регенераторов нагревается дымовыми газами. Затем в результате перекидки клапанов изменяют направление потока воздуха и дымовых газов. Воздух поступает для нагрева в четные регенераторы, а дымовые газы — в нечетные.

Процесс коксования длится около 15—16 ч. Из 1 т угля получают (в зависимости от влажности угля и выхода летучих веществ) около 720—800 кг кокса, 300 м³ коксового газа, 30—40 кг смолы, 10 кг бензола и примерно 3 кг аммиака.

Расход тепла на коксование 1 т угля составляет около 2514 МДж; при этом около 40—50 % расходуемого тепла заключается в физическом тепле кокса, т. е. в том тепле, которое было израсходовано на нагрев кокса до той температуры, при которой его выгружают из печи.

В табл. 7 приведены состав и пористость кокса отечественного производства.

§ 2. Основы теории горения топлива

Характеристика процесса горения

Горением называется процесс взаимодействия топлива с окислителем, сопровождающийся выделением тепла, а иногда и света. Роль окислителя в большинстве случаев выполняет кислород воздуха. Всякое горение предполагает прежде всего тесный контакт между молекулами топлива и окислителя. Чтобы происходило горение, необходимо обеспечить этот контакт, т. е. необходимо смешать топливо с воздухом. Следовательно, процесс горения складывается из двух стадий: смешение топлива с воздухом и воспламенение и горение топлива.

В процессе горения образуется пламя, в котором протекает реакция горения составляющих топлива и выделяется тепло. В технике при сжигании газообразного, жидко-

го и твердого пылевидного топлив применяют факельный метод сжигания. Факел — это частный случай пламени, когда топливо и воздух поступают в рабочее пространство печи в виде струй, которые постепенно перемешиваются друг с другом. Поэтому форма и длина факела обычно определенные.

При факельном, наиболее распространенном в металлургии и машиностроении сжигании топлива аэродинамическую основу процесса составляют струйные течения.

На практике при создании устройств для сжигания топлива (горелок, форсунок) применяют различные конструктивные приемы (направляют струи под углом друг к другу, создают закручивание струй и др.) с тем, чтобы организовать смешение так, как это необходимо для конкретного случая сжигания топлива.

Различают гомогенное и гетерогенное горения. При гомогенном горении тепло- и массообмен происходят между телами, находящимися в одинаковом агрегатном состоянии. Гомогенное горение протекает в объеме топлива и свойственно газообразному топливу.

При гетерогенном горении тепло- и массообмен происходят между телами, находящимися в разных агрегатных состояниях (в состоянии обмена находятся газ и поверхность частиц топлива). Такое горение свойственно жидкому и твердому топливам.

Гомогенное горение может протекать в кинетической и диффузионной областях.

При кинетическом горении полное перемешивание топлива с воздухом осуществляют предварительно и в зону горения подают заранее подготовленную топливо-воздушную смесь. В этом случае основную роль играют химические процессы, связанным с протеканием реакций окисления топлива. При диффузионном гомогенном горении процессы смешения и горения не разделены и совершаются практически одновременно. В этом случае процесс горения определяется перемешиванием, так как время смешения больше времени, необходимого для протекания химической реакции.

При гетерогенном горении твердого топлива также различают кинетическую и диффузионную области реагирования. Кинетическая область возникает в том случае, когда скорость диффузии в порах топлива значительно превосходит скорость химической реакции; диффузионная область возникает при обратном соотношении скоростей диффузии и горения.

Процесс горения любого топлива разделяется на две стадии: воспламенение и непосредственное горение.

Процесс воспламенения характеризует собой предварительный период, когда в результате медленного окисления в системе происходит накопление тепла с соответствующим постепенным повышением температуры. При достижении определенной температуры, называемой температурой воспламенения, реакции окисления резко ускоряются и процесс переходит непосредственно в горение.

Температура воспламенения зависит от природы топлива и соответствует практически той наинизшей температуре, при которой начинается интенсивное горение.

Ниже приведены температуры воспламенения в воздухе различных топлив, К:

Водород	803	Доменный газ . .	803
Оксид углерода .	883	Нефть	633
Метан	918	Бурые угли . . .	723
Коксовый газ . .	773	Кокс	873—973
Генераторный газ	803		

Чтобы установить пределы воспламенения промышленных газов, являющихся смесью различных горючих компонентов, пользуются правилом аддитивности:

$$z = \frac{p_1 + p_2 + p_3 + \dots}{(p_1/z_1) + (p_2/z_2) + (p_3/z_3) + \dots}, \qquad (74)$$

где z — искомый нижний или верхний предел воспламенения; z_1, z_2, z_3 — соответствующие пределы воспламенения для горючих компонентов топлива; p_1, p_2, p_3 — процентное содержание отдельных горючих компонентов в смеси (в реальном топливе).

Воспламенение вне концентрационных пределов отсутствует, потому что выделение тепла вне пределов воспламенения невелико и не может компенсировать возникающие тепловые потери.

Горение газообразного топлива

Горение газов осуществляется в объеме и относится к гомогенному горению; оно может происходить в кинетической и диффузионных областях.

Кинетическое горение

После того как произошло воспламенение, наступает процесс распространения пламени, связанный с постоянной передачей тепла от сгоревших к новым порциям топлива.

Подобная передача тепла определяется законами теплопроводности и диффузии и зависит от характера пламени. Если пламя распространяется в неподвижной смеси или в смеси, движущейся ламинарно, то основной формой передачи тепла является молекулярная теплопроводность.

Подобный чисто теплопроводный процесс получил название нормального горения.

При турбулентном движении газо-окислительной смеси большую роль приобретает турбулентная диффузия. При некоторых условиях распространение пламени происходит с огромной скоростью и имеет характер взрывной волны. Подобное распространение пламени получило название детонационного горения или просто детонации.

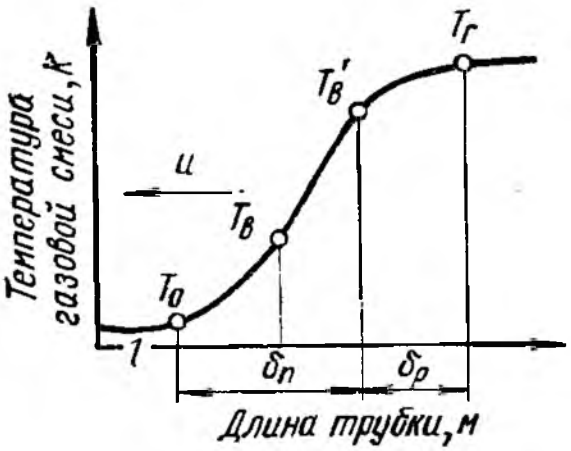


Рис. 43. Изменение температуры газовой смеси по длине трубы

Нормальное горение. После воспламенения горючей смеси возникает определенный фронт горения. Распространение пламени предполагает перемещение этого горения в направлении несгоревших порций газа. Позади фронта горения находятся продукты сгорания, впереди — невоспламенившаяся горючая смесь.

Возникшая при этом разность температур между продуктами сгорания и горючей смесью приводит к передаче тепла теплопроводностью, которая, опережая фронт горения, способствует подогреву новых порций смеси до температуры воспламенения и вызывает перемещение фронта. В большинстве случаев при горении газов фронт пламени является очень тонким — около $4 \cdot 10^{-2}$—$6 \cdot 10^{-2}$ см, поэтому с некоторым приближением его можно рассматривать как поверхность.

При нормальном горении фронт пламени в покоящейся горючей смеси перемещается с определенной скоростью $u_п = \Delta n / \Delta \tau$, где Δn — расстояние, на которое перемещается фронт пламени за время $\Delta \tau$.

Скорость нормального горения определяется исключительно процессом теплопроводности и потому является физико-химической константой горючей смеси.

По современным представлениям горение газовой смеси может быть изображено графически (рис. 43). Самовоспламенение происходит в точке $T_в$, но до $T_в'$ идет химичес-

кая реакция, свойственная индукционному периоду. Быстрая реакция происходит в коротком интервале температур от $T'_в$ до $T_г$, который соответствует химической толщине фронта пламени $\delta_р$. Тепловая толщина фронта $\delta_п$ представляет собой зону тепловой подготовки прогрева горючей смеси до $T'_в$, после которой развивается интенсивная химическая реакция.

Для всех горючих газов существует оптимальное соотношение газа и воздуха, при котором скорость нормального горения достигает максимальной величины.

Увеличение температуры подогрева газа или газовой смеси приводит к существенному увеличению скорости горения.

Горение однородной смеси в турбулентном потоке. Горение при турбулентном режиме — гораздо более распространенный случай в металлургической практике по сравнению с горением в спокойной или ламинарно движущейся среде.

В настоящее время турбулентное горение рассматривается как процесс, протекающий в отдельных перемешивающихся объемах (объемное горение).

На скорость турбулентного горения и на состояние фронта горения большое влияние оказывает общий уровень турбулентности потока. Измерения скорости турбулентного перемещения пламени показали, что отношение скорости турбулентного распространения пламени к нормальной скорости $u_т/u_н$ быстро возрастает с увеличением числа Re.

Это увеличение происходит в результате изменения $u_т$, так как $u_н = \text{const}$.

Диффузионное горение

В настоящее время широко распространен диффузионный метод сжигания газообразного топлива, при котором смешение и горение происходит в одном объеме. Поэтому процессы смешения при диффузионном горении играют первостепенную роль.

Процессы смешения между струями топлива и воздуха могут протекать при ламинарном и турбулентном течениях этих струй. В первом случае смешение определяется молекулярной диффузией, во втором — турбулентной диффузией.

На рис. 44 представлена упрощенная схема распределения концентраций в ламинарном пламени. Как видно, кислород полностью отсутствует внутри объема, ограниченно-

го фронтом пламени, так же как топливо отсутствует за пределами этого объема.

Расчеты и опыты показали, что высота пламени пропорциональна скорости подачи газа и обратно пропорциональна коэффициенту диффузии.

Если рассматривать факел, образующийся при вытекании горючего газа в неограниченную спокойную среду, то при определенной (критической) скорости ламинарный факел начнет переходить в турбулентный.

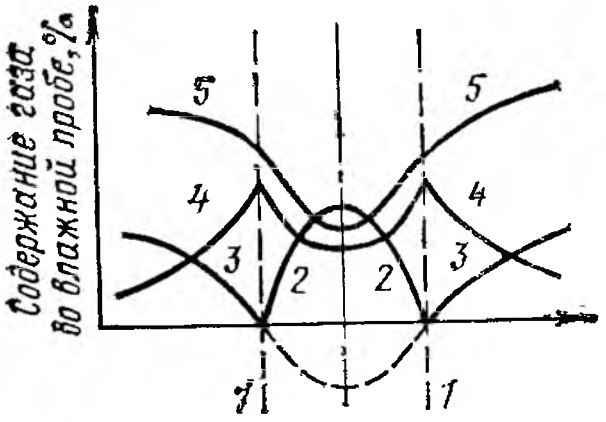


Рис. 44. Схема распределения концентрации в ламинарном диффузионном пламени:

1 — фронт пламени; *2* — горючий газ; *3* — кислород; *4* — продукты сгорания; *5* — азот

Критическое значение критерия $Re_{кр}$, при достижении которого начинается переход ламинарного пламени в турбулентное, зависит от вида топлива, динамических характеристик потока и влияния на них процесса горения.

Горение жидкого топлива

В условиях промышленных печей жидкое топливо (обычно мазут) сжигают в распыленном состоянии. Поэтому в основном комплексный процесс сжигания жидкого топлива складывается из процессов: 1) распыливания; 2) воспламенения, которому предшествует и способствует процесс смешения, подогрева и испарения топлива и 3) горения капель жидкого топлива.

Основой процесса распыливания топлива является дробление жидкости распылителем, происходящее в том случае, если давление движущегося распылителя превышает действие поверхностного натяжения.

Распыленное жидкое топливо, попав в среду с высокой температурой, начинает испаряться. Около поверхности капли (рис. 45) образуется паро-воздушная смесь, которая воспламеняется первой. Температуру, при которой происходит воспламенение паро-воздушной смеси, называют температурой вспышки топлива.

Температура кипения жидких топлив всегда ниже температуры воспламенения, поэтому горение жидкого топлива в основном происходит в паровой фазе. Процесс горения паро-воздушной смеси и процесс испарения тесно связаны между собой. При горении жидкого топлива происходит процесс теплообмена между газовой средой и поверх-

ностью жидкости, т. е. между средами, находящимися в разных агрегатных состояниях, что придает всему процессу гетерогенный характер.

Горение твердого топлива

Горение твердого топлива относят к гетерогенным процессам, хотя в нем и встречаются элементы гомогенного горения (горение летучих).

Процесс горения твердого топлива может быть разделен на следующие стадии: подогрев и подсушка топлива; процесс пирогенного разложения топлива с выделением летучих и образованием коксового остатка; горение летучих, горение коксового остатка (углерода).

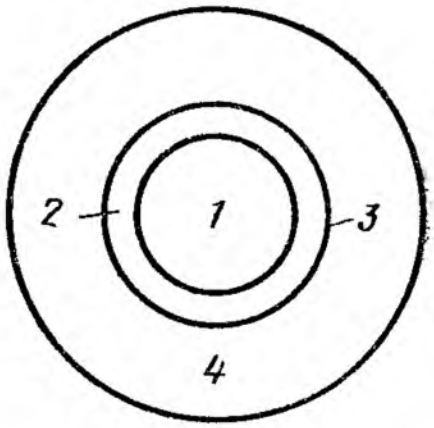


Рис. 45. Модель горения капли:

1 — жидкость; *2* — слой паров; *3* — зона горения; *4* — слой, где происходит диффузия кислорода и двуокиси углерода и догорание

При подогреве топлива до 473 К и выше протекает процесс выделения летучих, т. е. горючей смеси различных газообразных составляющих: H_2, CO, CO_2, CH_4, C_nH_m, H_2O и др. Количество летучих для разных углей различно и для некоторых из них весьма велико по отношению к массе всего топлива (табл. 8). Температура начала выделения летучих зависит от возраста угля. Чем старше уголь, чем выше в нем содержание углерода, тем при более высокой температуре начинается процесс выделения летучих. Летучие в процессе горения твердого топлива играют важную роль.

При горении кускового топлива летучие выделяются при сравнительно умеренных температурах, смешиваются с воздухом и воспламеняются первыми. Таким образом, горением летучих начинается процесс горения топлива. Тепло, выделяемое при горении летучих, способствует повышению

Таблица 8. Выход летучих из твердых топлив, % (по массе)

Уголь	В воздушной среде при 1123 К	В бескислородной среде при 1473 К	Уголь	В воздушной среде при 1123 К	В бескислородной среде при 1473 К
Антрацит	3,9—5,6	6,9—7,5	Газовый	39,0	38,3—40,6
Тощий	14,3	17,3	Якутский	83—90	90—91,5

температуры и дальнейшему развитию процесса горения. Горение углерода начинается после завершения выхода летучих, так как вначале кислород расходуется на горение летучих. Процесс горения углерода продолжителен и он определяет общее время протекания процесса.

Горение полное и неполное

В металлургической практике в большинстве случаев применяется полное горение, продукты которого не содержат каких-либо горючих компонентов. Все виды топлива содержат углерод и водород, в состав продуктов полного сгорания входят углекислый газ, водяные пары и азот. CO_2 и H_2O являются достаточно сильными окислителями, поэтому металл при нагреве в продуктах полного сгорания значительно окисляется. Для того чтобы избежать окисления металла, его надо нагревать в газовой среде (защитной атмосфере), не содержащей газов-окислителей. Одним из методов получения таких атмосфер является метод, при котором производится неполное сжигание газа с последующим удалением из продуктов неполного сжигания газов-окислителей. Неполное горение применяют также тогда, когда стремятся снизить окисление или обезуглероживание металла без использования специальных атмосфер.

В настоящее время наиболее распространенным газообразным топливом является природный газ, состоящий в основном из метана.

При полном горении метана при стехиометрическом соотношении $CH_4+2O_2=CO_2+2H_2O$ продукты сгорания, кроме азота, поступившего с воздухом, будут содержать CO_2 и H_2O. Если увеличить количество кислорода выше стехиометрического, т. е. на молекулу CH_4 подать более двух молекул O_2, то в продуктах сгорания будет содержаться еще и кислород. Но если количество кислорода ниже стехиометрического, т. е. в реакции $CH_4+mO_2\rightarrow CO_2+H_2O+H_2+CO$ $m<2$, то происходит неполное горение топлива. При этом в продуктах сгорания наряду с N_2, CO_2 и H_2O содержатся восстановительные газы H_2 и CO, которые способны окисляться (гореть) с выделением тепла. Это и является причиной потерь тепла в результате химического недожога. Поскольку в продуктах неполного сгорания концентрация газов-окислителей CO_2 и H_2O значительно ниже, чем при полном горении, постольку окисление металла при нагреве в подобной среде будет меньше. При определенном значении m состав продуктов неполного сгорания может быть определен по константе равновесия реакции водяного

газа $K_p = p_{CO}\, p_{H_2O} / (p_{CO_2}\, p_{H_2})$, где p_i — парциальное давление соответствующего компонента.

Значения константы равновесия реакции водяного газа следующие:

Температура, К	873	1073	1273	1473	1673
Константа K_p	0,408	0,935	1,656	2,506	3,436

Расчеты горения топлива

При горении топлива в качестве окислителя используют кислород воздуха. В результате образуются продукты сгорания и развивается определенная температура горения. Поэтому расчеты горения топлива выполняются с целью определения:

а) количества необходимого для горения воздуха;
б) количества и состава продуктов сгорания;
в) температуры горения.

Расход воздуха

Расходы воздуха можно определять как в объемных, так и в массовых единицах.

Для уяснения методики определения расхода воздуха рассмотрим полное горение метана (CH_4) по реакции $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$.

Сначала определим расход воздуха в объемных единицах. Как следует из приведенной реакции, для сжигания 1 моля CH_4 требуется 2 моля O_2. Поскольку 1 кмоль любого газа занимает при нормальных условиях одинаковый объем (22,4 м^3), то для сжигания 22,4 м^3 CH_4 потребуется $2 \cdot 22{,}4 = 44{,}8$ м^3 O_2. Таким образом, для сжигания 1 м^3 CH_4 требуется 2 м^3 O_2, но в сухом воздухе кислород по объему составляет 21 %, остальные 79 % приходятся на долю азота. Следовательно, количество азота в воздухе в 3,762 раза больше количества кислорода. Поэтому расход воздуха на сжигание 1 м^3 метана составит $2 + 2 \cdot 3{,}762 = 9{,}524$ м^3.

Аналогичный расчет можно провести и в массовых единицах. Подобные расчеты чаще делают для твердого или жидкого топлива. Возьмем, например, горение углерода $C + O_2 = CO_2$. Из этой реакции видно, что на 1 кмоль C расходуется 1 кмоль O_2, но 1 кг·моль C имеет массу, равную 12 кг, а кг·моль O_2 32 кг; следовательно, для сжигания 1 кг C потребуется $\frac{32}{12} = 2{,}67$ кг кислорода. В воздухе кислород по массе составляет 23,2 %, а азот 76,8 %. Поэтому вместе с кислородом войдет азота $2{,}67 \cdot \frac{76{,}8}{23{,}2} = 2{,}67 \cdot 3{,}31 = 8{,}83$ кг.

Следовательно, для сжигания 1 кг углерода потребуется воздуха 2,67+8,83=11,50 кг. Это количество можно перевести в объемное, поделив общую массу воздуха на его плотность (1,293 кг/м^3), т. е. 11,50/1,293=8,89 м^3.

Как при горении метана, так и при горении углерода полученные по реакциям количества кислорода и воздуха представляют собой те наименьшие количества, которые необходимы для полного окисления единицы горючего вещества. Такое наименьшее необходимое количество воздуха (кислорода) называется теоретическим количеством. На практике, однако, сжигание топлива осуществляется при расходах воздуха, несколько превышающих теоретическое количество. Величина, показывающая отношение действительного расхода воздуха ($V_д$) к теоретическому количеству ($V_т$), называется коэффициентом избытка воздуха $n = V_д/V_т$ и играет на практике очень важную роль.

Более универсальной величиной является коэффициент расхода кислорода (n_0), который показывает отношение действительного расхода кислорода ($V^0_д$) к теоретически необходимому ($V^0_т$), т. е. $n_0 = V^0_д/V^0_т$.

Коэффициент избытка воздуха пригоден только для полного сгорания топлива в воздухе.

При неполном же сгорании, когда подаваемое количество кислорода меньше теоретического, применим только коэффициент расхода кислорода, который становится меньше единицы. При применении обогащенного дутья, в котором количество кислорода превышает 21 %, характерным также является коэффициент расхода кислорода. В этом случае метод определения расхода дутья аналогичен выше изложенному с той лишь разницей, что изменяется соотношение между азотом и кислородом.

Всякое промышленное топливо представляет собой механическую или химическую смесь отдельных горючих элементов, поэтому общий расход воздуха (кислорода) определяется суммированием аналогичного расхода для отдельных элементов.

Состав и количество продуктов сгорания

Состав и количество продуктов сгорания определяют по методу, применяемому для определения расхода воздуха. Рассмотрим снова пример полного горения метана при коэффициенте избытка, равном единице. В результате горения образуются CO_2 и H_2O. Кроме того, в продуктах сгорания будет присутствовать N_2, внесенный с воздухом. Определим последовательно количество каждой составляю-

щей продуктов сгорания. При сжигании 1 м³ метана образуется CO_2 1м³ и H_2O 2 м³. Кроме того, с воздухом вносится $2 \cdot 3{,}762 = 7{,}524$ м³ N_2. Таким образом, полное количество продуктов сгорания составит 1 м³ + 2 м³ + 7,524 м³ = = 10,524 м³.

Состав продуктов сгорания следующий:

$$CO_2 = \frac{1}{10{,}524} \cdot 100\ \% = 9{,}5\ \%;$$

$$H_2O = \frac{2}{10{,}524} \cdot 100\ \% = 19{,}0\ \%;$$

$$N_2 = \frac{7{,}524}{10{,}524} \cdot 100\ \% = 71{,}5\ \%.$$

Если бы CH_4 сжигали с коэффициентом избытка воздуха, превышающим единицу, то общее количество продуктов сгорания возросло бы в связи с увеличением количества азота и наличием в продуктах сгорания избыточного кислорода.

При сжигании топлива в обогащенном кислородом воздухе наблюдается обратная картина.

При расчетах горения необходимо составлять материальный баланс процесса, путем определения исходных веществ и продуктов сгорания.

Температура горения

Под температурой горения понимают ту температуру, которую приобретают продукты сгорания в результате сообщения им тепла, выделенного при сжигании. Различают теоретическую и калориметрическую температуру горения.

Продукты сгорания топлива нагреваются до высоких температур, при которых возможна диссоциация CO_2 и H_2O, достигающая иногда 10 %. В результате диссоциации происходит изменение объема и уменьшается выделяемое количество тепла, так как в процессе диссоциации поглощается тепло. Теоретическая температура горения определяется с учетом диссоциации в продуктах сгорания, т. е.

$$T_т = (Q^р_н - q_{дисс})/(V_{пр} c),$$

где $Q^р_н$ — теплота сгорания топлива, Дж/м³, или Дж/кг; $q_{дисс}$ — тепло, пошедшее на процесс диссоциации, Дж; $V_{пр}$ — объем продуктов сгорания, образующихся при сгорании единицы топлива, м³; c — удельная теплоемкость продуктов сгорания, кДж/(м³·К).

Калориметрическая температура определяется из условия, что все выделившееся при горении тепло расходуется

только на повышение температуры продуктов сгорания. Иными словами, калориметрическая температура горения определяется для адиабатных условий, когда отсутствует теплообмен с внешней средой. Следовательно, $T_к = Q_н^р / (V_{пр} c)$.

При наличии подогретого воздуха (или топлива) калориметрическую температуру можно определить из выражения

$$T_к = (Q_н^р + Q_ф)/(V_{пр} c),$$

где $Q_ф$ — физическое тепло подогрева воздуха и топлива.

На практике обычно определяют калориметрическую температуру горения, которая является одной из характеристик топлива.

Расчет калориметрической температуры выполняют из условий полного сгорания топлива следующим образом. Продукты сгорания любого топлива представляют собой смесь различных газообразных составляющих CO_2, H_2O, N_2, O_2, SO_2. Каждой из этих составляющих при той или иной температуре присуща вполне определенная величина теплоемкости. Это дает возможность определить теплоемкость продуктов сгорания в целом для соответствующей температуры.

Энтальпия продуктов сгорания, как смеси газов, определяют аналогично определению теплоемкости продуктов сгорания.

Количество тепла, которое выделяется при горении единицы топлива, равно произведению энтальпии на объем продуктов сгорания, образовавшихся от сгорания единицы топлива $Q = IV$.

Однако возможна и обратная постановка задачи. Дело в том, что для продуктов сгорания определенного состава каждой величине теплоемкости 1 м^3 продуктов сгорания соответствует вполне определенная температура. Другой теплоемкости будет соответствовать и другая температура. Подобный метод определения температуры по величине теплоемкости (или энтальпии) продуктов сгорания широко применяется в расчетах.

§ 3. Устройства для сжигания топлива

Общие принципы выбора рациональных методов сжигания топлива в печах

Устройства для сжигания топлива предназначены для того, чтобы обеспечить превращение химической энергии топлива

в тепловую энергию, необходимую для осуществления технологических операций в рабочем пространстве печи. Метод сжигания топлива выбирают в зависимости от вида топлива и назначения печи.

Выбирая и размещая устройства для сжигания топлива для конкретной конструкции печи, необходимо обеспечить:

1) в рабочем пространстве печи необходимую действительную температуру;

2) необходимый характер изменения температуры по длине и ширине печи;

3) подвод топлива, который соответствовал бы выбранному распределению температуры;

4) такой характер движения газов и теплообмена, который для данной печи является наиболее целесообразным.

Кроме перечисленных задач, при выборе устройств для сжигания топлива и систем отопления учитывают также следующие факторы: возможность использования подогретых газа и воздуха, надежность эксплуатации и удобство обслуживания, возможность применения автоматического регулирования и ряд других факторов, связанных с особенностями конструкции печей.

Устройства для сжигания газа (горелки)

Основным назначением горелок является организация процесса горения топлива так, чтобы обеспечить заданный, экономически целесообразный режим работы печи. Для достижения этой цели горелка должна обеспечить:

1) подвод и смешение между собой необходимых количеств 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.

Таким образом, весь цикл, который составляет процесс сжигания топлива (смешение — горение — теплопередача), должен быть выполнен с наивысшей эффективностью, с наивысшим коэффициентом полезного действия.

Основным классификационным признаком горелок является способ смешения газа с воздухом. По этому признаку горелки делят на три большие группы:

1) с полным предварительным смешением газа и воздуха (беспламенные горелки);

2) с частичным предварительным смешением газа и воздуха (горелки с улучшенным смешением);

3) горелки без предварительного смешения или с внешним смешением (пламенные горелки).

К первой группе относятся такие горелки, которые обеспечивают полное смешение топлива и воздуха еще до выхода в печь. В печь (в зону горения) подают заранее подготовленную горючую смесь; процесс горения имеет кинетический характер. Такие горелки часто называют беспламенными, так как заранее подготовленная топливновоздушная смесь, сгорая, почти не дает видимого пламени. Беспламенные горелки дают факел с малой излучательной способностью, радиация такого факела быстро падает по мере удаления от горелки.

В горелках с частичным предварительным смешением к топливу предварительно (до выхода в печь) подмешивается только часть воздуха, необходимого для горения.

В горелках с внешним смешением образование смеси происходит в одном объеме с горением, которое имеет диффузионный характер. В результате при сжигании топлива, содержащего углеводороды, образуется хорошо видимое пламя. Поэтому эти горелки часто называют пламенными.

Горелки с полным предварительным смешением (инжекционные горелки)

В инжекционных горелках, дающих хорошее предварительное смешение топлива с воздухом, необходимая полнота сгорания достигается при наименьшем по сравнению с горелками других типов коэффициенте избытка воздуха. Уменьшение коэффициента избытка воздуха влечет за собой увеличение температуры горения. Поэтому горелки с предварительным смешением для аналогичного топлива обеспечивают наивысшую температуру горения.

Предварительное смешение газа и воздуха требует специальных устройств-смесителей, которые могут быть выполнены или заодно с горелкой, или отдельно от нее. Наибольшее распространение получили смесители инжекционного типа. На рис. 46 и 47 представлены инжекционные смесители конструкции Стальпроекта.

На рис. 46 показан инжекционный смеситель, выполненный отдельно от горелки и подающий газо-воздушную смесь сразу в несколько горелок.

На рис. 47 изображен инжекционный смеситель, представляющий собой единое целое с горелкой. В зависимости от производительности горелок используют ту или другую

конструкцию. При диаметре выпускного отверстия $d_{н.г} \leqslant$ $\leqslant 75$ мм применяют горелку, изображенную на рис. 46, а при $d_{н.г} > 75$ мм применяют горелку, приведенную на рис. 47.

Смеситель работает следующим образом. Газообразное топливо под определенным давлением поступает в смеситель через входной патрубок *1* и, выходя с большой скоростью через сопло *3*, инжектирует необходимый для горе-

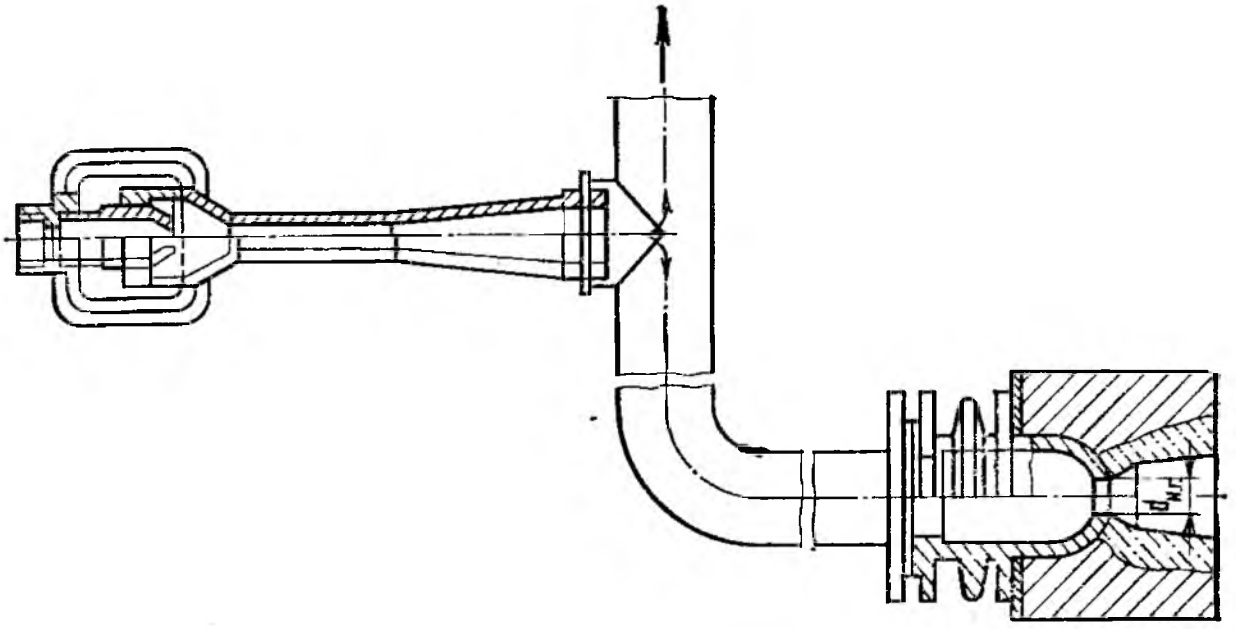


Рис. 46. Инжекционный смеситель, выполненный отдельно от горелки

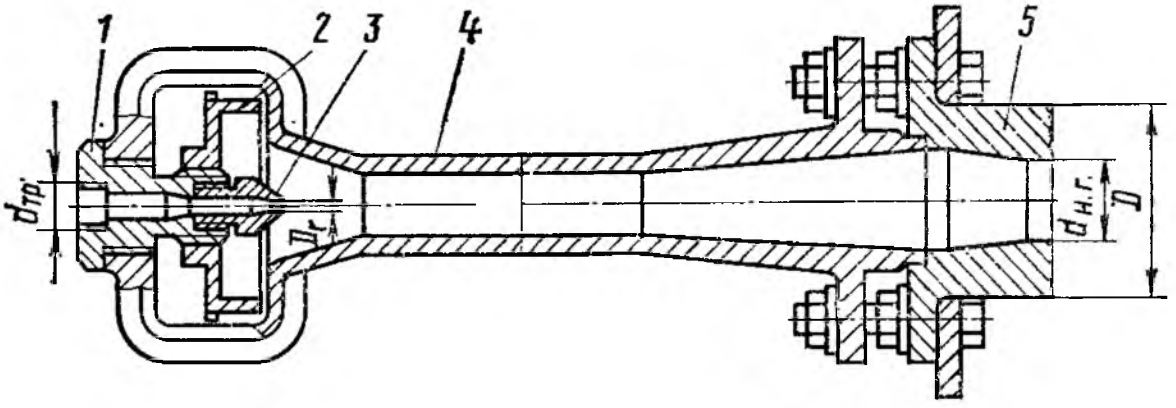


Рис. 47. Инжекционный смеситель, выполненный заодно с горелкой:

1 — входной патрубок; *2* — воздушная шайба; *3* — газовое сопло; *4* — смешивающая труба; *5* — горелка

ния воздух. Воздух подсасывается из окружающей атмосферы через кольцевую щель между воздушной шайбой *2* и смешивающей трубой *4*.

Газ смешивается с воздухом во время подсасывания воздуха, однако для полного перемешивания нужен еще дополнительный участок, роль которого и выполняет смешивающая труба *4*, длина которой должна быть не меньше семи ее диаметров.

В инжекционной горелке подобной конструкции при изменениях расхода одного и того же топлива автоматически может поддерживаться заданный коэффициент расхода (избытка) воздуха, так как изменение расхода газа влечет за собой изменение количества инжектируемого воздуха. Применение инжекционных смесителей при работе на холодном воздухе позволяет отказаться от воздухопроводов и

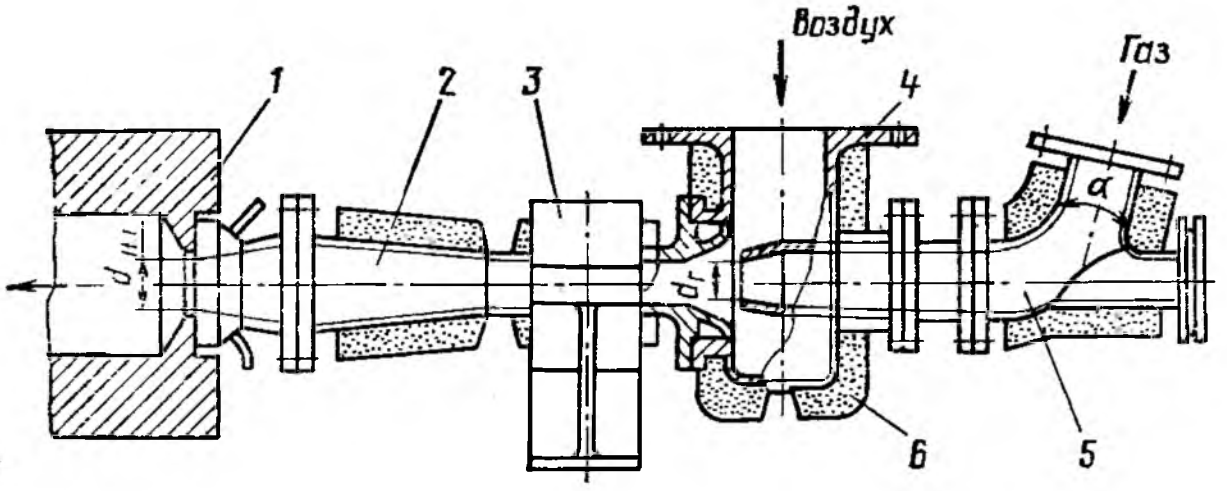


Рис. 48. Инжекционная горелка, работающая на подогретых средах:

1 — туннель; *2* — горелка; *3* — опорная стойка; *4* — дроссельный клапан; *5* — колено; *6* — изоляция

вентиляторов, что является преимуществом горелок этого типа.

Производительность и устойчивость работы инжекционных горелок в значительной мере зависят от давления, под которым поступает газообразное топливо. Если давление таково, что скорость выхода смеси из носика горелки окажется меньше скорости горения для данного топлива, то пламя будет проскакивать внутрь смешивающей трубы и горелка может выйти из строя.

Возможен и такой случай, когда при чрезмерном давлении скорость выхода смеси из носика горелки значительно превысит скорость горения и пламя будет отрываться от носика горелки, что снизит эффективность ее работы. Кроме работы на холодном атмосферном воздухе, инжекционные горелки определенных конструкций могут работать и на подогретых газе и воздухе, что особенно важно для печей, отапливаемых бедным топливом, например доменным газом. На рис. 48 показана инжекционная горелка подобного назначения конструкции Стальпроекта.

Важно правильно выбрать допускаемую температуру подогрева газа и воздуха, чтобы исключить возможность воспламенения в смесителе. Опыты Стальпроекта показали,

что при температуре смеси 850 К доменный газ не воспламеняется, а предельная температура нагрева смеси составляет 673 К. Эти горелки применяют обычно на крупных нагревательных печах. Печи, оборудованные такими горелками и керамическими рекуператорами из шамотных блоков, могут работать без принудительной подачи воздуха.

В работе инжекционных горелок существенную роль играет туннель. В процессе горения газа стенки туннеля раскаляются, что обеспечивает поджигание новых порций газо-воздушной смеси и тем самым способствует устойчивому горению.

При всех отмеченных преимуществах инжекционным горелкам свойственны следующие дефекты: недостаточные пределы регулирования, невозможность изменять теплоты сгорания топлива при данном диаметре сопла, большие размеры горелок значительной производительности.

Беспламенные горелки не следует применять в том случае, когда по условиям работы печи необходим хорошо светящийся и достаточно длинный факел.

Горелки с внешним смешением (пламенные горелки)

Горелки с внешним смешением получили очень широкое распространение на печах различного назначения и размеров. В зависимости от их конструктивного оформления длина факела изменяется в очень широких пределах. Общим для горелок с внешним смешением является то, что до выхода из горелки топливо и воздух подаются по отдельным каналам. Перемешивание газа с воздухом осуществляется на выходе из горелки в рабочем пространстве печи. В результате этого горение топлива затягивается и для обеспечения необходимой полноты сжигания топлива необходим избыток воздуха (10—15 %).

Существуют различные методы ввода газа и воздуха, которые в той или иной мере осуществляются в конструкциях пламенных горелок. Конструктивное оформление ввода газа и воздуха оказывает весьма сильное влияние на интенсивность смешения и как следствие на длину факела. Это хорошо видно из рис. 49. Второй и пятый случаи соответствуют широко распространенным горелкам «труба в трубе» и турбулентным. При коаксиальном подводе газа и воздуха (второй случай) качество смешения наиболее низкое, а длина факела наибольшая. Если придать воздуху интенсивное вращательное движение применением корпуса горелки улиткообразной формы (случай пятый), то смешение значительно улучшается, а факел укорачивается. В свя-

зи с этим турбулентные горелки с внешним смешением иногда называют горелками с улучшенным смешением. Таким образом, чем лучше смешение, тем короче факел.

Пламенные горелки целесообразно применять при сжигании топлива с высокой теплотой сгорания, когда при достаточно высоком коэффициенте расхода кислорода, равном

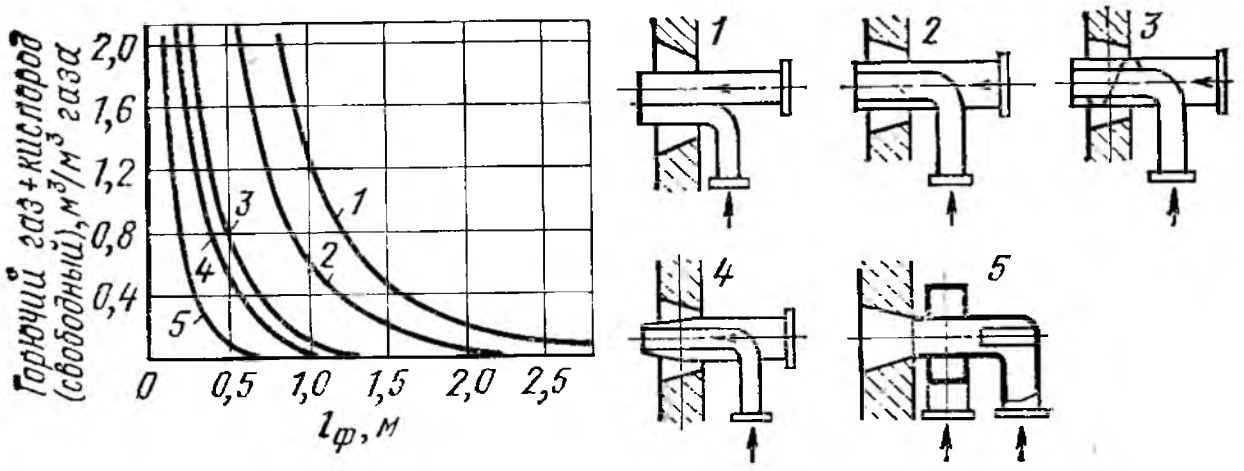


Рис. 49. Влияние конструкции горелки на длину факела

1,1—1,15, можно обеспечить необходимый нагрев металла. Такие горелки обычно применяют при необходимости концентрированного подвода топлива небольшим числом горелок. При применении горелок с внешним смешением наиболее просто осуществляется переход с одного вида топлива на другой.

К недостаткам горелок с внешним смешением надо отнести следующее: 1) высокое значение коэффициента избытка воздуха, что вызывает излишний расход топлива; 2) для подачи воздуха необходим вентилятор; 3) для регулирования количества воздуха по изменению количества газа нужны специальные устройства.

Имеется много различных горелок с внешним смешением. Ниже в качестве примеров рассмотрены лишь типовые горелки той или иной группы.

Горелки типа «труба в трубе». Эти горелки (их часто называют двухпроводными) могут работать на различных печах и на различном топливе при небольшом давлении и допускают широкие пределы регулирования. Скорость входа смеси в устье горелки принимают в пределах $w = 10 \div 70$ м/с при давлении газа и воздуха от 98 до 4900 Па. Необходимое давление газа и воздуха следует принимать на 35—40 % больше динамического напора газа и воздуха (рис. 50).

Следует также правильно выбирать соотношение скоростей газа и воздуха в указанных сечениях. Ниже приведены приближенные рекомендуемые значения отношения площади воздушного кольца к площади сечения газовой трубки для различных топлив:

Смешанный газ, $Q_н^р$=3771—5866 кДж/м³	1,1
Смешанный газ, $Q_н^р$=5866—8380 кДж/м³	1,9
Коксовый газ	7
Природный газ	14

Габариты горелок невелики. Горелки применяют при подогретых газе и воздухе; работа горелок не зависит от

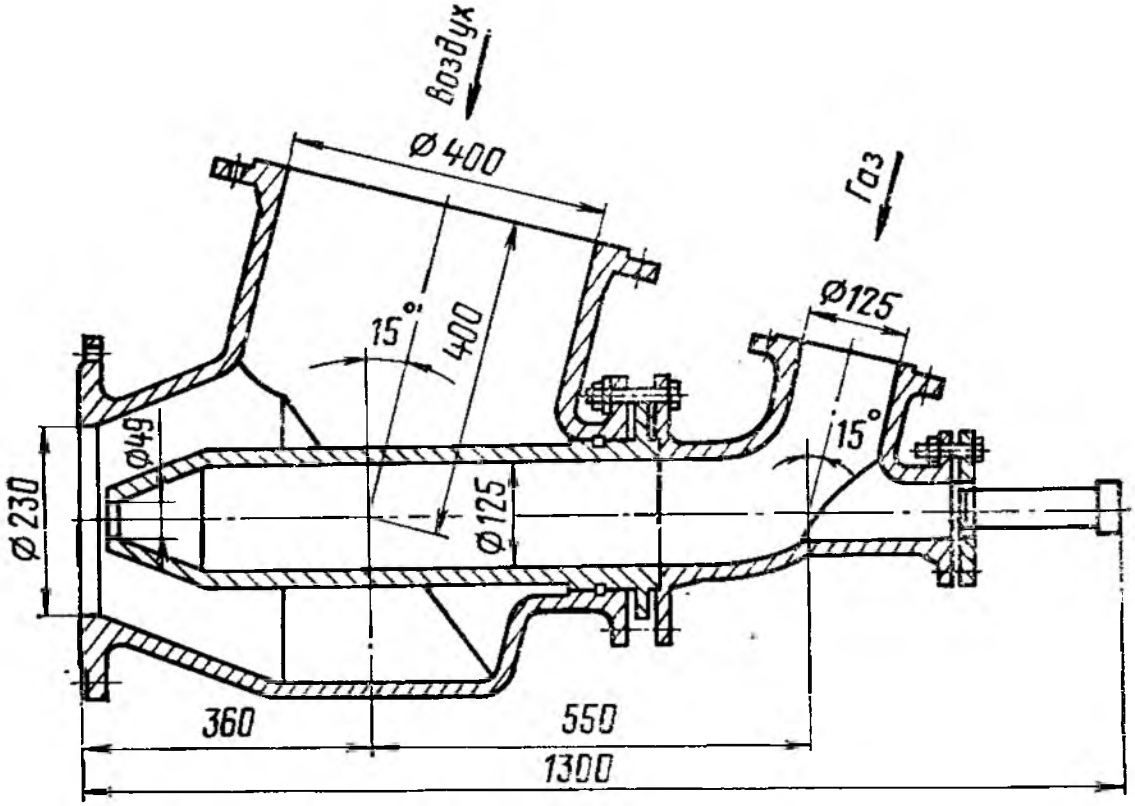


Рис. 50. Горелка «труба в трубе»

давления в печи. Смешение топлива с воздухом в двухпроводных горелках плохое, что вызывает образование длинного факела. Поэтому их целесообразно применять в тех случаях; когда тепловыделение от пламени должно быть растянуто по длине рабочего пространства. Подобные горелки пока представляют собой оптимальный вариант для методических печей, отапливаемых природным газом. Применение горелок данного типа стимулируется также относительной простотой их конструкции и малой стоимостью.

Турбулентные горелки. Эти горелки по конструктивным формам очень многообразны, однако общим для них является то, что в них воздушная струя поступает тангенциально по отношению к газовой. Благодаря этому воздух приоб-

ретает вращательное движение, что способствует улучшению перемешивания и общей турбулизации факела.

Одной из наиболее распространенных конструкций является турбулентная горелка Стальпроекта (рис. 51), рассчитанная на топливо с теплотой сгорания 3770—8280 кДж/м³. В этой горелке воздух приобретает вращательное движение благодаря улиткообразной форме воздушной части корпуса. Газ поступает в устье горелки со значительной

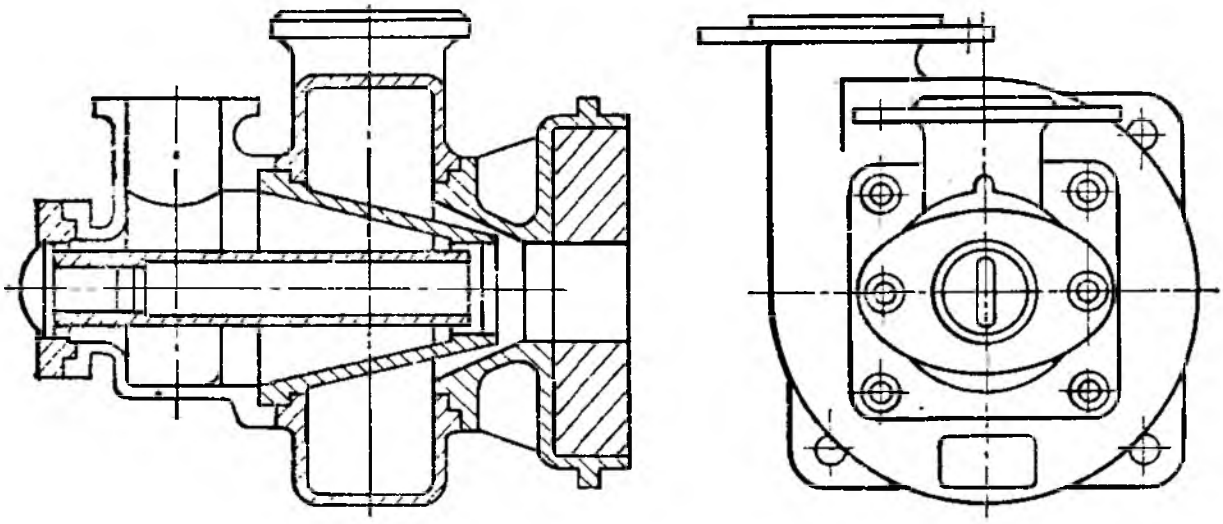


Рис. 51. Турбулентная горелка конструкции Стальпроекта

скоростью, которая обеспечивается постоянным сужением газового сопла и пережимающим действием внутренней трубки. Вращающийся вокруг газовой струи воздух разбивает ее, обеспечивая сравнительно хорошее перемешивание их друг с другом. Горелка работает при коэффициенте расхода (избытка) воздуха, равном 1,1, и создает факел, длина которого в 7—10 раз больше диаметра устья горелки.

Для турбулентных горелок данной конструкции скорость газо-воздушной смеси в устье горелки принимают в пределах 15—40 м/с, причем при скорости смеси 40 м/с давление газа и воздуха должно составлять 4,9—6,9 кПа.

Турбулентные горелки имеют следующие преимущества перед горелками других типов: 1) сравнительно низкое давление газа и воздуха; 2) при низком давлении и довольно простой конструкции могут обеспечить достаточно хорошее смешение топлива с воздухом; 3) могут работать на подогретых газе и воздухе.

Благодаря этим преимуществам турбулентные горелки нашли широкое применение на различных нагревательных и термических печах.

Горелки с регулируемой длиной факела. В некоторых печах расход топлива изменяется во времени. При этом в

соответствии с изменением тепловой нагрузки изменяются скорость истечения газа и воздуха и длина факела, что может привести к нежелательному изменению температуры по длине рабочего объема печи. Чтобы избежать этого, применяют горелки с регулируемой длиной пламени.

На рис. 52 представлена горелка с регулируемой длиной пламени, разработанная для нагревательных печей. К горелке подводят первичный и вторичный газ. Первичный газ

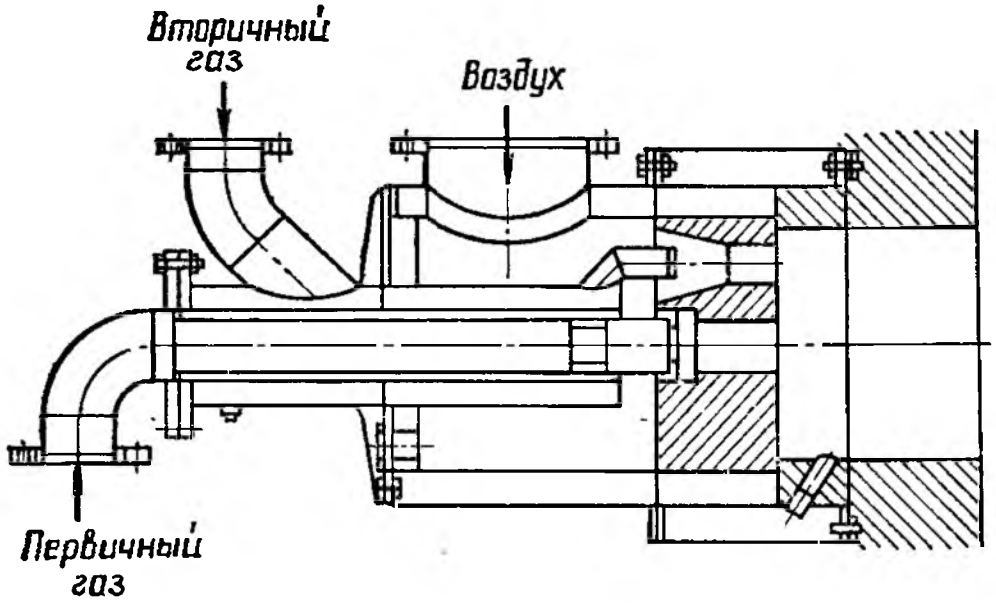


Рис. 52. Горелка с регулируемой длиной пламени

поступает через центральное сопло, а вторичный — через шесть сопел, оси которых совпадают с отверстиями для прохода воздуха. Если в горелку подается только первичный газ, то вследствие слабого смешения образуется растянутый факел. При подаче только вторичного газа смешение будет лучше, а факел короткий. Комбинируя соотношение первичного и вторичного газа, можно поддерживать факел необходимой длины.

Горелки, применяемые при косвенном режиме работы печи. При косвенном режиме сжигание газа должно быть выполнено так, чтобы селективное излучение продуктов сгорания было трансформировано в сплошное по спектру излучение огнеупорного материала на нагреваемый металл. Роль горелки сводится к тому, чтобы с наибольшей эффективностью раскалить поверхность керамики до высокой температуры. Такие горелки обеспечивают контактное сгорание газа на керамической поверхности с максимальным приближением к поверхности огнеупора зоны высоких температур пламени. Чем выше температура поверхности керамики, тем больше ее теплоотдающий эффект. В качестве теплоотдающей керамической поверхности могут быть ис-

пользованы поверхности керамических корпусов горелок и кладка свода, расположенная вокруг горелки. Горелки, применяемые для обеспечения косвенного режима, могут быть с предварительным и внешним смешением.

Предварительное смешение применяется, например в радиационных горелках с излучающей чашей.

В горелках с излучающей чашей корпус горелки выполняется из высококачественного, обычно высокоглиноземи-

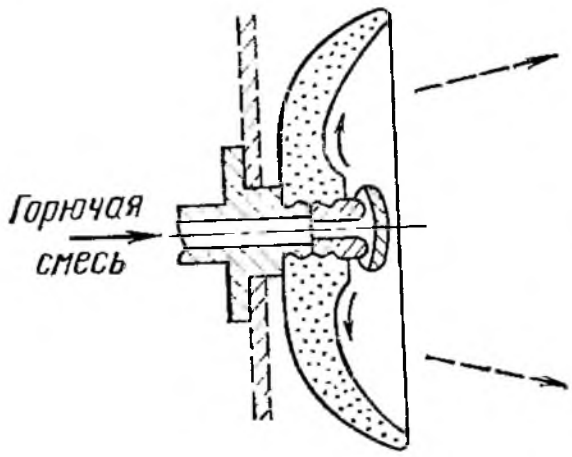


Рис. 53. Радиационная горелка с излучающей чашей

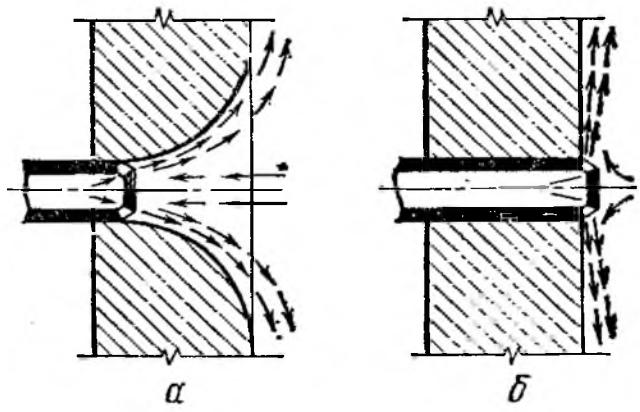


Рис. 54. Конфигурация горелочных камней плоскопламенных горелок

стого (алунда, муллита) огнеупорного материала. Поэтому такие горелки часто называют керамическими горелками. Одна из таких горелок представлена на рис. 53. Внутренний диаметр выходной части чаши обычно находится в пределах 50—170 мм. В центре чаши ввинчена керамическая пробка, имеющая 20—40 узких пазов шириной около 0,5 мм каждый. По этим пазам заранее приготовленная горючая смесь поступает в зону горения. Выходные отверстия в пробке выполнены так, что горючая смесь растекается вдоль вогнутой поверхности чаши и, сгорая в непосредственной близости, раскаляет ее до высокой температуры. Давление горючей смеси обычно около 19,6 кН/м^2. Излучение при теплоте сгорания топлива 37700 кДж/м^3 составляет примерно 70 %; с уменьшением теплоты сгорания доля излучения падает. Оптимальное теплонапряжение поверхности излучающей поверхности чаши 580—1280 кВт/м^2.

В последнее время все более широкое распространение приобретает сводовое отопление печей, при котором все необходимые горелки или некоторые размещаются на своде печи. Назначение этих горелок заключается в том, чтобы обеспечить максимально возможное излучение на нагреваемый металл внутренней поверхности свода. С этой целью конструкции горелок выполняются так, чтобы образующе-

еся пламя тонким (плоским) слоем растекалось по элементам поверхности свода, расположенным вокруг горелки. Вследствие этого такие горелки получили название плоскопламенных горелок.

Для создания разомкнутого пламени, стелющегося по поверхности свода, в плоскопламенных горелках применяют горелочные камни специальной формы и рассекатели. Кроме того, воздушному потоку обычно придается вращательное

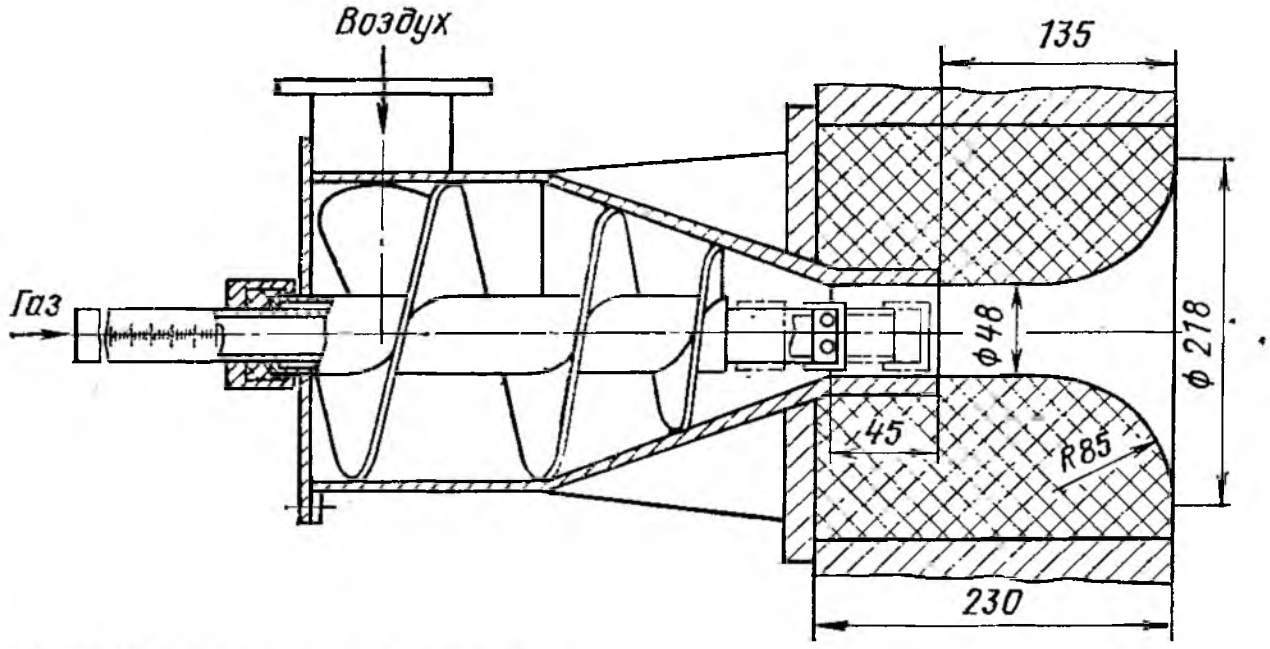


Рис. 55. Плоскопламенная горелка

движение. Конфигурация туннеля горелочного камня оказывает существенное влияние на форму пламени (рис. 54). Обычно плоскопламенные горелки применяют без туннеля (рис. 54, *б*) или с таким туннелем, который представлен на рис. 54, *а*.

Конструкции плоскопламенных горелок в настоящее время весьма многообразны. В горелке, разработанной в Институте газа АН УССР (рис. 55), вращательное движение воздуха обеспечивается улиткообразной формой корпуса, по которому подается воздух (наподобие того, как это делается в турбулентной горелке конструкции Стальпроекта), и специальным направляющим винтом. Иногда такую горелку применяют и без винта.

Принцип плоскопламенного горения применяют в отдельных случаях и при сжигании распыленного жидкого топлива.

Устройства для сжигания жидкого топлива (форсунки)

Для осуществления широко применяемого в печах факельного метода сжигания жидкого топлива применяют специальные устройства, называемые форсунками.

Таблица 9. Сравнительная характеристика форсунок низкого и высокого давления

Характеристика	Форсунки	
	низкого давления	высокого давления
Распылитель	Вентиляторный воздух	Компрессорный воздух; водяной пар
Давление распылителя, кПа	2,94—8,82	Компрессорный воздух; пар, 588—1774
Доля распылителя (воздуха) от всего воздуха, расходуемого на горение, %	100	7—12
Доля вторичного воздуха от всего воздуха, необходимого для горения, %	0	88—93
Предельная температура подогрева воздуха, К	573	Подогрев вторичного воздуха не ограничен
Удельный расход распылителя на 1 кг мазута, кг		0,6—0,8
Скорость выхода распылителя из форсунки, м/с	50—80	Обычно до 330; иногда более 330
Степень распыливания (диаметр капли), мм	До 0,5	0,05

К форсункам предъявляют следующие требования:

1) хорошее распыливание и перемешивание топлива с воздухом;

2) обеспечение устойчивого горения незатухающего факела нужной длины;

3) надежность в эксплуатации, простота и прочность конструкции, незасоряемость, удобство чистки.

Все форсунки разделяют на две группы: низкого и высокого давления (табл. 9).

Различие между форсунками низкого и высокого давления состоит в том, что в форсунках низкого давления распылителем служит вентиляторный воздух со сравнительно невысоким давлением, в то время как в форсунках высокого давления распылителем служит компрессорный воздух или пар высокого давления. При этом в форсунках низкого давления весь воздух, необходимый для горения, поступает через форсунку. В форсунках высокого давления расход компрессорного воздуха составляет 7—12 % всего количества воздуха, необходимого для горения. Остальной воздух, называемый вторичным, через форсунку не проходит, а по-

ступает к форсунке по специальным керамическим каналам.

Если распылителем является пар, то весь необходимый для горения воздух подают в виде вторичного. Это обстоятельство в значительной мере и определяет область применения различных форсунок. Поскольку вторичный воздух может подогреваться до весьма высоких температур (1373—1473 К), форсунки высокого давления применяют на таких печах, где для достижения высоких температур в рабочем пространстве (например, мартеновских печей) необходимо воздух подогревать до высокой температуры.

Форсунки низкого давления, в которых применяют воздух, подогретый до 573 К, используют на нагревательных печах различного типа. Преимущество форсунок низкого давления — несколько более полное сгорание мазута, что достигается благодаря участию большой массы воздуха в распыливании. В форсунках высокого давления подача основной массы воздуха, помимо форсунки, приводит к снижению качества смешения и является причиной несколько повышенного расхода воздуха.

Форсунки низкого давления

Конструкции форсунок низкого давления весьма многообразны. Типовой форсункой является широко распространенная форсунка конструкции Стальпроекта, показанная на рис. 56. Давление мазута перед форсункой составляет 49,0—98,0 кПа; распылителем служит вентиляторный воздух, который может быть подогрет до 573 К, но не выше, так как в результате нагрева мазутной трубки может произойти разложение мазута и сопло засорится.

Обычно в форсунках низкого давления весьма невелики возможные пределы регулирования расхода мазута. Это объясняется тем, что с уменьшением расхода мазута уменьшается расход воздуха, в результате чего уменьшается скорость выхода воздуха и ухудшается его распыливающее действие. В форсунке конструкции Стальпроекта можно изменять расход мазута до 40—50 % максимальной ее производительности без заметного ухудшения распыливания. Это обеспечивается возможностью перемещения мазутного сопла при помощи специального рычага, в результате чего изменяется сечение для выхода распылителя и скорость его остается на требуемом уровне. Форсунка дает длинный (примерно 2—2,5 м) узкий факел, причем для полноты сгорания необходимо поддерживать коэффициент избытка воздуха, равный 1,2.

В настоящее время многие форсунки типизированы, что позволяет не рассчитывать их, а выбирать в зависимости от производительности.

Форсунки высокого давления

Типичной для круглых струйных форсунок высокого давления одноступенчатого распыливания с внешним образованием смеси, применяемой на малых и средних печах,

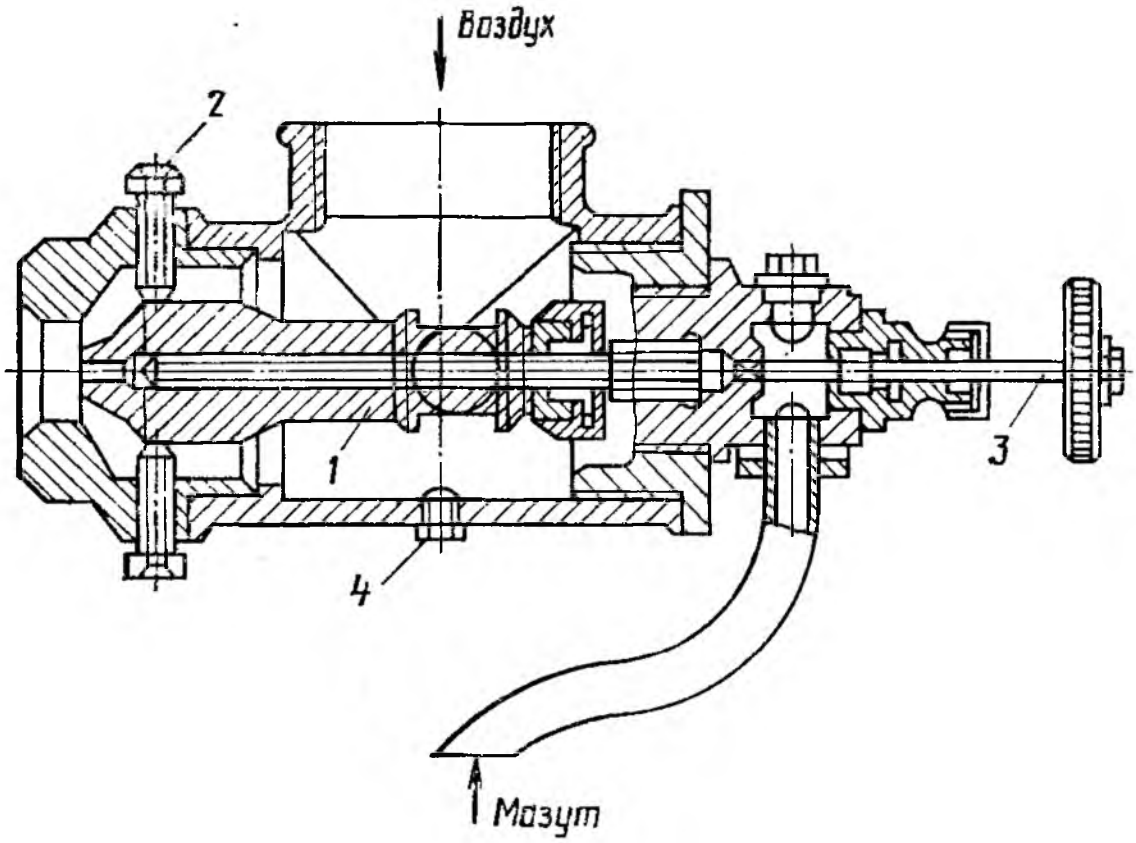


Рис. 56. Форсунка низкого давления конструкции Стальпроекта:

1 — мазутная трубка; *2* — винты для центровки мазутной трубки; *3* — игла для регулирования подачи мазута; *4* — сливная пробка

является форсунка конструкции В. Г. Шухова (рис. 57). Проходное ее сечение для мазута постоянно. Скорость истечения распылителя не превышает скорости звука (330 м/с). Факел форсунки узкий и длинный. Для форсунки малых размеров длина факела составляет 2,5—4 м; для больших форсунок она достигает 6—7 м. Форсунка пригодна для работы в длинных топочных камерах. Для малых камерных печей форсунка конструкции Шухова непригодна, так как пламя ударяет в противоположную стену камеры, разрушает кладку и образует коксовые наросты несгоревшего мазута. Часть топлива выносится из печи несгоревшим. Расход пара, необходимого для распыливания 1 кг подогретого мазута, составляет 0,4—0,6 кг, а расход сжатого воздуха изменяется в пределах 0,6—0,8 м^3/кг.

Форсунки изготовляют десяти размеров (номеров), рассчитанных на производительность 3—400 кг/ч.

Для отопления крупных печей, например мартеновских, применяют форсунки высокого давления особой конструкции, создающие достаточно жесткий, светящийся факел, например форсунку конструкции Днепропетровского метал-

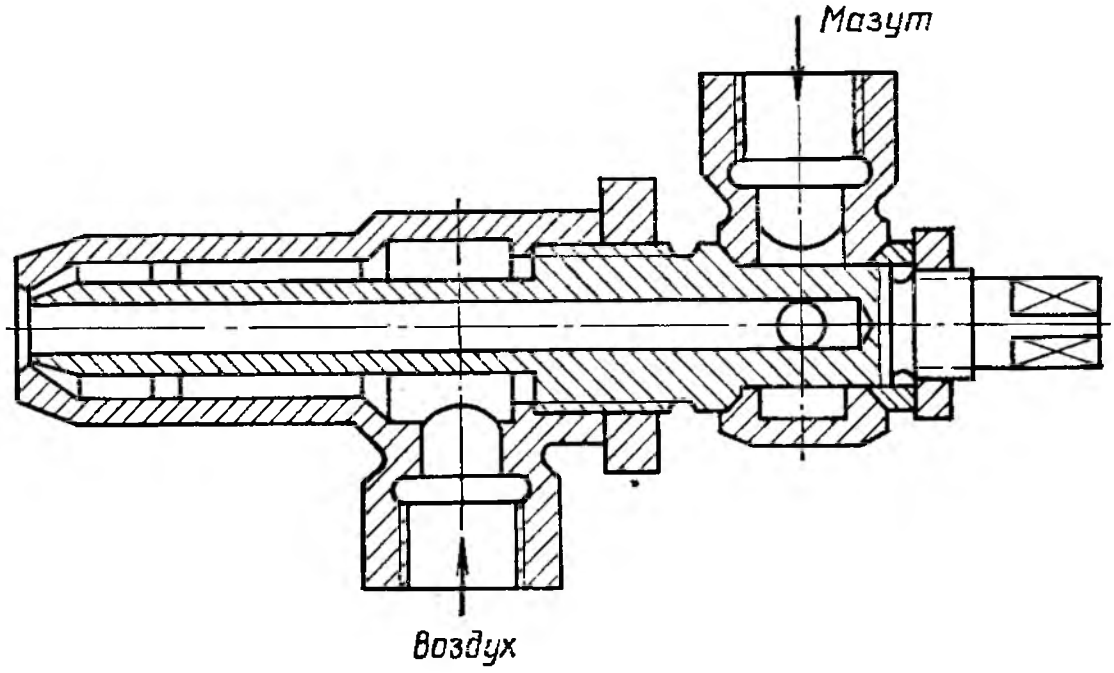


Рис. 57. Форсунка высокого давления конструкции В. Г. Шухова

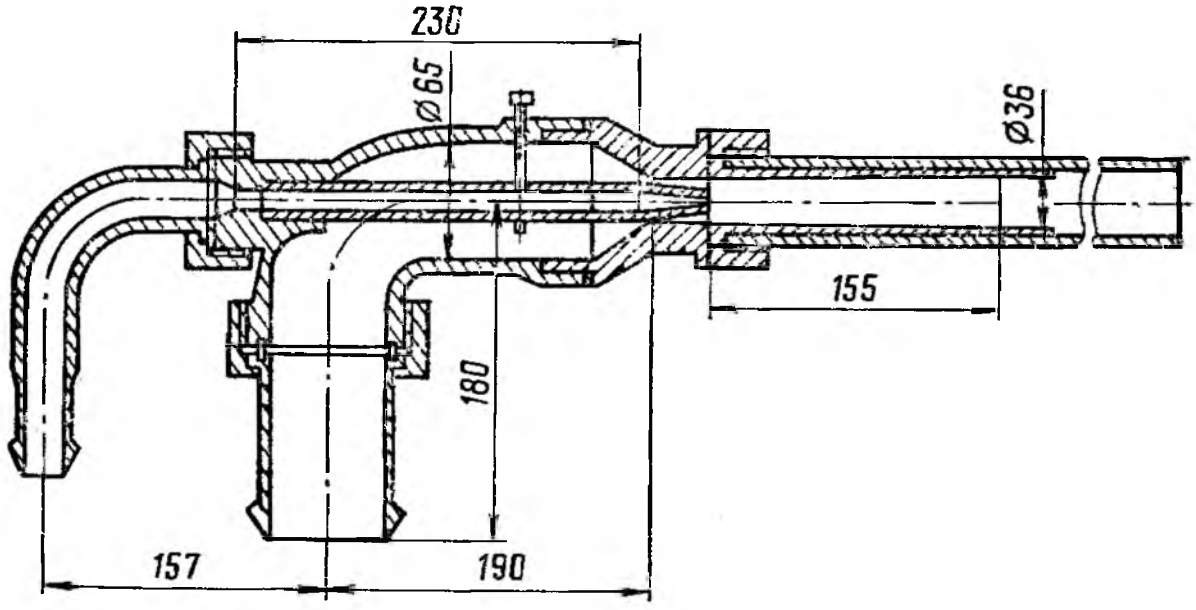


Рис. 58. Форсунка высокого давления конструкции ДМетИ

лургического института (ДМетИ), показанную на рис. 58. В этой форсунке мазут поступает по центральной трубке, а распылитель до соприкосновения с топливом расширяется до давления, близкого к атмосферному. Применение сопла Лаваля с диффузором позволяет достигать очень высокой скорости истечения (750 м/с и более), что обеспечивает хорошее распыливание мазута.

Производительность форсунки изменяется в пределах 250—2500 кг/ч при изменении расхода пара или компрессорного воздуха (распылителей) соответственно 25—1250 и 180—1900 кг/ч.

В нагревательных печах иногда при применении форсунок высокого давления вторичный воздух для горения также поступает по специальным керамическим каналам. Однако довольно часто применяют форсунку высокого давле-

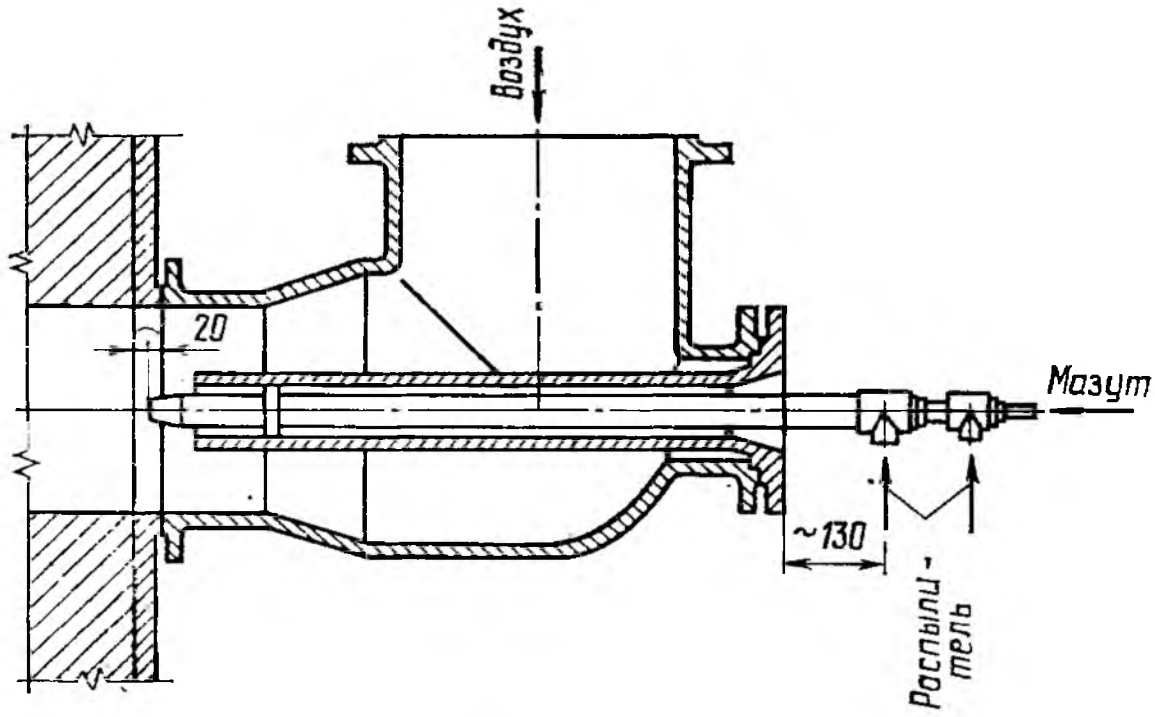


Рис. 59. Установка форсунки в форсуночной коробке

ния вместе с форсуночной коробкой, через которую подается воздух, необходимый для горения. На рис. 59 представлена форсунка высокого давления с двойным распыливанием конструкции Стальпроекта, установленная в форсуночной коробке.

Форсуночные коробки применяют при температуре воздуха до 673 К. Выходное сечение по воздуху рассчитывают на действительную скорость в пределах 20—25 м/с.

Комбинированные газомазутные горелки

В производственных условиях по различным причинам возможно изменение вида используемого топлива или добавление в случае нехватки топлива одного вида к другому (например, мазута к газу). В настоящее время широкое распространение получили комбинированные газомазутные горелки (форсунки).

Существуют газомазутные горелки, в которых мазут и газ подаются в зону горения через концентрические, распо-

ложенные по оси горелки трубки (рис. 60). Представленная на рис. 60 горелка применяется для отопления нагревательных печей. Работает она на мазуте и коксовом газе при давлении газа 980—4900 Па. Допустим подогрев газа до 473 К и воздуха до 773 К.

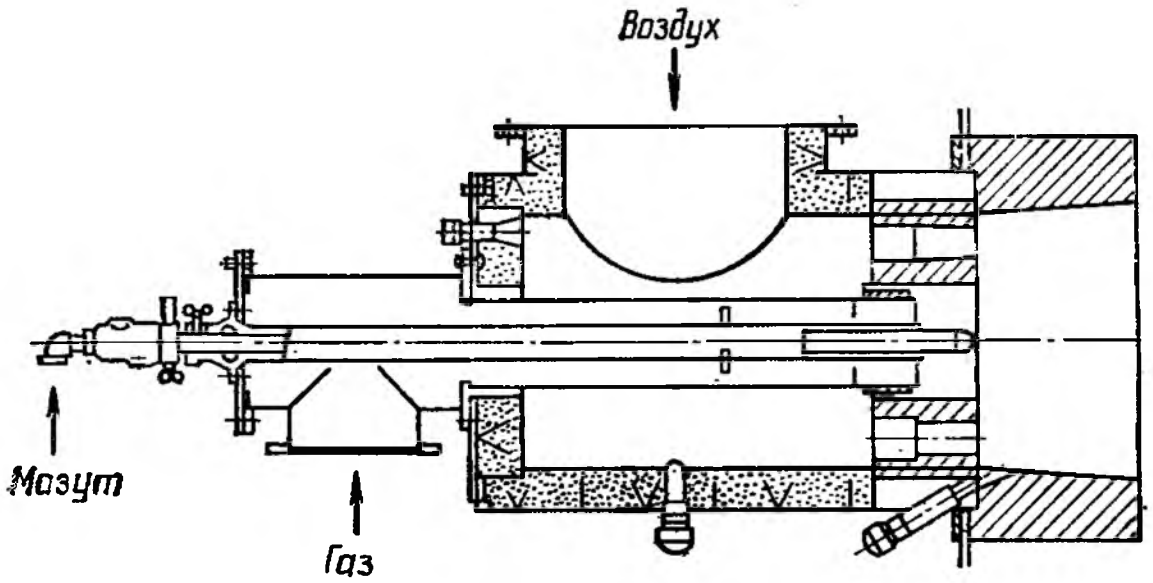


Рис. 60. Газомазутная горелка с осевым подводом газа и мазута

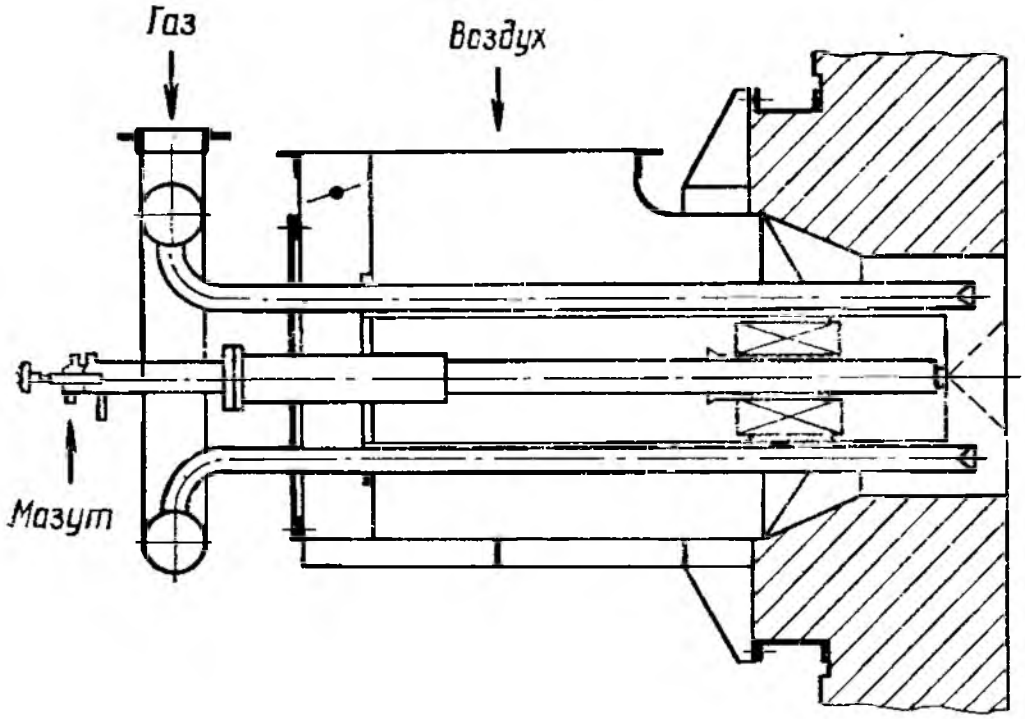


Рис. 61. Газомазутная горелка с разобщенным подводом газа и мазута

В других газомазутных горелках мазут и газ подаются по необъединенным конструктивно трубкам (рис. 61), причем мазут подается всегда по внутренней трубке, так как он труднее смешивается с воздухом.

Для распыливания мазута в комбинированных газомазутных горелках применяются пар с давлением до 1 МПа и сжатый воздух.

Радиационные трубы

Различные виды термической и термохимической обработки требуют применения муфелирования — отделения продуктов сгорания от нагреваемого металла. Одним из методов муфелирования является муфелирование пламени, для чего применяются радиационные трубы, в которых производится сжигание топлива. Радиационные трубы выполняют из жаростойких хромоникелевых сталей (18—25 % Cr, 13—25 % Ni). Такие трубы могут достаточно надежно работать при температуре поверхности примерно 1273 К; их устанавливают на печах с температурой нагрева металла 1173—1193 К. Для обеспечения эффективной работы радиационных труб необходимо стремиться к достижению максимально возможного теплонапряжения поверхности трубы, т. е. количества тепла, отдаваемого 1 м^2 поверхности трубы в единицу времени.

Радиационные трубы бывают одно- и многоветьевые. Конструкции наиболее распространенных труб приведены на рис. 62.

В радиационных трубах обычно применяют горелки типа «труба в трубе», позволяющие легко регулировать длину пламени по длине трубы, чем обеспечивается равномерный нагрев ее поверхности.

В радиационных трубах применяют рекуператоры для подогрева воздуха (см. рис. 62), представляющие собой ребристый радиатор из жароупорного чугуна, внутри которого расположена стальная труба. Воздух поступает через центральную трубку, проходит по кольцевой щели между центральной трубкой и внутренней поверхностью радиатора и через соединительный патрубок направляется в горелку. Продукты сгорания омывают радиатор снаружи.

Все трубы, представленные на рис. 60, предназначены для работы на природном газе. Характеристика этих труб приведена в табл. 10.

Теплонапряжение поверхности радиационных труб может быть определено по выражению, Вт/м^2

$$q = C_{\text{пр}}[(T_{\text{т}}/100)^4 - (T_{\text{м}}/100)^4],$$

где $T_{\text{т}}$ и $T_{\text{м}}$ — температура поверхности трубы и средняя температура поверхности металла в камере нагрева, К.

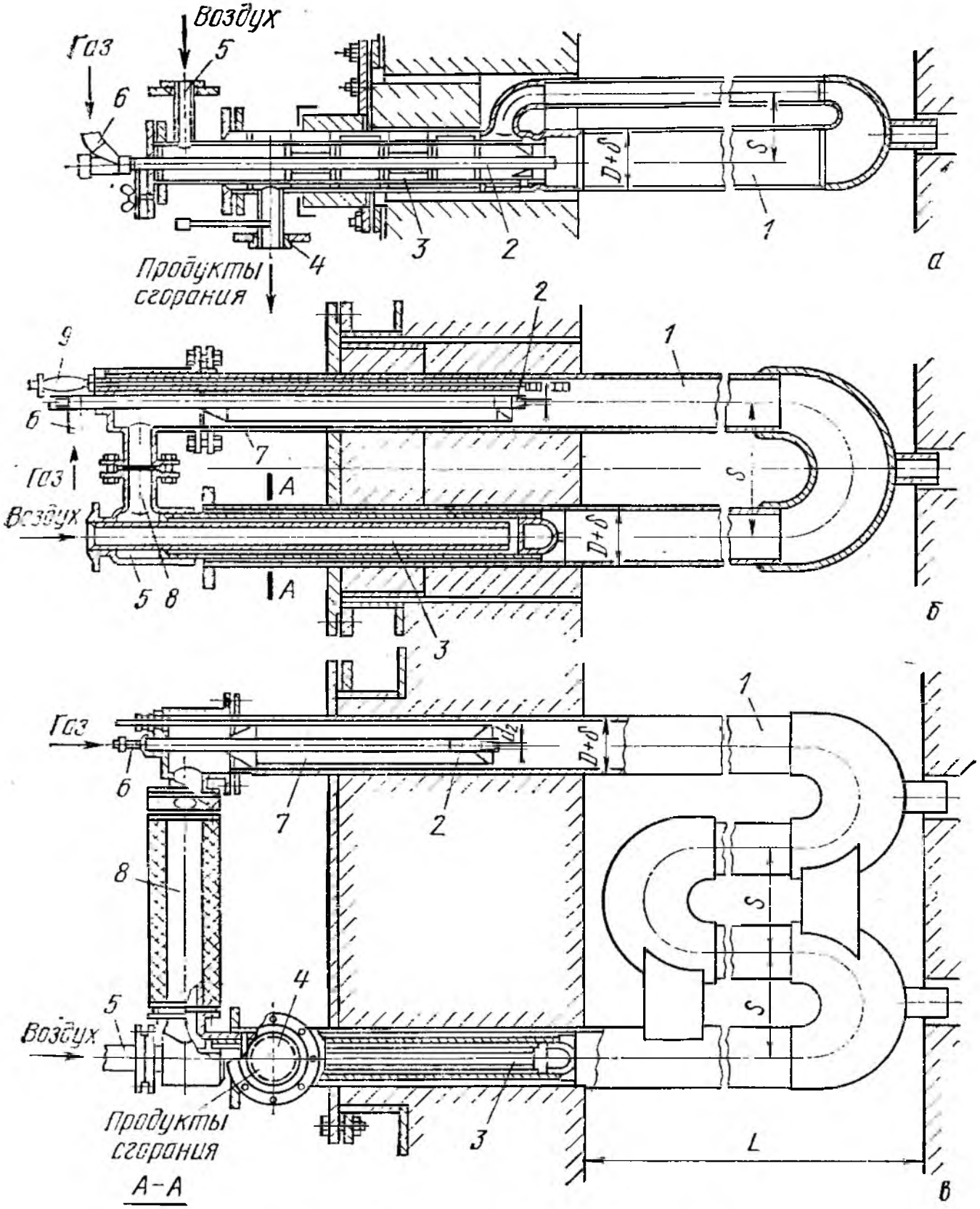


Рис. 62. Радиационные трубы:

а — Р-образная одноветьевая; *б* — двухветьевая; *в* — четырехветьевая; *г* — поперечное сечение рекуператора для подогрева воздуха; *1* — радиационная труба; *2* — горелка; *3* — рекуператор; *4* — выхлопной патрубок; *5* — патрубок для подвода первичного воздуха; *6* — патрубок для подвода газа; *7* — вставка; *8* — соединительный патрубок для подвода подогретого воздуха из рекуператора к горелке; *9* — запальник; *10* — радиатор; *11* — центральная трубка

Температуру поверхности металла труб выбирают на 50—100° выше температуры нагрева металла.

Приведенный коэффициент излучения определяется в соответствии с применяемой схемой теплообмена. Обычно радиационные трубы применяют при нагреве листов и лент. Характеристика системы для этого случая приведена на рис. 63. Коэффициент $C_{пр}$ может быть определен по выражениям, Вт/(м²·К⁴):

при одностороннем расположении радиационных труб

$$C_{пр} = \frac{C_0 \varphi_{12}^{общ}}{\varphi_{12}^{общ}\left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right) + \varphi_{21}^{общ}\left(\frac{1}{\varepsilon_2} + 1\right)};$$

при двустороннем расположении радиационных труб

$$C_{пр} = \frac{C_0 \varepsilon_1 \varphi_{12}^{общ}}{\varphi_{21}^{общ} + \varphi_{21}^{общ}\left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)}$$

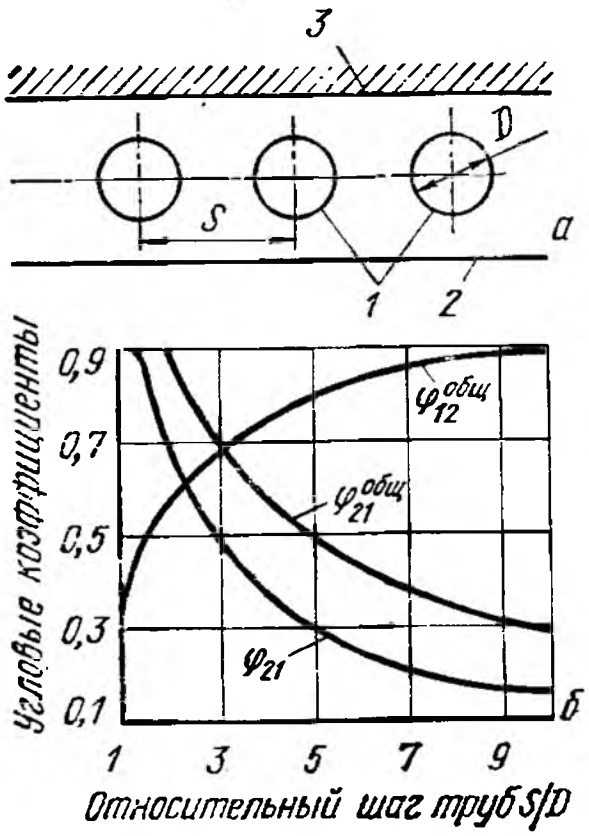


Рис. 63. Характеристика системы: радиационные трубы — металл — кладка:

а — схема системы; *б* — зависимости угловых коэффициентов от относительного шага; *1* — радиационная труба; *2* — металл (лист или лента); *3* — кладка

где C_0 — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела, Вт/(м²·К⁴); ε_1 и ε_2 — степень черноты поверхности радиационных труб и нагреваемого материала;

$$\varphi_{21}^{общ} = \varphi_{21} + \varphi_{21}(1 - \varphi_{21}) =$$

$$= \varphi_{21}(2 - \varphi_{21});$$

$$\varphi_{12}^{общ} = \varphi_{21}^{общ} \frac{S}{\pi D},$$

где $\varphi_{21}^{общ}$ и $\varphi_{12}^{общ}$ — угловые коэффициенты передачи излучения с металла на трубу и с трубы на металл с учетом отраженного излучения кладки (см. рис. 63); φ_{21} — то же, с металла на трубу (см. рис. 63); S — расстояния между осями труб (шаг труб), м; D — наружный диаметр трубы, м.

Достаточно надежных данных по ε_1 и ε_2 пока нет, поэтому обычно при термообработке в защитной атмосфере приближенно принимают $\varepsilon_1 = 0{,}75$ и $\varepsilon_2 = 0{,}5$.

Таблица 10. Основные размеры и характеристики радиационных труб (см. рис. 62)

Размеры и характеристики	Тип трубы		
	Р-образная	двухветьевая	четырехветьевая
Размеры, мм:			
L	1500	2000	1500
D	140	168	168
$d_в$	6,0	6,0	9,5
δ	4,0	8,0	8,0
S	150	280	280
Рабочая поверхность трубы, м^2	0,87	2,1	3,2
Максимальная пропускная способность по газу, м^3/ч	6	10	20
Давление перед трубой при максимальной пропускной способности по газу, Па:			
газа	9470	6230	3800
воздуха	2900	3000	4500
Температура подогрева воздуха в рекуператоре, К	763	623	593

Глава V МАТЕРИАЛЫ И СТРОИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПЕЧЕЙ

При сооружении металлургических печей наряду с обычными строительными материалами применяются материалы, предназначенные для работы при высоких температурах. Они служат для отделения рабочей камеры печи от окружающего пространства и ее тепловой изоляции. Это неметаллические огнеупорные и теплоизоляционные материалы.

Помимо них, применяются также жароупорные металлы и сплавы, используемые для изготовления узлов и деталей, работающих при высоких температурах и несущих значительные нагрузки (муфели, конвейеры, толкатели и т. п.).

§ 1. Огнеупорные материалы

Классификация огнеупорных материалов

Огнеупорными называют строительные материалы, предназначенные для сооружения тепловых устройств, в частности металлургических печей, и способные противостоять воз-

действию высоких температур и физико-химических процессов, протекающих в этих агрегатах.

По способу изготовления огнеупорные изделия делят на естественные (выпиливаемые из горных пород, например, тальковые) и искусственные (прессованные, трамбованные, литые и волокнистые). Литые изделия могут быть получены отливкой из жидкого раствора (подобно литому бетону) или из расплавленных масс. Прессованные изделия изготовляют обожженными (обжиговые) и необожженными (безобжиговые); последние подвергают обжигу в период разогрева печи и ее эксплуатации. Волокнистые изделия изготовляют путем пропитки связующим раствором алюмосиликатной огнеупорной волокнистой массы, получая, таким путем, войлок, маты и плиты.

Качество огнеупоров определяется их способностью не разрушаться под действием высоких температур и физико-химических процессов, развивающихся в печах. В соответствии с этим к изделиям из огнеупорных материалов предъявляются следующие требования: механическая прочность, особенно при рабочих температурах; способность противостоять резким изменениям температуры; сопротивляемость воздействию шлаков и газов; невысокая теплопроводность и теплоемкость при достаточной плотности; точные размеры и требуемая форма изделий, позволяющие осуществить высококачественную кладку футеровки печей. Далеко не последним требованием является возможно более низкая стоимость огнеупорных материалов.

Многочисленность и сложность выполнения этих, зачастую, противоречивых требований обусловила создание большого числа различных огнеупорных и теплоизоляционных материалов. Это вызывает необходимость их классификации, в основу которой положен химико-минералогический состав материалов. Исходя из этого, наиболее широко применяемые в металлургии огнеупоры делят на кремнеземистые на основе SiO_2 (динасовые и кварцитовые изделия); алюмосиликатные на основе Al_2O_3 и SiO_2 (полукислые, шамотные и высокоглиноземистые); магнийсодержащие на основе MgO (магнезитовые, или периклазовые); магнезиально-известковые на основе MgO и CaO (магнезитодоломитовые или периклазоизвестковые и доломитовые); магнезиально-шпинелидные на основе MgO, и Cr_2O_3 и Al_2O_3 (магнезитохромитовые, хромомагнезитовые, периклазошпинелидные и шпинельные); магнезиально-силикатные на основе MgO и SiO_2 (периклазфорстеритовые и форстеритовые); цирконистые на основе ZrO_2 (циркониевые и цирко-

новые); углеродистые на основе С (углеродистые графитированные и глинистографитовые); карбидкремниевые на основе SiC (карборундовые и карбидкремнийсодержащие).

Как видно из этого перечня, большинство промышленных огнеупорных материалов имеет в своей основе тот или иной оксид. Тип оксида, служащего огнеупорной основой материала, позволяет отнести его к одной из трех категорий: кислый (SiO_2), нейтральный (Al_2O_3) или основной (MgO).

Область применения огнеупорных материалов предъявляет свои требования к ним. Например, свойства шамотного кирпича для доменных печей должны быть выше свойств

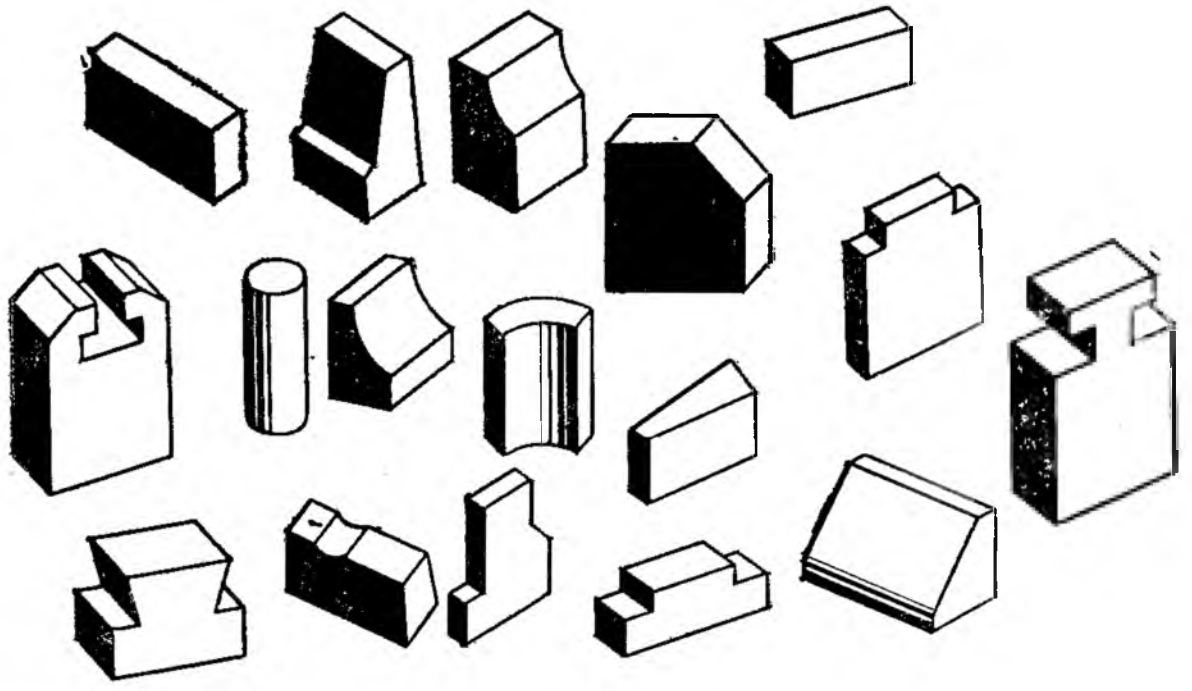


Рис. 64. Огнеупорные изделия

такого же кирпича, применяемого для термических и нагревательных печей. Огнеупорные изделия одинакового состава заводы — изготовители классифицируют и маркируют по применению: мартеновские; ковшевые для футеровки ковшей; насадочные для кладки насадок регенераторов и др.

Огнеупоры определенного целевого назначения часто называют припас, например, мартеновский припас, сталеразливочный припас и т. д.

Помимо изделий определенной формы, предназначенных для тех или иных устройств, все более широкое применение находят монолитные футеровки требуемого состава, а также огнеупорные бетоны и обмазки.

В зависимости от формы и размеров различают огнеупоры простые (обычный кирпич, имеющий форму параллелепипеда); фасонные (рис. 64). Огнеупорные кирпичи изго-

товляют различных размеров. Например, размеры нормального кирпича составляют 230×113×65 мм, большеразмерного — 250×123×65 мм, малоразмерного 170×113×65 мм и т. д.

Кроме обычных кирпичей, изготовляют крупные блоки в виде брусьев; например, размеры углеродистых блоков для доменных печей составляют по сечению от 150×150 до 500×500 мм, длиной до 3000 мм и более с массой свыше 1000 кг. Все огнеупорные изделия стандартизированы.

Свойства огнеупорных материалов

Огнеупорные материалы характеризуются огнеупорностью; предельной температурой службы; термической стойкостью; механической прочностью; плотностью; пористостью; шлакоустойчивостью; теплопроводностью; удельной теплоемкостью; электропроводностью.

Огнеупорность — это свойство материала противостоять длительному воздействию высоких температур, не деформируясь и не расплавляясь. Огнеупорность определяют стандартным методом. Для этого из испытуемого огнеупорного материала изготовляют трехгранные пирамидки (пирископы) либо малого, либо большого формата. Малые пирископы имеют высоту 30 мм, а стороны нижнего и верхнего оснований соответственно 8 и 2 мм. Большие пирископы имеют высоту 58—63 мм, а стороны нижнего и верхнего оснований 5—18 мм и 2,9—6,5 мм (в зависимости от исполнения). Их устанавливают на огнеупорной подставке вместе со стандартными пирископами строго соответствующего размера и определенной огнеупорности в специальную электрическую печь, температуру которой измеряют и медленно повышают со скоростью 2—6 К/мин).

Пирамидки постепенно размягчаются и их вершины под действием силы тяжести наклоняются к основанию. При одновременном касании вершин пирамидок испытуемого и одного из эталонных пирископов (их так называемом падении) испытание заканчивается, а температура, при которой это происходит, является показателем огнеупорности данного материала.

Стандартные пирископы характеризуются номером, показывающим температуру падения. Например, номер 171 означает, что данному стандартному пирископу свойственна температура падения (огнеупорность) 1710 °С.

Огнеупорность, хотя она и является очень важной характеристикой огнеупорного материала, не может быть принята в качестве показателя температурных условий его

службы, поскольку температура падения пирископа — это температура размягчения материала до такой степени, которая недопустима при его эксплуатации в печах. Помимо этого, в реальных условиях на материал действует не только высокая температура, но и механические нагрузки, что вызывает, зачастую, его разрушение при температурах, более низких, чем температура огнеупорности.

Предельная температура — это та максимальная температура, при которой огнеупорный материал может работать в футеровке печи без разрушения. При этом подразумевается воздействие на материал только высокой температуры при нагреве и силы давления вышележащих слоев кладки, без учета других факторов, таких как разъедающее действие расплавов, окалины и т. д. Для оценки значения предельной температуры службы может быть использовано испытание материала на сопротивление деформации под сжимающей нагрузкой при высоких температурах. Это испытание проводится с использованием цилиндрического образца, изготовленного из исследуемого материала диаметром 36 и высотой 50 мм.

Образец медленно нагревают в специальной электрической печи (со скоростью 4—5 К/мин при температуре свыше 800 К), подвергая его воздействию нагрузки. По мере разогрева образец сжимается под этой нагрузкой. Уменьшение его высоты (усадка) регистрируется с помощью дилатометрической системы. Температуру начала размягчения (начало деформации под нагрузкой) принимают как точку, соответствующую 4 % усадки образца, а температурой конца размягчения полагают точку, отвечающую 30 % усадки. Надо отметить, что обычно температура конца размягчения ниже температуры огнеупорности.

Сопротивление огнеупоров деформации под нагрузкой при высоких температурах зависит от: 1) природы материала — образуется или не образуется связанная кристаллическая решетка; 2) от плотности огнеупора — чем он плотнее, тем выше сопротивление; 3) от количества примесей — чем больше плавящихся составляющих, тем ниже сопротивление деформации; 4) от качества обжига — у плохо обожженного материала возникает дополнительная усадка.

Разные материалы ведут себя при испытании под нагрузкой при высоких температурах существенно по-разному. Например, динас, образующий при обжиге кристаллический сросток кремнезема, почти не имеющий каких-либо примесей, начинает деформироваться под нагрузкой при температуре, близкой к температуре его огнеупорности.

Изделия из шамота, в котором кристаллический сросток слабо развит и состоит из смеси двух оксидов (Al_2O_3 и SiO_2), образующих плавящуюся фазу, начинают деформироваться под нагрузкой при температуре, значительно более низкой, чем температура огнеупорности. Отсюда следует, что строительная прочность динаса при высоких температурах больше, чем у шамота. Вместе с тем огнеупорные материалы типа шамота, характеризуемые более пологой кривой размягчения (соответственно большей разностью температур начала и конца размягчения), допускают кратковременные перегревы, сохраняя устойчивость кладки.

Все эти соображения и положены в основу определения предельно допустимой температуры службы того или иного огнеупорного материала.

Термическая стойкость — это способность материала выдерживать резкие колебания температуры, не растрескиваясь и не разрушаясь. Этот показатель характеризуют числом теплосмен, понимая под одной теплосменой цикл нагрева огнеупорного изделия до определенной температуры с его последующим резким охлаждением. Различают водяную и воздушную теплосмены. При испытании на водяные теплосмены осуществляют охлаждение нагретого до 1300 °С изделия в воде, а при испытании на воздушные теплосмены — охлаждение изделия от 800 °С на воздухе.

Термическая стойкость зависит от теплопроводности и теплоемкости материала, коэффициента объемного расширения и прочности. Многокомпонентные материалы отличаются обычно более высокой термостойкостью, чем те огнеупоры, основой которых служит какой-либо один оксид. Так, динасовые изделия выдерживают 1—2 водяных теплосмены, магнезитовые изделия 5—7, а шамотные изделия порядка 10 теплосмен. В соответствии с этим следует и выбирать тип материала для футеровки различных устройств и печей. Так сталеразливочные ковши, подвергаемые сильным термическим ударам, не следует футеровать материалом, плохо переносящим резкие изменения температуры.

Механическая прочность огнеупорных материалов, характеризующая их строительную прочность, т. е. способность выдерживать давление без разрушения, описывается значением предела прочности при сжатии, МПа. Строительную прочность определяют при комнатной температуре.

Плотность материала оказывает влияние как на его механические свойства, так и на теплофизические характеристики. Чем выше плотность, тем лучше огнеупорный мате-

риал сопротивляется разъедающему воздействию жидкого металла и шлака, тем ниже его газопроницаемость и тем больше (при прочих равных условиях) механическая прочность. В то же время более плотные материалы обладают повышенной теплопроводностью, т. е. их теплоизолирующие свойства хуже. Для огнеупорных материалов определяют обычно кажущуюся плотность, выражаемую в кг/м^3, т. е. отношение массы сухого изделия к его общему объему, включая объем всех пор.

Пористость материала, тесно связанную с кажущейся плотностью, выражают в процентах как отношение объема пор ко всему объему огнеупорного изделия. Она колеблется от 1 % в литых огнеупорах до 80 % в теплоизоляционных материалах. Пористость огнеупорных изделий возникает в результате образования микротрещин при обжиге вследствие анизотропности кристаллического строения образующих их веществ.

Получить огнеупорные материалы совершенно без микротрещин практически невозможно даже методом изготовления литых изделий. Различают кажущуюся пористость (или открытую), при которой поры сообщаются с атмосферой, и истинную пористость. Кажущуюся пористость определяют как отношение объема открытых пор к общему объему изделия, а истинную пористость — как отношение объема всех пор (открытых и закрытых) к общему объему изделия.

С увеличением пористости повышается газопроницаемость, понижается механическая прочность и шлакоустойчивость. Огнеупорные изделия, используемые для выкладки пода, свода и стен печей, должны обладать минимальной пористостью, а теплоизоляционные материалы, наоборот, максимальной пористостью.

Открытая пористость влияет на газопроницаемость огнеупорных изделий; чем выше эта величина, тем больше пор, проходящих через кирпич от одной грани до противоположной.

При футеровке печей (особенно плавильных) необходимо применять огнеупорные изделия с минимальной газопроницаемостью, поскольку проникновение газов через кладку может открыть путь для прорыва жидкого металла и шлака.

Шлакоустойчивость характеризует способность огнеупорных материалов противостоять разъедающему действию расплавленных шлаков. Это свойство особенно важно при выборе материала для футеровки плавильных печей.

Основными факторами, определяющими шлакоустойчивость, являются состав огнеупоров и контактирующего с ним шлака, а также температура. Поэтому для уменьшения разъедания футеровки печей, где образуются кислые шлаки, ее выполняют из огнеупоров на основе кислых оксидов, а при наличии в печи основных шлаков ее футеруют основными огнеупорами. При этом, чем выше температура жидкого шлака, тем интенсивнее он разъедает тот же самый огнеупорный материал. Как отмечалось выше, уменьшение

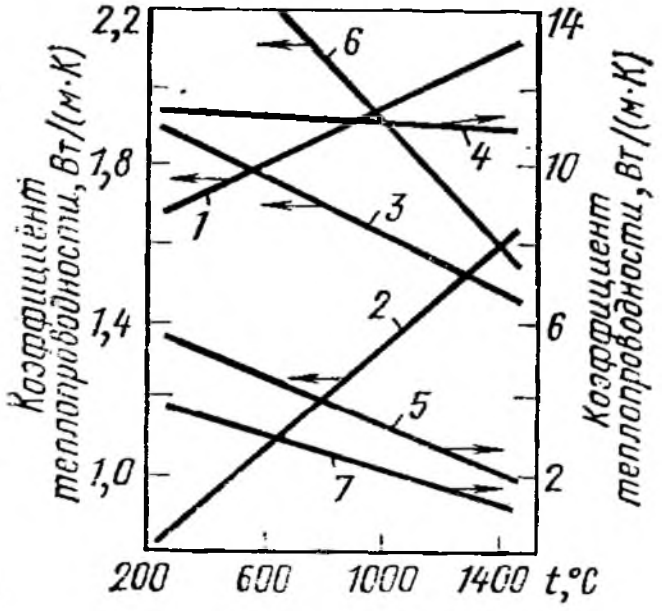


Рис. 65. Зависимость коэффициента теплопроводности огнеупорных материалов от температуры:

1 — динасовые; *2* — шамотные; *3* — муллитокремнеземистые; *4* — корундовые; *5* — магнезитовые (переклазовые); *6* — хромитопериклазовые; *7* — периклазошпинелидные

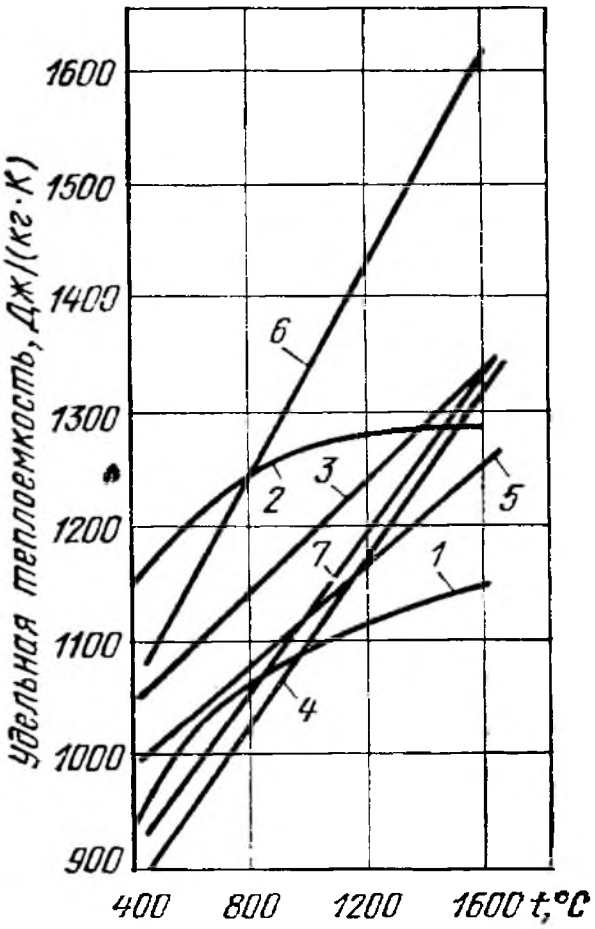


Рис. 66. Зависимость удельной теплоемкости различных огнеупорных материалов от температуры:

1 — динасовые; *2* — шамотные; *3* — муллитокремнеземистые; *4* — корундовые; *5* — плавленый корунд; *6* — магнезитовые (периклазовые); *7* — хромитопериклазовые

пористости материала во всех случаях способствует его лучшей шлакоустойчивости.

Теплопроводность огнеупорных материалов оказывает большое влияние на тепловую работу футеровки. Чем она ниже, тем лучше теплоизолирующие свойства кладки. Коэффициент теплопроводности огнеупоров зависит от природы материала, его пористости и температуры.

При увеличении температуры величина коэффициента теплопроводности шамотных и динасовых огнеупоров повышается, а магнийсодержащих и высокоглиноземистых — сильно понижается (рис. 65).

Удельная теплоемкость огнеупорного материала также является важной характеристикой, оказывающей влияние на тепловую работу футеровки, особенно печей периодического действия. Чем выше удельная теплоемкость огнеупорного материала, тем при прочих равных условиях больше расход тепла на аккумуляцию кладкой печи, изготовленной из этого материала. С ростом температуры теплоемкость всех огнеупорных изделий повышается (рис. 66).

Электропроводность огнеупорных материалов играет очень важную роль в службе футеровки электрических печей, где огнеупорные изделия часто служат изоляторами. При невысоких температурах большая часть огнеупоров (исключение представляют углеродистые, графитовые и карборундовые изделия) являются электроизоляторами. Однако при увеличении температуры свыше 1000 °С изоляционные свойства огнеупоров падают, т. е. их удельное электрическое сопротивление уменьшается. Это явление объясняется уплотнением материала вследствие его термического расширения, образованием жидких фаз, представляющих собой электролит, и тепловым возбуждением молекул и атомов.

Кремнеземистые огнеупорные материалы

Кремнеземистые огнеупорные материалы наиболее широко представлены очень распространенными динасовыми изделиями. Динас содержит не менее 93 % SiO_2. Динасовые изделия формуют под давлением из смеси чистого кварцитового порошка, содержащего не менее 95 % SiO_2, и 1,5—2,5 % CaO. Затем изделия обязательно подвергают обжигу в печах по специальному графику. Обжиг динаса — это сложный процесс, так как при нагреве в кремнеземе происходит перекристаллизация с переходом его из одной модификации в другую.

Кремнезем может существовать в виде одной из восьми модификаций: α- и β-кварц, α-, β- и γ-тридимит, α- и β-кристобалит и кварцевое стекло. Всем этим модификациям свойственна различная кристаллическая форма и разная плотность.

В природе кремнезем почти всегда существует в модификации β-кварца, который имеет плотность 2650 кг/м³ и при нагреве до 537 °С превращается в α-кварц плотностью 2583 кг/м³, т. е. в результате этого превращения его удельный объем возрастает на 4,6 %.

Если нагреть α-кварц до 1300—1400 °С, то он переходит в α-кристобалит плотностью 2229 кг/м³, т. е. удельный объ-

ем возрастает еще на 13,65 %. Но в присутствии плавящихся примесей или добавок (известь), обусловливающих при 1100—1400 °С образование жидких фаз, кварц будет подвергаться превращению не в α-кристобалит, а в α-тридимит плотностью 2228 кг/м³, т. е. удельный объем по сравнению с кварцем возрастет на 13,68 %. Однако это превращение происходит только до 1470 °С, а при более высоких температурах α-кварц во всех случаях переходит в α-кристобалит. Нагревая далее α-кристобалит до температуры плавления SiO_2 и переохлаждая раствор, можно получить кварцевое стекло плотностью 2203 кг/м³; в этом случае удельный объем вещества возрастает еще до 1,18 %.

Все процессы полиморфного превращения протекают сравнительно быстро, за исключением превращения (перерождения) α-кварца в α-тридимит или в α-кристобалит и стекла в α-кристобалит.

Установлено, что тридимитная разновидность кремнезема характеризуется наименьшим изменением объема при нагреве и охлаждении. Поэтому при обжиге динасовых изделий стремятся получить тридимитную модификацию SiO_2. При службе в печах в динасе тридимит будет переходить в кристобалит, не вызывая, однако, разрушения кирпича, так как печи в процессе службы не охлаждают до низших температур полиморфного превращения.

Поэтому добавка извести в кварцитовую шихту и играет столь важную роль, образуя жидкую фазу при обжиге, которая способствует перекристаллизации α-кварца в α-тридимит. При изготовлении динаса с известковой добавкой последняя одновременно служит связующим веществом при формовании кирпичей.

Для формования кирпича применяют прессы различных типов. Сформованные изделия сушат и затем обжигают в камерных или туннельных печах при 1430—1450 °С, причем нагрев ведут особенно медленно в диапазоне 1300—1450 °С. Превышение этой температуры недопустимо, так как при температуре обжига выше 1470 °С кварц, переходя в α-кристобалит, образует рыхлую массу.

Нагрев и охлаждение при обжиге необходимо проводить осторожно, с остановками, для того чтобы дать возможность завершиться процессам перекристаллизации кремнезема и избежать растрескивания кирпича в связи с увеличением объема. Цикл обжига динаса длится сотни часов.

Применение и свойства динасовых огнеупоров. Динасовые изделия, содержащие свыше 93—94,5 % SiO_2, используются для выполнения сводов сталеплавильных печей, фу-

теровки коксовых печей, насадок кауперов и других регенераторов, вагранок и реже нагревательных печей. Их не рекомендуется использовать в футеровке, подвергающейся регулярному охлаждению ниже 700—800 °С. В настоящее время производят динасовые (тридимитокристобалитные) изделия нескольких видов: для коксовых печей, для мартеновских печей, для сводов электросталеплавильных печей, для насадок регенераторов мартеновских и воздухонагревателей доменных печей и др. Кроме изделий, из кварцитов выполняют набивные футеровки кислых мартеновских печей, электропечей и плавильного пояса вагранок. Выпускаются также изделия из динасового огнеупорного бетона (блоки и панели).

Динас является кислым материалом, поскольку его огнеупорной основой служит SiO_2. Поэтому он хорошо сопротивляется кислым (кремнеземистым) шлакам, но при температуре свыше 1450 °С его шлакоустойчивость понижается.

Температура службы динасовых изделий ДМС, ДМ, ДН достигает 1640—1650 °С при кажущейся плотности 2340—2400 кг/м^3, а предел прочности динасовых изделий на сжатие составляет 17,5—25 МПа. Это позволяет успешно применять его в высокотемпературных печах для изготовления нагруженных частей футеровки. Однако динас обладает весьма невысокой термической стойкостью (1—2 водяных теплосмены), обусловленной изменениями объема при протекании процессов перекристаллизации и большим коэффициентом объемного расширения при невысоких температурах. Поэтому части футеровки, выполненные из динаса, не должны подвергаться резкому охлаждению (до температуры ниже 700 °С) во избежание растрескивания.

Для футеровки сводов электрических дуговых печей применяется высокоплотный динас, изготовляемый из чистых кварцитов. Эти изделия содержат свыше 96 % SiO_2 и характеризуются несколько более высокой температурой службы.

Изделия из динасового бетона имеют более низкую плотность (1800 кг/м^3) и температуру службы (1500 °С).

В сводах сталеплавильных печей динас подвергается разрушению вследствие взаимодействия кремнезема с плавильной пылью и брызгами шлака, содержащими большое количество оксидов железа и кальция. В результате образуется расплав, отдельными каплями стекающий со свода. Диффузионное проникновение этих оксидов внутрь кирпича изменяет его цвет и структуру, формируя поверхностный серый слой с несколько более высокой огнеупорностью, чем

исходный динас. Даже при больших потерях массы вследствие оплавления кладка из динаса сохраняет механическую прочность. Тем не менее недостаточно высокая стойкость динаса при растущей интенсивности тепловой работы сталеплавильных печей заставила его уступить место магнезитохромитовым огнеупорам для футеровки сводов. В стенах и сводах нагревательных печей непрерывного действия, не подверженных резким изменениям температуры, динас служит хорошо и долго в отличие от печей периодического действия, где в случае частых охлаждений кладки ниже 700 °С она быстро выходит из строя.

Алюмосиликатные огнеупорные материалы

Алюмосиликатные материалы имеют в качестве огнеупорной основы оксиды алюминия и кремния (Al_2O_3 и SiO_2). Структура, свойства и область применения этих материалов зависят от содержания Al_2O_3 и SiO_2. По этому признаку их разделяют на полукислые (15—30 % Al_2O_3), шамотные (30—46 % Al_2O_3) и высокоглиноземистые (свыше 46 % Al_2O_3).

На диаграмме состояния системы SiO_2—Al_2O_3 (рис. 67) показаны области существования различных огнеупорных

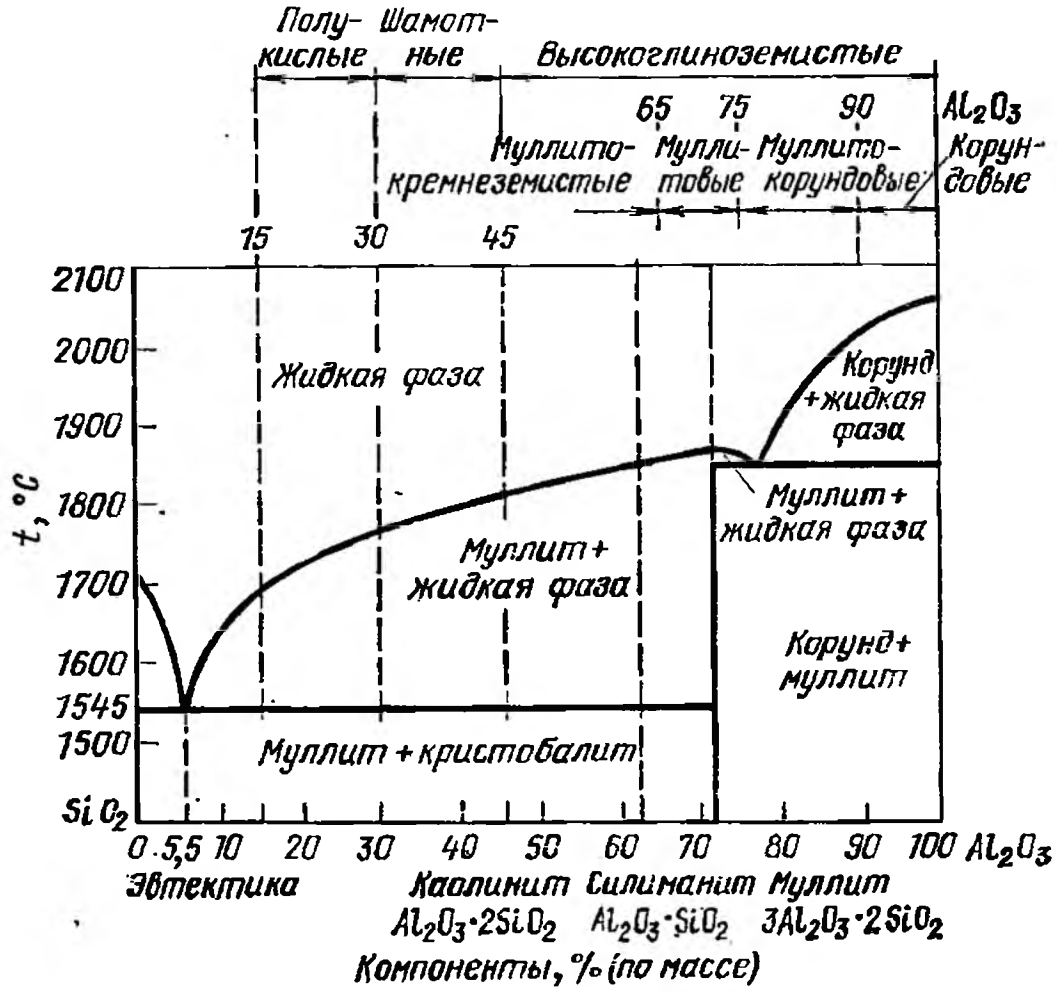


Рис. 67. Диаграмма состояния системы SiO_2—Al_2O_3

материалов на основе этих двух оксидов. Видно, что в этой системе минимальную температуру плавления (1545 °С) имеет эвтектика состава 5,5 % Al_2O_3 и 94,5 % SiO_2. При увеличении содержания в смеси Al_2O_3 устойчивой твердой фазой в расплаве будет муллит ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$), содержащий 71,8 % Al_2O_3, а при температуре выше 1850 °С — корунд. Следует отметить, что по мере нарастания содержания Al_2O_3 образуются соединения с более высокой температурой плавления: 46 % Al_2O_3 соответствует минералу каолинит ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$), имеющему температуру перехода в жидкое состояние около 1800 °С; 62,5 % Al_2O_3 отвечает силиманиту ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$) (температура плавления около 1850 °С; 71,8 % Al_2O_3 соответствует муллиту (температура плавления около 1870 °С). Температура плавления чистого Al_2O_3 (корунда) — 2050 °С.

Муллит является очень прочным и тугоплавким соединением. Он в основном и определяет высокую огнеупорность и стойкость высокоглиноземистых огнеупоров во время их службы в печах.

Шамотные изделия

Их изготовляют из огнеупорных глин и каолинов, содержащих водный каолинит $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$. Это сырье подвергают предварительному обжигу с целью получения безводного каолинита $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, который размалывают и просеивают. Смесь необожженной глины и безводного каолинита (в равных количествах) увлажняют и из этой пластической массы посредством прессования под высоким давлением изготавливают изделия требуемой формы. Их сушат, а затем обжигают при температуре, возрастающей до 1400 °С в течение 70—120 ч. В процессе обжига происходит перекристаллизация глинозема и образуется муллит $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, зерна которого укрупняются и формируют кристаллический сросток.

Применение и свойства шамотных огнеупоров. В настоящее время в производстве огнеупоров шамотные огнеупорные изделия занимают по объему первое место (70—75 %) и их широко применяют почти во всех отраслях промышленности, в том числе и в металлургии. Они используются для футеровки шахты и горна доменных печей, воздухонагревателей, нижнего строения мартеновских печей, большей части нагревательных печей, вагранок, ковшей, дымовых боровов, дымовых труб и т. д. Доступность и низкая стоимость (шамот — самый дешевый огнеупорный материал, кроме талька) также обусловливают их широкое распространение.

Шамотные огнеупоры имеют предельную температуру службы до 1500 °С, небольшую усадку при повторном обжиге и хорошую термостойкость (не менее 10 водяных теплосмен). Шамотные изделия плохо сопротивляются воздействию железистых шлаков и окалины. Шамотные изделия общего назначения, содержащие не менее 28 % Al_2O_3, разделяются на три класса, отличающиеся между собой значением предельной температуры службы: у изделий ША эта температура составляет 1300 °С; для изделий ШБ 1250 °С; для изделий ШУС 1200 °С. Кажущаяся пористость изделий 20—30 %, плотность соответственно 2100, 2000 и 1900 кг/м^3, предел прочности при сжатии 20—12,5 МПа.

Для футеровки сталеразливочных ковшей применяют шамотные огнеупорные изделия типов КШУ-32, КШУ-37 и КШУ-39 с содержанием Al_2O_3 соответственно не ниже 32, 37 и 39 %. Их кажущаяся плотность 2100 кг/м^3, а открытая пористость 12—19 %. При использовании этих изделий по прямому назначению температура службы составляет 1650 °С, а предел прочности при сжатии 27—30 МПа.

Повышение содержания Al_2O_3 в шамотных огнеупорах до 42 % и выше и увеличение их плотности позволяет довести предельную температуру их службы до 1500 °С (изделия КШУ-42, ШИ-42 и ШГ-42 с кажущейся плотностью 2100—2000 кг/м^3 и пределом прочности соответственно 40, 30 и 25 МПа).

Шамот используется также для выполнения бетонных блоков типа ШБВЦ-42, ШБВЦ-40, ШБГЦ-38 и ШБГЦ-36. При содержании в этих материалах Al_2O_3 соответственно не ниже 42, 40, 38 и 36 % температура их службы составляет 1350, 1300, 1250 и 1200 °С, а предел прочности на сжатие 20—15 МПа.

Условия службы шамотных огнеупоров сильно различаются в зависимости от типа печи, в которой они используются для выполнения футеровки. Так же различны и факторы, обусловливающие их выход из строя.

В футеровке шахт доменных печей износ шамота обусловлен в основном механическим истиранием движущейся шихтой, а также разрушающим воздействием выделяющегося сажистого углерода.

В воздухонагревателях доменных печей быстрее всего изнашиваются купол, верхние ряды насадок и футеровка верхней части стен.

В сталеразливочных ковшах резкие термические удары и разъедающее действие слоя шлака, опускающегося по всей высоте ковша по мере выпуска из него металла, при-

водят к тому, что стойкость шамотной футеровки составляет 8—20 заполнений ковша.

В нагревательных печах различных типов шамот показывает достаточно хорошую стойкость и служит от 15 (в термических печах) до 1—2 лет в колодцах.

Несмотря на очень широкое распространение шамота в металлургии, его применение постепенно сокращается, так как его вытесняют новые огнеупорные материалы с более высокими рабочими свойствами, применение которых обусловлено непрерывной интенсификацией тепловой работы печей.

Полукислые огнеупоры

Из изготовляют из огнеупорных глин, смешанных с песком, или из полукислых глин, содержащих 15—30 % Al_2O_3, по той же технологии, что и шамотные изделия. Полукислые огнеупорные материалы характеризуются хорошим постоянством объема, так как усадка одного компонента (глинозема) компенсируется увеличением объема второго компонента (кремнезема). Обычно полукислые огнеупоры дают в процессе эксплуатации усадку 1—1,5 %. Они несколько менее огнеупорны, чем шамотные материалы.

Высокоглиноземистые изделия

Их изготовляют из природных минералов: андалузита, силиманита и кианита, имеющих одинаковый химический состав ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$), но различное кристаллическое строение, а также из диаспора $Al_2O_3 \cdot H_2O$, боксита $Al_2O_3 \cdot nH_2O$, гидрагиллита $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ и корунда Al_2O_3. Применяется также и искусственное сырье в виде технического глинозема, содержащего не менее 90 % Al_2O_3.

Все эти исходные материалы должны содержать минимальное количество примесей (не более 3 %).

Высокоглиноземистые изделия изготовляют или прессованием с последующим обжигом, или литьем из расплавов (литые). Высокоглиноземистое сырье обжигают при температуре 1600—1650 °С и подвергают очень тонкому помолу (<10 мкм).

В качестве связующих при формовании высокоглиноземистых изделий используют чистые огнеупорные глины и каолины или фосфатные связки.

Литые муллитовые изделия получают в результате переплавки в электропечах минералов силиманитовой группы. В электропечи загружают шихту, состоящую из кокса, стального лома и силиманита. При расплавлении происхо-

дит частичное восстановление кремния из силиманита и при этом протекает реакция образования ферросилиция FeSi и шлака, состоящего из муллита $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$. Более тяжелый ферросилиций опускается на дно печи, а расплавленный муллит разливается в специальные формы (соответствующие размерам изделий), в которых расплав подвергается медленному охлаждению от 4 до 10 сут. Благодаря медленному охлаждению изделий снимаются внутренние термические напряжения. После охлаждения их шлифуют, доводя до нужных размеров.

Высокоглиноземистые изделия также можно получить посредством термитного процесса благодаря разности теплот образования оксидов алюминия и железа. Если 25 % алюминиевого порошка и 75 % оксида железа (по массе) перемешать между собой и поджечь (вольтовой дугой или запальной смесью), то произойдет реакция $Fe_2O_3 + 2Al = 2Fe + Al_2O_3$.

При протекании этой реакции выделяется значительное количество тепла (835 Дж/моль), благодаря чему металл и шлаковый расплав получаются в жидком состоянии. Расплав разливают в формы и медленно охлаждают для того, чтобы избежать возникновения термических напряжений в изделиях и их растрескивания. Таким способом получаются литые муллитовые и корундовые изделия.

Литые изделия позволяют получать очень плотный и прочный материал, хорошо сопротивляющийся воздействию любых шлаков.

Применение и свойства высокоглиноземистых огнеупоров. Эти материалы находят все более широкое применение для футеровки узлов сталеплавильных печей, работающих в тяжелых условиях (насадки регенераторов и своды электродуговых печей), сводов и подин высокотемпературных нагревательных печей, насадок воздухонагревателей доменных печей и т. д. Из них изготавливают ковшевой и сталеразливочный припас для разливки специальных сталей, защитные трубки и чехлы для термопар, тигли и элементы лабораторного оборудования для высокотемпературных исследований. Высокоглиноземистые огнеупоры сравнительно хорошо противостоят воздействию кислых и основных шлаков.

Свойства высокоглиноземистых огнеупоров во многом определяются содержанием в них Al_2O_3. Так, высокоглиноземистые изделия общего назначения типа МКРАП-45 и МКРУ-45 (муллитокремнеземистые), содержащие не менее 45 % Al_2O_3, имеют предельную температуру службы

1400 °С, кажущуюся плотность 2200—2300 кг/м³, предел прочности при сжатии 40 МПа. При увеличении содержания Al_2O_3 до 60—67 % (муллитовые и муллитокремнеземистые изделия МЛФ-62, МЛФ-67 на фосфатной связке, МЛУ-62, МЛС-62, МКРС-60-22 и др.) предельная температура службы высокоглиноземистых огнеупоров возрастает до 1500—1550 °С, а кажущаяся плотность—до 2300—2600 кг/м³. В муллито-корундовых изделиях МКС-72, МКС-80-22 содержится соответственно не менее 72 и 80 % Al_2O_3. Их кажущаяся плотность составляет 2500 и 2800 кг/м³, а предельная температура службы достигает 1600 и 1650 °С при прочности на сжатие 30—40 МПа. Корундовые изделия КС-90 и КС-95 с содержанием Al_2O_3 свыше 90 и 95 % имеют максимальную температуру службы 1750 и 1800 °С, а их плотность составляет соответственно 3000 и 3200 кг/м³. Эти материалы хорошо сопротивляются истиранию.

Высокоглиноземистые материалы обладают достаточно высокой термической стойкостью (3—5 водяных теплосмен) и повышенной теплопроводностью (особенно литые).

Срок службы монолитного пода высокопроизводительных методических печей, выполненного из литых корундо-муллитовых блоков, достигает трех лет, а применение литых блоков для футеровки пода и нижней части стен рабочих камер нагревательных колодцев позволяет увеличить срок службы до 5 лет.

Разрушение высокоглиноземистых огнеупоров происходит при резком охлаждении от температур выше 1200 °С. В этом диапазоне их термостойкость значительно снижается.

Применение высокоглиноземистых огнеупоров все больше расширяется и они вытесняют шамотные огнеупоры там, где предъявляются высокие требования к условиям их службы. Рост их применения сдерживается сравнительно высокой стоимостью.

Магнийсодержащие огнеупорные материалы

В зависимости от содержания огнеупорной основы (MgO), называемой часто периклазом, и состава примесей магнийсодержащие огнеупоры делят на магнезитовые (периклазовые) (более 90 % MgO), доломитовые (содержащие MgO и CaO), шпинельные (содержащие MgO и Al_2O_3), хромомагнезитовые (хромитопериклазные), содержащие MgO и Cr_2O_3, форстеритовые и тальковые (содержащие (MgO и SiO_2).

Магнезитовые (периклазовые) огнеупоры. Сырьем для их производства служит горная порода магнезит $MgCO_3$. Советский Союз является ведущей страной по производству магнезитовых огнеупоров.

В странах с развитой металлургической промышленностью, не имеющих природных залежей магнезита, для производства магнезитовых огнеупоров используют $Mg(OH)_2$, получаемый из морской воды.

Технология производства магнезитовых огнеупоров сводится к обжигу дробленого магнезита при температуре порядка 1570 °С с целью удаления CO_2 и получения MgO, который затем подвергается дроблению, помолу, увлажнению, прессованию для получения изделий требуемой формы, подсушиванию и обжигу при температуре, возрастающей до 1650 °С в течение 120—150 ч. Полученные таким способом изделия содержат не менее 85 % MgO и характеризуются высокой предельной температурой службы: так магнезитовые изделия М—3 ($\geqslant$91 % MgO), М—4 ($\geqslant$89 % MgO), М—6 ($\geqslant$87 % MgO) могут надежно служить при температуре до 1750 °С, а их термостойкость составляет 5—7 водяных теплосмен при плотности 2700—3000 кг/м^3 и пределе прочности при сжатии — 45—50 МПа. Магнезитовые огнеупоры хорошо сопротивляются воздействию расплавленных металлов и шлаков.

Из магнезита также изготавливают изделия различной формы путем расплавления в электрических дуговых печах обожженного магнезита и разливкой полученного расплава в формы.

Литые изделия из магнезита отличаются хорошей термостойкостью и лучшей стойкостью против воздействия шлаков. Однако их стоимость значительно выше стоимости прессованных изделий.

В металлургии находят применение не только готовые изделия, но и порошок из обожженного магнезита с размерами зерен 0,8—15 мм. Этим порошком наваривают и заправляют поды сталеплавильных печей, и он также служит основой для изготовления набивных тиглей индукционных печей.

Доломитовые огнеупоры изготовляют из обожженного естественного минерала доломита $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ путем дробления, добавки связующих веществ, формования изделий нужной формы и их обжига при температуре 1450—1580 °С. В последние годы расширяется производство смолодоломитовых изделий, приготовляемых из шихты, в состав которой входит порошок из смеси обожженных магнезита и доло-

мита и 4—11 % смолы, которая служит не только связующим, но и стабилизирующим веществом. В качестве смолы используется смесь, состоящая из 65—80 % пека и 35—20 % антраценового масла. После прессования изделия подвергают обжигу в восстановительной атмосфере при 1000—1100 °С.

Доломитовые и смолодоломитовые изделия отличаются свойством поглощать влагу из окружающей среды, причем протекают процессы гидратации MgO и CaO. Это сопровождается увеличением объема изделий и может даже привести к их полному разрушению. Поэтому доломитовые изделия не подлежат длительному хранению (больше 2—2,5 мес.).

Наряду с обожженными доломитовыми и смолодоломитовыми изделиями выпускаются безобжиговые, обжиг которых происходит при разогреве выполненной из них футеровки печи. Свойства обожженных и безобжиговых смолодоломитовых изделий примерно одинаковы: предельная температура службы конвертерных изделий типа МДТБС-50 и МДТБС-75, содержащих соответственно 50 и 75 % MgO, составляет 1650 °С, плотность 2900 кг/м^3, термическая стойкость до 8 водяных теплосмен. Эти огнеупоры характеризуются очень хорошим сопротивлением воздействию основных шлаков.

Наряду с обычными смолодоломитовыми изделиями выпускают водоустойчивые изделия, в которых CaO полностью связана в силикаты ($3CaO \cdot SiO_2$ и др.). Благодаря этому на воздухе не проходят процессы гидратации и такие изделия можно хранить очень длительное время. Водоустойчивые доломитовые изделия тоже хорошо противостоят воздействию основных шлаков, но в меньшей мере, чем обычные смолодоломитовые; кроме того, они дороже последних.

Помимо формованных изделий из доломита получают обожженный и необожженный порошок, используемый для заправки пода и порогов окон сталеплавильных печей.

Шпинельные огнеупоры изготавливают из шпинели — минерала $MgO \cdot Al_2O_3$, характеризующегося температурой расплавления 2035 °С. Установлено, что для системы MgO—Al_2O_3 минимальная температура расплавления 1925 °С соответствует составу 92,5 % MgO и 7,5 % Al_2O_3. Однако наличие в минеральном сырье примесей Fe_2O_3, CaO, SiO_2 и др. вызывает снижение этой температуры.

Шпинельные изделия получают из смеси спекшегося магнезита и технического глинозема. Их выпускают прессованными с последующим обжигом или литыми. Прессованные изделия производят из шихты, содержащей около 30 %

магнезита, предварительно обожженного при температуре 550—650 °С, и 70 % технического глинозема. Связкой служит магнезит. Для ускорения реакции синтеза $MgO + Al_2O_3 = MgO \cdot Al_2O_3$ в шихту добавляют 0,5—1,0 % борного ангидрида B_2O_3 или хромита.

Литые изделия получают из расплава, приготовленного в электропечах. Они обладают очень большой плотностью и чрезвычайно высокой шлакоустойчивостью до 1600 °С. Однако при температурах свыше 1600 °С шпинельные изделия быстро разрушаются железистыми шлаками. Предельная температура их службы составляет 1600—1700 °С, термическая стойкость 3—5 водяных теплосмен.

Форстеритовые огнеупоры изготавливают на базе форстерита (ортосиликата магния $2MgO \cdot SiO_2$), температура расплавления которого составляет 1790 °С. Сырьем для производства форстеритовых изделий служат природные минералы: оливин, дунит и серпентин. Иногда используют синтетическое сырье (спекшийся магнезит с кремнеземом). Содержание такой примеси, как FeO, в сырье жестко ограничивается, поскольку она образует с форстеритом легкоплавкое соединение, понижающее огнеупорность конечного изделия. Из форстерита получают прессованные изделия, которые либо подвергают обжигу, либо непосредственно используют для футеровки печей. Они хорошо противостоят основным шлакам, но неустойчивы против шлаков, содержащих значительные количества Al_2O_3. Предельная температура службы огнеупоров типа Ф, ФД, ФБ, содержащих 22—33 % SiO_2 и 54 % MgO и имеющих плотность 2900 кг/м³, составляет 1650 °С, термическая стойкость 5—7 водяных теплосмен, прочность при сжатии 30 МПа.

Магнезитохромитовые (периклазохромитовые) огнеупоры изготовляют из шихты, содержащей 40—65 % сырого хромита и 60—35 % обожженного магнезита с добавкой 4—6 % оксидов железа или железной руды. В полученную таким образом смесь вводят связку, формуют из нее посредством прессования кирпичи и изделия желаемой формы и подвергают их обжигу при 1650—1750 °С. При этом чем выше температура обжига и больше давление прессования, тем выше свойства изделий.

Большое значение имеет и качество помола составляющих частей шихты. При размере зерен до 3 мм получаются обычные магнезитохромитовые огнеупоры, в которых зерна оксида магния и хромита связаны очень тугоплавкими соединениями $2MgO \cdot Cr_2O_3$; $MgO \cdot Fe_2O_3$ и $MgO \cdot Al_2O_3$. Однако

часть зерен хромита остается без изменений, поскольку они во время обжига не взаимодействуют с оксидом магния.

Тонкий помол 30—70 % шихты того же состава позволяет осуществить связывание всего хромита оксидом магния в названные тугоплавкие соединения в процессе обжига. Такие изделия получили названия периклазошпинелидных, поскольку зерна оксида магния (периклаза) связаны в них между собой тугоплавкой шпинелью $MgO \cdot Al_2O_3$. Эти огнеупоры отличаются более высокими свойствами, чем обычные магнезитохромитовые.

Промышленностью выпускаются обожженные и необожженные магнезитовые изделия одинакового состава, причем их изготовляют как в стальных обоймах (кассетах), так и без обойм.

Магнезитохромитовые безобжиговые огнеупоры, предназначенные для кладки высокотемпературных печей, содержат не менее 65 % MgO и 7—18 % Cr_2O_3 (тип БМХ) и 5—13 % Cr_2O_3 (тип БМХК), имеют предельную температуру службы 1700 °С, кажущуюся плотность 2900 кг/м³, предел прочности на сжатие 30 МПа. Обожженные магнезитохромитовые изделия ПХСОФОТ ($\geqslant$65 % MgO и 7—15 % Cr_2O_3) и ПХСОФУ ($\leqslant$65 % MgO и 7—15 % Cr_2O_3), применяемые для сооружения сводов печей, работающих с охлаждением, имеют максимальную температуру службы 1700 °С, плотность 3200 кг/м³, предел прочности 25—30 МПа. Их термическая стойкость 5—6 водяных теплосмен.

Магнезитохромитовые обожженные изделия ПХППП, ПХПУ и ПХПС, содержащие 70 % MgO, 8—16 % Cr_2O_3, 2—2,5 % SiO_2 и 2,5 % CaO, имеют предельную температуру службы 1750 °С, кажущуюся плотность 3200 кг/м³, предел прочности 20—30 МПа. Они используются для выполнения сводов электродуговых и мартеновских печей.

Периклазошпинелидные хромитовые изделия ПХСП, ПССУТ, содержащие свыше 70—78 % MgO и 7—15 % Cr_2O_3, имеют предельную температуру службы 1650 °С, плотность 3120 кг/м³, также используются для выполнения сталеплавильных печей.

Хромитомагнезитовые (хромитопериклазовые) огнеупоры получают из хромитовой руды, содержащей минерал хромит (хромистый железняк) $FeO \cdot Cr_2O_3$. К хромиту добавляют в соответствующем количестве обожженный магнезит и глинозем и изготовляют методом прессования как обожженные, так и необожженные изделия по технологии, мало отличающейся от процесса изготовления магнезитовых огнеупоров.

В процессе обжига этих изделий образуются форстерит $2MgO \cdot SiO_2$ и шпинель $MgO \cdot Al_2O_3$, играющие важную роль высокотемпературной связки зерен огнеупорных оксидов. Это способствует повышению огнеупорности и шлакоустойчивости.

Реже выпускают плавленые хромитомагнезитовые изделия. Иногда хромитомагнезитовые изделия выпускают в обоймах из листовой стали (кассетах).

Хромитомагнезитовые изделия типа ХМ, содержащие около 50 % MgO и 15—25 % Cr_2O_3 и конвертерные изделия ХМКК того же состава имеют предельную температуру службы 1650—1700 °С, плотность 2900 кг/м³, термическую стойкость не менее 7 водяных теплосмен.

Большим достоинством этих огнеупоров являются малое изменение объема при нагреве и хорошая устойчивость против основных и железистых шлаков.

Тальковые огнеупоры производят из горной породы талька, состав которой описывается формулой $3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot 2H_2O$. При нагреве талька до 900 °С происходит его дегидратация и после обжига он содержит 33,3 % MgO и 66,7 % SiO_2, сохраняя при этом свое кристаллическое строение. Замечательной особенностью талька является то, что он не взаимодействует с окалиной.

Изделия из талька изготовляют выпиливанием и подвергают либо обжигу при 1000—1300 °С, либо используют непосредственно. Ничтожно малое изменение объема при обжиге (не свыше 0,4 %) позволяет использовать их в кладке печей сырыми (без обжига). Предельная температура службы тальковых изделий сравнительно невелика (1300—1400 °С), термостойкость 1—2 водяных теплосмены. Тальковые изделия имеют также очень большую пористость, достигающую 30 %.

Применение и служба магнийсодержащих огнеупоров

Благодаря высоким свойствам магнийсодержащие огнеупоры получили широкое распространение в черной металлургии. Отличительные особенности, характеризующие их описанные выше разновидности, предопределяют использование каждого из видов магнийсодержащих огнеупоров в соответствующих печах.

Так, из магнезита выполняют под и стены мартеновских, электросталеплавильных и ферросплавных печей, стены головок, вертикалов и шлаковиков мартеновских печей; из термостойких магнезитовых изделий возводят стены и свод регенераторов, головки и другие узлы мартеновских печей.

Кроме того, из магнезитовых огнеупоров делают сталеразливочный припас, например стаканы и шиберные затворы для сталеразливочных ковшей большой емкости. Магнезитом также футеруют миксеры для хранения чугуна в сталеплавильных цехах.

Из магнезитовых изделий выкладывают под высокотемпературных нагревательных печей, в которых наблюдается окалинообразование, поскольку магнезит хорошо сопротивляется ее воздействию и не образует с ней легкоплавких соединений.

В плавильных печах магнезитовая футеровка наиболее интенсивно изнашивается и разрушается в тех местах, которые подвержены резким термическим ударам (например, передняя стенка мартеновской печи, часть стенки электродуговой печи вблизи окна и т. п.), и поэтому иногда используют магнезитовый кирпич в обоймах (кассетах) из листовой стали толщиной 1,5—2 мм.

Сильный износ футеровки печи происходит также на том уровне, где имеет место длительный контакт со шлаком. Систематическая заправка пода и стен плавильных печей в этих местах позволяет продлить срок службы футеровки.

В нагревательных печах магнезитовый под разрушается вследствие механических ударов слитками и заготовками и от резких изменений температуры, возникающих при открывании дверок печей или крышек колодцев. Это вызывает скалывание поверхностного слоя магнезитовой футеровки.

Доломитовые огнеупоры с успехом применяют для замены магнезитовых, а их более низкая стоимость делает такую замену целесообразной. Однако ограниченный срок хранения уменьшает область их применения.

Смолодоломитовые огнеупоры применяют для футеровки кислородных конвертеров, а также стен и подин электродуговых сталеплавильных печей. В случае выполнения кладки конвертера из необожженных смолодоломитовых изделий перед первой плавкой ее подвергают обжигу на месте путем сжигания кокса, загружаемого в конвертер в течение 3—5 ч. Для сжигания подают кислород.

Износ смолодоломитовой футеровки электродуговых печей и конвертеров происходит в большей степени от уровня шлака и выше. В значительной мере он обусловлен взаимодействием смоляного кокса, связывающего зерна огнеупора, с восстанавливаемыми им оксидами металлов (Fe, Mn) и с кислородом. Срок службы смолодоломитовой футеровки

конвертера колеблется в широких пределах — от 200 до 1200 плавок [1].

Как отмечалось выше, шпинельные огнеупоры подвержены быстрому разрушению железистыми шлаками при температурах выше 1873 К. Поэтому они не получили распространения в черной металлургии, но широко используются в печах цветной металлургии.

Обожженные форстеритовые изделия в металлургии применяются для кладки верхних рядов воздушных насадок регенераторов мартеновских печей, футеровки стен этих же печей выше шлаковых порогов, стен головок, вертикальных каналов, стен шлаковиков, кладки стен и пода высокотемпературных нагревательных печей и в ряде других случаев. Безобжиговые изделия применяют в футеровке нагревательных печей.

Разрушение форстеритовых насадок происходит наиболее интенсивно в их верхних рядах при попадании на кирпичи железо-силикатного расплава, падающего с динасового свода регенераторов. Поэтому при использовании форстерита в насадках рекомендуется выполнять стены и своды регенераторов из магнезита, хотя это и дороже. Форстеритовые изделия в нагревательных печах разрушаются вследствие резких колебаний температур.

Периклазошпинелидные огнеупоры находят применение для выполнения сводов сталеплавильных печей, практически вытеснив динас, применявшийся ранее для этой цели. При этом срок службы периклазошпинелидных изделий значительно дольше, чем обычных магнезитохромитовых (вплоть до 1,5 раз в мартеновской и двухванной печах).

Специальная разновидность периклазошпинелидных изделий используется для футеровки сталеплавильных конвертеров. Все эти огнеупоры хорошо сопротивляются воздействию основных шлаков.

Использование этих огнеупоров позволяет существенно интенсифицировать тепловую работу сталеплавильных печей, сократить время плавки и повысить производительность.

Тяжелые условия службы в сводах интенсивно работающих сталеплавильных печей и в конвертерах обусловливают значительный износ даже таких стойких огнеупоров, как магнезитохромитовые и периклазошпинелидные. Так, толщина свода мартеновской или двухванной печи может

[1] Отмечаются отдельные случаи, когда стойкость футеровки кислородных конверторов достигала 2500 плавок (при условии осуществления систематического торкретирования кладки)

уменьшиться в течение одной плавки в среднем на величину, колеблющуюся от 0,2 до 1,2 мм (в зависимости от конкретных условий работы печей) вследствие износа. Поверхностный слой сводового огнеупора насыщается различными оксидами вследствие попадания на него железистой пыли и брызг шлака. В результате образуются соединения с температурой плавления 1400—1500 °С. Проникая по порам внутрь, оксиды железа и других элементов образуют различные зоны по толщине огнеупорной кладки. Разный химический состав этих зон по сравнению с исходным огнеупором, естественно, приводит к различию физических свойств отдельных слоев, в том числе их коэффициента термического расширения. Поэтому наряду с оплавлением рабочей поверхности огнеупорного материала, ставшей легкоплавкой вследствие ее насыщения оксидами, происходит также шелушение и даже скалывание слоев кладки толщиной от 5 до 40 мм. Это обусловлено ухудшением термостойкости материала, становящегося как бы многослойным в процессе службы.

Разрушению также способствуют те термические напряжения в кладке свода мартеновской или двухванной печи, которые возникают при изменении температуры в диапазоне 1300—1500 °С, когда появляется и вновь затвердевает жидкая фаза на поверхности рабочего слоя огнеупора. В более плотных периклазошпинелидных огнеупорах диффузия с поверхности внутрь кладки развивается в меньшей мере и толщина слоя, насыщенного сравнительно легкоплавкими оксидами, меньше. Поэтому износ этих огнеупоров существенно меньше, чем магнезитохромитовых. Срок службы свода мартеновской печи емкостью 400 т, выполненного из периклазошпинелидного кирпича, достигает 400—500 плавок.

В сводах электродуговых сталеплавильных печей кладка меньше подвержена воздействию брызг шлака и плавильной пыли, но чаще попадает в условия резкой смены температур. Поэтому обычный магнезитохромитовый кирпич, имеющий значительно более высокую термостойкость, чем периклазошпинелидный, оказывается здесь более предпочтительным и служит бóльший срок.

В кислородных конвертерах износ периклазошпинелидной футеровки обусловлен прежде всего воздействием очень высоких температур и резких термических ударов, имеющих место между плавками. Разрушение футеровки происходит наиболее сильно начиная с уровня шлакового покрова и выше; при этом низкоосновные шлаки в случае повышенного содержания кремния в чугуне или использования руды

вместо скрапа для охлаждения ванны ускоряют разъедание футеровки. Плохая центровка кислородной фурмы может вызвать несимметричный износ футеровки конвертера вследствие ее размывания с одной стороны. Стойкость периклазошпинелидной футеровки в кислородных конвертерах достигает 600 плавок.

Тальковые изделия вследствие их низкой стоимости и хорошей стойкости против действия окалины находят широкое применение для облицовки пода высокотемпературных нагревательных печей (где окалину убирают в твердом виде), заменяя дорогостоящие магнезитовые и форстеритовые изделия.

Тальк в основном подвержен механическому износу движущимися по нему заготовками вследствие его мягкости.

Цирконистые огнеупорные материалы

Цирконистые материалы имеют в качестве огнеупорной основы или чистый диоксид циркония ZrO_2 с температурой плавления 2950 °С или минерал циркон (ортосиликат циркония $ZrO_2 \cdot SiO_2$) с температурой плавления 2430 °С. Первые называются циркониевыми, а последние — цирконовыми.

Циркониевые огнеупоры изготовляют из минерала бадделеита, состоящего из диоксида циркония ZrO_2 и встречающегося в природе с такими примесями, как Al_2O_3, SiO_2, Fe_2O_3 и др. К тонкомолотой шихте добавляют 4—5 % извести, служащей в качестве стабилизатора полиморфных превращений ZrO_2 и предупреждающей значительное изменение объема изделий при нагреве в процессе службы благодаря созданию устойчивой кристаллической структуры. Из этой массы делают брикеты, подвергаемые затем первичному обжигу при 1700 °С. Обожженные и остывшие брикеты размалывают, добавляют 10 % порошка необожженного диоксида циркония и, получив посредством прессования, трамбовки или отливки в формы изделия, подвергают их окончательному обжигу при 1700 °С.

Цирконовые огнеупоры изготовляют по технологии, отличающейся от описанной только тем, что в качестве сырья используют циркон, к которому при первичном обжиге не добавляют известь. В окончательный состав цирконовых огнеупоров входит 59—63 % ZrO_2 и 32—34 % SiO_2.

Применение и свойства цирконистых огнеупоров

Цирконистые изделия имеют высокую температуру службы: порядка 1700—1800 °С и достаточно высокую тер-

мостойкость до 12 водяных теплосмен. Из этого материала выполняют тигли, предназначенные для плавки чистой платины, иридия и других металлов этой группы, а также кварцевого стекла. Однако диоксид циркония плохо противостоит основным шлакам при высоких температурах (около 2000 °С) и совсем плохо сопротивляется воздействию оксидов железа и марганца. Это исключает применение циркониевых тиглей для плавки железа и марганца в окислительной среде. Диоксид циркония может также вступать во взаимодействие с углеродом при высоких температурах, образуя хрупкие карбиды. Циркониевые тигли выдерживают более 30 плавок платины.

Цирконовые изделия применяют для футеровки соляных ванн для нагрева стальных деталей под термическую обработку, а также для изготовления стаканов и вкладышей машин непрерывного литья заготовок. Значительная хрупкость этих изделий ограничивает их применение.

Циркониевые и цирконовые массы для обмазок рабочих поверхностей находят успешное применение в различных высокотемпературных печах и установках для защиты наиболее подверженных износу элементов футеровки.

Углеродсодержащие огнеупорные материалы

Углеродсодержащие огнеупоры содержат углерод в количестве от 30 до 92 %. Углерод в кристаллической форме графита имеет очень высокую температуру плавления (3800 °С), однако его основным недостатком как огнеупорного материала является то, что на воздухе он начинает окисляться начиная с 700 °С. Графит встречается в природе в естественном виде и его также получают искусственно посредством нагрева чистого антрацита до 2300 °С в специальных электропечах. При этом происходит выделение всех примесей и перекристаллизация свободного углерода в графит.

Из чистого графита огнеупорные изделия не изготовляют в связи с трудностями формования.

Глинистографитовые огнеупоры выполняют в форме тиглей для плавки цветных и черных металлов и сплавов, стаканов и стопоров для сталеразливочных ковшей. Массу для производства глинистографитовых огнеупоров приготовляют из 35 % графита (предпочтительно чешуйчатого, а не зернового), 35—45 % огнеупорной глины и 10—30 % шамота. Из этой смеси изготовляют изделия. Их обжигают при 800—1000 °С (при производстве тиглей) и при 1300—1350 °С (при производстве сталеразливочного припаса). Обжиг ве-

дут в безокислительной атмосфере, обеспечиваемой помещением изделий в закрытые муфели, внутрь которых подсыпают графит или уголь.

Рабочая температура этих изделий 1800 °С, а термостойкость до 5 водяных теплосмен.

Коксовые (углеродистые) огнеупоры получают из углерода, входящего в состав кокса и термоантрацита с добавкой смолы, играющей роль связки при формовке (прессованием или трамбованием) изделий. Содержание углерода в них достигает 95 %. Эти изделия обжигают также в закрытых муфелях с подсыпкой угля или графита при температуре, достигающей 1400 °С. При этом кокс, образующийся из смолы, играет роль связующего вещества, соединяющего зерна исходного кокса и термоантрацита.

Коксовые изделия изготовляют в виде кирпичей нормального размера, а чаще в виде крупных блоков, размеры которых достигают 550×550×3200 мм, а масса превышает 1200 кг. Температура службы готовых изделий превышает 2000 °С.

Разновидностью коксовых огнеупоров являются графитизированные углеродистые блоки, отличающиеся от обычных большей прочностью, стойкостью и теплопроводностью. Они характеризуются высокой предельной температурой службы (~3000 °С). При нагреве коксовые огнеупоры не размягчаются и не смачиваются шлаками. В некоторых случаях вместо изделий делают набивную углеродистую футеровку.

Применение углеродсодержащих огнеупоров

Углеродсодержащие изделия можно применять только в печах с восстановительной атмосферой, так как при 700 °С они начинают гореть в окислительной атмосфере. Их высокая огнеупорность и термостойкость, несмачиваемость жидкими шлаками и металлами предопределяет эффективное использование в плавильных печах.

Из глинистографитовых огнеупоров делают тигли и сталеразливочный припас, а также муфели различного назначения. Износ и разрушение этих изделий происходят по мере выгорания графита и его вымывания расплавленным металлом.

Углеродсодержащие огнеупоры широко применяют для футеровки ферросплавных печей, электрических печей для плавки карбида кремния, выполнения выпускных желобов сталеплавильных печей и для кладки лещади и футеровки горна доменных печей. Рабочую футеровку горна выполня-

ют из коксовых кирпичей, а многослойную лещадь выкладывают из блоков, тесно подгоняя их друг к другу во избежание просачивания жидкого чугуна.

Износ углеродсодержащей футеровки доменной печи происходит вследствие ее окисления входящими в состав шлака расплавленными оксидами железа и марганца, а также водяным паром и диоксидом углерода, образующимися при сжигании кокса или инжектируемых в печь мазута и природного газа. Естественный износ футеровки происходит вследствие ее расходования при науглероживании ею чугуна. Средний срок службы лещади и горна доменной печи, футерованных углеродистыми огнеупорами, составляет 7—8 лет.

Следует отметить, что углеродсодержащие огнеупоры интенсивно разрушаются соединениями щелочных металлов (Na_2CO_3, K_2CO_3 и др.) даже в восстановительной атмосфере при температурах выше 800 °С. Поэтому при выплавке чугуна из руд, загрязненных этими соединениями следует подвергать руду тщательной очистке от них в процессе подготовки к плавке или не применять для футеровки доменной печи углеродсодержащие огнеупорные изделия.

Карбидкремниевые огнеупорные материалы

Огнеупорной основой этих изделий служит карборунд, или карбид кремния SiC, получаемый плавкой смеси, состоящей из кварцевого песка и нефтяного кокса. Плавку ведут в электропечах сопротивления при 2000—2200 °С.

Для ошлакования и удаления в виде хлоридов примесей в кварцевом песке (Al_2O_3, Fe_2O_3) в шихту вводят поваренную соль. В процессе плавки происходит восстановление диоксида кремния углеродом кокса и затем его соединение с углеродом, в результате чего образуется SiC.

Карборунд очень твердое вещество, он не размягчается, не расплавляется при нагреве и только при 2300 °С разлагается на кремний и углерод. При нагреве на воздухе карборунд начинает окисляться при 1000 °С и этот процесс протекает очень интенсивно уже при 1700 °С.

Несмотря на большую твердость, карборунд хрупок и поэтому легко поддается измельчению, после чего из него изготовляют карборундовые (рекристаллизированные) и карбидкремнийсодержащие (карбошамотные) изделия.

Карборундовые огнеупоры изготовляют из тонкоизмельченного порошка (<0,06 мм) карборунда на связке из жидкого стекла обжигом отформованных изделий при температуре, превышающей 2000 °С в восстановительной среде.

При этом происходят рекристаллизация карборунда и образование монолита по всему объему изделия. Благодаря этому полученные изделия обладают высокой огнеупорностью и прочностью. Они не деформируются при температурах до 1700 °С и служат при высоких температурах без существенного износа вследствие окисления. Их термическая стойкость превышает 20 водяных теплосмен. Карборундовые огнеупоры не взаимодействуют с окалиной.

Карбидкремнийсодержащие огнеупоры изготовляют из смеси карборунда, шамота и пластичной глины (содержание карборунда может колебаться от 20 до 85 %). Технология изготовления карбошамота аналогична технологии изготовления шамотных изделий.

Основными достоинствами этих огнеупоров являются высокая механическая прочность и твердость, хорошая термическая стойкость (до 5 водяных теплосмен). Их недостатками являются окисляемость при температурах выше 1300 °С и плохая сопротивляемость основным шлакам. Предельная температура службы карбошамотных огнеупоров несколько ниже, чем карборундовых. При этом они дешевле.

Применение карборундовых огнеупоров

Из них изготовляют трубки рекуперативных теплообменников, электрические нагреватели — силитовые стержни для печей сопротивления (благодаря электропроводности этого материала), а также муфели и тигли высокотемпературных печей. Из карборунда также изготовляют подовые плиты нагревательных электрических печей сопротивления. Карборундовые блоки применяют для футеровки монолитного пода томильной зоны крупных методических печей.

Карбошамот используют для изготовления блоков и трубок рекуператоров и выполнения муфелей, а, кроме того, кирпичи и блоки из этого материала находят применение для футеровки пода коксовых печей.

Огнеупорные растворы, набивочные массы, обмазки и бетоны

Огнеупорные растворы

Для обеспечения плотности футеровки печей и ее хорошего сопротивления проникающему и разъедающему воздействиям раскаленных газов, расплавленных шлаков и металлов швы между отдельными кирпичами в процессе кладки чаще всего заполняют либо огнеупорными растворами, либо тонко помолотыми порошками, изготовленными

из того же огнеупорного материала, из которого выполняется футеровка.

Правильный выбор и качество огнеупорного раствора оказывают большое влияние на срок службы кладки печей. Растворы должны обеспечивать хорошее заполнение швов и минимальные расстояния между соединяемыми кирпичами; они должны также обеспечивать монолитность кладки, для чего необходима их хорошая связь с огнеупорными кирпичами после затвердевания; и, наконец, такие их свойства, как коэффициент термического расширения, изменение объема при нагреве, предельная температура применения и шлакоустойчивость (в затвердевшем состоянии), должны быть возможно более близкими к этим свойствам соединяемых огнеупорных кирпичей.

Поэтому огнеупорные растворы всегда готовят на основе того же материала, из которого изготовляют огнеупорную футеровку, т. е. в качестве основы раствора для шамотной кладки используют шамот, для кладки из высокоглиноземистого кирпича — соответствующий высокоглиноземистый материал, для динасовой — динас и т. д. Эти материалы применяют в виде тонкомолотого порошка, размер зерен которого не должен превышать половины толщины шва кладки. В качестве связующего вещества используют огнеупорную глину, добавляемую в количестве 10—20 % общей массы. Для улучшения сцепления раствора с кирпичами и, главное, для ускоренного затвердевания раствора на воздухе при комнатной температуре в него иногда добавляют 1—2 % жидкого стекла или цемента.

Эту смесь разбавляют водой до получения сметанообразной массы, причем густые растворы применяют при большой толщине швов (3—4 мм), а жидкие — при тщательной кладке с толщиной швов, не превышающей 1—2 мм. Поскольку некоторые огнеупоры (магнезит, хромомагнезит, форстерит, доломит) не допускают увлажнения, то кладку из этих материалов ведут либо насухо с тщательной подгонкой кирпичей друг к другу и с засыпкой швов соответствующим сухим порошком тонкого помола, либо на огнеупорном растворе, замешиваемом не на воде, а на обезвоженной каменноугольной смоле. Смолу добавляют к огнеупорному порошку в количестве около 10 % общей массы. Такой раствор используют в подогретом до 60—90 °С состоянии. При укладке углеродистых блоков для заполнения швов также применяют специальную углеродистую безводную массу и пасту.

При разогреве печи происходит взаимодействие раство-

ра с огнеупорными кирпичами и в процессе обжига он образует надежную монолитную футеровку.

Огнеупорные набивочные массы

Они находят все более широкое применение для изготовления монолитных футеровок. Это оказывается особенно эффективным в случае рабочих камер цилиндрической или более сложной формы, работающих в тяжелых условиях (например, тигли и подовые камни индукционных плавильных печей, дуговые плавильные печи, амбразуры горелок, плавильные пояса и днища вагранок и т. д.). Отсутствие швов повышает стойкость такой футеровки, время и затраты на ее изготовление сокращаются, а с помощью соответствующих шаблонов создается возможность легкого изготовления любых сложных по форме элементов футеровки. Набивочная масса должна спекаться при высокой температуре (при разогреве печи и при ее работе). При этом масса должна сохранять постоянство объема по всему сечению футеровки, иначе спекшийся (горячий) слой будет отслаиваться.

Основой набивочных масс служит соответствующий огнеупорный материал в виде порошка тонкого помола. Так, для кислой футеровки используется чистый тонкомолотый кварцит SiO_2, а для основной — порошок обожженного магнезита MgO. В качестве связующих веществ для водных набивочных масс применяют огнеупорную глину в порошке (5—15 %), борную кислоту H_2BO_3 (1—2 %), патоку (2—3 %) и жидкое стекло (1—3 %).

Количество связующих добавок зависит от конкретных условий и обычно не превышает 5—15 %. Массу увлажняют до требуемой консистенции и с помощью специальных шаблонов и трамбовок придают ей нужную форму непосредственно в рабочей камере печи. Готовую футеровку медленно (часто в течение десятков часов) сушат и нагревают во избежание появления трещин, которые могут быть вызваны быстрым испарением из нее влаги.

В последнее время получают распространение безводные набивочные массы на органических связках, подвергающихся коксованию в процессе обжига: на обезвоженной каменноугольной смоле, на смеси битумов или нефтяного воска с мазутом, на лигносульфате и т. д. Такие смеси не требуют никакой подготовки перед набивкой, а время разогрева футеровки сокращается в несколько раз. Опыт эксплуатации набивных монолитных футеровок показал их высокую стойкость. Так, срок службы основной футеровки стен и пода

электрических дуговых печей малой и средней емкости возрос до 8000—10000 плавок, в то время как обычная кладка требовала ремонта через 50 и менее плавок.

Разновидностью набивочных масс являются торкрет-массы, наносимые как в процессе изготовления футеровки, так и при ее ремонте на различные рабочие поверхности печей. Наносят и уплотняют их не посредством лопаток и трамбовок, как набивочные массы, а с помощью специальных торкрет-пушек, либо работающих на сжатом воздухе, либо механического типа. Эти пушки «выстреливают» под высоким давлением (400—600 кПа) порции торкрет-массы на подлежащие футеровке или ремонту места и она прочно прилипает, распределяясь более или менее ровным тонким слоем. При горячем ремонте торкрет-массу наносят на раскаленную поверхность футеровки, где она быстро высыхает, твердеет и подвергается обжигу.

Основой торкрет-масс является соответствующий огнеупорный материал в виде порошка. Его количество составляет 70—80 %, а добавка 15—20 % огнеупорной глины и 5—10 % высокоглиноземистого цемента позволяет обеспечить связывание порошка и затвердевание массы как в горячем состоянии, так и в холодном. Для придания холодной торкрет-массе необходимой консистенции добавляют к этой смеси воду. При факельном торкретировании сухие частицы огнеупорной массы вводят в топливно-кислородную смесь.

Этот метод позволяет существенно ускорить, упростить и удешевить выполнение футеровки и ее ремонт.

Огнеупорные обмазки

Их применяют либо для уплотнения футеровки (наносятся снаружи кладки), либо для защиты ее от воздействия высокой температуры (наносятся на внутреннюю, рабочую поверхность футеровки).

Уплотнительные обмазки составляют из смеси 70—80 % кварцевого песка или динасового порошка, 10—20 % асбеста или графита с добавкой 20 % жидкого стекла (от сухой массы). Обмазку наносят тонким слоем (2—4 мм) на хорошо очищенную поверхность кладки, имеющей температуру при нанесении слоя не выше 100 °С.

Защитные обмазки должны обладать не только соответствующей огнеупорностью, но и хорошей сцепляемостью с кладкой. В состав этих обмазок входят в качестве основы различные огнеупорные порошки (шамот, кварцит, хромит, хромомагнезит, диоксид циркония и т. д.) с добавлением связующих веществ и воды. В качестве связующих веществ

часто используются огнеупорная глина (3—13 %), жидкое стекло (2—7 %) или сульфитный щелок (4—8 %). Защитные обмазки наносят на поверхность слоем толщиной 2—3 мм. Их применяют в нагревательных печах и очень редко в плавильных выше уровня шлака. Защитные обмазки часто используют при горячих ремонтах печей для заделки небольших отверстий в кладке.

Огнеупорные бетоны

Их применяют все более широко для изготовления монолитной футеровки печей и топок методом сооружения опалубки соответствующей формы из дерева или из металла, заливки в нее жидкой бетонной массы и разборки опалубки после затвердевания бетона.

При более густой консистенции бетонной массы можно изготовлять из нее монолитную футеровку набивкой. Футеровку из огнеупорного бетона сооружают как на месте, так и на отдельном стенде. В последнем случае осуществляют ее монтаж на месте из отдельных панелей или блоков (например, стены нагревательных колодцев). При выполнении монолитных подвесных элементов футеровки из огнеупорного бетона используют анкерные кирпичи с ребристой поверхностью, подвешиваемые к каркасу. Эти кирпичи, залитые бетонной массой, надежно удерживают ее на заданном месте после затвердевания и разборки опалубки.

Поскольку обычные бетоны начинают разрушаться при температурах, превышающих 200 °С в связи с низкой огнеупорностью обычного цемента и заполнителя, в качестве которого служат песок и щебень, то огнеупорные бетоны готовят на основе стабилизированного портландцемента либо глиноземистого или магнезиального цемента с использованием в качестве заполнителя тонкомолотого (для замены песка) и дробленого (для замены щебня) соответствующего обожженного огнеупорного материала.

Этот материал придает бетону необходимую огнеупорность, а цемент играет роль вещества, связывающего огнеупорные частицы вместе. Для улучшения связи добавляют жидкое стекло.

По мере разогрева футеровки из огнеупорного бетона последовательно происходят удаление свободной влаги (сушка), удаление связанной влаги, образование жидкой (расплавленной) фазы из легкоплавких соединений, входящих в состав цемента, ее взаимодействие с частицами огнеупорного материала, ведущее к образованию монолита, и, наконец, при температурах выше 900—1000 °С его оконча-

тельный обжиг, сопровождающийся значительным повышением прочности как в горячем состоянии, так и в холодном.

Разработанные к настоящему времени составы огнеупорных бетонов с шамотным заполнителем (для футеровки печей с рабочей температурой до 1400 °С) и с хромомагнезитовым или хромитовым заполнителем (для печей с температурой до 1700 °С) успешно применяют для выполнения верхней части фундамента доменных печей, полной футеровки электрических плавильных печей, колодцев для нагрева слитков, различных печей для нагрева заготовок перед прокаткой и под термообработку, тепловой изоляции глиссажных труб и т. д.

Стоимость футеровки из огнеупорных бетонов ниже, чем стоимость кладки из обожженных изделий или набивной футеровки. Однако ее сушка и разогрев требуют очень длительного времени (до 100 ч), а стойкость ее в эксплуатации остается более низкой.

Стоимость огнеупорных материалов

Хотя стоимость отдельных видов огнеупорных материалов не остается постоянной, поскольку она зависит от технологии их производства, которая непрерывно совершенствуется и изменяется, тем не менее полезно сравнить цены на некоторые огнеупоры. Для этого, приняв стоимость шамотных изделий ША за единицу, можно записать следующее ориентировочное соотношение цен различных изделий:

Шамотные ША	1,00
Высокоглиноземистые с содержанием Al_2O_3:	
45 %	2,39
80 %	13,70
Динасовые:	
обычные	1,27
сводовые	2,77
Магнезитовые	1,55
Хромитомагнезитовые	1,23
Магнезитохромитовые	1,71
Форстеритовые	1,81
Тальковые	0,95
Карбидкремниевые с содержанием 80 % SiC	27,7

§ 2. Теплоизоляционные материалы

Требования, предъявляемые к теплоизоляционным материалам. Классификация и свойства материалов

Теплоизоляционными называются материалы, позволяющие изолировать зону, где осуществляется какой-либо технологический процесс при высокой температуре, от окружающей среды. Благодаря этому уменьша-

ется тепловой поток из зоны высоких температур, т. е. сокращаются потери тепла, уменьшается расход топлива или электроэнергии, возрастает коэффициент полезного действия печи. В соответствии с этим к теплоизоляционным материалам предъявляют два основных требования: 1) иметь как можно более низкую теплопроводность (это должно обеспечивать минимальные потери через теплоизоляцию теплопроводностью при данной ее толщине) и 2) иметь как можно более низкую удельную теплоемкость (это должно обеспечивать минимальные потери тепла на аккумуляцию слоем теплоизоляции данной толщины при его разогреве до рабочей температуры).

Первое требование играет важную роль в тепловой работе теплоизоляции печей непрерывного действия с установившимся во времени режимом работы, а второе — в тепловой работе печей периодического действия, когда вся футеровка печи и ее теплоизоляция подвержены циклическим колебаниям температуры.

Наряду с малой теплопроводностью и низкой удельной теплоемкостью теплоизоляция должна обладать достаточной огнеупорностью и также строительной прочностью. Естественно, стоимость теплоизоляционных материалов должна быть по возможности невысокой.

Однако перечисленные требования, предъявляемые к теплоизоляционным материалам, оказываются противоречащими друг другу: с одной стороны, огнеупорность, прочность материалов при высоких температурах и шлакоустойчивость тем выше, чем меньше их пористость и больше плотность; с другой стороны, чем больше пористость и меньше плотность, тем ниже теплопроводность материала. Следовательно, материал, к которому предъявляют высокие требования по сопротивлению воздействию высоких температур, неизбежно должен быть высокоплотным и малопористым, и, следовательно, он будет обладать невысокими теплоизолирующими свойствами.

Поэтому футеровка современных металлургических печей обычно выполняется двухслойной, а иногда трехслойной, причем наружные теплоизоляционные слои не подвергаются воздействию высоких температур и значительным механическим нагрузкам. Для выполнения этих теплоизоляционных слоев используют пористые материалы, характеризующиеся невысокой теплопроводностью.

Эти теплоизоляционные материалы подразделяют на основные типы по следующим признакам:

1. По огнеупорности теплоизоляционные материалы делят на огнеупорные, выдерживающие рабочую температуру 800 °С и выше, и неогнеупорные, которые можно использовать только при температурах ниже 700—800 °С.

2. По происхождению все теплоизоляционные материалы делят на естественные и искусственные. Последние в свою очередь различают по способу изготовления, обеспечивающему получение большого числа пор в готовом изделии: легковесные материалы, изготовленные методом выгорающих добавок; пенокерамические материалы, изготовленные методом введения в шихту пенообразующих добавок; материалы, изготовленные из огнеупорного волокна.

3. По форме и способу применения в футеровке печей. Теплоизоляционные материалы выполняют или в виде отдельных изделий (кирпичи различной формы и размера, листы, полосы и т. д.), или в виде сыпучих сред, применяемых для засыпок.

Все теплоизоляционные материалы характеризуются теми же физическими свойствами, что и огнеупорные: пористостью, газопроницаемостью, теплопроводностью, удельной теплоемкостью, электропроводно-

стью, термическим расширением. Эти характеристики описаны в § 1 настоящей главы.

Главной рабочей характеристикой теплоизоляционных материалов служит предельная температура их применения. При конструировании футеровки печей и выборе теплоизоляционных материалов для нее следует внимательно следить за тем, чтобы действительная температура службы теплоизоляционного слоя не превышала бы предельную величину. В противном случае теплоизоляция может оказаться химически или механически неустойчивой и выйдет из строя.

Теплоизоляционные материалы характеризуются также прочностью на сжатие и постоянством объема при нагреве в процессе службы (усадкой), выражаемым в процентах изменения объема относительно исходного.

Естественные теплоизоляционные материалы

Из естественных теплоизоляционных материалов, относящихся к группе огнеупорных, наибольшее распространение получили диатомит и трепел (последний также известен под названием кизельгур, или инфузорная земля). Эти материалы представляют собой пористые осадочные породы, образовавшиеся из остатков доисторических водорослей и морских простейших организмов. Их состав описывается формулой $SiO_2 \cdot nH_2O$.

Диатомит и трепел используют в сыром и в обожженном виде для засыпок в порошкообразной форме [средний коэффициент теплопроводности 0,12—0,16 Вт/(м·К)]. Из этих материалов также изготовляют кирпич на глинистой связке.

Диатомитовый кирпич выпускают двух марок: D-500 и D-600, что отвечает его плотности в кг/м³. Средний коэффициент теплопроводности диатомита равен 0,25 Вт/(м·К).

Диатомитовые кирпичи очень непрочны и применяются для выполнения слоя наружной тепловой изоляции стен и сводов печей. Предельная температура службы для засыпок составляет 900 °С, а для обожженного диатомитового кирпича 1000 °С.

Помимо диатомита и трепела, к естественным материалам относится вермикулит. Он представляет собой разновидность слюды, имеющей способность вспучиваться и увеличивать объем в 15—20 раз при нагреве до 800—900 °С вследствие удаления гидратной влаги. Необожженный вермикулит используют для засыпок и изготовления плит. Максимальная температура применения вермикулита 700—850 °С, средний коэффициент теплопроводности засыпок и плит примерно 0,1 Вт/(м·К). В обожженном виде он известен под названием зонолит и применяется для засыпок и изготовления различных изделий. Максимальная рабочая температура зонолита — до 1100 °С, средний коэффициент теплопроводности засыпок и изделий примерно 0,1 Вт/(м·К).

Из неогнеупорных теплоизоляционных материалов широко известен асбест. Асбест — естественная горная порода, встречающаяся в природных месторождениях в виде волокнистой массы, — имеет состав $3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$. При нагреве асбеста до температуры выше 500 °С происходит удаление связанной влаги и в результате он разрушается, рассыпаясь в порошок, и теряет теплоизоляционные свойства. Поэтому асбест можно применять до температуры 450 °С.

Асбест в виде крошки используют для засыпок, а из его длинноволокнистых сортов изготовляют шнур и асбестовую ткань. Изготовляют также асбестовый картон, используя 80 % асбеста и 20 % огнеупорной

глины, и асбоцементные плиты, где асбестовая крошка связывается глиноземистым цементом.

Асбестовую крошку широко применяют в качестве важнейшей составной части различных обмазок. Средний коэффициент теплопроводности асбестового шнура, ткани и засыпки из асбестовой крошки примерно 0,15 Вт/(м·К), асбестового кирпича 0,17 Вт/(м·К), асбоцементных плит 0,11 Вт/(м·К).

Искусственные теплоизоляционные материалы

Искусственные теплоизоляционные материалы изготовляют тремя способами на основе различных огнеупорных материалов.

Легковесные изделия. Эти изделия на основе шамота, динаса и высокоглиноземистых огнеупоров получают прессованием формовочной смеси, составленной из соответствующего огнеупорного порошка, огнеупорной глины и выгорающих добавок (древесных опилок, древесноугольного, антрацитового порошка и т. п.), вводимых до 25—35 % от общей массы смеси. Для получения динасового, высокоглиноземистого и других легковесных материалов в соответствующую смесь огнеупорного порошка, глины и выгорающих добавок вводят органические связующие вещества.

Готовые изделия подвергают обжигу. Технология обжига легковесных изделий такая же, как и обычных изделий, поскольку у них одинаковый состав. Легковесные изделия часто маркируют, указывая в их названии плотность, выраженную в т/м³. Например, марка ШЛ-1,0 означает: шамотный легковес с плотностью 1000 кг/м³.

Пенокерамические изделия получают введением в огнеупорноглинистую массу специально приготовленной пены, приводящей к образованию пористой структуры и сохранению ее после обжига. В качестве основы для пенообразователя используют канифольное мыло, дающее устойчивую пену. Массу при этом способе производства теплоизоляционных изделий готовят жидкой, разливают ее по формам, дают затвердеть, после чего изделия сушат и подвергают обжигу по обычной технологии. При нагреве часто происходит коробление изделий и поэтому после обжига их подвергают дополнительно механической обработке для точного обеспечения требуемых размеров. Теплоизоляционные изделия, полученные таким способом, характеризуются очень широким диапазоном свойств: их плотность изменяется с 300 до 1000 кг/м³ в зависимости от количества пенообразующей массы в смеси и от состава огнеупорной основы.

Выпускают легковесные и пенокерамические изделия на основе шамота, динаса, муллитокремнеземистых материалов и корунда. Их плотность колеблется от 400 до 1300 кг/м³, а средний коэффициент теплопроводности составляет 0,4—0,5 Вт/(м·К), для динаса и шамота — легковеса; 0,71 Вт/(м·К) для высокоглиноземистого легковеса и 0,9—1,6 Вт/(м·К) для корундового легковеса. Максимальная температура применения этих изделий изменяется с 1150 (шамот—легковес ШЛ-0,4 до 1550 °С (высокоглиноземистый легковес МЛЛ-1,3) и корунд—легковес КЛ-1,3.

Чем меньше плотность легковесных и пенокерамических изделий, тем больше пористость и, следовательно, ниже теплопроводность. На рис. 68 эта зависимость отчетливо видна.

Вместе с тем уменьшение плотности вызывает снижение механической прочности и уменьшение предельной рабочей температуры. Пенокерамические и легковесные изделия иногда используют для выполнения рабочего слоя футеровки низко- и среднетемпературных нагревательных печей.

Материалы из керамического волокна изготовляют на алюмосиликатной огнеупорной основе. Диаметр волокон составляет 2—5 мкм, длина 10—50 мм. Волокна изготовляют путем распыливания паром высокого давления алюмосиликатного расплава. В процессе производства волокон они переплетаются между собой и образуют легкую массу, похожую на вату, которая легко прессуется, а после пропитки связующим раствором служит исходным материалом для изготовления войлока, матов, плит и других изделий.

Волокнистые материалы обладают большими достоинствами: предельная температура их применения достаточно высока (1150—1600 °С

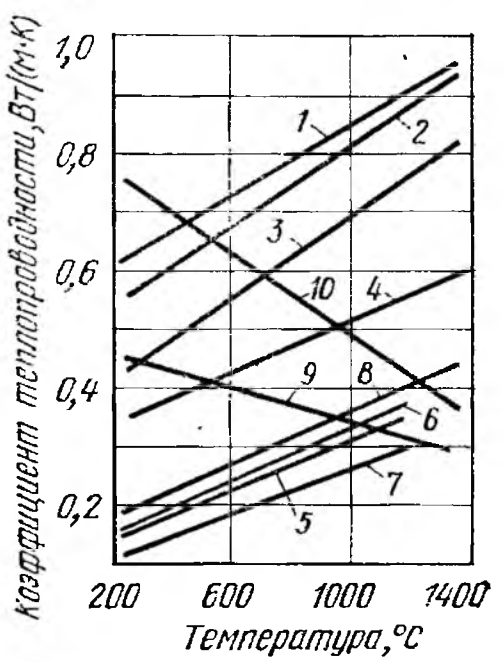


Рис. 68. Зависимость коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов от температуры:

1 — динасовый легковес; *2* — шамотный легковес ШЛ-1,3; *3* — шамотный легковес ШЛ-1,0; *4* — шамотный легковес ШЛ-0,9; *5* — шамотный легковес ШЛ-0,4; *6* — диатомитовый Д-500, Д-600; *7* — пенодиатомитовый ПД-350; *8* — шамотнотальковый легковес ШТЛ-0,8; *9* — муллитокремнеземистый легковес МКРЛ-0,8; *10* — корундовый легковес КЛ-1,3

в зависимости от состава огнеупорной основы); их кажущаяся плотность очень низка, вследствие чего коэффициент теплопроводности мал; удельная теплоемкость этих материалов также очень невысока; изделия из керамического волокна имеют практически неограниченную термическую стойкость и их структура позволяет использовать их для футеровки элементов, подвергающихся вибрации.

Эти свойства и обусловливают применение волокнистых материалов для футеровки промышленных печей. Их использование позволяет резко снизить массу футеровки и сократить тепловые потери на аккумуляцию кладкой и сквозь нее. Только за счет этого расход топлива на печи может быть снижен на 30—40 %, особенно на печах периодического действия. Снижение массы футеровки позволяет упростить и облегчить металлоконструкции печи, уменьшить затраты времени и рабочей силы при монтаже и ремонтах печи. Срок службы футеровки из волокнистых материалов больше, чем у обычной из огнеупорных кирпичей.

К недостаткам этих материалов следует отнести сравнительно низкую стойкость при их обдуве высокоскоростными газовыми потоками и сравнительно высокую стоимость из-за достаточно сложной технологии производства.

Крепление рабочего слоя футеровки из керамического волокна (в виде войлока или плит) осуществляется с помощью анкеров-шпилек, привариваемых на внутренней поверхности кожуха печи. Эти анкеры выполняют из жаропрочной стали и их конструкция такова, что они либо не проходят слой материала насквозь, либо подлежат защите с помощью огнеупорных колпачков с целью предупреждения их выхода из строя при высокой температуре.

Выпускаются муллитокремнеземистые материалы в виде фетра в рулонах и листового войлока толщиной от 15 до 50 мм типа МКРВ, МКРР-130, МКРРХ-150, МКРВ-200, МКРВХ-250, имеющих плотность соответственно 120, 130, 150, 200 и 250 кг/м³. В состав этого огнеупорного волокна входит не менее 51 % Al_2O_3, а общее содержание Al_2O_3 и SiO_2 составляет 97 %. Материалы МКРРХ-150 и МКРВХ-250 содержат также 2—4 % Cr_2O_3. Предельная температура службы материалов типа МКРВ, МКРР-130, МКРВ-200 составляет 1150 °С, а хромсодержащих МКРРХ-150 и МКРВХ-250 1300 °С.

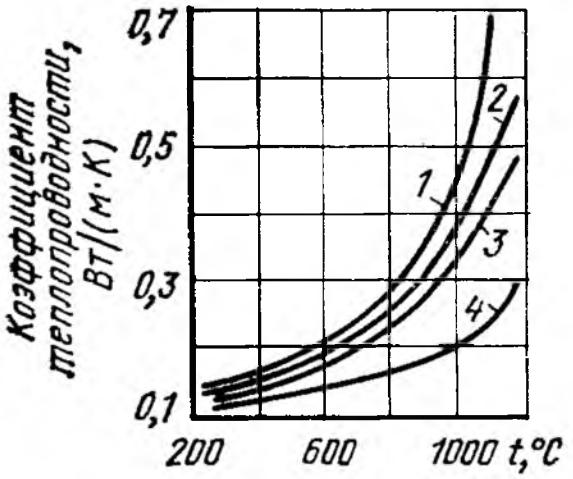


Рис. 69. Зависимость коэффициента теплопроводности волокнистых материалов от температуры:

1 — муллитокремнеземистый войлок МКРВ-200; *2* — муллитокремнеземистый рулонный материал МКРР-130; *3* — плиты из муллито-кремнеземистого волокна МКРП-340; *4* — плиты из шамотно-волокнистого материала ШВП-350

Из керамического волокна выполняют также плиты на глинистой связке толщиной до 100 мм и размером 0,5×0,5 м. Такие плиты из муллитокремнеземистого волокна типа МКРП-340 (плотность 340 кг/м³) и шамотного волокна типа ШВП-350 (плотность 350 кг/м³) имеют предельную температуру применения 1250 °С.

Зависимость коэффициента теплопроводности для некоторых материалов из керамического волокна показана на рис. 69.

§ 3. Строительные материалы и металлы, применяемые для печей и их элементов

Строительные материалы

Обычные строительные материалы широко используют при сооружении печей наряду с рассмотренными выше огнеупорными и теплоизоляционными изделиями. К ним относятся строительный кирпич, бутовый камень, бетон, гидроизоляционные материалы, лаки и краски.

Строительный (красный) кирпич. Размеры кирпича те же, что и у нормальных огнеупорных изделий. Его применяют для строительства фундаментов, боровов, сушил, стволов дымовых труб и для наружной изоляции некоторых печей. Предельная температура применения кирпича 500—650 °С. Его средний коэффициент теплопроводности 0,8 Вт/(м××К), а плотность 1800 кг/м³. Для дымовых труб изготовляют кирпичи специальной формы и размеров (лекальный кирпич).

При сооружении элементов печей из строительного кирпича кладку выполняют на цементном или известковом растворе.

Клинкерный кирпич, изготовленный из тугоплавких глин, применяют для футеровки боровов и дымовых труб при температуре до 900 °С.

Бутовый камень. Он представляет собой куски горных пород неправильной формы массой до 15—40 кг. В печестроении применяют песчаниковые и известняковые камни. При этом предпочтение отдают песчаниковым, способным выдерживать температуру до 600 °С в то время

как известняковые могут использоваться только до 200 °С. Бутовую кладку ведут на строительных растворах. Из бутового камня строят фундаменты печей, подпорные стены, стены различных коммуникационных туннелей в цехах и т. п.

Бетон. Им называют искусственный камень, полученный в результате твердения рационально подобранной смеси вяжущего вещества (цемента), воды и заполнителей (песка и щебня или гравия). Цемент при добавлении к смеси образует связующую массу, которая, обволакивая частицы песка и гравия и при затвердевании удерживая их вместе, формирует монолит с высокими механическими свойствами.

В строительстве печей наиболее широко распространен портландцемент, в состав которого входят 60—70 % CaO, 19—24 % SiO_2, 4—8 % Al_2O_3, 2—6 % Fe_2O_3, до 4,5 % MgO.

Эти оксиды при обжиге цемента образуют соединения, способные взаимодействовать с водой (гидратироваться), перекристаллизовываться и обеспечивать срастание кристаллов. Процесс схватывания (превращения массы в монолит) протекает довольно быстро (до 12 ч), а процессы окончательного твердения (приобретение прочности) длятся месяцами, а иногда годами. Цементы (как и бетоны) маркируют по прочности на сжатие, приобретенной ими в течение 28 сут. Применяют портландцемент следующих марок: 200, 250, 300, 400, 500 и 600. Для ускорения схватывания в растворы добавляют хлористый кальций $CaCl_2$ (1—3 % массы цемента).

В портландцемент вводят также кремнеземистые активные добавки (трепел, диатомит и др.), которые способствуют твердению цемента и одновременно связывают известь в устойчивые соединения, повышая прочность и равномерность структуры бетона.

На базе портландцемента приготовляют шлако-портландцемент для выполнения быстросхватывающегося бетона, получаемый добавлением к цементу 30—50 % доменного шлака; этот бетон прочно сцепляется со стальной арматурой и не вызывает ее коррозию.

Расход цемента на 1 м³ бетона составляет не менее 200 кг, а заполнителей около 2 т.

Глиноземистый цемент (быстротвердеющий), тоже широко используемый в печестроении, имеет следующий состав: 35—48 % CaO, 45—55 % Al_2O_3, 7—8 % SiO_2. В составе этого цемента основным минералом, способным гидратироваться, является алюминат кальция $CaO \cdot Al_2O_3$.

В печестроении в качестве связующего вещества часто применяют растворимое (жидкое) стекло, состоящее из силикатов натрия и калия. Его используют в виде водного раствора, твердеющего на воздухе вследствие высыхания и выделения аморфного водного кремнезема.

Гидроизоляционные материалы. При сооружении печей эти материалы применяют для защиты от грунтовых вод фундаментов печей и дымовых труб, боровов, газоходов и кессонов регенераторов. Для этой цели широко применяют толь и рубероид (картон, пропитанный смолой и битумом, выпускаемый промышленностью в рулонах), а также гидрозол (асбестоцеллюлозный картон, пропитанный битумом с температурой размягчения не ниже 50 °С. Используют также борулин-асбестовое волокно с температурой размягчения не ниже 65 °С, пропитанное битумом, а затем прокатанное в полотно толщиной 3—4 мм.

Лаки и краски. Для горячих металлических поверхностей применяют специальные лаки и краски с целью их защиты от атмосферной коррозии.

Широко применяют масляный печной лак, состоящий из битума, смолы, масла и растворителя. Температура сушки лака около 120 °С и

он надежно защищает металлические поверхности, хорошо сцепляясь с ними и не разрушаясь до 200 °С.

Снижению тепловых потерь излучением в окружающую среду (наряду с защитой от коррозии), способствует окраска горячих элементов металлоконструкций печей (кожухи, каркасы и т. п.) в серебристый цвет с помощью краски, составленной на основе масляного лака и смолы с тонким алюминиевым порошком в качестве наполнителя.

Металлы и сплавы

Расход металла для изготовления арматуры железобетонных конструкций, каркаса и кожуха печей очень велик и достигает сотен и тысяч тонн на печь в зависимости от ее типа и производительности. Для этих целей применяют сталь рядовых марок. Ее используют в виде стального листа и сортового проката. Применяют стальной лист толщиной от 4 (небольшие нагревательные печи) до 36 мм (доменные печи) для выполнения кожухов печей. Сортовой прокат используют для выполнения каркасов, рам, заслонок и дверей и других элементов конструкций, причем все соединения выполняют посредством сварки.

Стальные и чугунные отливки используют в виде плит оконных рам, холодильников, иногда подпятовых балок и т. д. Для глиссажных и опорных труб методических печей применяют цельнотянутые трубы.

Следует иметь в виду, что рядовые стали и чугуны удовлетворительно служат при температурах не выше 350—400 °С. При более высоких температурах снижается механическая прочность стали, а в чугунах начинается процесс распада карбидов, сопровождающийся изменением размера изделий. Кроме того, чем выше температура, тем интенсивнее происходит окисление металла. Поэтому для того, чтобы конструкции, изготовленные из рядовых сталей и чугунов, не нагревались выше 400 °С, их защищают от воздействия высоких температур с помощью теплоизоляции или выполняют водоохлаждаемыми.

Некоторые металлические элементы конструкций и деталей печей работают при температурах, превышающих 400 °С. Их изготовляют из жаростойких и жаропрочных сплавов. К этим элементам и деталям относятся: металлические рекуператоры, радиационные трубы, муфели термических печей для светлого отжига, штанги толкателей, ролики в печах с роликовым подом, цепи в конвейерных печах, вентиляторы и высокотемпературные дымососы, а также многие другие узлы. Одни из этих элементов предназначены для службы при высоких температурах практически без внешней нагрузки, а другие подвергаются при этом воздействию иногда очень значительных нагрузок.

Для выполнения деталей, работающих под небольшой нагрузкой или вообще без нее, используют жаростойкие стали и сплавы. Жаропрочные стали и сплавы применяют для изготовления тех деталей и узлов, которые предназначены для длительной службы при высокой температуре под нагрузкой.

Жаростойкой (окалиностойкой) называют сталь (сплав), обладающую стойкостью к окислению при высокой температуре. Окалиностойкость сплаву придают легирующие добавки, окисляющиеся легче, чем железо, и образующие на поверхности изделия прочную тонкую пленку оксидов, защищающую его от воздействия окружающей среды. К таким добавкам относят хром, алюминий, кремний, марганец, титан, бор и др. Очень эффективным оказывается одновременное легирование несколькими из перечисленных элементов. Это позволяет обеспечить значительное повышение жаростойкости.

Жаропрочной называют сталь (сплав), сохраняющую достаточную

прочность в нагруженном состоянии, а также стойкую к окислению при высокой температуре. Жаропрочность стали обеспечивается при большом содержании в ней хрома и никеля с добавками вольфрама, кобальта, молибдена, ванадия и других легирующих элементов. В ряде случаев, когда предъявляются особо высокие требования к условиям службы отдельных деталей и узлов печей при высоких температурах (например, рейтеры для глиссажных труб современных методических печей, электрические нагревательные элементы и т. д.), используются не сплавы на основе железа (стали), а сплавы на основе кобальта, никеля, молибдена и хрома.

К настоящему времени разработано очень много марок жаростойких и жаропрочных сталей. Некоторые, наиболее употребляемые из них при сооружении печей приведены ниже:

для элементов конструкций печей, работающих без нагрузок до 600—650 °С: Х6С, Х9С2, Х12ЮС;

для крепежных деталей печей, работающих при небольших нагрузках до 600—650 °С: 15Х5М, 15Х11МФ;

для узлов и деталей, работающих при небольших нагрузках до 700—750 °С (теплообменники, муфели, крепеж): 12Х13, 20Х13, Х12НВМФ, 13Х11Н2В2МФ;

для деталей печей, работающих при существенных нагрузках до 750 °С (ролики, цепи и ленты печных конвейеров, штанги толкателей, опорные элементы футеровки): 10Х14Г14Н4Т, 17Х18Н9, 08Х18Н12Б;

для деталей и узлов, работающих при небольших нагрузках до 1050—1100 °С (радиационные трубы, рекуператоры, детали горелок, муфели): 15Х25Т, 15Х28;

для деталей и элементов, работающих при значительных нагрузках до 1050—1100 °С (штанги толкателей, элементы конвейеров и роликов, опорные плиты и брусья): 20Х23Н13; 20Х25Н20С2Л;

для деталей печных роликов, работающих под нагрузкой до 1050 °С: 20Х25Н20С2.

Из жаростойких чугунов широкое применение для выполнения литых элементов конструкций печей нашел кремнистый чугун (силал). Из этого чугуна отливают игольчатые и блочные рекуператоры. При выполнении их из чугуна марки ЖЧС-5,5 они служат до температуры стенки 600 °С, а при использовании модифицированного магнием кремнистого чугуна марки ЖЧС-5,5-0,1 рабочая температура достигает 950 °С.

Разработаны и применяются также жаростойкие хромистые чугуны ЖЧХ-9, ЖЧХ-1,5 и ЖЧХ-2,5, допускающие использование изготовленных из них деталей до 600—700 °С в окислительной среде.

Материалы для нагревательных элементов электропечей сопротивления

Нагревательные элементы электрических печей сопротивления работают в очень тяжелых условиях и поэтому они прежде всего должны быть жаростойкими с тем, чтобы не окисляться при высокой температуре, и достаточно жаропрочными с тем, чтобы не деформироваться при высокой температуре под действием, по крайней мере, собственного веса.

Нагреватели не должны расти со временем, так как это приводит к необходимости предусматривать конструктивные меры для предотвращения их удлинения. Из металлических материалов для нагревателей обычно изготовляют ленту и проволоку различных сечений, навивают спирали и т. д. Отсюда следует, что материалы для нагревателей должны быть механически обрабатываемыми и хорошо соединяться посредством сварки.

Определенным требованиям должны отвечать и электрические свойства материалов для нагревательных элементов: они должны обладать большим электрическим сопротивлением, чтобы обеспечить небольшие размеры нагревателей и их удобное размещение в печи; малым температурным коэффициентом увеличения электрического сопротивления. Поэтому большинство материалов для нагревателей представляет собой сплавы, так как их электрическое сопротивление увеличивается с ростом температуры гораздо меньше, чем сопротивление чистых металлов.

Металлические материалы

Основными металлическими материалами для нагревательных элементов, специально разработанными для этой цели и поэтому в максимальной степени удовлетворяющими предъявляемым к ним требованиям, являются хромоникелевые сплавы, известные под названием двойные и тройные нихромы. В состав двойных сплавов входят в основном никель и хром, содержание железа в них очень мало (до 3 %).

Добавление железа в сплав несколько улучшает его обрабатываемость и существенно снижает стоимость, но повышает температурный коэффициент увеличения электрического сопротивления и значительно снижает жаростойкость. Двойные сплавы могут работать при температурах до 1150—1200 °С, тройные до 1000 °С. Нихром обладает хорошими механическими свойствами и довольно легко обрабатывается. Электрические свойства нихрома вполне удовлетворительные: его удельное сопротивление велико, температурный коэффициент увеличения электрического сопротивления мал, ему не присущи явления старения и роста. Так, электрическое сопротивление различных нихромов возрастает на 3—10 % при нагреве до максимальной рабочей температуры.

Железохромоалюминиевые сплавы, не содержащие дорогого и дефицитного никеля, обладают достаточно высокой жаропрочностью и их удельное сопротивление почти не зависит от температуры. Сплав Х23Ю5 имеет максимальную рабочую температуру 1200 °С, а сплав Х27Ю5Т 1300 °С. Но железохромоалюминиевые сплавы очень непрочны и хрупки, особенно после нескольких нагревов, а в процессе службы они удлиняются (иногда на 30—40 %) и деформируются. При температурах свыше 1100 °С эти сплавы чувствительны к оксидам железа и кремнезему, разрушающим защитную пленку из оксидов алюминия и хрома. Поэтому футеровка печей в местах соприкосновения с нагревателями из этих материалов должна быть выполнена из чистых высокоглиноземистых материалов.

Хромоникелевые и железохромоалюминиевые сплавы для изготовления нагревательных элементов выпускают в виде холоднотянутой и горячекатаной проволоки диаметром 0,5—14 мм, а также в виде ленты с размерами поперечного сечения от 1×10 до 4×40 мм.

Металлические нагревательные элементы для высокотемпературных промышленных печей выполняют из чистого молибдена (до 1700 °С) и вольфрама (до 2500 °С). Эти материалы могут работать только в вакууме или в аргоне и водороде. Нагревательные элементы из молибдена допускают контакт только с чистыми высокоглиноземистыми огнеупорами, а элементы из вольфрама используются исключительно в вакуумных печах с экранной теплоизоляцией.

Молибден и вольфрам для электронагревателей выпускают в виде проволоки, листов и сетки. Электрическое сопротивление вольфрама и молибдена возрастает почти в 10 раз при нагреве до максимальной рабочей температуры. Основной трудностью в связи с применением этих металлов является их плохая обрабатываемость и свариваемость.

К неметаллическим нагревателям относят карборундовые стержни и трубки диаметром 6—30 мм, известные под названием силит и глобар. Они отличаются друг от друга конструктивным исполнением и технологией изготовления. Карборундовые нагреватели выдерживают температуру до 1500 °С в окислительной среде.

Силитовые и глобаровые стержни в нагретом состоянии очень хрупки и малопрочны. Они чувствительны к быстрому нагреву, с изменением температуры заметно уменьшают удельное сопротивление (практически в два раза при нагреве до 1400 °С). Эти нагреватели стареют в процессе работы, причем их сопротивление при этом увеличивается на 20—25 %. Поэтому печи с карборундовыми нагревателями должны обязательно снабжаться ступенчатыми трансформаторами, позволяющими регулировать подводимое к ним напряжение. Срок службы карборундовых нагревателей составляет 1000—1200 ч при 1400 °С и возрастает в 2—3 раза при снижении рабочей температуры до 1300—1350 °С.

Неметаллическим материалом для нагревателей является также дисилицид молибдена $MoSi_2$, нагреватели из которого могут работать до 1680 °С в окислительной среде или атмосфере углекислого газа. Применять эти нагреватели для работы в вакууме или атмосфере водорода не рекомендуется. Нагревательные элементы из дисилицида молибдена выпускают в виде стержней и U-образных элементов с диаметром рабочей части 6 мм. Удельное электрическое сопротивление этих нагревателей также сильно зависит от температуры и возрастает примерно в 12 раз при нагреве до 1600 °С. Поэтому питание печей с такими нагревателями осуществляют только через ступенчатые трансформаторы, допускающие регулирование вторичного напряжения в очень широких пределах.

Графит широко применяется для изготовления нагревательных элементов, особенно для работы в вакууме или аргоне. Из графита выполняют нагреватели в форме стержней диаметром 5, 20 и 40 мм, пластин и трубок. Этот материал сравнительно дешев, хорошо обрабатывается и надежно и долго служит при температуре до 2100 °С в вакууме. Его удельное сопротивление сравнительно мало изменяется с температурой, возрастая на 10—12 % при нагреве до 2100 °С.

§ 4. Строительные элементы печей

Фундаменты печей

Фундамент предназначен для передачи силы тяжести всего сооружения на грунт. Нагрузка, производимая подошвой фундамента на грунт, не должна превышать 250 кПа. Для обеспечения равномерной осадки фундамента нагрузка должна быть одинаковой по всему периметру подошвы. Названия элементов фундамента приведены на рис. 70, где показаны фундаменты различных печей. Геометрическая форма фундамента может быть разной, поскольку она зависит от конструкции печи и ее размеров.

Фундамент должен обладать большой прочностью. Фундаменты сооружают из красного кирпича (в сухих грун-

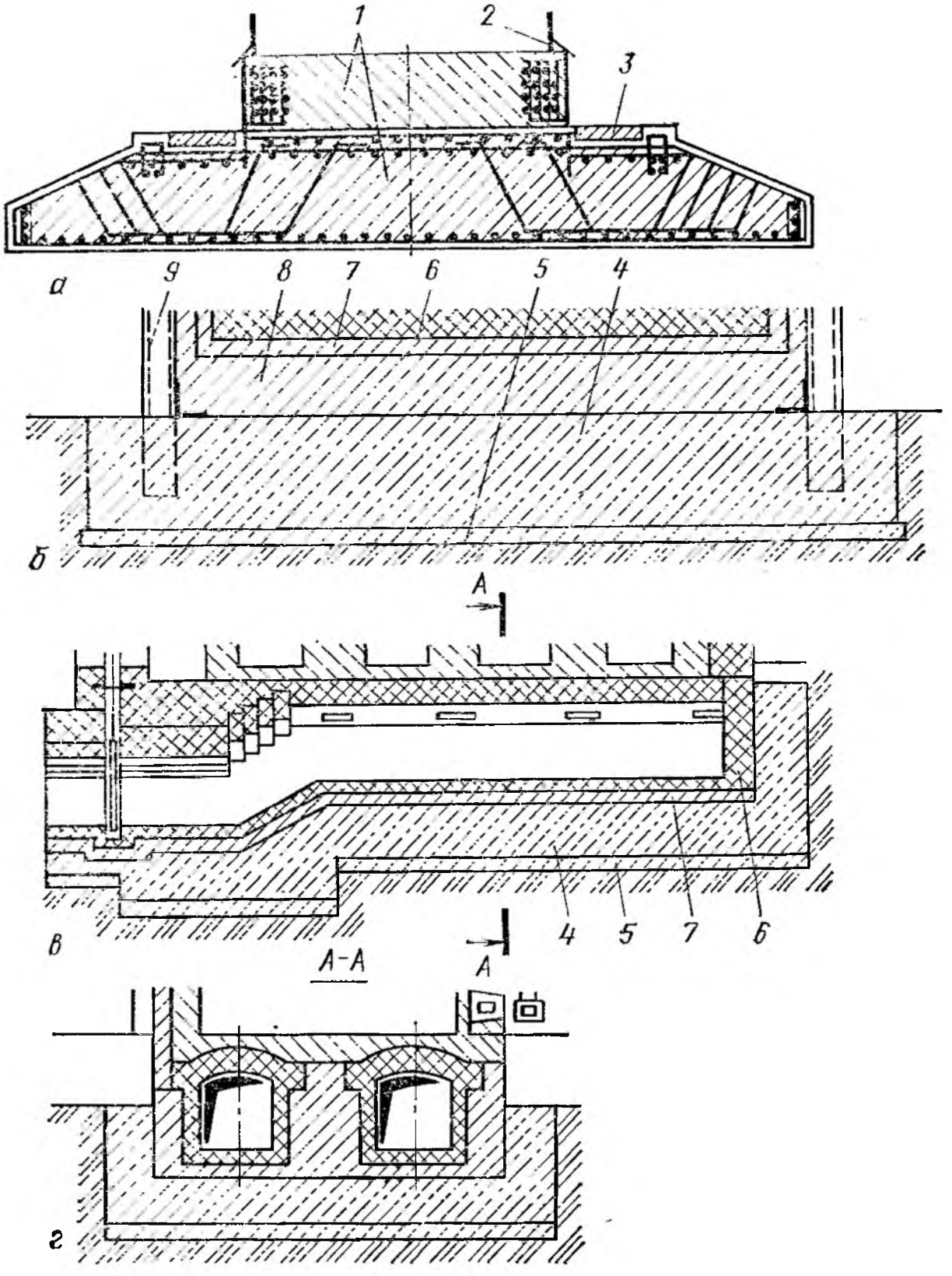


Рис. 70. Фундаменты печей:

а — доменной; *б* — нагревательной; *в* — термической с подподовыми топками; *1* — пень из огнеупорного бетона; *2* — кожух печи; *3* — ростверк под колонны; *4* — плита фундамента; *5* — щебеночная подготовка; *6* — огнеупорная кладка; *7* — теплоизоляционная кладка; *8* — кладка из красного кирпича; *9* — стойка

тах), бутового камня, выложенного на растворе, и чаще всего из бетона и железобетона. При строительстве печей вне крытых цехов (доменные, обжиговые печи и др.), глубина заложения фундамента должна быть ниже глубины промер-

зания грунта; при строительстве печей внутри цехов это правило не имеет значения. Во влажных грунтах фундаменты защищают от воздействия грунтовых вод, покрывая поверхность фундамента гидроизоляционными материалами или осушая территорию вокруг фундамента отводом грунтовых вод. В случае, если некоторые узлы печи (регенераторы, борова) размещаются ниже уровня грунтовых вод, для них сооружают гидроизолированные кессоны из мягкой стали или из специального железобетона.

Обязательной является защита фундамента и от воздействия высоких температур. Для того чтобы его температура не превышала 200 °С между фундаментом и футеровкой пода печи предусматривают слой теплоизоляционного материала.

Каркасы печей

Каркас печи возводят на фундаменте. Его выполняют из различных металлоконструкций. Главная задача каркаса — воспринимать усилия, возникающие в футеровке печи при ее тепловом расширении. Каркас также несет на себе всю арматуру печи (заслонки, рамы), площадки для обслуживания, горелки, механизмы и другое оборудование печи.

Конструкция каркаса зависит от конструкции печи. Так, у конверторов, шахтных печей и малых нагревательных устройств кожух и каркас выполняются как единая конструкция. Для большинства плавильных и нагревательных печей сооружают каркасы стоечного типа. Их подразделяют на подвижные и жесткие.

Подвижный каркас, показанный на рис. 71, *а*, представляет собой стойки, расположенные по бокам и торцам печи, связанные между собой попарно поперечными и продольными болтовыми связями. По мере разогрева печи болтовые связи отпускают, а при ее охлаждении затягивают, компенсируя температурное расширение кладки. Многократный отпуск связей может привести к перекосу каркаса и печи. Помимо этого, подвижный каркас требует значительных затрат на обслуживание. Поэтому в настоящее время такие каркасы почти не применяют.

В последнее время наибольшее распространение получили жесткие каркасы (рис. 71, *б*). В этой конструкции стойки жестко связаны между собой продольными и поперечными связями, роль которых выполняют балки, приваренные к соответствующим стойкам. При кладке футеровки печи в этом случае предусматривают зазоры (называемые температурными швами), которые заполняются за счет расшире-

ния кладки при разогреве печи, исключая возникновение опасных термических напряжений.

Важным элементом конструкции печи являются подпятовые балки, которые служат для восприятия и передачи

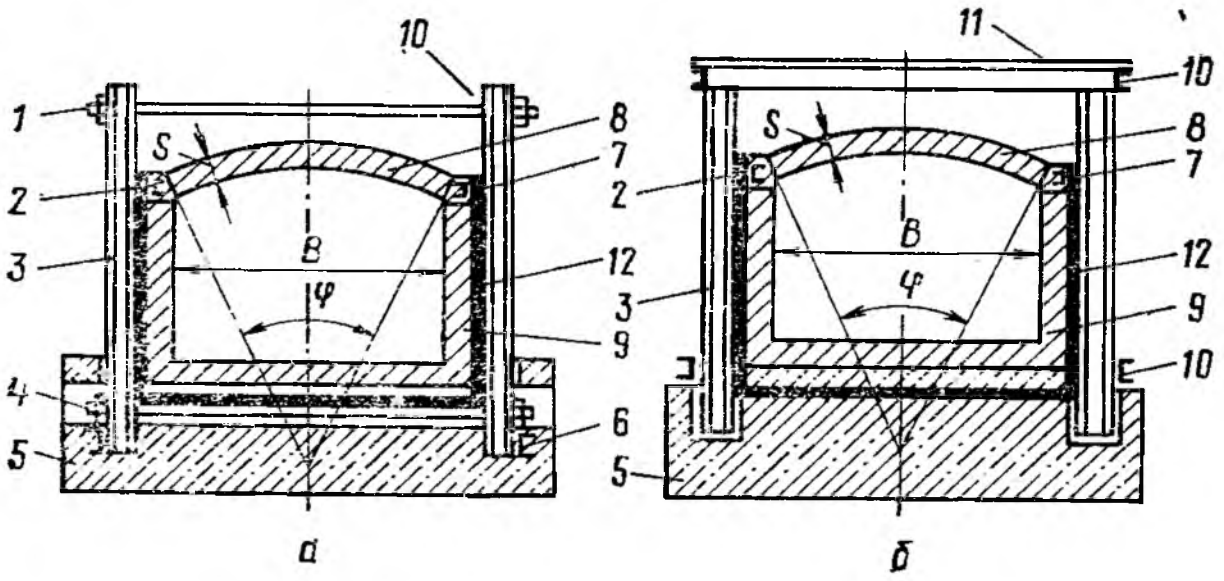


Рис. 71. Стоечные каркасы:

а — подвижный; *б* — жесткий; *1* — верхняя болтовая связь; *2* — подпятовая балка; *3* — стойка; *4* — нижняя болтовая связь; *5* — фундамент; *6* — балка на случай прогара связи; *7* — пятовый кирпич; *8* — свод; *9* — стены; *10*—продольная связь; *11* — поперечная жесткая связь; *12* — кожух

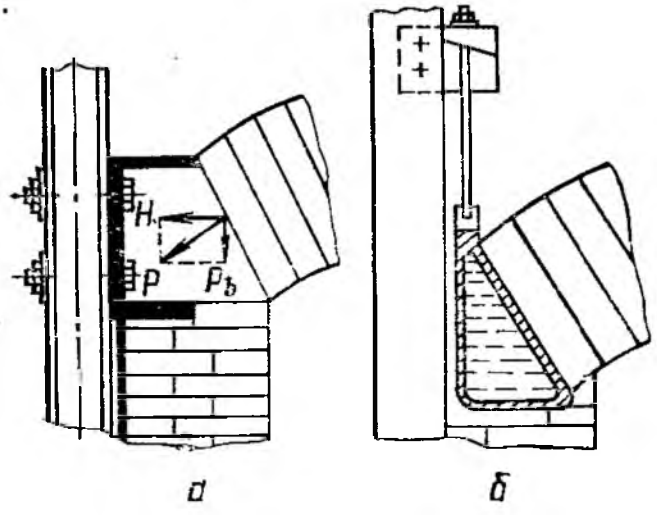


Рис. 72. Подпятовые балки:

а — неводоохлаждаемые; *б* — водоохлаждаемые

на каркас распорного усилия арочного свода. Эти балки крепят к стойкам каркаса. Они могут быть водо- и неводоохлаждаемыми (рис. 72).

Каркасы печей с арочным сводом и подпятовые балки рассчитывают по распорным усилиям свода. На рис. 72, *а* показано, что сила, направленная по нормали к плоскости пятового кирпича, может быть разложена на две составляющие: горизонтальную H и вертикальную $P_в$. Вертикальная составляющая $P_в$ передается через кладку стенки печи на фундамент, а горизонтальная H стремится отклонить вертикальные стойки каркаса и прогнуть подпятовую балку. Поэтому подпятовую балку рассчитывают на изгиб как равномерно нагруженную по длине и покоящуюся на двух опорах, т. е. между двумя стойками каркаса. Вертикальные стойки рассчитывают на изгиб под действием силы H, а се-

чение горизонтальных поперечных тяг каркаса определяют, исходя из того, что они не должны деформироваться под действием растягивающей их силы H. Значение силы H можно найти из выражения

$$H = \frac{G}{(n+1)\,2\,\mathrm{tg}\,\varphi/4}, \qquad (75)$$

где G — вес арочного свода, H; φ — центральный угол свода (см. рис. 71, *а*); n — число пар стоек каркаса, воспринимающих распорное усилие свода.

Учитывая дополнительные усилия, возникающие в арочном своде при нагреве вследствие термического расширения, найденную силу H умножают на эмпирический коэффициент запаса, равный 2—3 (в зависимости от температуры печи).

При расчете каркаса для печи с плоским, подвесным сводом рассчитывают поперечные тяги на изгиб под действием силы тяжести свода, а вертикальные стойки — на поперечный изгиб. Усилия, действующие на каркас в этом случае, меньше и поэтому каркасы таких печей легче и проще.

С учетом тяжелых условий службы при расчете любых каркасов печей допустимые расчетные напряжения для стали, из которой их изготовляют, принимают в два раза меньше номинальных.

Футеровка печей

Футеровка печи состоит из пода, стен и свода. Кладка всех этих элементов футеровки осуществляется различными методами. Кирпичи укладывают в большинстве случаев на плашку (рис. 73, *а*), но в подах и сводах печей их часто кладут на ребро и на торец (рис. 73, *б*, *в*). Различают также укладку кирпича ложковую (рис. 73, *г*) и тычковую (рис. 73, *д*).

В каждом последующем ряду кладки кирпичи смещают (на $^1/_4$, на $^1/_2$ или $^3/_4$ размера кирпича) относительно предыдущего ряда с тем, чтобы швы в двух соседних рядах не совпадали. Это укрепляет кладку и делает ее более устойчивой по отношению к шлаку и к газам. Такое смещение швов называют перевязкой.

Вертикальные швы перевязывают всегда, а горизонтальные — редко. Некоторые примеры перевязки швов показаны на рис. 74.

Огнеупорный слой с теплоизоляционным перевязывают крайне редко, поскольку их разные коэффициенты термического расширения могут вызвать смещение и разрушение

кладки. Для компенсации термического расширения кладки в ней предусматривают температурные швы, размеры и число которых зависят от рабочей температуры печи и материала и колеблется от 5 до 15 мм на 1 м кладки.

Под печи

Его выкладывают либо прямо на фундаменты, либо на стальные листы, опирающиеся на подподовые балки, а в небольших печах прямо на подовые стальные листы. Зазор между подом и фундаментом, образуемый благодаря подподовым балкам, служит для предотвращения перегрева верха фундамента.

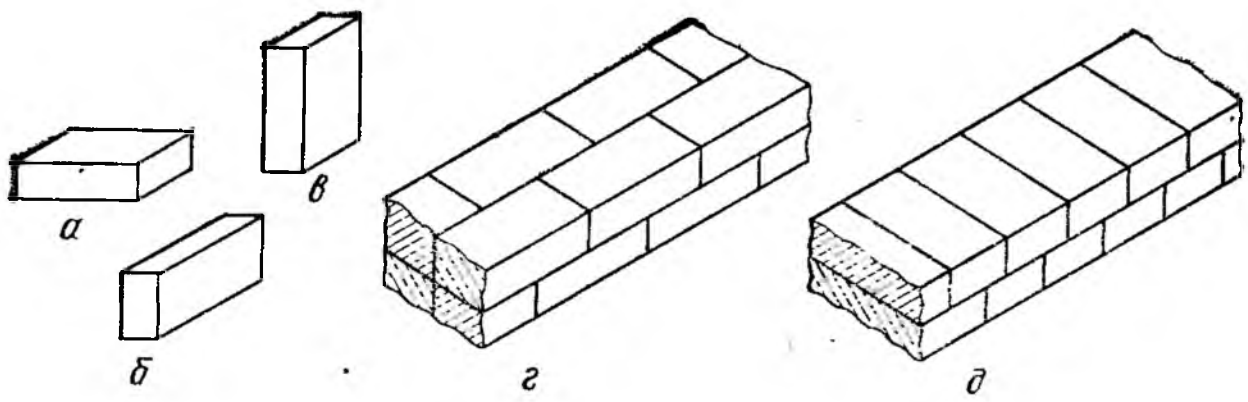


Рис. 73. Способы укладки кирпича:
а — на плашку; *б* — на ребро; *в* — на торец; *г* — ложковая; *д* — тычковая

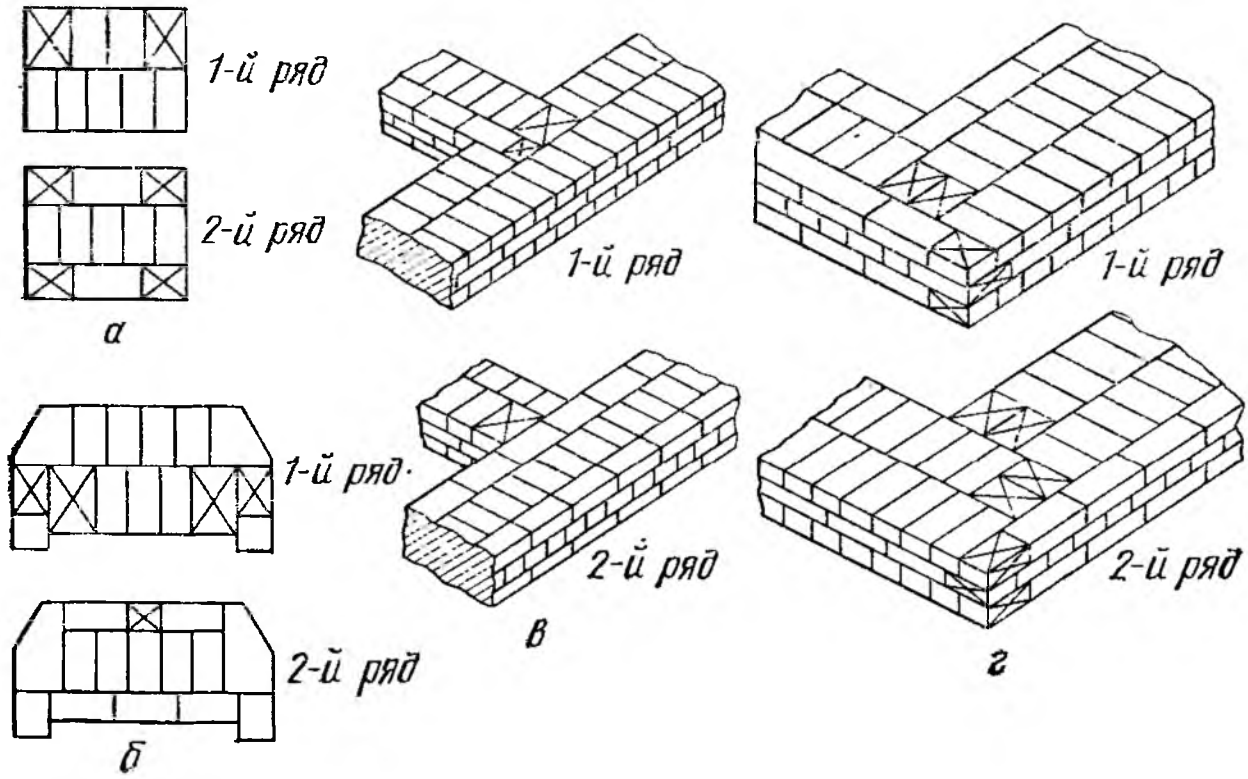


Рис. 74. Примеры перевязки швов огнеупорной кладки:
а — столбика; *б* — простенка; *в* — стены; *г* — угла

Под всегда выполняют многослойным. Нижние его слои, называемые выстилкой, кладут из теплоизоляционного кирпича и низших сортов огнеупорного кирпича, а иногда из красного кирпича. Верхние слои пода выполняют из соответствующих характеру работы печи огнеупорных материалов. При кладке пода всегда обеспечивают тщательную перевязку швов, а ряды кирпичей размещают вперемежку, чередуя кладку на плашку и на ребро. Верхний ряд кирпичей кладут всегда на ребро или в елочку (как паркет). Это обеспечивает продление срока службы пода благодаря его лучшему сопротивлению механическому воздействию загружаемого в печь металла.

Верхний ряд кирпичей пода укладывают так, чтобы они не были перевязаны с кладкой боковых стен. Это позволяет легко удалять верхний, наиболее изнашиваемый слой футеровки пода при ремонтах.

В термических печах с подподовыми топками под выполняют в виде арочных сводов (рис. 70, *в*), либо перекрывают специальными подовыми плитами и брусьями.

Толщина кладки пода в нагревательных печах в зависимости от рабочей температуры и размеров печи составляет от 230 до 460 мм. В плавильных печах она значительно больше и достигает, например, в крупных мартеновских и двухванных печах 1200 мм (вместе с наварным слоем).

Стены печи

Их выкладывают всегда, размещая кирпичи на плашку. Так же, как и при кладке пода, швы перевязывают. Стены плавильных печей делают часто наклонными с толщиной, уменьшающейся кверху, а стены нагревательных печей — всегда вертикальными с постоянной по высоте толщиной. Толщина стен плавильных печей всегда весьма значительна. Например, стены горна доменной печи достигают 1,6, а шахты 1,1 м. Стены мартеновских и двухванных печей на уровне порогов рабочих окон выкладывают толщиной до 1,1, а в верхней их части до 0,9 м. Толщина футеровки стен нагревательных печей изменяется в довольно широких пределах и зависит от условий их работы и размеров печи.

Во всех случаях стены печей выполняются двухслойными, а иногда и трехслойными. Внутренний слой, подвергающийся воздействию высоких температур, расплавленных металлов и шлаков, выполняют из плотного огнеупорного кирпича с высокими рабочими свойствами, но с невысокими теплоизоляционными характеристиками. Наружный слой

Таблица 11. Рекомендуемые толщины футеровки топливных нагревательных печей

Рабочая температура печи, °С	Высота стен, м	Толщина огнеупорного слоя, мм	Толщина теплоизоляционного слоя, мм
<1200	<1	115	230
<1200	>1	230	230
>1200	<1	230	115—230
>1200	>1	230—350	115—230

(или слои) делают из теплоизоляционных материалов или засыпок, отличающихся невысокой плотностью и низкой теплопроводностью.

Толщина теплоизоляционного слоя оказывает очень сильное влияние на потери тепла теплопроводностью через кладку и ее увеличение позволяет резко уменьшить проходящий через футеровку тепловой поток. Однако чрезмерное увеличение толщины теплоизоляционного слоя опасно, поскольку оно может привести к снижению механической прочности стен в связи с очень низким сопротивлением теплоизоляционных материалов сжатию. Кроме того, увеличение общей толщины футеровки стен вызывает повышение потерь тепла на аккумуляцию при разогреве, что особенно важно для печей периодического действия.

Рекомендуемые толщины футеровки топливных нагревательных печей приведены в табл. 11.

При выборе футеровки для электрических нагревательных печей вопрос экономии дорогостоящей электроэнергии приобретает очень большое значение, а опасность местных перегревов внутреннего огнеупорного слоя уменьшается. Поэтому слой тепловой изоляции в этих печах делают сравнительно толще, чем в топливных, по отношению к огнеупорному слою.

Таблица 12. Рекомендуемые толщины футеровки электрических нагревательных печей

Рабочая температура печи, °С	Толщина слоя, мм	
	огнеупорного	теплоизоляционного
300—600	65	115—230
600—800	115	230
800—1000	115	230—300
1000—1200	115	300—350

Рекомендуемые толщины футеровки электрических нагревательных печей приведены в табл. 12.

В стенках печей всегда выполняют отверстия: рабочие и смотровые окна отверстия для горелок и форсунок и т. д. Для того, чтобы эти отверстия не ослабляли

футеровку, изоляционный слой около них не выкладывают, а кладку из огнеупорного кирпича ведут прямо до кожуха, на всю толщину стены. Небольшие смотровые отверстия перекрывают одним кирпичом, а окна — специальными брусьями либо арочным сводом. С наружной стороны окон для обеспечения плотного прилегания заслонок устанавливают рамы, которые делают водоохлаждаемыми в высокотемпературных печах.

Свод печи

Его выполняют арочным или подвесным. Конструкция и основные размеры арочного свода показаны на рис. 71, *а*. Радиус кривизны этих сводов обычно принимают равным пролету свода B, т. е. ширине печи. Такой профиль свода называют циркульным. Реже выполняют полуциркульные арочные своды, у которых радиус кривизны равен половине пролета. Толщину свода S берут обычно равной торцовому размеру кирпича, т. е. обычно 230 мм (иногда 300 мм).

Своды сталеплавильных печей обычно выполняют без теплоизоляции во избежание их перегрева, а своды нагревательных печей изолируют, как правило, слоем засыпки толщиной от 65 до 230 мм.

Арочные (распорные) своды применяют для тех печей, у которых ширина пролета не превышает 4 м. При большем пролете слишком возрастает распорное усилие и это вызывает необходимость сооружения очень мощного каркаса с большей затратой металла, а также делает свод ненадежным.

При ширине пролета печи 4 м, а иногда и меньше свод выполняют подвесным. Его набирают из специальных кирпичей, подвешиваемых к рамным металлоконструкциям, укрепляемым на стойках и на поперечных связях каркаса печи. Примеры выполнения подвесного слоя показаны на рис. 75.

Своды мартеновских и двухванных печей очень массивны. Поэтому их выполняют распорно-подвесными, т. е. часть веса свода передается через подпятовые балки на стойки каркаса, а часть воспринимается поперечными связями через специальные подвесные устройства.

Для тех печей, у которых своды делают съемными (электрические дуговые печи, нагревательные колодцы), их набирают в специальных металлических рамах, воспринимающих все возникающие нагрузки.

Кирпичи в арочных сводах укладывают двумя способами: кольцами и вперевязку. Как в том, так и в другом случаях

для кладки свода возводят опалубку, которую ставят на под печи. Укладка кольцами заключается в том, что один ряд кирпича поперек печи укладывают от одной подпятовой балки до другой.

При этом параллельные ряды (кольца) кирпича не связаны между собой. В случае ремонта можно легко заменить один ряд, не трогая соседние. При укладке вперевязку все кирпичи свода перевязываются, т. е. производится смещение

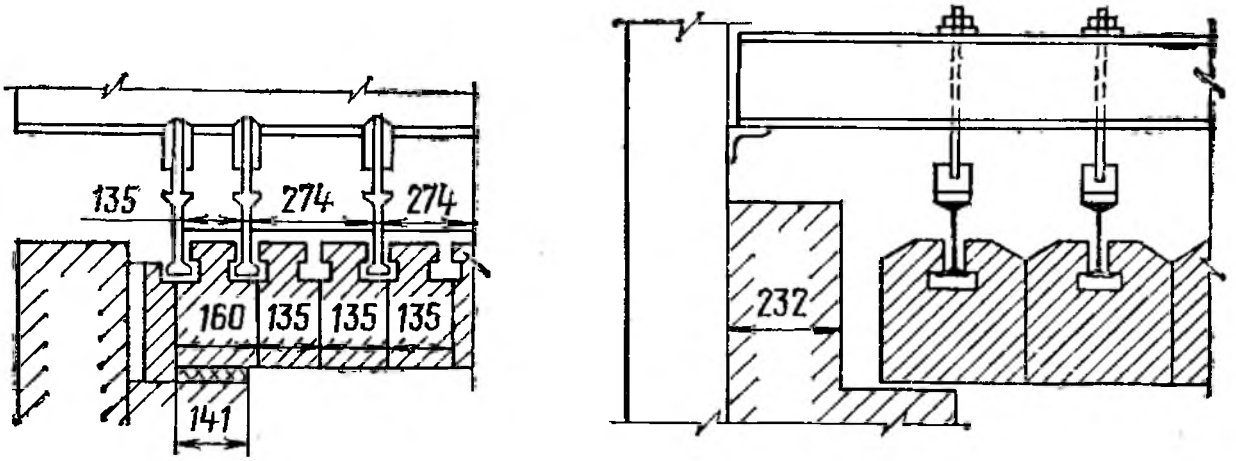


Рис. 75. Подвесные своды нагревательных печей

швов между ними. Эта конструкция более прочная, но ее труднее ремонтировать, так как все кирпичи в своде оказываются связанными между собой.

Своды мартеновских и двухванных печей всегда укладывают кольцами. Свод набирают от пятовых кирпичей к центру печи и ряды кирпича уплотняют замковыми кирпичами, которые забивают кувалдой через деревянные прокладки. Только после забивки замковых кирпичей опалубку снимают. Своды высокотемпературных печей кладут насухо (без раствора), и после окончания кладки швы уплотняют подсыпкой порошка, изготовленного из того же материала что и свод.

§ 5. Сооружение печей

Порядок работ по сооружению печей

Строительство фундаментов

Сооружение любой печи начинают со строительства фундамента в соответствии с его проектом, определяемым типом и размером печи (см. рис. 70). На верхней поверхности фундамента красками или рисками на специально заделанных стальных пластинах наносят его главные оси и все отметки, необходимые для монтажа каркаса. На фундаменте обязательно должны быть предусмотрены углубления и анкерные болты для установки и крепления стоек каркаса или кожуха печи и подподо-

вых балок. Их фактическое размещение и соответствие проекту должно быть тщательно проверено до начала монтажа металлоконструкций.

Очень важно также проверить вертикальные размеры фундамента, поскольку ошибка в уровне расположения печи в цехе совершенно недопустима. Печь, являющаяся одним из важнейших видов технологического оборудования, тесно связана с системами подачи, загрузки и выгрузки исходных материалов, металла и шлака. Поэтому точное соответствие вертикальных размеров фундамента проекту должно обеспечить нормальную работу печи в комплексе со всеми обслуживающими ее устройствами и с тем технологическим оборудованием (например, прокатным станом), для которого она предназначена.

Проверяют также горизонтальность верхней поверхности фундамента, которая должна строго соблюдаться и отклонение не должно превышать допустимой (по проекту) величины для данного типа печи.

Монтажные работы

После тщательной и всесторонней проверки фундамент печи принимают по акту и только тогда можно начинать работы по монтажу каркаса, кожуха и всех механизмов печи, а также кладку огнеупорной футеровки и тепловой изоляции. При сооружении небольших и средних нагревательных печей обычно сначала осуществляют монтажные работы и только после полной готовности каркаса печи начинают кладку ее футеровки.

Строительство таких крупных печей, как доменные, мартеновские, двухванные, нагревательные колодцы и другие ведут, совмещая монтаж стальных конструкций, оборудования печи и кладку ее футеровки. Поэтому график монтажа крупных печей должен быть очень четко согласован со сроками проведения всех смежных работ и, что самое главное, он должен точно соблюдаться. Задержка монтажных работ или нарушение их последовательности сразу же повлекут за собой снижение темпов сооружения всей печи вследствие вынужденного откладывания смежных операций.

Монтаж стальных конструкций следует выполнять в строгом соответствии с проектом организации работ после проверки и подготовки всех деталей и узлов к подъему и установке на место. Обычно производят предварительное укрупнение элементов конструкции вблизи места монтажа. Это укрупнение должно в максимально возможной мере сократить число операций по сборке всей металлоконструкции на месте, что позволяет уменьшить время монтажа.

Степень укрупнения элементов металлоконструкций ограничивается только грузоподъемностью имеющегося в распоряжении крана. При этом очень важна строгая последовательность сборки конструкции без пропусков, так как только правильный порядок ее сборки обеспечивает создание расчетной прочности, жесткости и неизменяемости размеров в процессе службы.

Подъем и установку на место всех деталей и узлов проводят с помощью подъемных мачт и кранов. Поднимаемые элементы и узлы металлоконструкции закрепляют стропами, в качестве которых используются стальные тросы или цепи. Строповку проводят так, чтобы элемент поднимался в положении, близком к проектному, и чтобы его не нужно было поворачивать во время подъема. Перед окончательным соединением установленных на место деталей и узлов проверяют правильность их размещения и полное соответствие проектным отметкам.

Соединение большей части элементов стальных конструкций проводится посредством сварки и реже клепки. Для этого предусматривают сооружение временных подмостей на период монтажа стальных кон-

струкций печи с целью обеспечения доступа ко всем соединяемым узлам. Подмости крепят на легких кронштейнах, привариваемых к стойкам каркаса печи или к ее кожуху. Сварка печных металлоконструкций должна проводиться тщательно. По окончании монтажа окончательно проверяют геометрическую схему конструкции. В случае крупных печей такая проверка проводится инструментальными геодезическими методами, а для небольших печей с помощью стальной рулетки, уровня и отвеса.

Иногда для ускорения монтажа каркаса и кожуха, особенно при капитальном ремонте или реконструкции печи, применяют способ надвижки. Он заключается в том, что на специальном стенде на уровне фундамента печи (или несколько выше его верхней отметки), но в стороне от него собирают всю металлоконструкцию или значительную ее часть. Затем готовую конструкцию надвигают на место с помощью полиспастов и лебедок и опускают на фундамент (на уровень проектной отметки). После этого остается только надежно и прочно соединить металлоконструкцию с фундаментом посредством анкерных болтов. Если к металлоконструкции предъявляется требование газоплотности (например, кожух доменной печи, ее газоочистные устройства и т. п.), то герметичность всех сварных швов подвергают тщательной проверке. Для этого швы промазывают керосином и следят за его просачиванием через возможные раковины и неплотности.

В тех случаях, когда можно закрыть временными заглушками все отверстия и люки в кожухе (например, воздухонагреватели доменных печей), проводят испытания накачиванием в полностью закрытый кожух сжатого воздуха и измерения падения давления в течение определенного времени. Утечку воздуха в вызывающих опасения местах швов устанавливают, покрывая их мыльным раствором.

Сдача и приемка смонтированных металлоконструкций проводится по акту.

Кладка огнеупорной футеровки и тепловой изоляции

Ее выполняют в строгом соответствии с проектом печи, предписывающим совершенно определенный подбор огнеупорных и теплоизоляционных материалов для тех или иных ее элементов и узлов. Такое соответствие наряду с высоким качеством выполнения работ по кладке обеспечивают ее механическую прочность и долговечность.

Как отмечалось выше, огнеупорная футеровка печи должна хорошо сопротивляться проникновению через нее газов и расплавленных металлов и шлаков. Это в значительной мере обусловлено толщиной швов, поскольку они обычно являются слабым местом любой кладки. В зависимости от толщины швов огнеупорную кладку подразделяют на четыре категории:

1) особо тщательная, со швами толщиной не более 1 мм, применяется при выполнении футеровки плавильных печей в зоне контакта с жидким металлом и шлаком и некоторых высокотемпературных нагревательных печей, а также их сводов при 1400 °С и выше;

2) тщательная, со швами толщиной не более 2 мм, применяется для выполнения футеровки элементов плавильных печей, подвергающихся воздействию шлаков и высокотемпературных нагревательных печей в тех местах, где кладка подвержена значительным истирающим воздействиям, а также сводов печей при температуре до 1400 °С;

3) обыкновенная, со швами толщиной не более 3 мм, применяется при футеровке нагревательных печей с рабочей температурой до 1200 °С;

4) простая, со швами толщиной до 4 мм, применяется для выпол-

нения нижних слоев пода, не контактирующих с нагреваемым металлом, для футеровки боровов и дымовых труб.

При толщине швов до 2 мм кирпичи предварительно подгоняют, обтесывая одну из сторон. Очень важно, чтобы при выполнении кладки кирпич не оказался бы лежащим обтесанной стороной в сторону рабочего пространства печи; он обязательно должен быть уложен так, чтобы обтесанная сторона легла бы внутрь кладки.

Помимо соблюдения требуемой толщины швов, стойкость кладки повышается перевязкой швов, обязательно практикующейся при ее выполнении и подробно описанной в § 4 настоящей главы (см. рис. 74).

Перед началом работ по выполнению футеровки печи к рабочей площадке подвозят необходимые материалы и создают склады для их хранения. От правильности транспортировки, перегрузки и хранения огнеупорных изделий зависят их сохранность и качество. При небрежном обращении с огнеупорами у них отбиваются углы и ребра, образуются трещины, а иногда происходит разрушение кирпича. При неправильном складировании возникает опасность перемешивания кирпичей различных сортов и марок, что вызывает затруднения в учете и отгрузке со склада необходимых огнеупорных изделий.

При складировании кирпич каждого размера и сорта кладут в отдельные штабеля. Это необходимо для обеспечения высококачественной кладки, учитывая, что толщина шва при одинаковых размерах кирпичей получается одинаковой по всей кладке. Штабеля четко маркируют.

При перегрузках и транспортировке кирпича к строящейся печи с помощью конвейеров, рольгангов, лотков и желобов необходимо следить за тем, чтобы кирпичи не ударялись друг о друга или о соответствующие приспособления.

Склады для огнеупорных изделий должны быть закрытыми; только для шамотных и динасовых изделий допускается на летнее время пользоваться полузакрытыми складами (навесами). Мертели и огнеупорные порошки хранят в закрытых складах в отдельных закромах с надписями, показывающими марку и сорт материала.

Работы по кладке футеровки печи начинают обычно с ее нижнего строения (дымоходов, рекуператоров или регенераторов и т. д.). Затем проводят последовательно кладку пода, стен и свода печи. При выполнении кладки соблюдают приведенные выше требования по толщине швов в зависимости от ее категории в соответствии с указаниями проекта печи, обеспечивая необходимую перевязку швов.

Кладка отдельных элементов печи (пода, стен, свода) должна проводиться в соответствии с особенностями ее конструкции, описанными в § 4 настоящей главы. В случае выполнения футеровки печей из набивных масс или огнеупорного бетона используют шаблоны и опалубки необходимой формы. Для ускорения работ по выполнению огнеупорной футеровки часто ведут кладку отдельных узлов или их изготовление из огнеупорного бетона в непосредственной близости от печи, а затем эти укрупненные блоки переносят с помощью крана и устанавливают на место.

При сооружении крупных печей для сокращения времени работ по футеровке кладку ведут на двух и более уровнях по высоте. Например, футеровку лещади и горна доменной печи сочетают с выполнением ряда монтажных работ и с кладкой футеровки ее шахты.

Сушка и разогрев футеровки

После завершения монтажных и футеровочных работ тщательно проверяют соответствие проекту фактически получившихся геометриче-

ских размеров и формы рабочего пространства печи. После устранения всех дефектов и недоделок можно начинать сушку футеровки и ее разогрев. Длительность этих операций зависит от конструкции, размеров, назначения печи, материала футеровки и способа ее выполнения. Так, монолитная футеровка из огнеупорного бетона требует очень медленного и тщательного высушивания и разогрева, тогда как кладка из огнеупорных кирпичей может быть высушена и разогрета сравнительно быстро.

При сушке футеровки, осуществляемой сжиганием газа с помощью специальных временных горелок или (что практикуется реже) сжиганием дров в рабочей камере, должно быть соблюдено главное условие: обеспечение равномерного распределения температуры по всему высушиваемому пространству.

Разогрев печей с доведением до рабочей температуры следует проводить непосредственно по окончании сушки. Во время сушки и разогрева должно быть организовано непрерывное наблюдение за состоянием температурных швов и свода. В случае подвижного каркаса необходимо постепенно отпускать болтовые связи.

После разогрева и опробования всех механизмов и оборудования печи проводят наладку ее производственного режима и сдают печь обслуживающему персоналу.

Техника безопасности при сооружении печей

Сооружение печей проводится либо во вновь строящихся, либо в расширяемых или реконструируемых цехах. Работы по сооружению печей ведутся в цехе часто одновременно на разных уровнях, причем особо сложная обстановка складывается в действующих цехах, насыщенных работающим оборудованием.

Поэтому обязательный инструктаж всех занятых при строительстве печи по технике безопасности должен отражать не только вопросы охраны труда и безопасного выполнения работ собственно по сооружению печи, но и специфику условий работы в данном цехе с его грузопотоками, транспортными средствами и энергетическими коммуникациями. При этом значительная часть грузопотоков в действующем цехе металлургического завода представляет собой потоки расплавленного или раскаленного металла и жидкого шлака, что требует особого внимания для обеспечения безопасности работающих.

Основные правила техники безопасности при монтаже стальных конструкций и оборудования печей сводятся к следующему. Зона монтажа должна быть ограждена и посторонние лица в нее не допускаются. При выполнении работ в этой зоне в темное время суток она должна быть хорошо освещена. Все оборудование, используемое при монтажных работах, должно быть в исправном состоянии и испытано, а все грузоподъемные устройства и механизмы должны иметь соответствующие паспорта.

Линии электрического тока следует располагать так, чтобы исключить случайное задевание за них монтируемыми конструкциями. Если существующую в цехе линию нельзя вынести за зону монтажа, то следует установить за ней специальный надзор.

При обвязывании стропами балок, стоек и других поднимаемых на высоту элементов металлоконструкций следует строго соблюдать специально разработанные правила по строповке. Все сварочные работы также проводятся в соответствии с существующими правилами, обеспечивающими безопасные условия работы.

При сборке каркаса и установке на него литых рам, заслонок, горелочных плит и всякого другого тяжелого оборудования и арматуры

печи надо очень внимательно следить за тем, чтобы эти нагрузки на каркас были по возможности равномерными и не вызывали перегрузки какой-либо одной стороны печи. Иначе это может привести к неустойчивости и даже опрокидыванию не закрепленного еще окончательно и не загруженного футеровкой каркаса. Ни в коем случае нельзя поднимать на высоту металлоконструкции или грузы, на которых находятся люди. Высокие металлоконструкции, установленные в вертикальное положение, необходимо поддерживать расчалками до момента их окончательного закрепления.

Все монтажные работы на высоте должны проводиться только с подмостей, имеющих прочные ограждения, и с привязкой монтажников с помощью специальных предохранительных поясов к неподвижным частям конструкции. Использовать подмости в качестве опор для домкратов и рычагов категорически запрещается.

При выполнении работ по кладке футеровки следует соблюдать следующие основные правила техники безопасности. Все рабочие места, проходы и лестницы должны быть свободные от мусора и металлических конструкций и хорошо освещены. В закрытые места (шлаковики, борова и т. п.) следует посылать не менее двух человек.

Леса, подвесные площадки и подмости, с которых проводят кладку, должны быть достаточно устойчивыми, надежными и прочными. Их рассчитывают и подвергают испытанию под двойной нагрузкой. Во избежание провала настилов не следует перегружать леса и подмости кирпичом и другими строительными материалами, а их укладка должна быть равномерной.

Если работы ведутся в два или три яруса по высоте (например, при сооружении доменных печей), необходимо устраивать прочные и не имеющие отверстий и щелей перекрытия для предохранения людей, работающих на нижних уровнях, от предметов и мусора, которые могут упасть с верхних ярусов.

Так как при сооружении печей используется большое число различных механизмов (для транспортировки кирпича, порошков и растворов, приготовления растворов, резки кирпича и т. д.), следует принять все меры против возможного травматизма. С этой целью все движущиеся части и приводы механизмов должны быть надежно ограждены, а механизмы размещены на рабочей площадке так, чтобы обеспечить наименьшую вероятность пересечения путей движения работающих и грузопотоков. Необходимо также предусмотреть систему аварийного выключения отдельных механизмов.

Осуществление всех перечисленных мероприятий должно обеспечить безопасные условия работ по сооружению металлургических печей.

Глава VI УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛА В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧАХ

§ 1. Характеристика методов утилизации тепла в металлургических печах

Дымовые газы, покидающие рабочее пространство печей, имеют высокую температуру и поэтому уносят с собой значительное количество тепла. Например в мартеновских пе-

чах из рабочего пространства с дымовыми газами уносится около 80 % всего тепла, поданного в рабочее пространство, в нагревательных печах 60 %. Из рабочего пространства печей дымовые газы уносят с собой тем больше тепла, чем выше температура дымовых газов и чем ниже коэффициент использования тепла в печи. Поэтому целесообразно обеспечивать утилизацию тепла отходящих дымовых газов, которая может быть выполнена принципиально двумя методами: с возвратом части тепла, отобранного у дымовых газов, обратно в печь и без возврата этого тепла в печь. Для осуществления первого метода необходимо тепло, отобранное у дыма, передать идущим в печь газу и воздуху (или только воздуху). Для достижения этой цели широко используются теплообменники рекуперативного и регенеративного типа, применение которых позволяет повысить к. п. д. печного агрегата, увеличить температуру горения и сэкономить топливо.

В ряде случаев тепло отходящих дымовых газов используется в теплосиловых котельных и турбинных установках. При этом тепло в печь не возвращается, но достигается существенная экономия топлива.

В отдельных случаях оба описанных метода утилизации тепла отходящих дымовых газов используются одновременно. Это делается тогда, когда температура дымовых газов после теплообменников регенеративного или рекуперативного типа остается достаточно высокой и целесообразна дальнейшая утилизация тепла в теплосиловых установках.

Учитывая важное значение, которое имеет утилизация тепла отходящих дымовых газов с возвратом части их тепла в печь, остановимся на этом вопросе подробнее.

Следует прежде всего отметить, что единица тепла, отобранная у дыма и вносимая в печь воздухом или газом (единица физического тепла), оказывается значительно ценнее единицы тепла, полученной в печи в результате сгорания топлива (единицы химического тепла), так как тепло подогретого воздуха (газа) не влечет за собой потерь тепла с дымовыми газами. Ценность единицы физического тепла тем больше, чем ниже коэффициент использования топлива и чем выше температура отходящих дымовых газов.

Для нормальной работы печи необходимо в рабочее пространство печи подавать определенное количество тепла. В это количество тепла входит не только тепло топлива (Q_x), но и тепло подогретого воздуха или газа ($Q_ф$), т. е. $Q_Σ = Q_x + Q_ф$.

Ясно, что при $Q_Σ = \text{const}$ увеличение $Q_ф$ позволит умень-

шить Q_x. Иными словами, утилизация тепла отходящих дымовых газов позволяет достичь экономии топлива, причем экономия топлива зависит от степени утилизации тепла дымовых газов

$$R = I_в/I_д,$$

где $I_в$ — энтальпия подогретого воздуха, Вт/(Дж/период); $I_д$ — энтальпия отходящих из рабочего пространства дымовых газов, Вт/(Дж/период).

Степень утилизации тепла, выраженная в процентах, может быть также названа к. п. д. рекуператора (регенератора):

$$К.п.д._р = \frac{I_в}{I_д} 100\%.$$

Зная величину степени утилизации тепла, можно определить экономию топлива по выражению:

$$\eta = \frac{I_в/I'_д}{1 - I_д/I'_д(1 - R)} 100\%,$$

где $I'_д$ — энтальпия дымовых газов при температуре горения, Дж/м; $I_д$ — энтальпия дымовых газов, покидающих печь, Дж/м^3.

Снижение расхода топлива в результате использования тепла отходящих дымовых газов обычно дает значительный экономический эффект и является одним из путей снижения стоимости нагрева металла в промышленных печах.

Кроме экономии топлива, применение подогрева воздуха (газа) сопровождается увеличением калориметрической температуры горения, что может являться основной целью рекуперации при отоплении печей топливом с низкой теплотой сгорания.

Увеличение $Q_ф$ при $Q^р_н$ =const приводит к увеличению температуры горения. Если необходимо обеспечить определенную величину $T_к$, то повышение температуры подогрева воздуха (газа), приводит к уменьшению величины $Q^р_н$, т. е. к уменьшению доли в топливной смеси газа с высокой теплотой сгорания.

Поскольку утилизация тепла позволяет значительно экономить топливо, целесообразно стремиться к максимально возможной, экономически оправданной степени утилизации.

Однако необходимо сразу отметить, что утилизация не может быть полной, т. е. всегда $R<1$. Это объясняется тем, что увеличение поверхности нагрева рационально только до определенных пределов, после которых оно уже приводит к очень незначительному выигрышу в экономии тепла.

Как уже указывалось, утилизация тепла отходящих дымовых газов с возвратом в печь можно осуществить в теплообменных устройствах регенеративного и рекуперативного типов. Регенеративные теплообменники работают при нестационарном тепловом состоянии, рекуперативные при стационарном.

Теплообменники регенеративного типа имеют следующие недостатки:

1) регенераторы не обеспечивают постоянную температуру подогрева воздуха или газа, которая падает по мере остывания кирпичей насадки и ограничивает возможность применения автоматического регулирования печи;

2) прекращается питание печи теплом при перекидке клапанов;

3) при подогреве в регенераторах имеет место потеря топлива через дымовую трубу, при этом величина уноса достигает 5—6 % полного расхода;

4) большие объемы и масса регенераторов;

5) керамические регенераторы всегда располагают под печами; исключение составляют только кауперы, подмещаемые около доменных печей.

Однако, несмотря на очень серьезные недостатки, регенеративные теплообменники применяют еще на высокотемпературных печах (мартеновских и доменных печах, в нагревательных колодцах). Это объясняется тем, что регенераторы могут работать при весьма высокой температуре дымовых газов (1500—1600 °С). При такой температуре рекуператоры работать устойчиво пока не могут.

Рекуперативный принцип утилизации тепла отходящих дымовых газов более прогрессивен и более совершенен. Рекуператоры обеспечивают постоянную температуру подогрева воздуха или газа и не требуют никаких перекидных устройств — это обеспечивает более ровный ход печи и большую возможность для автоматизации и контроля ее тепловой работы. В рекуператорах отсутствует вынос газа в дымовую трубу, они меньшего объема и массы. Однако рекуператорам свойственны и некоторые недостатки, основными из которых являются низкая огнестойкость металлических рекуператоров и низкая газоплотность керамических рекуператоров.

§ 2. Утилизация тепла отходящих дымовых газов с целью предварительного подогрева газа и воздуха

Регенеративные теплообменники

Регенератор, обычно применяемый в металлургических печах, представляет собой камеру, заполненную кирпичной многорядной решеткой (насадкой), выложенной из огнеупорных кирпичей. Сначала через регенератор пропускают дым, а затем в обратном направлении — воздух или газообразное топливо. В этот период регенеративная насадка отдает воздуху (газу) ранее аккумулированное тепло Существует оптимальное в теплотехническом отношении время между перекидкой клапанов, т. е. между следующими друг за другом изменениями поступления газообразных сред. У воздухонагревателей доменных печей длительность воздушного $\tau_в$ и дымового $\tau_д$ периодов связана следующим образом:

$$\tau_в = \frac{\tau_д + \tau_п}{n - 1},$$

где $\tau_п$ — длительность перекидки клапанов; n — число воздухонагревателей на одну печь.

Для мартеновских и нагревательных печей $\tau_д = \tau_в$, причем и в том и другом случае продолжительность периодов составляет 5—15 мин и определяется особенностями работы регенеративной насадки в целом и каждого кирпича в отдельности. В начале дымового периода температура насадки относительно мала и перепад температур между дымовыми газами и кирпичами насадки значительный. Постепенно насадка нагревается, перепад температур уменьшается и наступает такой момент, когда необходима перекидка клапанов. К этому времени насадка настолько нагревается, что температура ее может находиться на грани огнеупорности кирпича. Изменение температуры подогрева воздуха (газа) вызвано постепенным охлаждением насадки в течение воздушного (газового) периода. Наиболее высокая температура подогрева воздуха наблюдается в начале воздушного периода, когда температура насадки максимальна.

Требования теплового режима печи к работе регенераторов обусловлены тем, что понижение температуры подогрева воздуха или газа приводит к снижению температуры горения и неблагоприятно влияет на температуру в печи. Поэтому, когда необходимо поддержать температуру в печи достаточно высокой, следует часто делать перекидку клапанов.

Кирпич аккумулирует тепло дымовых газов и передает его нагреваемому воздуху, выполняя тем самым роль посредника в теплообмене между дымом и воздухом. Изменение температуры кирпича в течение дымового и воздушного периодов показано на рис. 76, из которого видно, что в течение дымового периода температура поверхности кирпича интенсивно повышается, а температура центра сначала даже несколько понижается, а потом начинает расти. Это объясняется тем, что к концу воздушного периода температура поверхности кирпича становится ниже температуры его центра. При этом наблюдается отток тепла от середины к поверхности кирпича. В начале дымового периода процесс передачи тепла от центра к поверхности также имеет место до тех пор, пока температура поверхности не превзойдет температуры его центра.

Количество тепла $+\Delta q$, которое кирпич аккумулирует в дымовой период, равно количеству тепла $-\Delta q$, которое кирпич отдает воздуху в воздушный период. Внутренние слои кирпича претерпевают значитель-

но меньшие температурные колебания, чем наружные. Поэтому масса кирпича, с точки зрения его теплоаккумулирующей и теплоотдающей способности, работает неодинаково.

К насадке предъявляют следующие требования, определяющие ее экономичность и эксплуатационные качества:

а) высокий общий коэффициент теплопередачи;

б) минимальное аэродинамическое сопротивление;

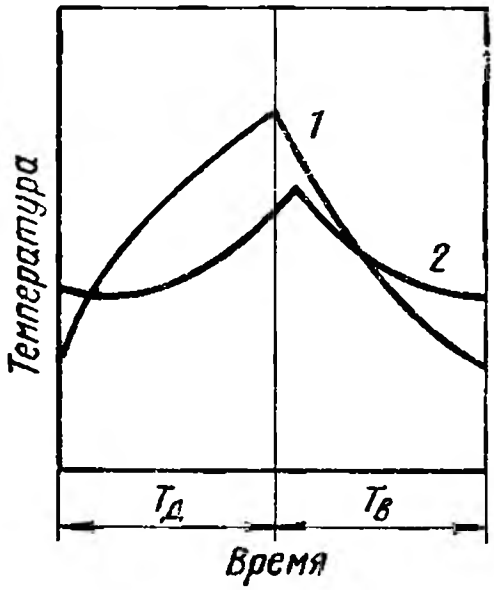


Рис. 76. Изменение температуры регенеративного кирпича во времени:

1 — поверхность; *2* — центр

в) максимальная удельная поверхность нагрева;

г) минимальная опасность засорения;

д) необходимая строительная устойчивость.

Материал, из которого выполняют насадку, должен характеризоваться соответствующей огнеупорностью, термостойкостью и обладать определенным сопротивлением деформации под нагрузкой при повышенных температурах. В мартеновских печах крайне важное значение имеет способность кирпича насадки выдерживать воздействие железистых шлаков.

Ячейкой регенеративной насадки называется сечение, свободное для прохода газов и заключенное между четырьмя кирпичами регенератора. Размер ячейки определяется видом и назначением насадки. Наибольшее распространение получили насадки, представленные на рис. 77. Их сравнительные характеристики приведены в табл. 13.

Конструкции регенераторов

В настоящее время нагревательные печи с регенераторами не строят. Однако существует еще достаточно большое количество нагревательных колодцев и печей с выкатным подом, снабженных регенераторами. Регенераторы таких печей выполнены однооборотными, преимуществен-

Таблица 13. Характеристика различных типов регенеративных насадок

Показатели	Тип насадки			
	Каупера (рис. 77, *а*)	Сименса (рис. 77, *б*)	блочная для доменных воздухонагревателей	
			рис. 77, *в*	рис. 77, *г*
Удельная поверхность нагрева, $м^2/м^3$	13,5	13,5	38,1	36,8
Объем кирпича насадки, $м^3/м^3$	0,54	0,31	0,7	0,58
Живое сечение насадки, $м^2/м^2$	0,48	0,42	0,29	0,386

но с насадкой Сименса при размере ячейки 50×50 и 70×70 мм. В регенераторах нагревательных колодцев газ и воздух подогреваются до 800—1000 °С. Из динаса выполняют либо всю насадку, либо только верхние (более нагретые) ее ряды. Нижние ряды в этом случае делают из шамота.

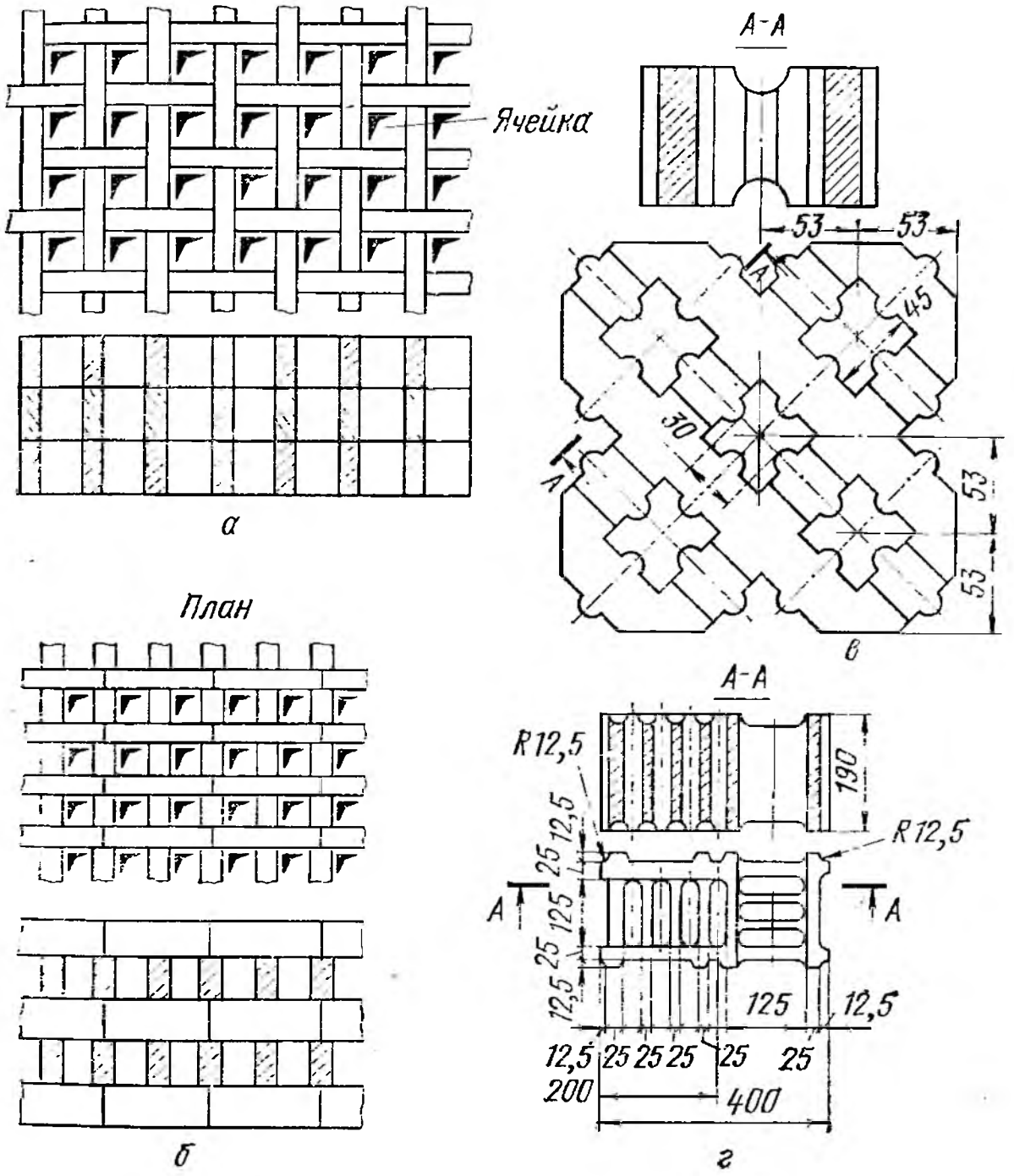


Рис. 77. Виды регенеративной насадки:

а — насадка Каупера; *б* — насадка Сименса; *в*, *г* — блочные насадки для доменных воздухонагревателей

Регенераторы мартеновских печей работают в условиях высоких температур и интенсивной шлаковой атаки. Температура дымовых газов на входе в регенератор составляет 1500—1600 °С, температура подогрева газа и воздуха 1100—1250 °С. Для улавливания плавильной пыли перед регенераторами предусмотрены как стационарные, так и выдвижные шлаковики. В мартеновских печах объем газовых и воздушных (или только воздушных при отоплении мазутом или природным газом) насадок должен составлять 4,0—5,0 м³/м² площади пода печи. Для

крупных мартеновских печей емкостью более 400—450 т устанавливают двухоборотные регенераторы (рис. 78, *а*), так как увеличение высоты насадки более 7 м сопряжено со значительными затратами, поскольку для мартеновских печей это связано с расположением регенераторов ниже уровня земли. В однооборотных насадках (рис. 78, *б*) верхние 20 рядов обычно выполняют из форстерита, хорошо сопротивляющегося

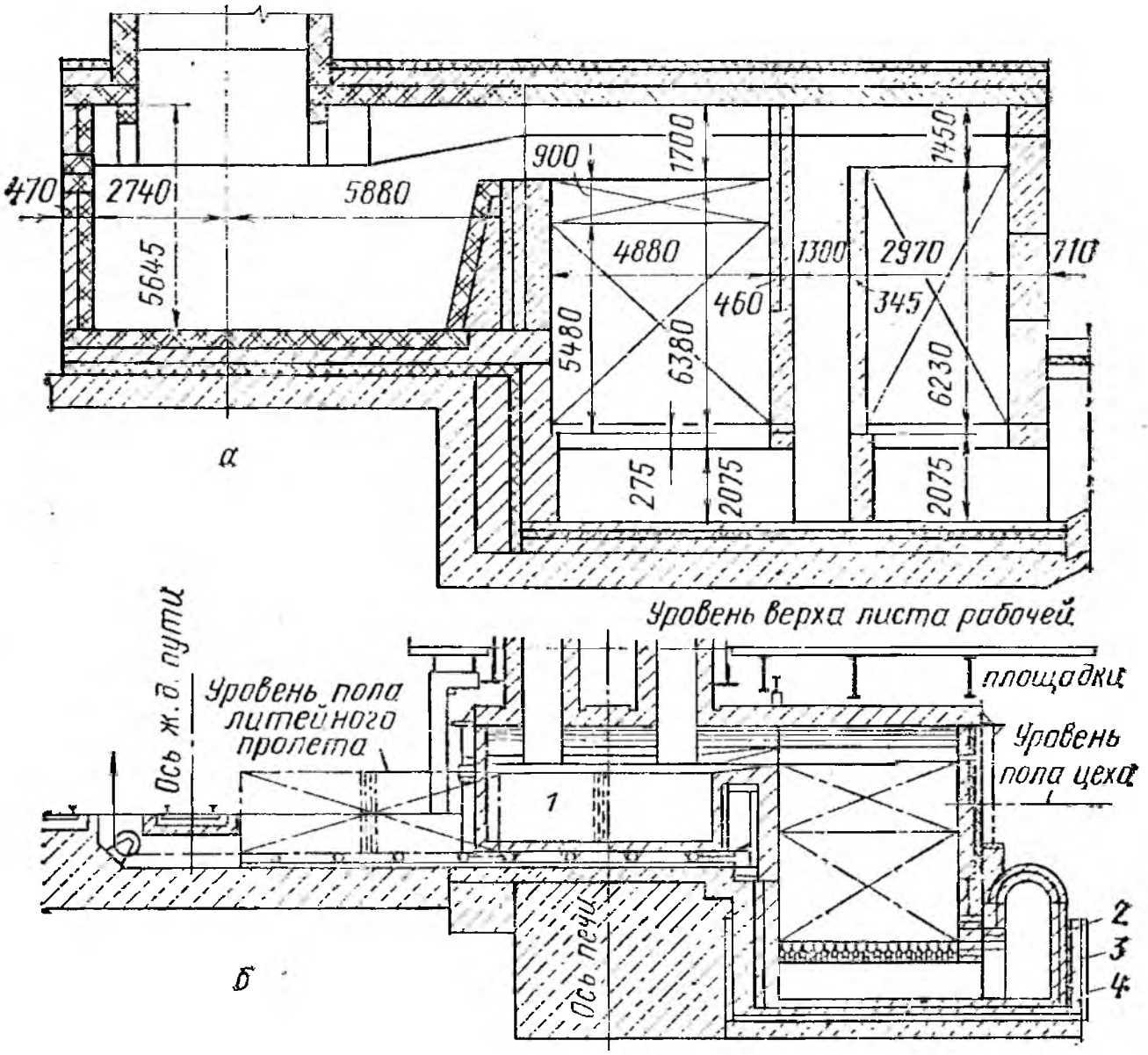


Рис. 78. Регенераторы мартеновских печей:

а — двухоборотный; *б* — однооборотный с выдвижным шлаковиком

воздействию окислов железа, в нижние — из шамота. Первую по ходу дыма (горячую) камеру двухоборотных насадок изготовляют из форстерита, вторую — из шамота. В однооборотных регенераторах обычно применяют насадку Сименса с ячейками размерами 150×150 и 180×180 мм. В двухоборотных регенераторах горячую камеру выкладывают по Каупер с ячейками размерами 230×230÷270×270 мм. Вторую камеру выкладывают по Сименсу с ячейками 140×140÷190×190 мм. Применение двухоборотного регенератора позволяет повысить температуру подогрева на 50—100 К. Расчет выполняют отдельно для той и другой камер.

Наиболее распространены доменные воздухонагреватели (аппараты Каупера) с внутренней боковой камерой горения, где сжигается домен-

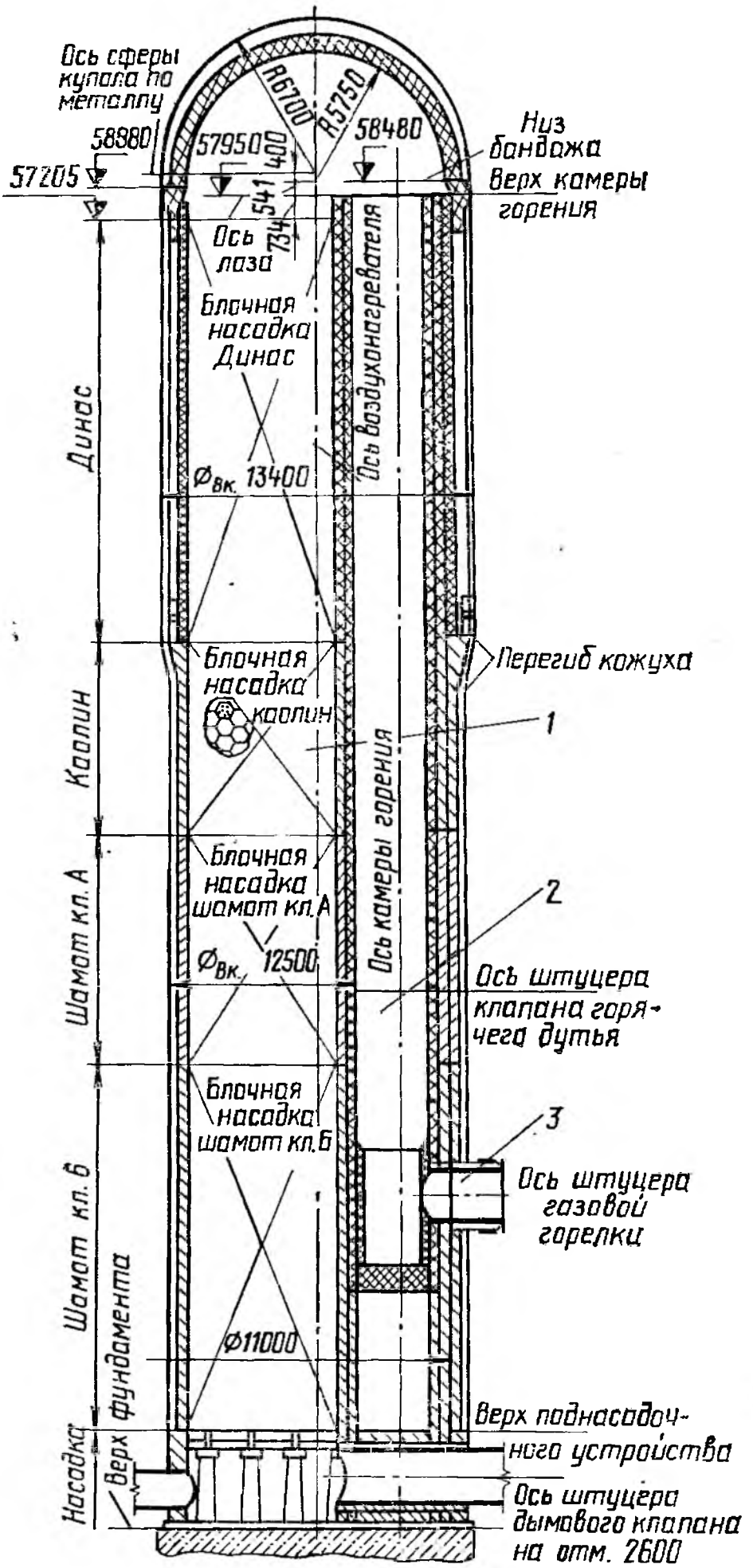


Рис. 79. Доменный воздухонагреватель с четырехъярусной насадкой:

1 — насадка; *2* — камера горения; *3* — горелка

ный газ, продукты сгорания которого, проходя по насадке сверху вниз, нагревают ее. Воздух проходит в обратном направлении. Существуют и конструкции воздухонагревателей с выносной камерой горения, а также такие, в которых газ сжигается щелевыми горелками в купольном пространстве. Воздухонагреватели с внутренней камерой и удобнее в эксплуатации, чем воздухонагреватели со щелевыми горелками, у которых горелки и клапаны размещены на большой высоте. Однако воздухонагревателям с внутренней камерой свойственны свои недостатки: перегрев купола и отклонение в процессе эксплуатации камеры горения в сторону насадки.

В отечественной практике применяют воздухонагреватели как с одноярусной насадкой (размер ячейки 45×45 мм), так и с трех- и четырехъярусной насадкой (рис. 79). Температура дыма по мере его продвижения в насадке падает. Для поддержания теплоотдачи на должном уровне целесообразно постепенно уменьшать живое сечение насадки. Поэтому в трехъярусных насадках ячейки наибольшего размера (110×110 мм) в верхнем ярусе; ячейки среднего яруса имеют размер 130×45, нижнего 45×45 мм.

В большинстве случаев в отечественной практике доменные воздухонагреватели сооружены с применением в кладке купола, верха насадки, верха стен и камеры горения высокоглиноземистого кирпича, содержащего 45—62 % глинозема. Такие воздухонагреватели обеспечивают подогрев воздуха до 1150—1200 °С.

Для поддержания необходимой температуры фурменных зон требуется обеспечить соответствующую генерацию тепла. При применении наряду с коксом природного газа или мазута необходимо использовать воздушное дутье с более высокой температурой нагрева или дутье, обогащенное кислородом. Это объясняется тем, что энтальпия продуктов сгорания кокса выше энтальпии продуктов сгорания природного газа в 5 раз, а мазута в 1,6 раза. Для достижения повышенной температуры воздушного дутья перспективной является конструкция воздухонагревателей с четырехъярусной насадкой (рис. 79) из специальных блоков типа изображенных на рис. 77. Верхний, наиболее высокотемпературный ярус насадки выполняют из малоразрыхляющегося динаса, второй ярус сверху — из каолинового огнеупора (42 % Al_2O_3), остальную часть насадки — из шамота.

Расчет регенераторов

Расчет регенераторов проводят на циклы их работы. Основной целью расчета является определение общей поверхности нагрева (м²) и общего объема (м³) регенератора

$$F = \frac{Q}{\varkappa \cdot \Delta T_{ср}}; \qquad (76)$$

$$V = \frac{F}{f},$$

где F — общая поверхность нагрева регенератора, м²; $\varkappa$ — суммарный коэффициент теплопередачи в регенераторе, Дж/(м²·К·период); $\Delta T_{ср}$ — средняя разность температур, К; V — общий объем регенератора, м³; F — удельная поверхность нагрева регенератора, м²/м³; Q — количество тепла, передаваемое от дыма к воздуху, Дж/период. Значение Q определяют из уравнения теплового баланса насадки.

Суммарный коэффициент теплопередачи от дымовых газов к воздуху (газу) может быть определен из выражения

$$\varkappa = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_д \tau_д 3{,}6} + \psi \frac{S_э}{\lambda 3{,}6}\left(\frac{1}{\tau_д} + \frac{1}{\tau_в}\right) + \frac{1}{S_э \rho c \xi} + \frac{1}{\alpha_в \tau_в 3{,}6}}$$

Дж/(м²·К·период), (77)

где $\alpha_д$ и $\alpha_в$ — соответственно коэффициенты теплоотдачи от продуктов сгорания к поверхности кирпича регенеративной насадки и от поверхности кирпича к воздуху (газу), Вт/(м²·К); $\tau_д$ и $\tau_в$ — длительность дымового и воздушного (газового) периодов, с; ψ — коэффициент, учитывающий внутреннее тепловое сопротивление насадки при реальных циклических условиях ее работы; $S_э$ — эффективная полутолщина кирпича, м; λ — коэффициент теплопроводности материала кирпича, Вт/(м·К); ρ — объемная плотность кирпича насадки, кг/м; c — удельная теплоемкость кирпича насадки, Дж/(кг·К); ξ — коэффициент, зависящий от интенсивности изменения температуры насадки средней по массе в дымовой и воздушной периоды.

Коэффициент ψ зависит от коэффициента аккумуляции тепла в кирпиче насадки $\eta_к$

$$\eta_к = \frac{1}{1 + 4/3 + 1/F_{0\Sigma}},$$

где $F_{0\Sigma} = \frac{a\tau_\Sigma}{S_э}$; $\tau_\Sigma = \tau_д + \tau_в$.

Эффективная полутолщина кирпича $S_э$ может быть найдена из выражения $S_э = v/f$, в котором v — удельный объем насадки, м³/м³; f — удельная поверхность нагрева насадки, м²/м³.

В теплотехническом отношении целесообразно, чтобы вся толщина кирпича принимала участие в процессе аккумуляции тепла. Для достижения этого необходимо, чтобы $\eta_к > 1/3$. При $\eta_к > 1/3$ для всех насадок, кроме брусковой, рекомендуется принимать $\psi = 1/3$, для брусковой $\psi = 1/4$.

Специальные исследования позволили установить, что для регенераторов мартеновских и нагревательных печей коэффициент ξ может быть принят равным 10, для воздухонагревателей доменных печей $\xi \leqslant 5$.

Рекуперативные теплообменники

Любой рекуператор представляет собой теплообменный аппарат, работающий в условиях стационарного теплового состояния, когда тепло постоянно передается от остывающих дымовых газов к нагревающемуся воздуху (газу) через разделительную стенку.

Полное количество тепла, переданного в рекуператоре в единицу времени, определяют по уравнению

$$Q = K \Delta T_{ср} F, \quad (78)$$

где K — суммарный коэффициент теплопередачи от дыма к воздуху (газу), характеризующий общий уровень теплопередачи в рекуператоре, Вт/(м·К); $\Delta T_{ср}$ — средняя (по всей

поверхности нагрева) разность температур между дымовыми газами и воздухом (газом), К; F — поверхность нагрева, через которую происходит передача тепла от дымовых газов к воздуху (газу), м^2.

Теплопередача в рекуператорах включает в себя три основные ступени передачи тепла: а) от дымовых газов к стенкам рекуперативных элементов; б) через разделительную стенку; в) от стенки к нагреваемому воздуху или газу.

На дымовой стороне рекуператора тепло от дымовых газов к стенке передается не только конвекцией, но и излучением. Следовательно, локальный коэффициент теплоотдачи на дымовой стороне равен

$$\alpha_д = \alpha_д^к + \alpha_д^{изл},$$

где $\alpha_д^к$ — коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к стенке конвекцией, Вт/(м^2·К); $\alpha_д^{изл}$ — коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к стенке путем излучения, Вт/(м^2·К).

Передача тепла через разделительную стенку зависит от теплового сопротивления стенки $R=S/\lambda$ и состояния ее поверхности.

На воздушной стороне рекуператора при нагреве воздуха тепло от стенки к воздуху передается только конвекцией, при нагреве газа конвекцией и излучением. Таким образом, при нагреве воздуха теплоотдача определяется локальным коэффициентом теплоотдачи конвекцией $\alpha_в=\alpha_в^к$; если нагревается газ, то коэффициент теплоотдачи $\alpha_г=\alpha_г^к+\alpha_г^{изл}$.

Все отмеченные локальные коэффициенты теплоотдачи объединены в суммарном коэффициенте теплопередачи

$$K = \frac{1}{1/\alpha_д + S/\lambda + 1/\alpha_в}. \qquad (79)$$

В трубчатых рекуператорах суммарный коэффициент теплопередачи следует определять для цилиндрической стенки (линейный коэффициент теплопередачи)

$$K = \frac{2\pi}{1/\alpha_1 r_1 + 1/\lambda \ln \frac{r_2}{r_1} + 1/\alpha_2 r_2}. \qquad (80)$$

Коэффициент K называется коэффициентом теплопередачи трубы. Если же необходимо отнести количество тепла к площади внутренней или наружной поверхности трубы, то

суммарные коэффициенты теплопередачи можно определить следующим образом:

$$K_1 = \frac{K}{2\pi r_1} \quad \text{и} \quad K_2 = \frac{K}{2\pi r_2},$$

где α_1 — коэффициент теплопередачи на внутренней стороне трубы, Вт/(м^2·К); α_2 — то же, на наружной стороне трубы, Вт/(м^2·К); r_1 и r_2 — соответственно радиусы внутренней и наружной поверхностей трубы, м.

В металлических рекуператорах можно пренебречь величиной теплового сопротивления стенки S/λ, и тогда суммарный коэффициент теплопередачи можно записать в следующем виде:

$$K = \frac{\alpha_д \alpha_в}{\alpha_д + \alpha_в}. \qquad (81)$$

Все локальные коэффициенты теплоотдачи, необходимые для определения величины K, можно получить на основании законов теплоотдачи конвекцией и излучением, рассмотренных выше.

Поскольку между воздушной и дымовой сторонами рекуператора всегда есть перепад давлений, наличие неплотностей в рекуперативной насадке приводит к утечке воздуха, достигающей иногда 40—50 %. Прососы резко снижают эффективность рекуперативных установок; чем больше прососанного воздуха, тем меньше доля тепла, полезно использованного в керамическом рекуператоре (см. ниже):

Утечка, %	0	25	50
Конечная температура дымовых газов, °С	660	615	570
Температура подогрева воздуха, °С . .	895	820	770
К. п. д. рекуператора (без учета потерь) %	100	84	73,5

Утечка воздуха влияет на величину локальных коэффициентов теплоотдачи, причем воздух, попавший в дымовые газы, не только снижает их температуру, но и уменьшает процентное содержание CO_2 и H_2O, вследствие чего ухудшается излучательная способность газов.

Как при абсолютно газоплотном рекуператоре, так и при утечке локальные коэффициенты теплоотдачи меняются по поверхности нагрева, поэтому при расчете рекуператоров определяют отдельно величины локальных коэффициентов теплоотдачи для верха и низа и затем уже по усредненному значению находят суммарный коэффициент теплопередачи.

Температурное поле рекуператора

В рекуператорах движение газообразной среды может быть противоточное, перекрестное и прямоточное. График, характеризующий изменение температуры по поверхности нагрева при противоточной и прямоточной схемах движения, приведен на рис. 80. Следует отметить, что принято схему движения рассматривать по ходу дыма.

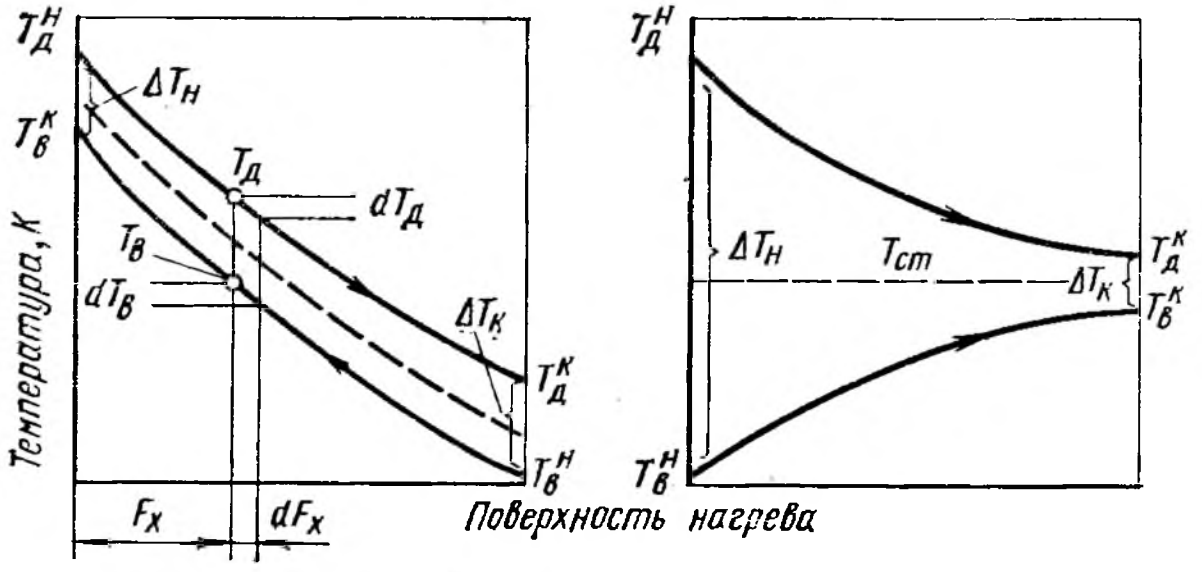


Рис. 80. Схема движения газовых сред в теплообменниках рекуперативного типа

Из приведенного графика видно, что при противоточном движении конечная температура воздуха $T_в^к$ (температура подогрева воздуха) может быть конечной температуры дымовых газов $T_д^к$, чего никогда не может быть при прямоточной схеме движения. Вместе с тем при противотоке температура стенки рекуператора может быть значительно выше, чем при прямотоке. Поэтому более эффективную противоточную схему используют в керамических рекуператорах и в металлических рекуператорах при относительно невысоких температурах отходящих дымовых газов. Прямоточную схему применяют для металлических рекуператоров в том случае, если температура дымовых газов настолько велика, что возникает опасность в отношении стойкости материала рекуператора.

Как при противотоке, так и при прямотоке температура дымовых газов и воздуха изменяется по поверхности нагрева, что обусловливает изменение разности температур дымовых газов и воздуха. Поэтому характерной является средняя разность температур по всей поверхности нагрева $\Delta T_{ср}$.

Для расчета рекуператоров необходимо знать конечные температуры газообразных сред, определить которые можно из анализа изменения температуры сред по поверхности нагрева. Анализ температурного поля рекуператора предполагает совместное рассмотрение уравнений теплообмена и теплового баланса. Для противоточного рекуператора (см. рис. 80) при постоянном (среднем) для всей поверхности нагрева суммарном коэффициенте теплопередачи K, количество тепла, передаваемое в единицу времени на малом участке поверхности dF_x будет равно

$$dQ = KdF_x(T_д - T_в),$$

где $T_д$ и $T_в$ — температуры дымовых газов и воздуха после прохождения части поверхности.

Это же количество тепла будут терять дымовые газы и приобретать воздух. Считая по ходу более нагретой среды, получим

$$dQ = -W_д dT_д;$$

$$dQ = -W_в dT_в.$$

Здесь $W_д = c_д G_д$ и $W_в = c_в G_в$ — произведения количества среды на ее теплоемкость.

Выполнив соответствующие преобразования из этих уравнений можно получить, что

$$\Delta T_{ср} = \frac{T_в^к - T_в^н - T_д^к - T_д^н}{\ln \dfrac{T_д^к - T_в^н}{T_д^н - T_в^к}} = \frac{\left(T_д^к - T_в^н\right) - \left(T_д^н - T_в^к\right)}{\ln \dfrac{T_д^к - T_в^н}{T_д^н - T_в^к}}. \quad (82)$$

Конечная температура дымовых газов $T_д^к$ при этом будет равна

$$T_д^к = \frac{W_в T_в^к - W_д T_д^н + W_в \left(T_д^н - T_в^к\right) e^{-KF\left(1/W_д - 1/W_в\right)}}{W_в - W_д}.$$

Конечную температуру воздуха $T_в^к$ можно определить из равенства

$$W_д\left(T_д^н - T_д^к\right) = W_в\left(T_в^к - T_в^н\right),$$

которое после подстановки значения для $T_д^к$ превратится в уравнение с одним неизвестным $T_в^к$. Изменение температуры газов в рекуператоре может носить как криволинейный, так и прямолинейный характер. Судить об этом можно по величине отношения $\Delta T_н / \Delta T_к$.

Если отношение $\Delta T_н/\Delta T_к > 0{,}5$, то практически происходит прямолинейное изменение температуры газов по поверхности нагрева, и среднюю разность температур для всей поверхности нагрева можно определять как среднеарифметическое между $\Delta T_н$ и $\Delta T_к$. При криволинейном изменении температур средняя разность определяется по выражению (82).

Величины $\Delta T_н$ и $\Delta T_к$ означают соответственно большую и меньшую по абсолютной величине разность температур между газами и воздухом на входе в рекуператор и на выходе из него, т. е. разности при противотоке $T_д^н - T_в^к$ и $T_д^к - T_в^н$ и при прямотоке $T_д^н - T_в^н$ и $T_д^к - T_в^к$.

Таким образом, полученные выражения при известных начальной температуре дымовых газов (определяемой условиями работы печи) и начальной температуре воздуха (температуре атмосферы) позволяют найти температуру и разность температур в любой точке рекуператора, что необходимо, например, для определения температуры стенки рекуператора. Температура стенки $T_{д.ст}$ со стороны дымовых газов равна

$$T_{д.ст} = T_д - \frac{K(T_д - T_в)}{\alpha_д},$$

а со стороны воздуха

$$T_{в.ст} = T_в + \frac{K(T_д - T_в)}{\alpha_в}.$$

В металлических рекуператорах вследствие большой теплопроводности материала температурным перепадом по толщине стенки можно пренебречь ($T_{д.ст} = T_{в.ст}$), в результате чего

$$T_{ст} = T_в + \frac{T_д - T_в}{1 + \alpha_в/\alpha_д}. \qquad (83)$$

Конструкции рекуператоров

Исходя из реальных возможностей конструкций к рекуператорам предъявляют следующие требования:

а) обеспечение максимальной степени утилизации тепла дымовых газов;

б) достаточная стойкость против воздействия дымовых газов с высокой температурой;

в) максимальная компактность конструкции, т. е. высокая удельная поверхность нагрева на 1 м^3 рекуперативной насадки;

г) наивысший суммарный коэффициент теплопередачи K, что также способствует достижению компактности рекуператора;

д) наименьшее гидравлическое сопротивление рекуператора;

е) достаточная герметичность.

Рекуператоры изготавливают из металла и керамических материалов.

Преимущества металлических рекуператоров по сравнению с керамическими следующие:

а) более высокий коэффициент теплопередачи и большая удельная поверхность нагрева ($м^2/м^3$); это обеспечивает лучшую компактность металлических рекуператоров и, следовательно, меньший объем при одинаковой общей поверхности нагрева;

б) отсутствие глубоких подземных боровов, можно размещать рекуператоры над печами;

в) улучшенная герметичность.

Сварные металлические рекуператоры можно применять для подогрева газа.

Недостатком металлических рекуператоров является их малая стойкость против воздействия высоких температур.

Керамические рекуператоры более громоздки, характеризуются меньшим коэффициентом теплопередачи и меньшей удельной поверхностью нагрева. Они мало герметичны и совершенно непригодны для подогрева газа. Размещают керамические рекуператоры только под печами, они занимают много места и требуют значительных подземных боровов. Однако керамические рекуператоры могут устойчиво работать при температуре дымовых газов 1200—1350 °С, в них обеспечивается подогрев воздуха до 800—850 °С, что позволяет применять их на высокотемпературных печах.

Металлические рекуператоры. Металл рекуператоров работает в условиях высоких температур при динамическом и окисляющем действии дымовых газов. Стойкость металлов определяет работоспособность рекуператора. Для изготовления рекуператоров 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 рекуператоре не должна превышать 700—750 °С.

Для увеличения стойкости рекуператоров и повышения температуры подогрева воздуха применяют чугуны и стали, легированные в основном хромом, кремнием и алюминием. Применение легированных чугунов и сталей для изготовления металлических рекуператоров 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 работа-

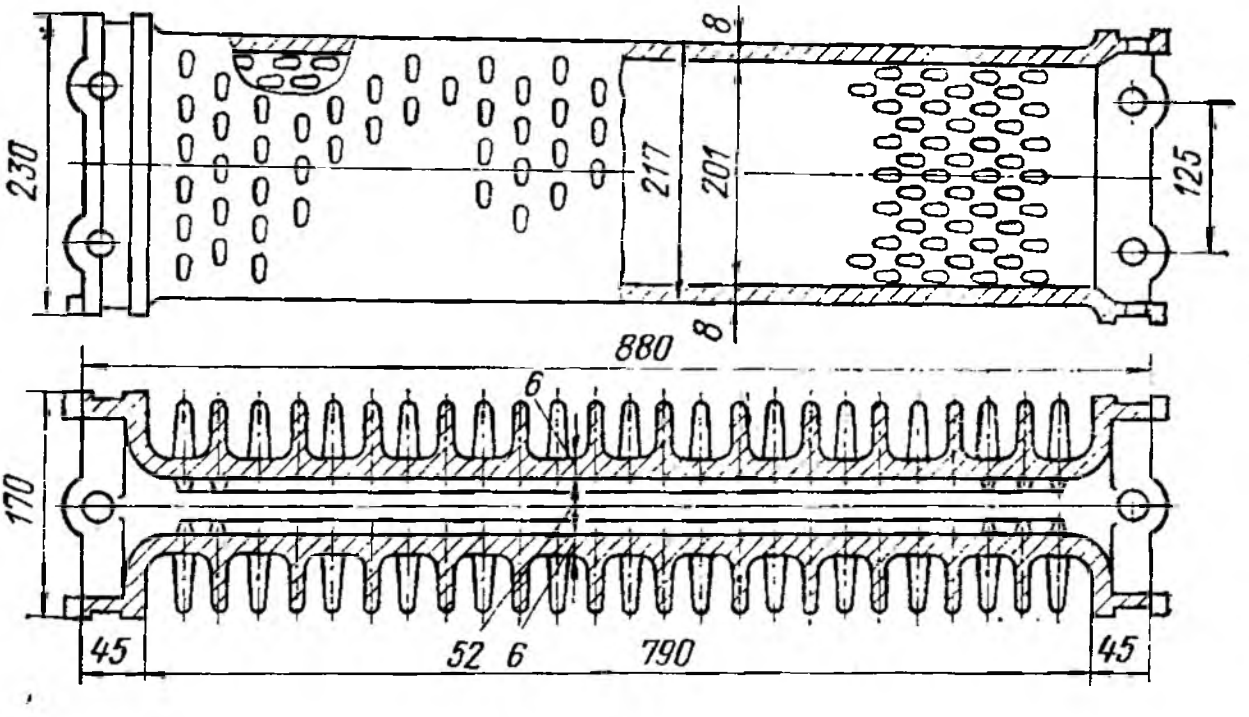


Рис. 81. Труба игольчатого рекуператора

ет при наиболее высоких температурах; остальные части выполняют из углеродистого металла.

Применяют конвективные, радиационные и комбинированные конвективно-радиационные металлические рекуператоры. Конвективные металлические рекуператоры могут быть игольчатые и трубчатые. Последнее время наибольшее распространение получили трубчатые сварные рекуператоры, так как игольчатые не обеспечивают должной герметичности.

Игольчатые рекуператоры изготовляют из чугуна типа силал. Основная часть игольчатых рекуператоров (игольчатая труба) представлена на рис. 81. Иглы могут быть расположены как на внутренней, так и на наружной стороне. Иглы позволяют увеличить действительную поверхность нагрева и турбулизировать поток газов, что приводит к увеличению коэффициента теплопередачи до 93—116,3 Вт/(м^2·К) при пересчете на гладкую поверхность. Обычно внутри труб пропускают воздух, а снаружи — дымовые газы.

Иглы, находящиеся на дымовой стороне рекуператоров, быстро засоряются, поэтому используют игольчатые рекуператоры с иглами только на воздушной стороне. По виду оребрения наружной поверхности трубы рекуператора выпускают двух типов 17,5 и 28, что соответствует расстоянию между иглами в миллиметрах. На внутренней, воздушной стороне расстояние между иглами всегда одинаково и равно 14 мм. Все трубы, как с наружными иглами, так и без них, выпускают длиной 880, 1135, 1640 мм.

Весь игольчатый рекуператор собран из отдельных труб с фланцами, соединяемых 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, непригодны для нагрева газообразного топлива. Секция игольчатого рекуператора, через которую воздух проходит, не меняя направления движения, называется ходом. Число ходов рекуператора зависит от температуры подогрева воздуха. Чаще всего применяют двухходовые рекуператоры, которые обеспечивают подогрев воздуха до 300—400 °С при температуре дымовых газов 800 °С. Скорость движения воздуха обычно не превышает 10 м/с, а дымовых газов 3—14 м/с. Теплопередача в игольчатых рекуператорах осуществляется в условиях перекрестного тока и зависит в основном от скорости движения газообразных сред. Коэффициент теплоотдачи игольчатых поверхностей может быть найден по формуле $\alpha = B \cdot w_0^n$.

Коэффициенты B и n зависят от конструкции рекуперативных труб (см. том 2 настоящего издания).

Аэродинамическое сопротивление (Па) внутренних поверхностей игольчатых труб можно найти из выражения

$$h_в = A w_0^2 \frac{T_{ср}}{273},$$

где w_0 — скорость воздуха при 273 К; $T_{ср}$ — средняя температура воздуха в трубе, К; A — коэффициент, зависящий от длины трубы (см. том 2 настоящего издания).

Трубчатые рекуператоры выполняют из цельнотянутых труб различного диаметра. Конструкции их многообразны.

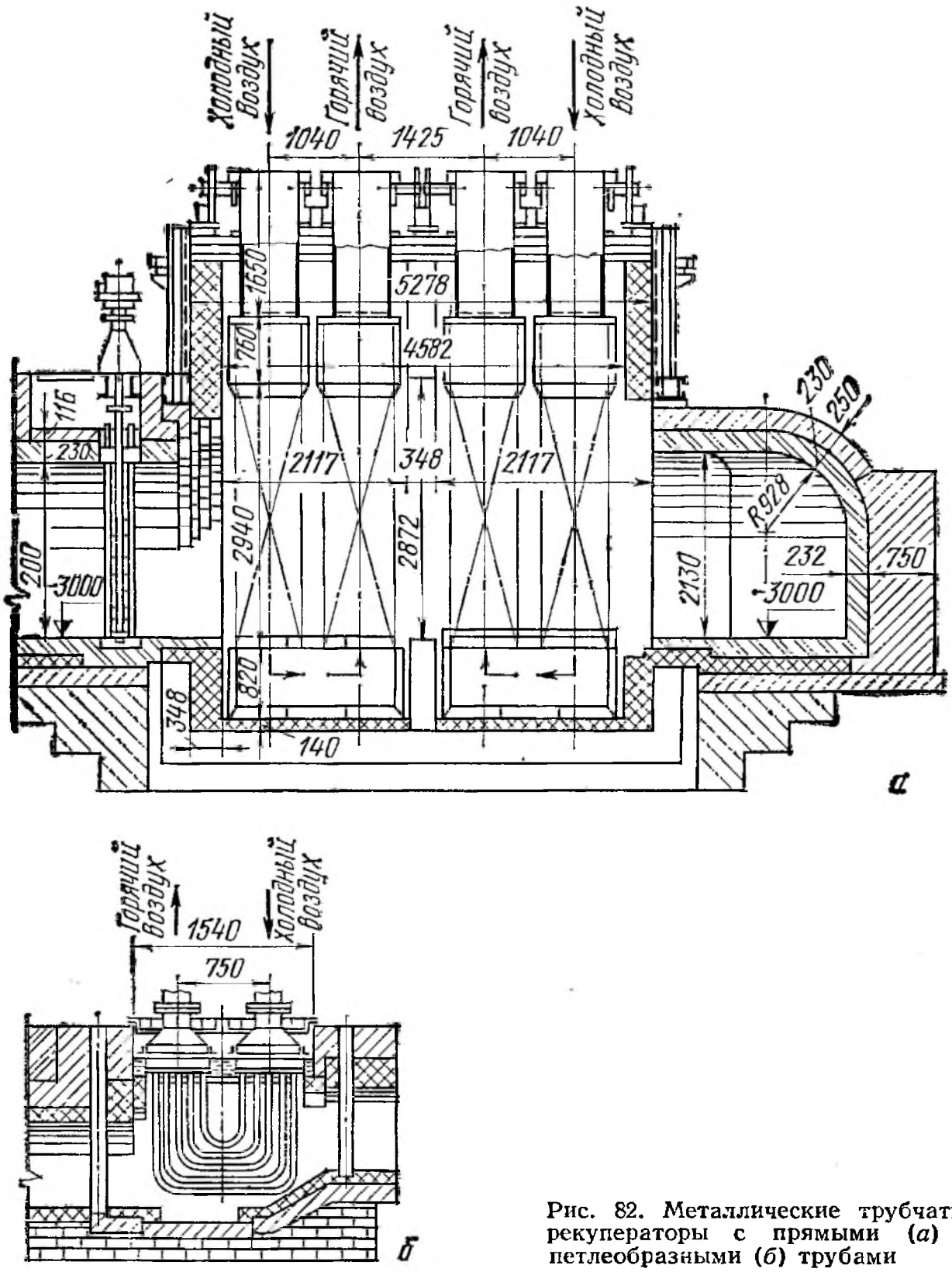


Рис. 82. Металлические трубчатые рекуператоры с прямыми (*а*) и петлеобразными (*б*) трубами

Часто применяют рекуператоры с прямыми трубами такой конструкции, как показано на рис. 82, *а*. В этом рекуператоре воздух проходит между трубами, а дымовые газы — внутри труб. 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 и суммарном коэффициенте теплопередачи 17—23 Вт/м²·К.

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 боровах печей удобно размещать рекуператоры с петлеобразной формой труб (рис. 82, *б*). 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 и коэффициенте теплопередачи 23 Вт/(м²·К). Устройство висящих труб у рекуператора дает возможность обойтись без применения компенсаторов термического расширения.

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. В радиационных рекуператорах часто применяют прямоточную схему движения теплоносителей, которая вместе с интенсивным отбором тепла на воздушной стороне позволяет повысить температурный предел применения металлических радиационных рекуператоров до 1400—1500 °С. Весьма важной положительной особенностью радиационных рекуператоров является значительно меньшая, чем у других металлических рекуператоров, засоряемость поверхности нагрева, располагаемой обычно вертикально. Вместе с тем радиационные рекуператоры более громоздки и требуют более жаростойких материалов.

В настоящее время чаще всего применяют щелевые и трубчатые радиационные рекуператоры. Щелевые рекуператоры (рис. 83, *а*) выполняют из двух концентрических цилиндров, сваренных из листов жаропрочной стали толщиной 4—8 мм. Диаметр дымового цилиндра зависит от размера рекуператора и обычно изменяется в пределах от 0,7 до 1,5 м. Ширина кольцевого канала для прохода воздуха равна 10—60 мм. На обоих концах рекуператора

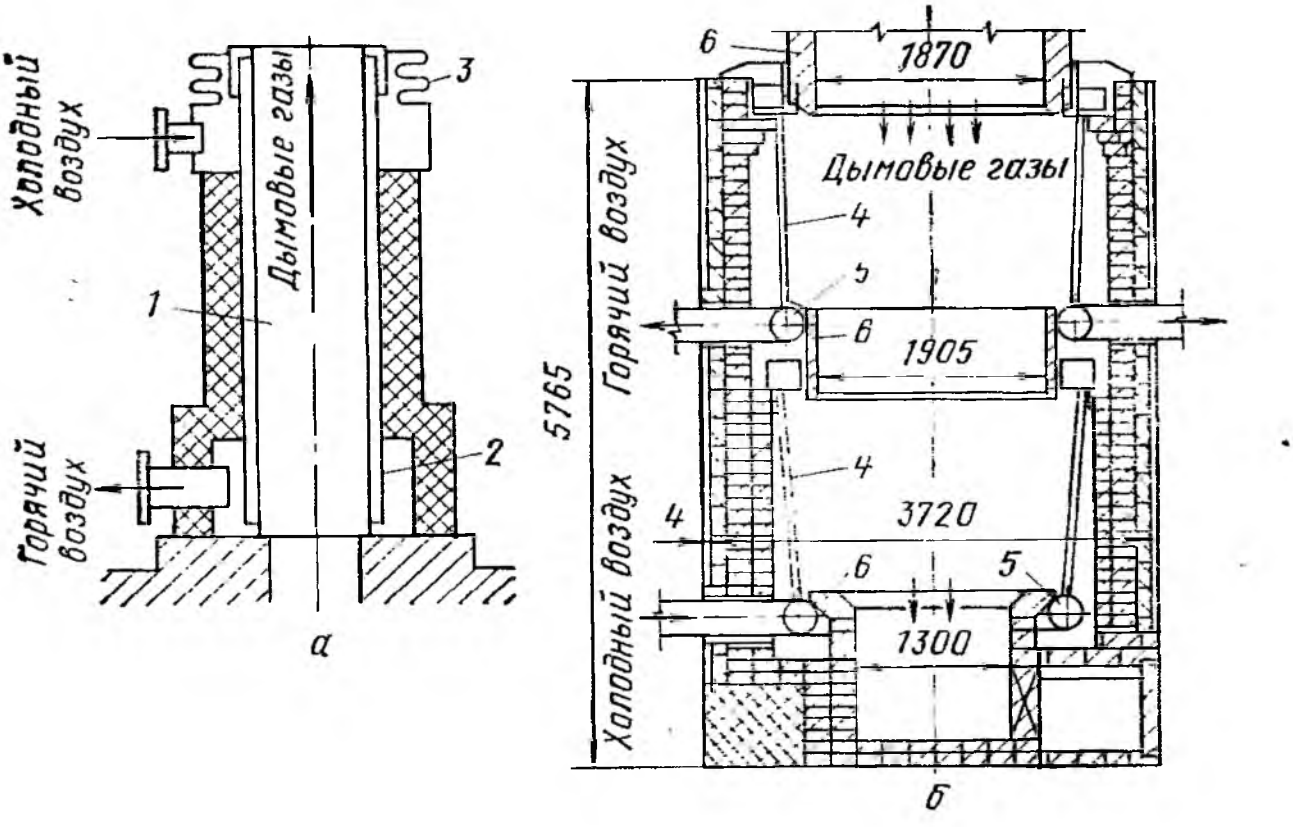


Рис. 83. Радиационные рекуператоры:

а — щелевой; *б* — трубчатый корзиночный; *1* — внутренний цилиндр; *2*—наружный цилиндр; *3* — устройство для компенсации теплового расширения цилиндров; *4* — трубки рекуператора; *5* — кольцевые воздушные коллекторы; *6* — защитные своды кольцевых коллекторов

выполняются кольцевые короба для подвода и отвода воздуха. Воздух должен подводиться максимально равномерно, так как для нормальной эксплуатации щелевого радиационного рекуператора необходимо, чтобы вся его поверхность равномерно охлаждалась воздухом. В противном случае рекуператор будет коробиться и выходить из строя. Для компенсации теплового расширения цилиндров предусматривают специальные устройства. Снижение тепловых потерь достигается тепловой изоляцией наружного цилиндра. 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 движения, что в свою очередь предъявляет дополнительные требования к строительной прочности радиационных рекуператоров. Щелевые радиационные рекуператоры достаточно устойчиво работают при давлении воздуха до 4000—5000 Па, которого бывает недостаточно для обеспечения желаемой скорости движения воздуха. В случае необходимости повышения давления воздуха и, следовательно, строительной прочности применяют трубчатые радиационные рекуператоры.

Трубчатые радиационные рекуператоры бывают различных конструкций. Наибольшее распространение получили так называемые корзиночные рекуператоры, один из которых представлен на рис. 83, *б*. Поверхность нагрева такого рекуператора состоит из множества стальных прямых трубок небольшого диаметра, расположенных по окружности и приваренных к кольцевым коллекторам.

Рекуператор состоит из двух трубчатых «корзин». Воздух входит сначала в нижний коллектор нижней корзины, поступает по трубкам вверх, в верхний коллектор нижней корзины, а оттуда по специальному внешнему трубопроводу подается в верхнюю корзину, в которой и довершается его нагрев. Таким образом, по отношению к направлению движения дымовых газов осуществляется противоточно-прямоточный метод движения воздуха. В таких рекуператорах при температуре дымовых газов 1300 °С воздух может подогреваться до 800—850 °С при средней тепловой нагрузке на единицу поверхности нагрева около 13—14 Вт/м^2.

Керамические рекуператоры. 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.

Долгое время единственным материалом для изготовления керамических рекуператоров служил шамот. Однако низкие газоплотность и теплопроводность шамота обусловливает малую тепловую эффективность и большие размеры рекуператоров. Стремление использовать материалы высокой огнеупорности и теплопроводности привело к

применению в керамических рекуператорах карборундовых (SiC) и высокоглиноземистых $Al_2O_3 > 60\%$ огнеупоров, а также карбошамотной смеси, содержащей 35—39 % карборунда. Изделия из нее характеризуются лучшими свойствами, чем шамотные, но по теплопроводности и огнеупорности уступают карборундовым. В отечественной практике известны также случаи применения высокоглиноземистых огнеупоров для изготовления керамических рекуператоров, которые свидетельствуют о целесообразности применения подобных материалов. Более широкое распространение высокоглиноземистых материалов ограничено их высокой стоимостью.

Эффективность работы керамических рекуператоров в основном зависит от величины суммарного коэффициента теплопередачи, герметичности и удельной поверхности нагрева ($м^2/м^3$ насадки рекуператора). Конструктивные формы весьма сильно влияют не только на эти основные характеристики, но и на работу рекуператора в целом. Керамические рекуператоры собирают из отдельных труб или блоков, поэтому в насадке большое количество швов.

Герметичность рекуператоров в значительной мере определяется положением шва (вертикального или горизонтального) и длиной швов, приходящихся на 1 $м^3$ насадки. Лучшая плотность достигается при горизонтальном расположении швов, так как при этом происходит самоуплотнение шва под действием массы вышележащих частей рекуператора. Кроме того, горизонтальные швы легче поддаются уплотнению.

При нагреве рекуперативная насадка расширяется (растет), поэтому для компенсации этого роста 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. Один из таких затворов, применяемый на карбошамотных рекуператорах, показан на рис. 84. В практике отечественных предприятий применяют шамотные рекуператоры и карбошамотные рекуператоры из восьмигранных трубок.

Шамотный рекуператор (рис. 84, *а*) собирают из фасонных кирпичей четырех марок. Основной его частью являются установленные вертикально фасонные блоки, что дает горизонтальные швы. Воздух движется снизу вверх по четырем каналам внутри блока.

Дымовые газы направляются между блоками, совершая петлеобразное движение и омывая их с двух сторон. Удельная поверхность рекуператора из шамотных блоков составляет 6,35 м²/м³, масса 980 кг/м³ насадки. Рекуператор такого типа обеспечивает подогрев воздуха до 500—

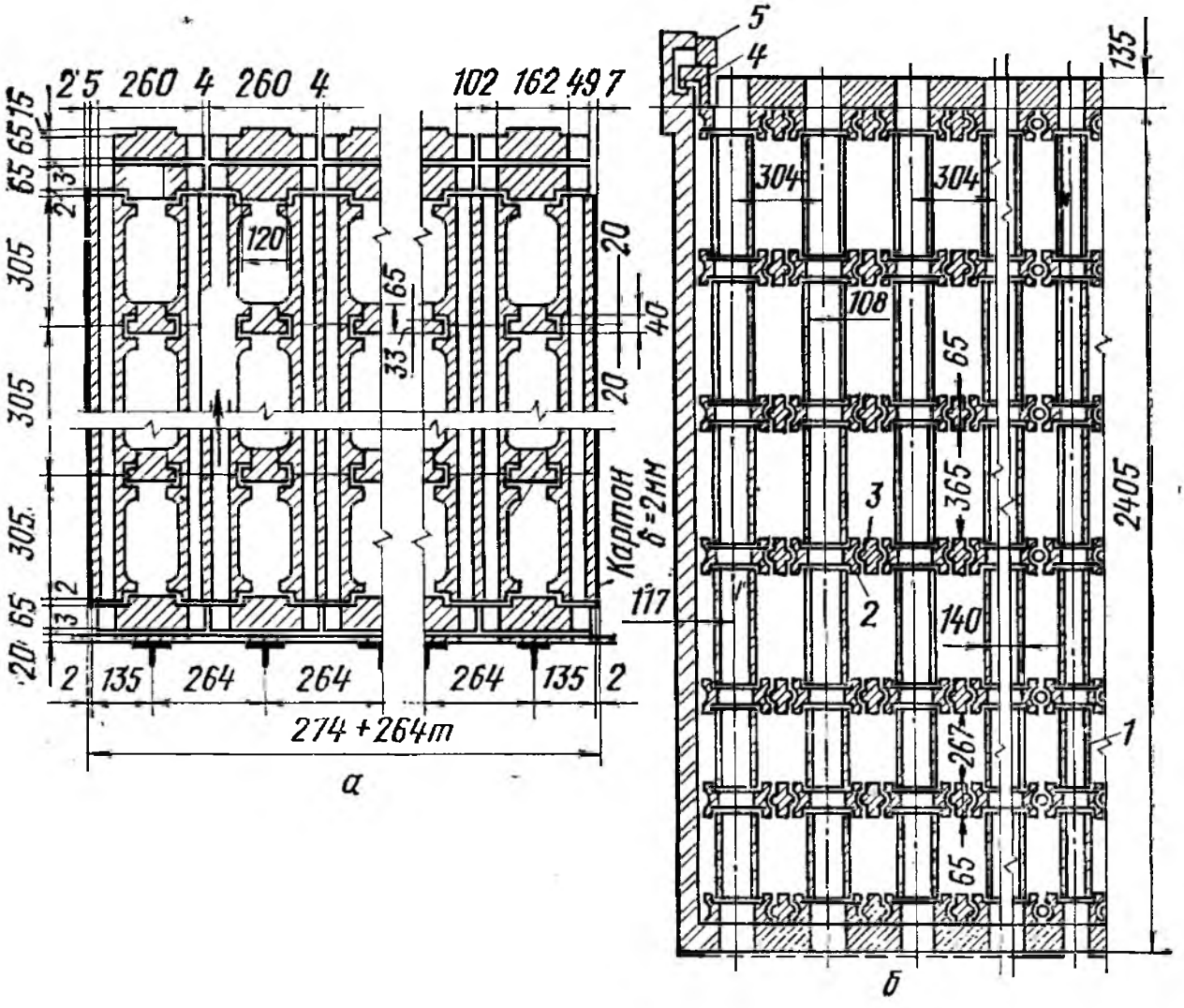


Рис. 84. Керамические рекуператоры:
а — из шамотных блоков; *б* — из карбошамотных труб

600 °С при температуре дымовых газов 100—1100 °С и коэффициенте теплопередачи, 4,65—5,8 Вт/(м²·К).

Отличительная особенность шамотного рекуператора состоит в том, что возникающие на пути воздуха сопротивления невелики и поэтому для движения воздуха может быть использован его геометрический напор. Печи, оборудованные рекуператорами подобного типа и инжекционными горелками, могут работать в отсутствие вентиляторов. При этом достигается меньший перепад давлений между воздушными и дымовыми каналами, что приводит к увеличению общей герметичности рекуператора, не превышающей 10 %.

Во время кладки рекуператора места соединения фасонных блоков и перегородок промазывают специальным раствором твердеющего на воздухе цемента, в состав которого (по массе) входит 90 % шамотного порошка, 10 % боксита уральского, 15 % (сверх 100 %) растворимого стекла.

Карбошамотный трубчатый рекуператор (рис. 84, *б*) применяют для нагревательных колодцев, а также стекловаренных и методических печей. Этот рекуператор собирают из восьмигранных трубок высотой 300—400 мм, которые располагают в шахматном порядке и соединяют между собой шамотными восьмигранными муфтами *2*. В верхней части рекуператора предусмотрен специальный песочный затвор *4*, *5* для создания большей газоплотности. Дымовые газы движутся внутри трубок сверху вниз, 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 *3*.

Живое сечение рекуператора по воздушному тракту для трубок высотой 400 мм составляет 55 %, а по дымовому тракту 19 %. Скорость движения воздуха при нормальных условиях равна 1—2 м/с, а дымовых газов 0,7—1 м/с.

Рекуператор данной конструкции используют на печах, температура отходящих дымовых газов которых 1100—1400 °С. Такая конструкция обеспечивает подогрев воздуха до 800—850 °С. При подобных условиях в рекуператоре достигается суммарный коэффициент теплопередачи 8,15—10,4 Вт/м^2·К.

При общей массе элементов, приходящихся на 1 м^3 насадки, составляющей около 550 кг, удельная поверхность нагрева на 1 м^3 насадки составляет, м^2: по дымовым газам 9,5; по воздуху 7,5; средняя 8,5.

У рекуператора два основных недостатка — низкая герметичность и засорение (ошлакование) верхней части рекуперативных трубок.

Низкая герметичность карбошамотных рекуператоров является его наибольшим недостатком; утечка иногда достигает 40 % всего воздуха, поданного в рекуператор. Особыми приемами сборки рекуператора, а также аккуратной эксплуатацией можно повысить герметичность, но совершенно устранить утечки воздуха почти невозможно.

Ошлакование происходит вследствие того, что дымовые газы несут частички сажи, окалины и коксика (на нагре-

вательных колодцах), которые, осаждаясь на раскаленной поверхности керамики, привариваются к ней и зачастую полностью забивают трубки.

Расчет рекуператоров

Обычно целью расчета является определение размеров рекуператора, необходимых для обеспечения подогрева требуемого количества воздуха (газа) до необходимой температуры. В отдельных случаях приходится решать обратную задачу. Расчет рекуператоров ведется обычно в следующем порядке.

1. Составление теплового баланса. Для газоплотных рекуператоров тепловой баланс составляют лишь с учетом 10 % потерь тепла в окружающую среду, т. е.

$$0{,}9V_{д}\left(c_{д}^{н}T_{д}^{н}-c_{д}^{н}T_{д}^{к}\right)=V_{в}\left(c_{в}^{к}T_{в}^{к}-c_{в}^{н}T_{в}^{н}\right). \qquad (84)$$

При составлении теплового баланса для негазоплотных рекуператоров необходимо учитывать утечку воздуха в дымовые каналы. Это особенно важно при расчете керамических рекуператоров. Утечку воздуха целесообразно принимать в пределах от 15 % (для шамотных рекуператоров методических печей) до 30 % (для рекуператоров нагревательных колодцев) первоначального количества воздуха, поданного в рекуператор. При этом уравнение теплового баланса может быть представлено следующим образом:

$$0{,}9V_{д}\left(c_{д}^{н}T_{д}^{н}-c_{д}^{к}T_{д}^{к}\right)=V_{в}\,c_{в}^{к}T_{в}^{к}+\Delta V_{в}\,c_{в}T_{д}^{к}. \qquad (85)$$

Уравнения (84) и (85) должны быть решены относительно температуры $T_{д}^{к}$ дымовых газов, уходящих из рекуператора.

Параллельно с расчетом теплового баланса уместно определить необходимое для последующего расчета количество тепла, передаваемого через поверхность нагрева рекуператора в единицу времени:
для газоплотных конструкций

$$Q_{F}=V_{в}\left(c_{в}^{к}T_{в}^{к}-c_{в}^{н}T_{в}^{н}\right);$$

для негазоплотных конструкций

$$Q_{F}=\left(V_{в}+\frac{\Delta V_{в}}{2}\right)\left(c_{в}^{к}T_{в}^{к}-c_{в}^{н}T_{в}^{н}\right),$$

где $V_{д}$ и $V_{в}$ — объем дымовых газов и воздуха, м³/с; $\Delta V_{в}$ — количество воздуха, ушедшее в дымовые каналы, м³/с; $c_{д}$ и $c_{в}$ — теплоемкости дымовых газов и воздуха, при соответствующих температурах, Дж/(м³·К).

2. Определение средней разности температур. При определении средней разности температур необходимо учитывать взаимный характер движения газообразных сред.

Как уже указывалось, что при $\Delta T_{н}/\Delta T_{к}>0{,}5$ среднюю разность температур теплоносителей можно определять как арифметическую.

3. Определение суммарного коэффициента теплопередачи K. Для определения величины K целесообразно задаваться скоростью движения дымовых газов и воздуха.

Для металлических рекуператоров скорость движения дымовых газов w_{0} следует принимать равной 3—5 м/с, скорость воздуха 7—10 м/с. Для керамических рекуператоров из-за их низкой газоплотности скорость принимают меньшей. Так, для рекуператоров нагревательных колодцев целесообразно принимать скорость воздуха (при 0 °С) 0,8—

1,2, а скорость дымовых газов 0,5—0,8 м/с. При расчете рекуператоров методических печей $w_{0в}=0.7—1$ и $w_{0д}=1,2—2$ м/с. Зная скорость движения и температуры газообразных сред, применяя выражения, приведенные выше, можно определить локальные коэффициенты теплоотдачи на воздушной и дымовой сторонах.

4. Определение общей поверхности нагрева и размеров рекуператора. Для определения поверхности нагрева пользуются выражением (78). Разделив общую поверхность нагрева рекуператора на удельную, характерную для каждой конструкции, легко получить объем рекуператора и перейти к определению его размеров.

После теплового расчета рекуператора определяют аэродинамическое сопротивление по дымовому и воздушному трактам.

При расчете рекуператоров печей, работа которых характеризуется переменной во времени тепловой нагрузкой, после расчета на максимальный расход топлива необходимо провести, кроме того, поверочный расчет на наименьший расход топлива.

§ 3. Утилизация тепла отходящих дымовых газов в теплосиловых устройствах

Котельные установки

Энергетическое хозяйство металлургического завода предназначено для выработки и распределения энергии или энергоносителей разных видов.

К основным энергетическим цехам завода относятся тепловая электрическая станция (ТЭЦ) или паро-воздуходувная станция (ПВС), кислородный цех, теплосиловой цех, цех тепловых и газовых сетей и др.

Кроме электроэнергии на заводе вырабатываются такие энергоносители, как пар и горячая вода, сжатый воздух, кислород.

Теплоэнергетическое оборудование или теплосиловые устройства, на которых получается тот или иной энергоноситель, состоит из различного вида парогенераторов, паровых и газовых турбин, турбокомпрессоров и воздуходувок и т. д. На производство энергоносителей затрачивается более 13 % от всей потребляемой заводом энергии.

К парогенераторам относятся энергетические котельные агрегаты, расположенные на ТЭЦ, а также котлы-утилизаторы (КУ) и системы испарительного охлаждения (ИО), размещенные вблизи металлургических печей.

Энергетический котельный агрегат предназначается для выработки перегретого водяного пара энергетических параметров, т. е. давлением 1,4—14 МПа и температурой 420—560 °С (рис. 85).

Работу парового котла обеспечивают системы топливоприготовления и топливоподачи *1—3*, устройства для сжи-

гания топлива *4*, система шлако- и золоудаления *17*, химводоочистки и система КИП и автоматики.

Паровой котел — это трубчатый теплообменник, состоящий из радиационной части — экранов и конвективной части — змеевиковых пакетов труб, соединенных с барабаном-сепаратором.

Трубчатые экраны радиационной части *6* размещаются на стенах топочной камеры *5*, где сжигается топливо. Эк-

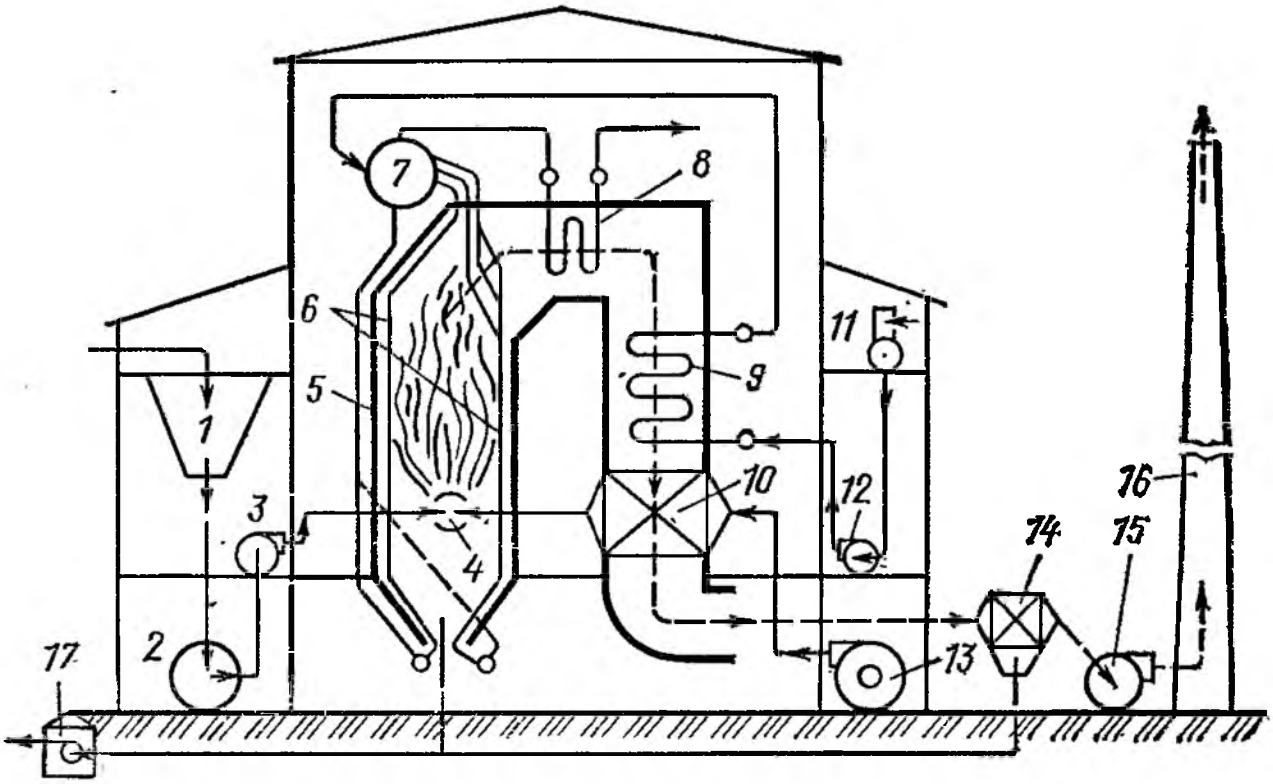


Рис. 85. Схема котельного агрегата

раны представляют собой ряд вертикальных труб, которые через верхние и нижние коллекторы подключены в барабану *7* и образуют замкнутый циркуляционный контур для пароводяной смеси. В современных котлах применяется как многократная принудительная, так и естественная циркуляция пароводяной смеси.

На выходе дымовых газов из топки размещаются змеевики труб конвективной части поверхности нагрева, затем следуют пакеты труб пароперегревателя *8*. В опускном вертикальном газоходе находятся хвостовые поверхности нагрева — водяной экономайзер *9* и воздухоподогреватель *10*. Здесь температура газов снижается с 500—700 °С до 100 °С.

Дымовые газы на выходе из воздухонагревателя направляются на газоочистку *14*, а затем дымососом *15* подаются на дымовую трубу *16*.

Насыщенный пар из барабана-сепаратора проходит пароперегреватель и далее поступает в заводской паропровод перегретого пара.

Подпитка контура циркуляции *12* осуществляется химически очищенной деаэрированной водой *11*, которая подогревается в трубчатом теплообменнике — экономайзере *9* и подается в барабан котла. Эта вода называется питательной, она состоит из возвратного конденсата и химоочищенной сырой воды. Количество ее соответствует паропроизводительности котла и компенсации продувки. Для вывода из контура циркуляции накопленных солей, часть воды из барабана котла удаляется в виде продувочной воды (до 5 %).

Воздух, необходимый для сжигания топлива *13*, проходит подогрев в воздухоподогревателе — в трубчатом или регенеративном теплообменнике *10*.

Эффективность преобразования энергии топлива в энергию пара в котле характеризует коэффициент полезного действия (к. п. д.). К. п. д. котлоагрегата определяют как отношение полезно затраченного тепла ко всему, выделенному при сжигании топлива.

Для современных крупных котлоагрегатов к. п. д. составляет 80—90 %. Паропроизводительность достигает 420 т/ч при давлении 14 МПа.

Котлы могут отапливаться пылевидным угольным, газовым, а также жидким топливом. На ТЭЦ металлургических заводов, как правило, отопление комбинированное, а котлоагрегаты оборудованы устройствами для сжигания 2—3 видов топлива.

Расчет теплообмена в котлоагрегате дает возможность определить величину поверхностей нагрева H, м^2 при заданной паропроизводительности D, кг/ч или наоборот, для выбранного типа котла с поверхностью нагрева H уточнить его паропроизводительность D. В основе расчетов лежат уравнения теплового баланса и уравнения теплопередачи.

Движение продуктов горения в газоходах котлоагрегата обеспечивается дымососом, установленным за золоуловителем, перед дымовой трубой. Тип золоуловителя, как правило, зависит от вида сжигаемого топлива — центробежный сруббер, батарейный циклон или электрофильтр.

Выбор типа и режима работы дымососа производится на основе аэродинамического расчета котельного агрегата. При конструировании или реконструкции котла выполняется также расчет и оценка надежности циркуляции. Циркуляция в пароводяном контуре котла может быть органи-

зована по естественному или принудительному принципу. В первом случае движение вызывается разностью плотностей воды и пароводяной смеси, во втором — в основном напором, создаваемым специальным циркуляционным насосом.

На многих ТЭЦ установлены котлы Барнаульского и Таганрогского котельных заводов паропроизводительностью 200—400 т/ч перегретого пара.

Котлы-утилизаторы мартеновских печей

В отличие от рассмотренных выше энергетических парогенераторов в котлах-утилизаторах (КУ) вместо тепла от сжигания топлива используется физическое тепло отходящих газов промышленных печей. Основная задача, которой удовлетворяют КУ, снизить температуру выбрасываемых в атмосферу газов (и тем самым повысить к. п. д. печи), преобразовав их тепло в энергию водяного пара.

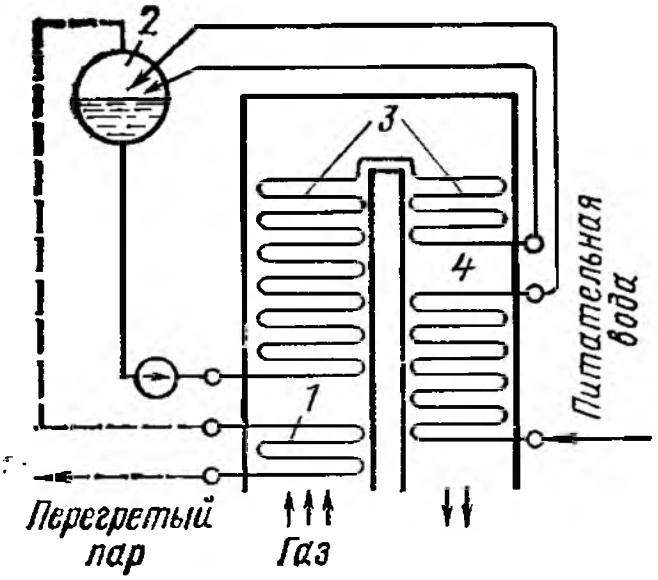


Рис. 86. Схема котла-утилизатора

Конструкция КУ (рис. 86) состоит из трубчатых испарительных поверхностей нагрева *3*, пароперегревателя *1*, водяного экономайзера *4* и барабана-сепаратора *2*. В некоторых типах КУ для низкотемпературных газов пароперегреватель отсутствует. Для работы при высоких температурах (1000—1200 °С) на входе в КУ предусматривается радиационная камера, за которой размещается пароперегреватель, а далее конвективные испарительные поверхности.

На металлургических заводах в основном применяются унифицированные агрегаты с принудительной циркуляцией паро-водяной смеси типа КУ-125, КУ-100-1 и КУ-80-3. Первая цифра в маркировке означает максимальный часовой расход газов через котел в тыс. м³/ч. Допустимые температуры газа на входе 650—850 °С, параметры пара $P=1{,}8 \div 4{,}5$ МПа, $T=365 \div 385$ °С. Паропроизводительность достигает 30—41 т/ч.

Расчеты (тепловой, аэродинамический) котлов-утилизаторов выполняются по тем же нормам, как и энергетические котлы. При этом удельные показатели относят не к

1 м³ (кг) сжигаемого топлива, а к 1 м³ отходящих газов, поступающих в котел-утилизатор.

Котлы-утилизаторы кислородных конвертеров

Поверхностные охладители конвертерных газов можно классифицировать по следующим основным признакам:

1) по виду теплоносителя: водяные и паровые. К первым относятся кессоны и трубчатые охладители, ко вторым котлы-утилизаторы или схемы испарительного охлаждения;

2) по виду преимущественного теплообмена: радиационные и радиационно-конвективные. В первых охлаждение газов происходит до 800—1200 °С, во вторых до 250—400 °С;

3) по схеме циркуляции теплоносителя: с принудительной, естественной и комбинированной схемами циркуляции;

4) по виду газохода: с одним восходящим газоходом (наклонным или вертикальным) Л-образным газоходом, с П-образным газоходом и др.

На многих заводах в схемах с дожиганием оксида углерода в качестве охладителей продуктов сгорания применяются радиационно-конвективные паровые котлы-утилизаторы с принудительной циркуляцией, с П-образной компоновкой газохода. В схемах «без дожигания» или «с частичным дожиганием» — радиационные паровые с принудительной и естественной циркуляцией с П-образным или одиночным вертикальным газоходом.

В большинстве конструкций охладителей конвертерных газов в качестве поверхностей нагрева применяют трубы. В радиационной части трубы, соединенные мембраной, образуют сплошные мембранные трубчатые панели.

Рассмотрим особенности конструкций паровых котлов-утилизаторов и водяных охладителей конвертерных газов.

Условия работы конвертерных котлов от обычных котлов-утилизаторов отличаются резкими колебаниями тепловой нагрузки. В этих котлах применяются схемы с принудительной и естественной циркуляцией.

Принципиальная схема конвертерного котла-утилизатора с принудительной циркуляцией состоит в следующем. Питательная вода поступает в водяной экономайзер, а затем — в барабан-сепаратор, где смешивается с котловой водой. Вода из барабана по опускным трубам поступает в циркуляционные насосы. Насосы подают воду в коллекторы экранов и змеевиков, где установлены уравнительные

дроссельные шайбы. Образующаяся в экранных трубах паро-водяная смесь поступает в барабан. Пар из барабана отводится в цеховой паропровод, а вода по опускным трубам вновь поступает к насосам.

Как показала практика, схема с принудительной циркуляцией значительно усложняет и удорожает эксплуатацию котла-утилизатора. Расход электроэнергии на привод насосов достигает 4 кВт·ч на 1 т стали. Поэтому были созданы схемы котлов с комбинированной, а затем и с естественной циркуляцией.

Естественная циркуляция возникает под действием разности плотностей воды и паро-водяной смеси в контуре.

Конструкция теплообменных поверхностей конвертерных котлов определяется видом преимущественного теплообмена. Так как на выходе из горловины конвертера газы имеют температуру не ниже 1600 °С, то эта часть котла всегда выполняется как радиационная, т. е. цилиндрическая, прямоугольная или многогранная шахта, экранированные стены которой воспринимают тепло излучением. Здесь происходит охлаждение газов до температуры около 1000 °С.

Радиационная часть котла работает в условиях повышенной запыленности, а значительный вынос жидких частиц в период продувки может привести к зашлаковыванию и настылеобразованию. Поэтому в большинстве конструкций котлов радиационная часть делается из двух отдельных секций. Первая, радиационная секция в виде гладкостенного или трубчатого кессона подвижна и может отводиться в период перефутеровки конвертера. Как правило, кессоны имеют самостоятельный контур циркуляции. Конструкция кессона предусматривает возможность производить через него засыпку сыпучих и ввод кислородных фурм, а также стекание шлака со стен обратно в конвертер. Угол наклона к вертикали 30—40°.

Стационарная секция радиационной части котла компонуется в виде вертикальной шахты или в виде Г- или П-образного газохода. В качестве поверхностей нагрева используются трубы малого диаметра (38×4 и 38×5 мм). В связи с этим котлы имеют малый водяной объем и малоинерционны в режиме резких колебаний паропроизводительности. Трубы или мембранные панели из них располагаются вдоль направления движения газов.

Если в межпродувочный период осуществить подтопку котла, то он может вырабатывать пар для энергетических или технологических нужд, то есть непрерывно. В этом

случае в радиационной части котла размещаются дополнительные устройства для сжигания газообразного топлива (например горелки для коксодоменной смеси или природного газа). Подтопка котла действует непрерывно, но нагрузка горелок регулируется автоматически в зависимости от режима выхода конвертерного газа.

Конструкция радиационно-конвективных котлов, предназначенных для работы с дожиганием CO и утилизацией тепла, имеет опускной конвективный газоход. В нем размещаются трубчатые испарительные и экономайзерные поверхности нагрева. По такому принципу сконструированы отечественные котлы типа ОКГ-100-2р и ОКГ-100-3, работающие за конвертерами садкой 130—150 т. Для конвективных поверхностей применяются трубы диаметром 25×3,5 мм и 32×3 мм. Трубы размещаются поперек потока газов в коридорном или шахматном порядке.

Температура газов перед конвективной поверхностью не превышает 1000—1100 °С, что обеспечивает их бесшлаковую работу. Газоход конвективной части прямоугольного сечения. Для очистки поверхности нагрева применяется виброочистка или импульсная. Аэродинамическое сопротивление котла составляет 2000—3000 Па. Газы на выходе имеют температуру около 300 °С. При величине подтопки 20—30 МВт котлы вырабатывают 160—200 т/ч насыщенного пара при давлении соответственно 2,5 и 4,6 МПа. Такие котлы требуют установки 5—8 циркуляционных насосов.

Технико-экономические расчеты показывают, что с увеличением садки конвертеров до 300 т и более и интенсивности продувки кислородом до 5 м³/мин, паропроизводительность котлов возрастает до 800—900 т/ч, что требует увеличенных капитальных затрат и эксплуатационных расходов. В этих условиях технико-экономические показатели схем отвода газов в режиме без дожигания становятся более предпочтительными.

Для схем без использования тепла или с частичной его утилизацией предназначены котлы с радиационными поверхностями нагрева. Среди отечественных котлов такого типа ОКГ-250бд и ОКГ-250-2 с принудительной циркуляцией.

Конструктивной особенностью радиационных котлов является отделяемый кессон круглого сечения. Он соединен со стационарным газоходом с помощью линзового компенсатора. Стены стационарного газохода представляют экранную поверхность из вертикальных труб диаметром 38×5 мм с шагом между осями 50 мм. Концы труб

приварены к коллекторам. В зоне кессона трубы сварены между собой пластинами и образуют сплошную мембранную поверхность. По высоте котлы разделяются на 2—3 параллельных контура.

Производительность котлов зависит от расхода кислорода на продувку. Температура газов на выходе из такого котла высока около 1000 °С. Поэтому газы далее по тракту перед газоочисткой охлаждаются впрыском воды в газоход. Аэродинамическое сопротивление радиационных котлов не велико и составляет 200—300 Па.

Турбинные установки

Паротурбинные установки. Основным элементом турбинных установок является турбина-двигатель с непрерывным рабочим процессом. Энергия рабочего тела (пара, газа или воды) на лопатках рабочего колеса турбины непрерывно преобразуется в механическую. Механическая энергия, полученная колесом, определяется разностью кинетических энергий рабочего тела на входе и выходе из канала, образованного соседними лопатками колеса турбины. В паровых турбинах для создания высокой скорости на входе в лопатки применяются сопла, в которых потенциальная энергия пара частично или полностью преобразуется в кинетическую. Давление пара падает, скорость растет. Из уравнения баланса энергии несложно определить зависимость скорости выхода из сопла ω_1 (или выхода на лопатку) от величины разности энтальпий пара I до и после сопла:

$$\omega_1 = \varphi \sqrt{2(I_1 - I_{2a})}, \text{ м/с}, \qquad (86)$$

где φ — коэффициент скорости, учитывающий потери на трение, вихреобразование и т. п.

В диаграмме $I - S$ (рис. 87) эта разность энтальпий для одной ступени (сопло — лопатка) имеет вид отрезка 1—2а при адиабатном истечении, а с учетом потерь — отрезка 1—2.

В конструкциях паровых турбин применяют такие ступени, в которых процесс превращения перепада давления в скорость не полностью заканчивается в соплах, а частично и в лопаточном канале, где благодаря изменению скорости, возникает реактивный эффект, повышающий окружную скорость колеса. Отношение теплоперепада на лопатках к теплоперепаду на всей ступени называется степенью реакции. Паровые турбины, у которых степень реакции $\rho =$

$=h_л/h_а$ каждой из ступеней не превосходит 0,15, называются активными, а при условии $\rho \geqslant 0{,}4$ реактивными.

Современные паровые турбины выполняются многоступенчатыми и комбинированными, с использованием как активных, так и реактивных ступеней. Одним из основных элементов турбинных установок является паровой конденсатор. Это трубчатый теплообменник, в котором за счет интенсивного охлаждения водой, проходящей по трубкам происходит конденсация отработавшего в турбине пара. При конденсации рабочего пара происходит уменьшение в сотни тысяч раз его объема, т. е. резкое падение давления пара.

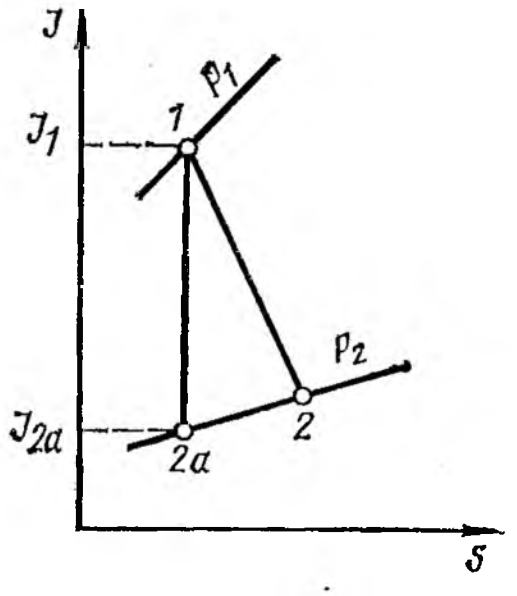


Рис. 87. Теплоперепад в паровой турбине

Как видно из диаграммы водяного пара I—S, чем ниже давление в конденсаторе, тем больше располагаемый теплоперепад, а значит и мощность, развиваемая турбиной. Глубина разрежения (или вакуума в конденсаторе) определяется начальной температурой охлаждающей воды и кратностью охлаждения.

Кратность охлаждения m — это количество охлаждающей воды, необходимой для конденсации 1 кг пара.

На современных станциях $m=50$—70. Как правило, охлаждающая конденсатор вода циркулирует в замкнутом контуре, который включает специальные охладители — градирни или брызгальные бассейны. Конденсат, образующийся в межтрубном пространстве конденсатора, с помощью насосов подается в трубопровод питательной воды котельной установки. Скрытая теплота парообразования, уносимая охлаждающей водой, теряется.

Паротурбинные установки, у которых весь пар проходит через конденсатор, называются конденсационными. Они предназначены для выработки только электроэнергии. Их к. п. д. с учетом термодинамических потерь, внутренних или потерь несовершенства процесса, механических потерь и потерь в электрогенераторе, в современных установках достигает 29—39 %.

Конденсационные турбины устанавливаются, как правило, на крупных электростанциях и предназначаются для выработки электроэнергии.

На ТЭЦ металлургических заводов наибольшее распространение имеют схемы с комбинированной выработкой тепловой и электрической энергии и регенеративным подогревом питательной воды. На таких станциях применяют турбины с производственными и теплофикационными отборами пара соответственно при P=0,60—0,130 МПа и P= =9—17 МПа и T= 480—570 °С. Они являются приводом электрогенераторов мощностью 17 и 22 МВт. Производственный отбор зачастую работает параллельно с утилизационными установками.

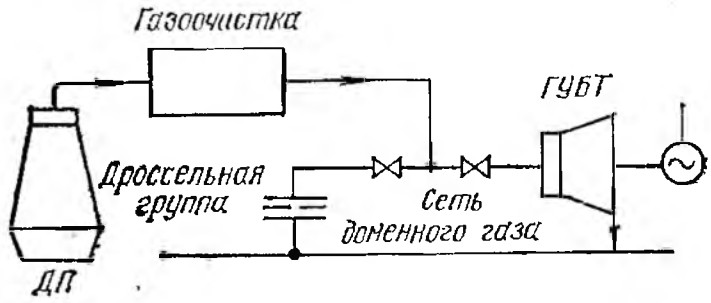


Рис. 88. Схема включения ГУБТ в сеть доменного газа

Как показывает опыт эксплуатации, такие тепловые схемы особенно выгодны на станциях, где котлоагрегаты работают с высоким подогревом воздуха. Регенеративный подогрев воды позволяет уменьшить поверхность водяного экономайзера котла и тем самым поднять температуру газов, поступающих в воздухоподогреватель.

Схемы с комбинированной выработкой электрической и тепловой энергии экономически более выгодны, чем схемы с чисто конденсационными турбинами.

Газотурбинные установки. При использовании газа в качестве рабочего тела газотурбинная установка (ГТУ) приобретает ряд существенных особенностей по сравнению с паротурбинной. Теплоперепад, который срабатывается в проточной части газовой турбины, значительно меньше, чем теплоперепад паровой турбины, однако объемный и массовый расходы газа, а также уровень температур значительно выше. Это приводит к конструктивным различиям газовых турбин.

В черной металлургии успешно применяется другой тип газовых расширительных турбин — утилизационные бескомпрессорные, типа ГУБТ. В них сжигание газов не производится, поэтому камера сгорания и воздушный компрессор отсутствуют. ГУБТ предназначен для использования потенциальной энергии доменного газа с параметрами P=240÷350 кПа и T=120—140 °С до давления 110 кПа.

Схема включения ГУБТ в сеть доменного газа дана на рис. 88. Проточная часть турбины имеет две ступени. Подвод газа осевой, через блок поворотных диафрагм, выполняющих роль регулирующего и отсечного устройства. От-

вод газа вниз, под углом через цилиндрический патрубок, и далее в сеть доменного газа.

Освоен выпуск нескольких типоразмеров ГУБТ для установки за доменными печами различного объема, которые маркируются по предельной мощности генератора на 6, 8, 12 МВт (ГУБТ-6, 8 или 12), на расход газа соответственно 150, 260 и 360 тыс. м³/ч.

Себестоимость выработки электроэнергии по опыту ряда заводов страны составляет 0,2—0,35 коп/(кВт·ч), что значительно ниже стоимости 1 кВт·ч заводской ТЭЦ. Эффект от использования утилизационных турбин на доменном газе позволяет покрыть расходы на компремирование воздушного дутья доменных печей на 40 %.

§ 4. Охлаждение печей

Многие элементы конструкции металлургических печей, работающие в зоне высоких температур, имеют специальное охлаждение. Это предохраняет их от прогара, повышает стойкость кладки, поддерживает температуру в пределах не допускающих разрушение и износ материалов. В некоторых случаях охлаждение способствует созданию гарнисажа, защитного слоя стенки печи.

Охлаждающей средой может быть воздух, вода или пароводяная смесь. Воздушное охлаждение деталей применяется в случае, если плотность теплового потока на стенку детали не превышает 2 кВт/м². Этот способ применяется, например для охлаждения лещади доменной печи.

Наибольшее распространение имеют водяное проточное охлаждение и замкнутые системы испарительного охлаждения печей.

Водяное (проточное) охлаждение

Водяное охлаждение обеспечивает интенсивный отвод тепла от детали или элемента печи. Значение коэффициента теплоотдачи α зависит от плотности теплового потока, конструкции детали, температуры и скорости охлаждающей воды и ряда других факторов и находится в пределах 10^2—10^5 Вт/м²·К. Детали печей не защищенные футеровкой воспринимают тепловые потоки в среднем 200—800 кВт/м², а футерованные или покрытые гарнисажем от 5 до 150 кВт/м².

Особенностью водяного охлаждения является низкий допустимый уровень нагрева воды. При нагреве до 40—60 °С из воды происходит выпадение солей, образование

шлама, накипи на стенке. Средний коэффициент теплопроводности накипи 0,3 Вт/(м·К). Это приводит к росту термического сопротивления стенки и повышению ее температуры. Поэтому воду нагревают только до 35—50 °С или в среднем на 10 °С, что приводит к очень большим ее расходам. Применение оборотного цикла и химической очистки воды хоть и удорожает систему охлаждения, но в целом оказывается целесообразным.

Из опыта известно, что средняя расходная скорость воды для предотвращения осаждения механических взвесей в детали не должна быть меньше 0,8 м/с. Другим условием при выборе скорости является создание такой циркуляции, при которой для заданной плотности теплового потока на деталь не возникало бы местное кипение.

Для выбора минимальной скорости можно использовать эмпирическую формулу, м/с

$$w_{min} = 10^{-2} q d_э^{0,2}, \qquad (87)$$

где q — плотность теплового потока, кВт/м^2; $d_э$ — эквивалентный диаметр полости охлаждаемой детали, м.

Так для охлаждения рам и кессонов мартеновской печи минимальная скорость для предотвращения местного кипения равна 2—5 м/с, для фурм и холодильников доменной печи 0,5—3 м/с, для глиссажных труб методических печей 1—1,2 м/с. Отсюда следует, что в охлаждаемых деталях сложной конфигурации невозможно создать условия, предотвращающие поверхностное кипение и образование накипи. Таким образом водяное охлаждение не устраняет опасности прогара в местах накипи и прорыва воды.

Начиная с 1950 г. на металлургических заводах страны стали переходить с водяного охлаждения на испарительное.

Испарительное охлаждение

При испарительном охлаждении используется в основном скрытая теплота парообразования, которая отводится от охлаждаемой поверхности испаряющейся водой. Коэффициент теплоотдачи к кипящей воде от стенки значительно больше, чем к холодной воде. Это и создает условие для отбора тепла от стенки в количестве необходимом для испарения воды, т. е. 2260 кДж/кг, что в несколько десятков раз больше, чем при водяном охлаждении.

Схема испарительного охлаждения является более прогрессивной и экономически выгодной, несмотря на допол-

нительные затраты на химическую очистку воды. Она повсеместно вытесняет водяное проточное охлаждение, так как по сравнению с ним позволяет в 60—100 раз сократить расход воды и в 9—10 раз увеличить срок службы деталей. Схема испарительного охлаждения (ИО) также дает возможность использовать тепло получаемого пара. Для испарительного охлаждения применяют умягченную катионированную воду, при которой исключается отложение накипи.

Принципиальная схема контура циркуляции воды и пароводяной смеси в установке ИО подобна схеме котла-утилизатора. В большинстве схем — циркуляция естественная, за счет разности плотности воды и пароводяной смеси. Принудительная, с помощью циркуляционных насосов, циркуляция применяется в случае резких колебаний тепловых нагрузок на охлаждаемые элементы печи или при сложной конфигурации этих элементов. При проектировании и наладке схем ИО выполняются расчеты на прочность стенок охлаждаемых деталей по максимально возможной плотности теплового потока. Расчет контура циркуляции проводят для определения расхода воды, размеров труб и кратности циркуляции, которые обеспечивают устойчивый режим работы схемы. Так как давление в контуре ИО выше 0,5 МПа, расчеты выполняются в соответствии с нормативными методами расчета котельных агрегатов, а сами системы находятся под контролем службы Госгортехнадзора.

Доменные печи

Современная доменная печь теряет с охлаждающей водой в среднем до 120—170 кВт на 1 т выплавляемого чугуна.

Потери тепла распределяются по зонам доменной печи следующим образом: шахта, распар и заплечики 67 %, фурменная зона 28 %, горн и лещадь 5 %.

В качестве охлаждающих элементов, которые устанавливаются почти по всей высоте шахты печи и горна, применяются плитовые холодильники. В каждой такой чугунной плите залит змеевик из стальной трубки, для прохода охлаждающей паро-водяной смеси.

Тепловой режим работы холодильников не стабилен во времени. Он зависит от режима работы печи, периода кампании и места расположения холодильника. В тоже время плотность теплового потока, которую воспринимает холодильник, почти не зависит от объема доменной печи и со-

ставляет для плитовых конструкций в среднем 23 кВт/м². Температура внутренней рабочей поверхности холодильников этой зоны колеблется от 180 до 600 °С.

Для отливки плиты применяют чугун марки ЖЧХ—0,8. В связи с этим ни один из участков холодильников не должен находиться длительное время при температуре вы-

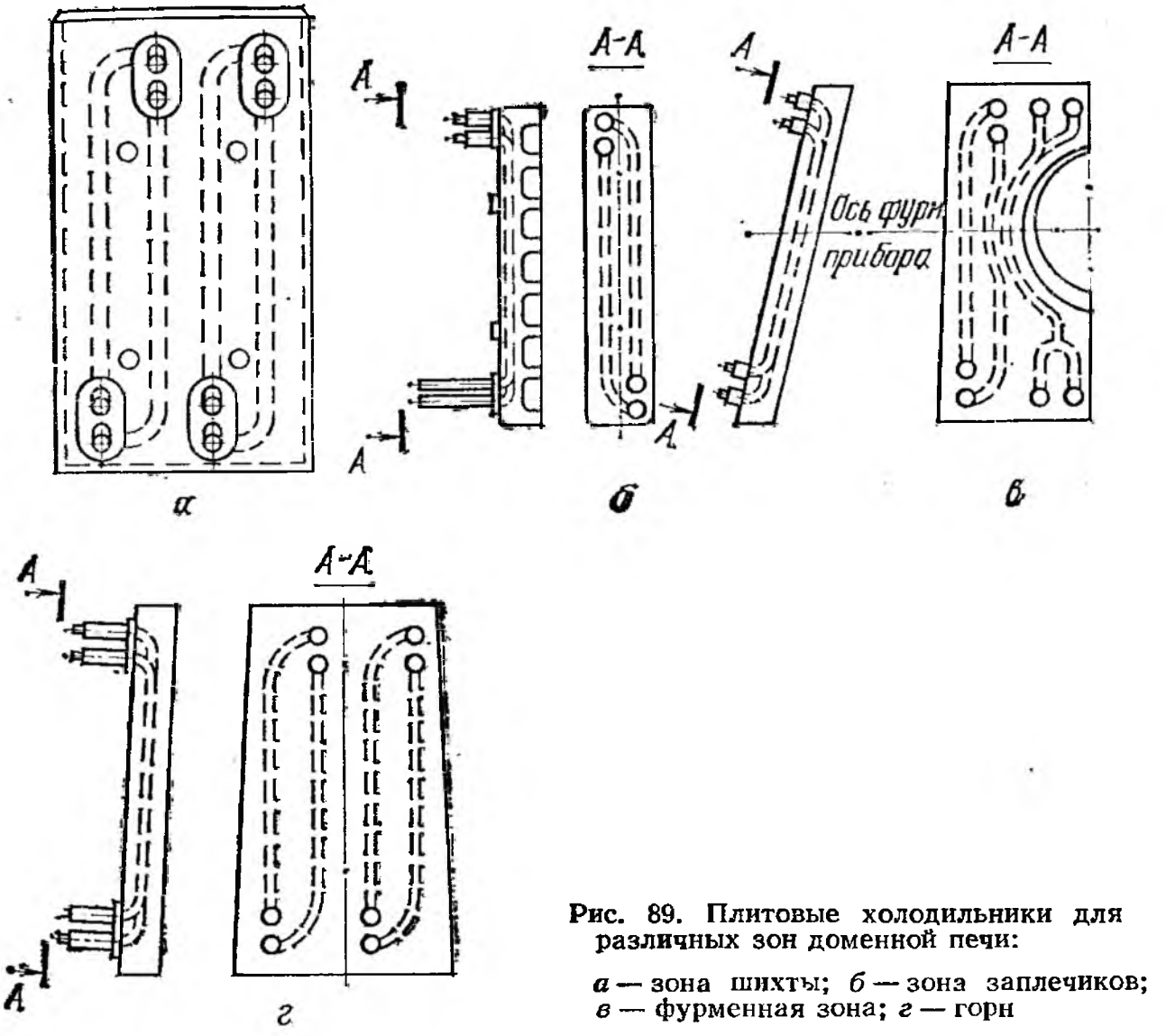


Рис. 89. Плитовые холодильники для различных зон доменной печи:

а — зона шихты; *б* — зона заплечиков; *в* — фурменная зона; *г* — горн

ше 550 °С. По условию прочности давление 0,8 МПа является для них верхним пределом.

Шаг между охлаждающими трубками в плитовом холодильнике 200—250 мм, диаметр трубки 44—52 мм. Толщина плит 140—150 мм, высота 1—3 м, ширина 700—1500 мм. Конструкция некоторых типов холодильников дана на рис. 89.

Общий расход питательной воды на все холодильники этой зоны достигает 20—40 м³/ч.

Схема соединения холодильников доменной печи в контур испарительного охлаждения может быть одно- или двухзонной. Однозонная схема (рис. 90) более распространена. При двухзонной схеме в первую зону входят только

холодильники шахты, а во вторую — холодильники фурменной зоны и горна.

По периметру печи размещается от 2 до 6 вертикальных рядов холодильников-секций. Каждая секция может иметь свой барабан-сепаратор и работает как самостоятельный контур. Барабаны-сепараторы размещаются на расширенной колошниковой площадке над крышей поддоменника или в одной галерее с барабаном-сепаратором испарительного охлаждения клапанов воздухонагревателя (на высоте около 20 м). В конструкции фурменных холодильников предусматривают их работу как на испарительном охлаждении, так и возможность переключения их на охлаждение проточной водой. В большинстве случаев воздушные фурмы охлаждаются по схеме ИО, а шлаковые — по схеме водяного проточного охлаждения.

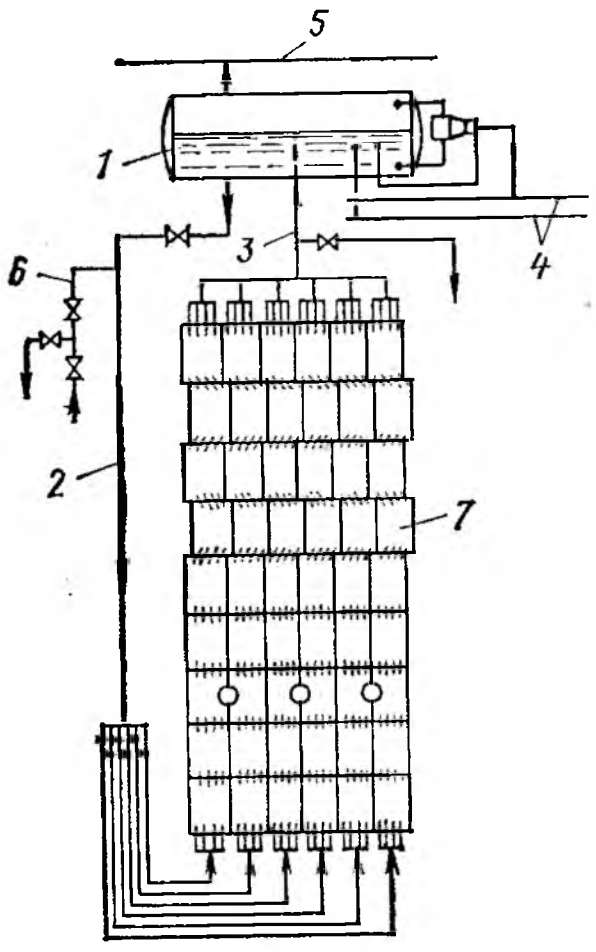


Рис. 90. Однозонная схема испарительного охлаждения:

1 — барабан; *2* — спускной коллектор; *3* — подъемный коллектор; *4* — питательная вода; *5* — паропровод; *6* — продувка; *7* — плитовые холодильники

Закономерность повышения солесодержания циркулирующей котловой воды и влияние продувки на его уровень лежит в основе метода определения прогара холодильников. По непрерывной записи солесодержания можно зафиксировать момент, когда произойдет снижение темпа роста солесодержания. А причиной этому является утечка воды в результате прогара.

Эксплуатация установок испарительного охлаждения и штат обслуживания находится в ведении доменного цеха. Технический контроль осуществляет служба главного энергетика завода.

На каждую доменную печь в смену приходится один слесарь — дежурный по системе охлаждения.

Мартеновские печи

Интенсификация сталеплавильного производства привела к некоторой модернизации конструкции печей. В на-

стоящее время часть парка мартеновских печей реконструирована на двухванные агрегаты. При этом схемы охлаждения остаются без существенных изменений. В схемы ИО включены элементы печи, находящиеся в наиболее тяжелых температурных условиях: кессоны газовых печей, фурмы и форсунки мазутных печей, пятовые балки главного свода и пережимов, рамы и заслонки завалочных окон,

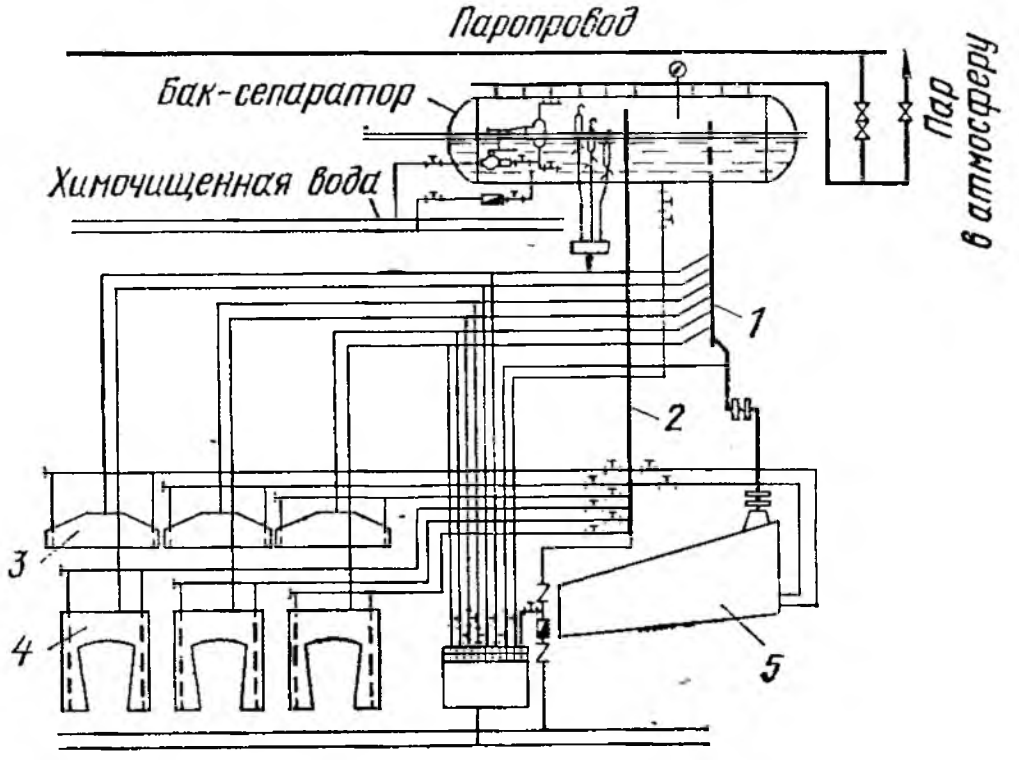


Рис. 91. Схема испарительного охлаждения мартеновской печи:

1 — подъемный коллектор; *2* — опускной коллектор; *3* — пятовые балки; *4* — рамы завалочных окон; *5* — кессон

столбики передней стенки, а также перекидные и регулирующие устройства и другие элементы.

Температура стенки охлаждаемых стальных элементов мартеновской печи, при которой обеспечивается ее надежная работа, составляет 400—500 °С. Стойкость охлаждаемых деталей в среднем составляет 3—4 кампании печи по своду, т. е. 2—3 года.

Параметры получаемого пара зависят, как правило, от предельных давлений для конструкций охлаждаемых элементов. В основном приняты давления на мартеновских схемах ИО до 1—4 МПа. Все охлаждаемые элементы печей выполняются полой или трубчатой конструкции с толщиной стенки не менее 12 мм из листовой стали марки 15К. Расчеты деталей на прочность и схем охлаждения на устойчивость циркуляции ведутся с учетом воспринимаемых максимальных плотностей теплового потока. Эта ве-

личина не зависит от садки печи и для разных деталей колеблется в пределах от 17—40 кВт/м² (с защитной футеровкой) до 400—700 кВт/м² (с оголенной поверхностью). К концу кампании, в результате разрушения футеровки, отвод тепла значительно увеличивается.

Принципиальная схема испарительного охлаждения мартеновской печи на газовом отоплении дана на рис. 91. Все схемы работают с естественной циркуляцией, что увеличивает ее надежность и снижает стоимость. Улучшению циркуляции способствует расположение барабана-сепаратора на высоте не менее 10 м от верха охлаждаемой детали. Опыт эксплуатации показывает, что большая надежность работы и удобство обслуживания имеет схема с расположением барабанов на крыше цеха в специальной галерее. Объем барабанов выбирают из условия создания запаса воды на случай отключения на работу в течение 1—2 ч.

Трубные разводки, как подъемные, так и опускные выполняют с промежуточными коллекторами, при условии, что объединяемые трубы немного отличаются по гидравлическим сопротивлением. Рекомендуемый диаметр опускных труб 50—70 мм, подъемных 100—150 мм. Размеры уточняются при гидравлическом расчете циркуляции.

Скорость циркуляции в охлаждаемых деталях должна быть не менее 0,4—0,8 м/с, а в опускных трубах не более 2 м/с. Рекомендуемые кратности циркуляции: для кессонов и фурм 40, для пятовых балок 30, для рам и заслонок завалочных окон 15. Средний показатель выработки пара в системах испарительного охлаждения мартеновских печей составляет 0,2—0,3 т/т стали. Перспективной является схема с повышенными параметрами пара, что позволит объединить ее с котлами-утилизаторами.

Нагревательные печи

Среди большого разнообразия нагревательных печей в качестве примера рассмотрим методическую печь для нагрева металла перед сорто- или листопрокатными станами. Это крупная печь с высокотемпературными зонами, 20—30 % тепловой мощности которых расходуется в охлаждаемых элементах конструкции.

В схемы испарительного охлаждения включены элементы: подовые продольные трубы (48 % от всех потерь тепла), поперечные (опорные) трубы (37 %), балки торцов загрузки и выгрузки, рамы, отбойники, шиберы, горелки и др. (15 %).

Плотность тепловых потоков на охлаждаемые элементы достигает 50—120 кВт/м^2.

Из охлаждаемых элементов печи основными являются подовые трубы — продольные и поперечные, которые обычно изготовляются из труб круглого сечения из стали марок 10 и 20. Диаметр и толщина стенок труб определяются из

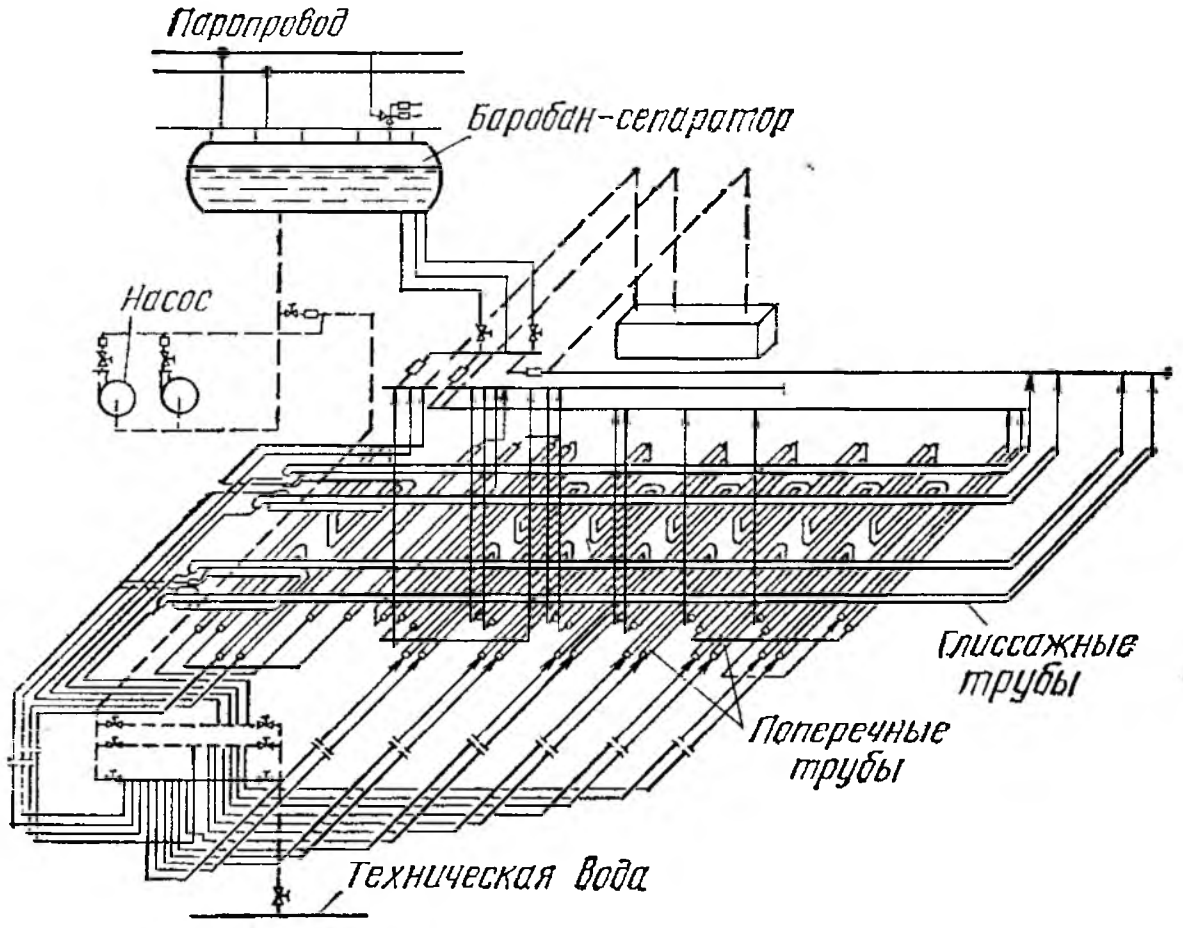


Рис. 92. Схема испарительного охлаждения методической печи

условий прочности при весовой нагрузке и истирании. Они зависят от геометрических размеров печи и находятся в пределах от 76×10 мм до 120×20 мм. Длина труб 12—30 м.

Принципиальная схема испарительного охлаждения методической печи дана на рис. 92.

Системы испарительного охлаждения современных методических печей работают по схеме естественной циркуляции с избыточным давлением 1,5—4,5 МПа. Каждую из продольных подовых труб включают самостоятельным контуром, а поперечные трубы, группами по 2—3 трубы, соединенных последовательно, подключают параллельными контурами к барабану-сепаратору. Тепловая нагрузка на каждый самостоятельный контур (или группу) составляет 400—800 кВт. Допустимая скорость циркуляции в контурах методической зоны 0,8 м/с, в сварочной зоне 1,2 м/с, в опускных трубах 0,8—1,5 м/с, в подъемных — до 15 м/с.

Схемы испарительного охлаждения нагревательных печей на повышенном давлении до 4,5 МПа целесообразно объединять в комплексные схемы с котлами-утилизаторами этих печей. Это может улучшить технико-экономические показатели системы охлаждения.

На экономические показатели существенно влияет стоимость пара заводской ТЭЦ, доля которого замещается паром, вырабатываемым в системе испарительного охлаждения.

Глава VII ОЧИСТКА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

§ 1. Характеристика газоочистных устройств

Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в атмосфере промышленных предприятий в виде аэрозолей и токсичных газов регламентируются государственными стандартами и основаны на санитарно-гигиенических нормах. В приземном слое атмосферы населенного пункта должно быть: пыли нетоксичной не более 0,5 мг/м^3, оксидов углерода 3 мг/м^3, сернистого ангидрида 0,5 мг/м^3 и оксидов азота 0,085 мг/м^3. Расчет и выбор газоочистных устройств производится из условий соблюдения норм ПДК. Эффективность газоочистки оценивается показателем степени очистки

$$\eta = 1 - z_к/z_н, \qquad (88)$$

где $z_н$ и $z_к$ — соответственно концентрация улавливаемой компоненты до и после очистки. Газоочистные аппараты для очистки от газообразных компонентов основываются на сорбционно-каталитических или химических методах, а аппараты для улавливания аэрозолей — на физико-механических.

Аэрозоли принято различать трех видов: пыли, дымы, туманы.

Пыли — малоустойчивые системы с твердыми частицами от 5 мкм до 50 мкм и более. Частицы диспергационного происхождения, т. е. образованные в результате механического дробления твердого вещества.

Дымы — длительно устойчивые системы с частицами размером от 5 мкм до 0,1 мкм и менее, образованными в результате возгонки и конденсации паров.

К туманам отнесены аэрозоли с жидкими частицами широкого диапазона размеров, образованные в результате распыления жидкости или конденсации паров. К металлургическим аэрозолям в основном следует отнести первые два вида.

В задачу пылеулавливания входит создание условий для укрупнения частиц за счет коагуляции и осаждения их в пылеулавливающем аппарате. В схемах пылеулавливания применяют две и более ступеней очистки. В первой ступени грубой очистки улавливаются крупные фракции пыли, вторая — тонкая ступень очистки улавливает мелкие фракции.

Методы очистки и аппараты по природе используемых в них сил делятся на механические и электрические. Большую группу пылеулавливающих аппаратов, основанных на механических методах очистки, можно разделить еще на два вида: сухие и мокрые аппараты. В мокрых используется эффект смачивания частиц в результате столкновения с каплями или пленкой введенной жидкости.

К аппаратам сухого типа относятся устройства, использующие гравитационно-инерционные и фильтрационные принципы. Это наиболее распространенные аппараты.

Электроочистка

Электрическая очистка, как правило, применяется в качестве второй, тонкой ступени и осуществляется в электрофильтрах. Электрофильтры способны работать с эффективностью 99 % и даже 99,9 %, улавливать частицы широкого диапазона размеров вплоть до субмикронных при концентрации пыли на входе до 50 г/м^3 и выше.

Процесс электроосаждения пыли состоит из двух стадий: зарядки частиц пыли и осаждения. В большинстве конструкций обе стадии совмещены в пределах системы разноименных электродов: коронирующих и осадительных. Осадительные электроды заземлены, а на изолированные коронирующие электроды подается постоянное высокое напряжение от высоковольтного агрегата питания. Конструкция электродов такова, что между ними образуется резко неоднородное электрическое поле, что является условием образования коронного разряда. В результате в межэлектродном пространстве образуется униполярный объемный заряд, состоящий из движущихся к осадительному электроду ионов. На поверхность частицы пыли, поступающей в межэлектродный промежуток, осаждаются ионы, сообщая ей заряд определенной величины. Поле

напряженностью $\bar{E}$ с момента приобретения частицей заряда q действует на нее с силой $\bar{F}_э$(Н)

$$\bar{F}_э = q\bar{E}. \qquad (89)$$

После достижения частицей заземленного осадительного электрода ее заряд стекает, цепь замыкается. Частица удерживается на электроде силами адгезии до тех пор, пока образующийся слой осажденных частиц не достигнет такого размера, когда его необходимо удалять.

При выборе нужного типоразмера электрофильтра часто пользуются опытными данными промышленного фильтра, работающего в аналогичных условиях, с известной степенью улавливания, или данными, полученными на модели электрофильтра. При выборе аналога учитывают характеристики пылегазового потока, скорость газа в активном сечении, способ встряхивания электродов, электрический режим аппарата.

Конструкции электрофильтров разнообразны и определяются технологическими условиями его работы. К ним относятся состав и свойства пыли и газов, их температура, давление и влажность, степень очистки, условия компоновки газового тракта и др.

Все типы электрофильтров можно классифицировать по нескольким признакам.

По размещению зон зарядки и осаждения они делятся на двухзонные и однозонные. В двухзонных зарядка происходит в ионизаторе, а осаждение — в осадителе. В однозонных — зоны зарядки и осаждения совмещены.

Первые применяют редко и в основном для тонкой очистки аспирационного воздуха.

По направлению газового потока в активной зоне электрофильтры делятся на горизонтальные и вертикальные. По способу удаления пыли с электродов — на сухие и мокрые. В первых применяют ударно-молотковый механизм встряхивания, в мокрых — обмывку электродов водой. В зависимости от количества последовательно расположенных электрических полей электрофильтры делятся на одно- и многопольные; по числу параллельных секций фильтра — на односекционные и многосекционные. По типу электродной системы — на трубчатые и пластинчатые.

Кроме того, электрофильтры с различной пропускной способностью по газу отличаются друг от друга высотой электродов, длиной полей по ходу газа, площадью сечения и т. п.

Промышленный электрофильтр (рис. 93) состоит из узла осадительных *1* и коронирующих электродов *2*, корпуса *3*, узла подвода, распределения и отвода газов *4*, узла удаления пыли с электродов *5*, узла подвода электропитания *6*, устройства для удаления пыли из электрофильтра *7*.

На металлургических заводах широко применяются горизонтальные электрофильтры.

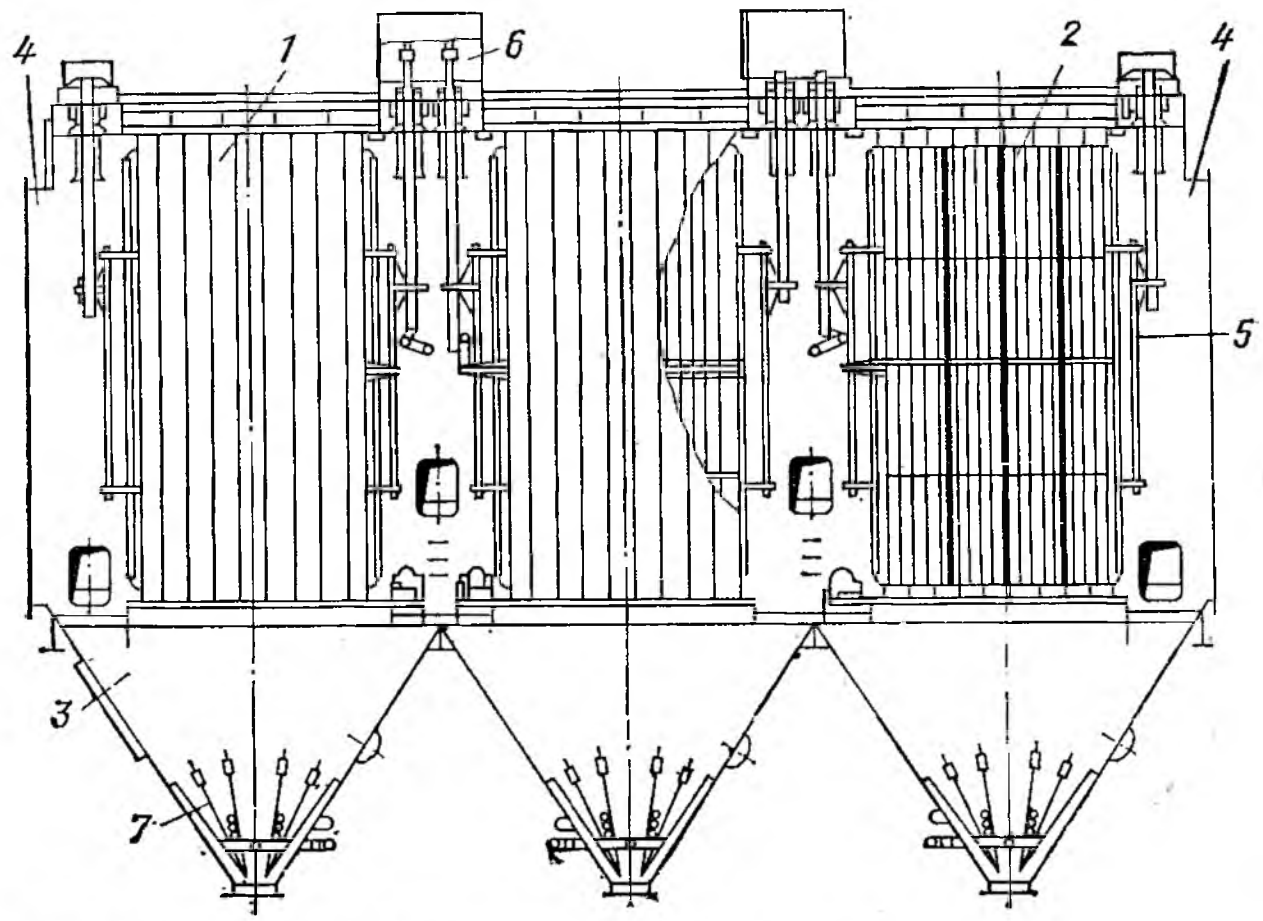


Рис. 93. Горизонтальный пластинчатый электрофильтр

Промышленностью освоен выпуск унифицированных сухих горизонтальных пластинчатых электрофильтров типа ЭГА.

Фильтры могут иметь высоту электродов 6 м, 7,5 м, 9 м, 10,5 м и 12 м. Длина электрического поля от 2,5 м до 5,2 м. В электрофильтре возможно 2, 3 или 4 поля. Площадь активного сечения от 16,5 до 285,5 м^2.

Осадительные электроды широкополосные, С-образного сечения, коронирующие — ленточно-игольчатые. Межэлектродное расстояние 300 мм. Коронирующие электроды с шагом 180 мм объединяются в раму с автономным подвесом, системой встряхивания и подводом высокого напряжения. Корпуса выполняются со щелевыми и пирамидальными бункерами.

Электрофильтры ЭГА применяют для очистки газов при температуре до 330 °С. Допустимое разрежение в корпусе 5 кПа и 15 кПа.

Агрегаты питания, снабжающие электрофильтры выпрямленным током высокого напряжения (60—80 кВ), являются неотъемлемой частью установки. В состав агрегата питания входит повышающий трансформатор, полупроводниковый выпрямитель, регулятор напряжения и пульт управления. На один электрофильтр устанавливают обычно столько агрегатов, сколько в нем полей. Каждое электрическое поле имеет самостоятельное электропитание.

Регулятор напряжения служит для поддержания его на максимально высоком предпробивном уровне. Пробивное напряжение, зависящее от многих факторов и прежде всего от величины и параметров пылегазового потока, колеблется в значительных пределах. Поэтому эффективность работы электрофильтра в высшей степени зависит от регулятора.

Хорошие результаты дают регуляторы, основанные на искровом принципе, когда напряжение поддерживается на уровне искрового разряда и не допускается развитие дугового разряда.

Удельный ток короны $i_к$, приходящийся на единицу площади, осадительного электрода, определяется расчетным или экспериментальным путем (обычно $i_к$=0,35 мА/м²). По суммарной площади электродов, приходящейся на одно поле (S), можно установить номинальный ток агрегата питания, А:

$$I = i_к S \cdot 10^3 \qquad (90)$$

и по нему выбрать агрегат питания

На эффективность работы электрофильтров оказывают влияние многие факторы. Среди них: скорость газов, начальная концентрация пыли, параметры газа, загрязнение электродов, величина удельного электросопротивления пыли и др.

Оптимальная скорость газа установленная из опыта эксплуатации электрофильтров для большинства типов пылей составляет 0,8—1,5 м/с. Она определяет время пребывания частицы в активной зоне фильтра и имеет решающее значение для вторичного уноса пыли.

Электрическая прочность межэлектродного промежутка, которую характеризует величина пробивного напряжения $U_{пр}$, зависит от параметров и состава газа. Рост плотности и снижение температуры газа ведет к увеличению $U_{пр}$, ус-

тойчивости коронного разряда. Положительное действие оказывает повышение влажности газа.

Существенное влияние на эффективность очистки имеют характеристики дисперсной фазы: размер частиц, их удельное электрическое сопротивление (УЭС), адгезионные свойства, т. е. способность к слипанию и др. По величине УЭС все промышленные пыли принято делить на три группы.

Первая группа — низкоомные пыли с УЭС ниже 10^4 Ом·см. При осаждении они быстро отдают свой заряд и могут быть снова вынесены потоком, если их адгезионные свойства низки.

Вторая группа — хорошо улавливаемые пыли с УЭС 10^4—10^{10} Ом·см. Скорость их разрядки такова, что способствует образованию осадка на электродах, который при встряхивании осаждается в бункер.

Третья группа — высокоомные пыли (УЭС выше 10^{10}—10^{11} Ом·см). Трудность улавливания в электрофильтре пыли этой группы вызвана образованием «обратной» короны в микротрещинах осажденного слоя. Пробивное напряжение, заряд частиц, а с ними и эффективность улавливания, резко снижаются. Кондиционирование газа небольшими добавками водяного пара, серного ангидрида или аммиака, снижает УЭС пыли и подавляет обратную корону. Для большинства пылей зависимость УЭС от температуры имеет экстремальный характер — максимальные значения УЭС приходятся на диапазон температур 100—200 °С. Поэтому в большинстве случаев стремятся снижать температуру газа перед электрофильтром.

Сухая очистка газов

В схемах сухой механической очистки газов применяются осадительные камеры, инерционные пылеуловители, центробежные и вихревые аппараты, а также аппараты фильтрующего действия.

Процесс осаждения частиц в движущемся потоке можно рассматривать как результат сложения двух движений. Этот принцип лежит в основе расчета осадительных камер (рис. 94). Например, время τ прохождения газа через камеру высотой и шириной $h \times b$ и длиной l при объемном расходе V составит (с)

$$\tau = hbl/V. \qquad (91)$$

За это время частица, осаждаясь со скоростью w, пройдет путь $h_ч$, равный:

$$h_ч = w\tau, \text{ м}.$$

Если $h_ч = h$, то частицы размером d смогут оседать в пределах камеры. Минимальный размер частиц, которые осядут в камере заданных размеров, м

$$d_{min} = \sqrt{18V\mu_г/(\rho_ч - \rho_г)\,gbl}. \qquad (92)$$

Отсюда видно, что эффективность осадительной камеры тем больше, чем меньше ее высота или больше площадь основания при том же объеме и меньше скорость потока.

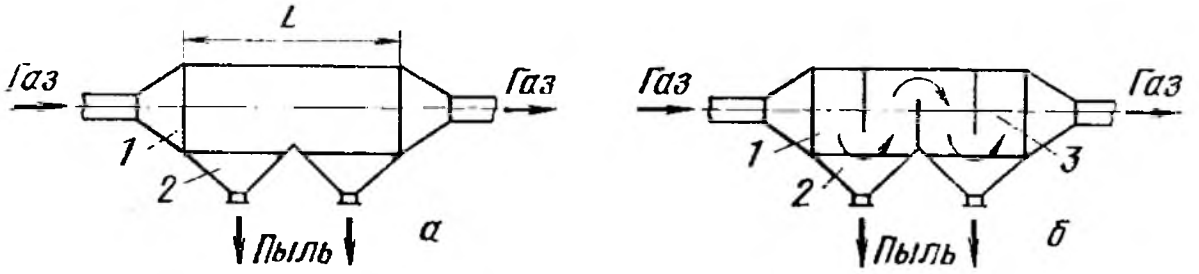


Рис. 94. Схемы простой пылеосадительной камеры (*а*) и камеры с вертикальными перегородками (*б*):
1 — корпус; *2* — бункер; *3* — перегородка

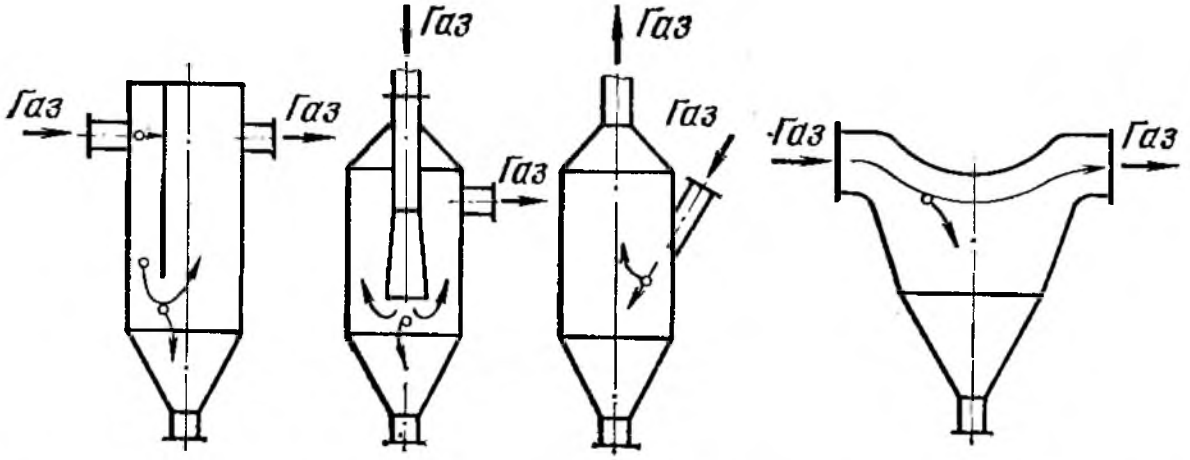


Рис. 95. Схемы инерционных пылеуловителей с различными способами подвода газа

Несмотря на свою невысокую эффективность, простейшие аппараты — пылеосадительные камеры применяются довольно широко в качестве первой ступени, грубой очистки. В них осаждают крупную (более 100 мкм) фракцию частиц с высокой плотностью. Простота конструкции, низкая стоимость сооружения, низкие потери давления по тракту — составляют преимущества осадительных камер. Основной же недостаток — большие размеры.

В разнообразных конструкциях так называемых инерционных пылеуловителей осуществляют резкий поворот потока на угол от 90° до 180°, что вызывает инерционный эффект (рис. 95). При этом после поворота потока создают

такое изменение скорости, чтобы восходящий поток имел скорость меньше скорости седиментации пыли.

Подобные пылеуловители например устанавливают в качестве ступени грубой очистки за доменными печами. Частицы более 30 мкм улавливаются на 70—80 %. Гидравлическое сопротивление таких аппаратов не превышает 300 Па. Простейшим из таких устройств является шлаковик мартеновской печи.

Инерционный принцип осаждения действует и в жалюзийных аппаратах, которые широко применяются на электростанциях для улавливания золы котельных агрегатов и в системах промышленной вентиляции, а также в процессах фильтрации в пористых фильтрах.

Циклоны. Инерционный эффект многократно усиливается при вихревом вращении газового потока, который осуществляется в циклонах. Циклоны — наиболее распространенные в практике пылеулавливания аппараты. С высокой эффективностью в них осаждаются частицы крупностью от 15 мкм и выше.

При вращении потока на частицу действует центробежная сила (Н)

$$\bar{F}_{ц} = mw_{т}^{2}/r, \qquad (93)$$

где m — масса частицы, кг; $w_{т}$ — тангенциальная составляющая скорости потока, м/с; r — радиус вращения частицы, м.

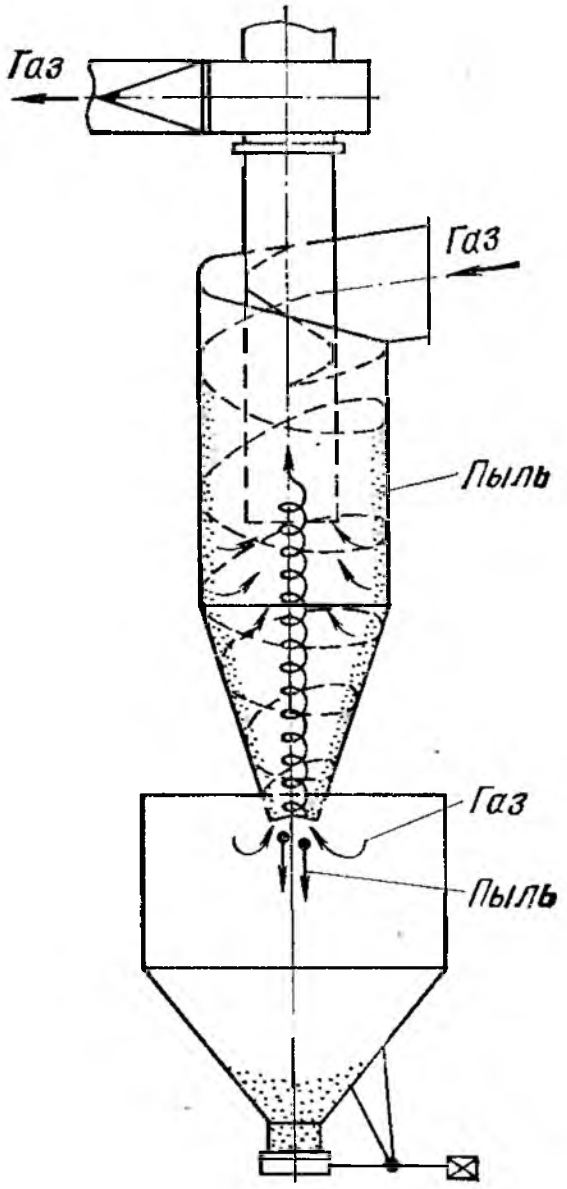


Рис. 96. Схема пылеотделения в циклоне

Движение частиц в циклоне имеет сложный характер.

Принципиальная схема работы циклона дана на рис. 96.

Благодаря тангенциальному вводу, газ движется по спиральной траектории, причем по внешней спирали вниз, а по внутренней — вверх и удаляется через выхлопную трубу. Частицы пыли отбрасываются к стенке, скользят по ней вниз и собираются в бункере.

Для ориентировочных расчетов циклонов применяют формулу Дэвиса минимального диаметра уловленных частиц, м

$$d_{кр} = 1{,}5\sqrt{\frac{D_ц^2 \mu_г}{2H(\rho_ч - \rho_г)\omega_{го}}\left(1 - \frac{D_{тр}^4}{D_ц^4}\right)}, \qquad (94)$$

где H, $D_ц$, $D_{тр}$ — соответственно высота циклона, его диаметр и диаметр выхлопной трубы, м; $\omega_{го}$ — скорость газов на входе в циклон, м/с.

Отсюда видно, что эффективность осаждения возрастает с уменьшением диаметра циклона. Затраты энергии на очистку газа в циклоне определяются величиной его гидравлического сопротивления.

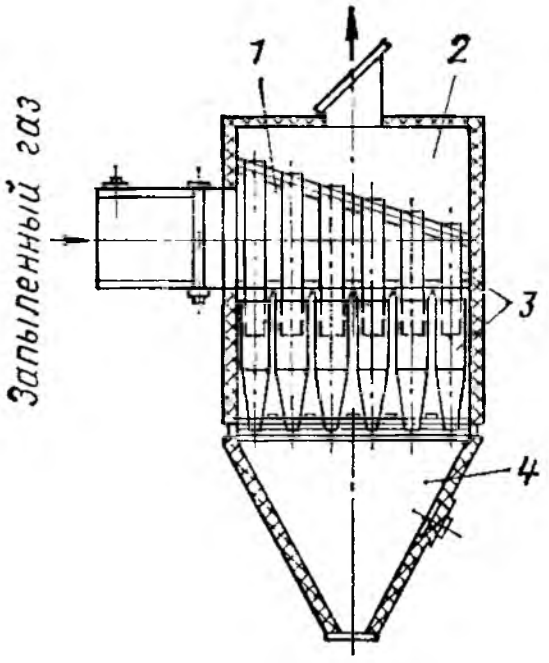


Рис. 97. Батарейный циклон:

1 — перегородка; *2* — камера чистого газа; *3* — циклонный элемент; *4* — бункер

Многочисленные исследования различных конструкций циклонов легли в основу нормализованного ряда циклонов НИИОГАЗ цилиндрического и конического типов. Нормативный метод расчета, разработанный для этих циклонов, дает возможность выбрать тип и размер циклона, удовлетворяющий требуемой степени очистки. Сопоставление результатов экспериментов дает удовлетворительное согласие с расчетными данными.

Циклоны НИИОГАЗ цилиндрического типа ЦН-11 ЦН-15, ЦН-24, ЦН-154 хуже улавливают мелкие частицы, чем циклоны конические, но в сопоставимых условиях обладают меньшим гидравлическим сопротивлением. Они относятся к типу высокопроизводительных. Как показывают расчеты, при условной скорости газа (средняя скорость на сечение аппарата) 2,2—5,0 м/с в них хорошо улавливаются неслипающиеся частицы размером более 5 мкм.

В конических циклонах при больших потерях давления (1,25—1,5 кПа), достигается высокая эффективность улавливания мелких частиц. Они относятся к типу высокоэффективных, но малопроизводительных аппаратов. Частицы размером более 5 мкм улавливаются в них при более низких условных скоростях 1,5—3,5 м/с.

При больших расходах очищенного газа, чтобы не увеличивать диаметр циклона, применяют групповую параллельную компоновку от 2 до 8 циклонов. Как правило, группы имеют общий коллектор грязного газа, общий сборник чистого газа и общий пылевой бункер.

Для повышения эффективности очистки от высокодисперсной пыли при больших расходах газа широко применяется конструкция батарейных или мультициклонов. Батарейные циклоны (рис. 97) состоят из корпуса, в котором объединено в группу большое число мелких циклонных элементов диаметром 100, 160 или 250 мм и общего пылевого бункера.

Циклонные элементы могут быть обычного или прямоточного типа. В большинстве конструкций применяются обычные циклонные элементы с направляющими завихрителями типа «винт» или «розетка». Оптимальная скорость газов для каждого элемента находится в диапазоне 3,5—4,75 м/с.

При использовании специальных защитных покрытий внутренних поверхностей батарейные циклоны успешно применяются на неслипающихся абразивных пылях в огнеупорном и агломерационном производствах, а также для улавливания золы ТЭЦ.

Расчет батарейных циклонов сводится к определению числа циклонных элементов, а расчет каждого элемента выполняется аналогично расчету одиночных циклонов.

К недостаткам батарейных циклонов относятся: повышенная металлоемкость и большие по сравнению с одиночными циклонами эксплуатационные расходы.

Очистка газов фильтрацией. При прохождении потока газа через пористую перегородку на ней задерживаются частицы, взвешенные в потоке. Структура пористой перегородки может быть весьма разнообразной: волокнистые и тканевые материалы, насыпной зернистый слой и пористая керамика. Осаждение частицы пыли в них является результатом суммарного действия на частицу сил инерции, броуновской диффузии, электрических сил и эффекта касания. Из опыта следует, что только частицы размером 0,1—0,5 мкм плохо улавливаются такими фильтрами.

Особенностью аппаратов такого типа является то, что на поверхности фильтрующего элемента накапливается слой осажденных частиц — автослой, роль которого в процессе фильтрации является основной. Эффективность очистки быстро растет. Но вместе с тем растет и гидравлическое сопротивление фильтрации газа. При этом в зависи-

мости от типа фильтра он подвергается или полной замене, или регенерации, т. е. очистке от уловленной пыли. По виду фильтрующего элемента фильтры следует разделить на волокнистые, тканевые и зернистые.

По области применения фильтры можно разделить на три вида:

1) фильтры ультратонкой очистки воздуха для особо чистых производств. Допустимая концентрация пыли на входе не более 1 мг/м^3, скорость фильтрации до 10 см/с. Это волокнистые фильтры различных конструкций, работающие без регенерации, с заменой рабочего слоя;

2) фильтры для очистки воздуха приточной вентиляции, которые работают с концентрацией на входе до 50 мг/м^3 и со скоростью фильтрации до 3 м/с. Это волокнистые и тканевые фильтры.

Для очистки воздуха в системах приточной и вытяжной вентиляции применяются грубоволокнистые фильтры из стекловолокна производительностью от 200 до 1500 м^3/ч с сопротивлением до 150 Па, а также разнообразные конструкции кассетных и масляных фильтров. Для очистки воздуха перед турбовоздуходувками доменных печей используют масляные самоочищающиеся сеточные фильтры марки КДМ. Подача масла на сетки обеспечивает непрерывную их регенерацию.

3) К третьему виду относится большая группа промышленных фильтров, которые предназначены для технологической и санитарной очистки промышленных газов с начальной запыленностью до 60 г/м^3. Это в основном тканевые рукавные фильтры. В обычных тканях размер сквозных пор между пересекающимися нитями диаметром 300—700 мкм составляет 100—200 мкм. Эти отверстия в свою очередь перекрываются волокнами ворса, что и способствует формированию и удержанию фильтрующего слоя пыли (автослоя). Микроструктура его становится очень сложной, а суммарный эффект улавливания существенно возрастает.

В промышленных фильтрах применяются ткани, изготавливаемые на ткацких станках и войлоки. Материалом служат хлопчатобумажные, шерстяные, нитроновые, лавсановые ткани и стеклоткани. Есть опыт применения металлоткани для температур 1000 °С и более.

Срок службы материалов зависит от температуры газов и свойств пылей и достигает 24 мес. Термостойкость стеклоткани не превышает 300 °С, а синтетических 140 °С.

Аэродинамические свойства чистых тканей характери-

зуются скоростью фильтрации или величиной воздухопроницаемости $w_ф$ при стандартном перепаде давления 49 Па. При обычных скоростях фильтрации от 0,3 до 2 м/мин сопротивление применяемых чистых тканей составляет от 5 до 40 Па.

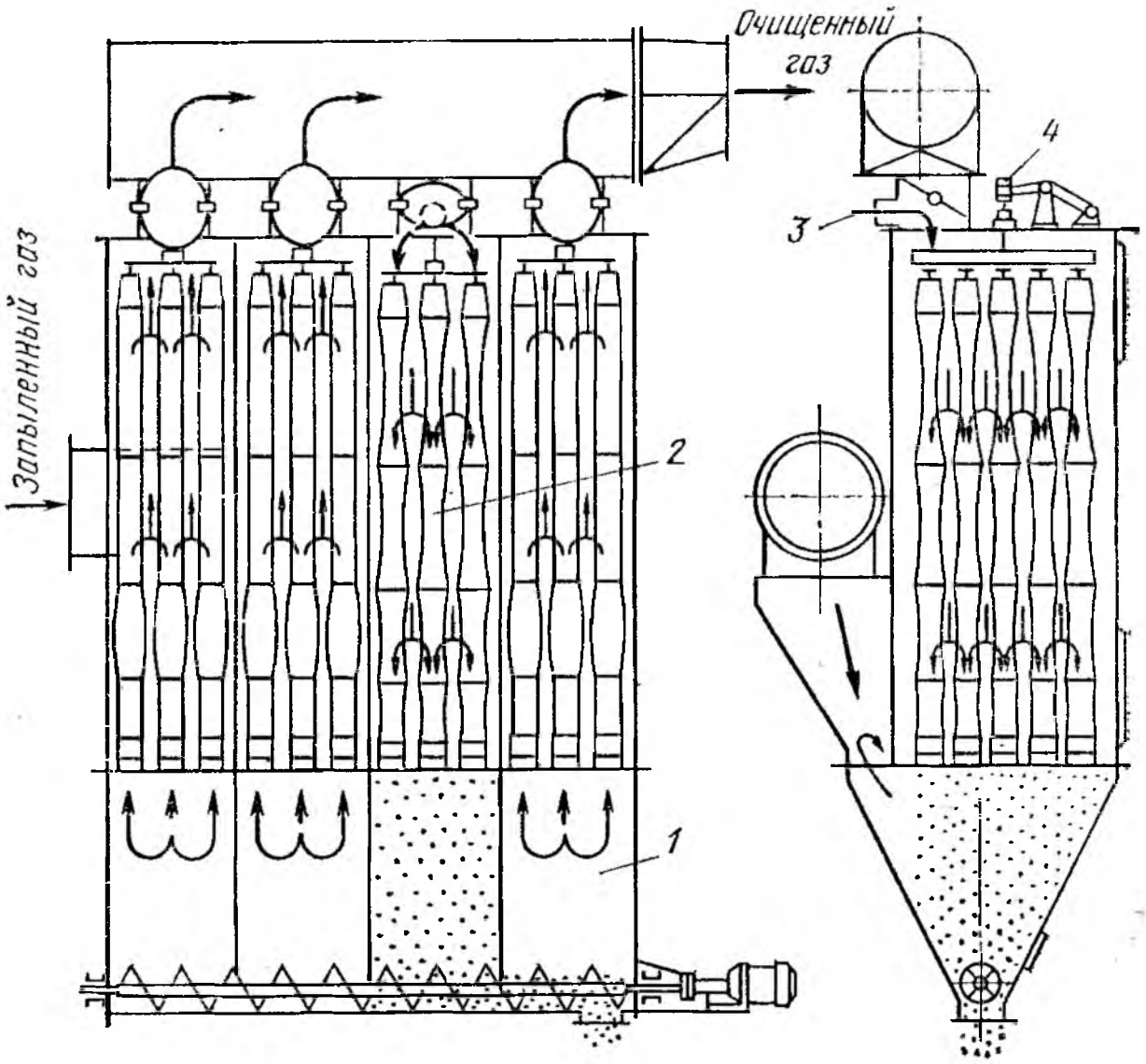


Рис. 98. Схема рукавного фильтра:

1 — рабочая камера; *2* — камера на регенерации; *3* — обратная продувка; *4* — механизм встряхивания рукавов

Конструктивно фильтры различаются по многим признакам. Основные из них: форма фильтрующего элемента, способ регенерации, вид ткани.

Наиболее распространенной формой фильтрующего элемента является сшитый из ткани цилиндр — рукав. Схема рукавного фильтра дана на рис. 98. Как правило, фильтр состоит из нескольких камер (до 10), в каждой камере 10—100 рукавов. Отношение диаметра рукава к его длине обычно 1 : 20 или 1 : 16. Рукава выполняют диаметром 127 или 300 мм.

Запыленный поток поступает внутрь рукава или снаружи. При подаче газа снаружи рукав снабжается каркасом.

Регенерация производится встряхиванием рукава или обратной продувкой. В большинстве конструкций применяется сочетание этих способов. Хорошие результаты дает обратная струйная продувка, при которой вдоль рукава вверх и вниз движется полое кольцо. Из радиальных отверстий кольца навстречу фильтрующему газу истекают струи сжатого воздуха, которые выдувают осевшую пыль.

Регенерация ведется посекционно. Секция на время 20—50 с автоматически отключается от газового потока. Скорость фильтрации, межрегенерационный период, эффективность очистки рукавных фильтров определяются опытным путем.

Выбор типоразмера фильтра выполняется на основании приближенного расчета необходимой площади фильтровальной ткани. Для этого определяется общий расход запыленных газов с учетом подсосов по тракту. Затем в зависимости от типа ткани выбирается величина газовой нагрузки или скорость фильтрации $w_ф$, м^3/(м^2·мин).

Для шерстяных и хлопчатобумажных тканей $w_ф = 0{,}6 \div 1{,}2$ м^3/(м^2·мин); для стеклянных и синтетических $w_ф = 0{,}3 \div 1{,}0$ м^3/(м^2·мин).

Выбор типа ткани, способа регенерации и типа фильтра производится с учетом технико-экономических соображений и опыта эксплуатации аналогичных установок.

На заводах цветной металлургии распространены фильтры типа РФГ и укрупненные типа УРФМ, разработки Гипроцветмета.

Эффективно их применение при переработке полиметаллических руд, где пыль является ценным продуктом. Степень очистки 96—99 %. Из опыта эксплуатации ряда заводов следует, что при начальной концентрации пыли 5—50 г/м^3 запыленность на выходе рукавных фильтров составляет не более 20—50 мг/м^3.

К основным недостаткам тканевых рукавных фильтров следует отнести большие габариты аппаратов, обусловленные низкими скоростями фильтрации, т. е. низкой газовой нагрузкой на ткань, а также ограниченную стойкость ткани, относительно низкую температуру очищаемых газов.

Зернистые и металлокерамические фильтры, состоящие из слоя частиц сферической и другой формы целесообразно применять для очистки газов при высоких температурах и особенно для агрессивных сред. Фильтры могут быть в ви-

де слоя сыпучих зерен, либо в виде спеченной пористой структуры. Осаждение пыли в них аналогично процессу в волокнистых фильтрах. В сыпучем слое зерен частицы осаждаются во всем объеме слоя. В фильтрах, состоящих из прессованных металлических порошков, имеет место образование поверхностного автослоя пыли, также как и в тканевых.

Более сложный, чем для тканей процесс регенерации этих фильтров, ограничивает их применение в промышленности, особенно при очистке больших объемов газов.

Мокрая очистка газов

В основе способа мокрой очистки газа лежит контакт запыленного потока с жидкостью. При этом в большинстве случаев, когда температура газа и жидкости различна, пылеулавливанию сопутствуют тепло- и массообменные процессы. Контакт газа с жидкостью способствует и процессу абсорбции газовых компонентов. Таким образом, с помощью аппаратов мокрого типа часто решают комплексную задачу: охлаждение, пылеулавливание и в некоторой степени очистку от вредных газообразных примесей.

Поверхность контакта потока газа с жидкостью в аппарате может быть трех видов: поверхность пленки жидкости, поверхность пузырьков газа, барботирующего через жидкость и поверхность капель диспергированной жидкости. Наиболее развитой является поверхность капель. В аппаратах мокрой очистки создается одна или несколько видов поверхностей контакта.

Осаждение частиц на пленку жидкости происходит в скрубберах с орошаемой насадкой и в масляных кассетных самоочищающихся фильтрах типа КДМ. Необходимый запас кинетической энергии частицы для осаждения ее на пленку зависит от массы (размера) частицы и угла смачивания. Аппараты такого типа эффективны только для улавливания крупных частиц пыли.

Осаждение частиц в барботажных или пенных аппаратах происходит в образующихся пузырьках диаметром 0,2—1,0 см при скорости их подъема примерно 0,3 м/с.

Высокая эффективность улавливания достигается лишь с ростом размера частиц и с уменьшением размера пузырьков. Пенные аппараты не получили распространения в металлургии. Чаще применяются аппараты скрубберного типа. Осаждение частиц пыли в них происходит на каплях. Инерционный захват частичек пыли каплей при ее обтекании лежит в основе процесса кинематической коагуляции.

Эффективность кинематической коагуляции зависит от относительной скорости частиц и капель и отношения их размеров. Диапазон размеров улавливаемых частиц увеличивается с увеличением скорости.

Наиболее благоприятные условия для кинематической коагуляции протекают в таких аппаратах, где относительная скорость частиц достигает 100 м/с и более.

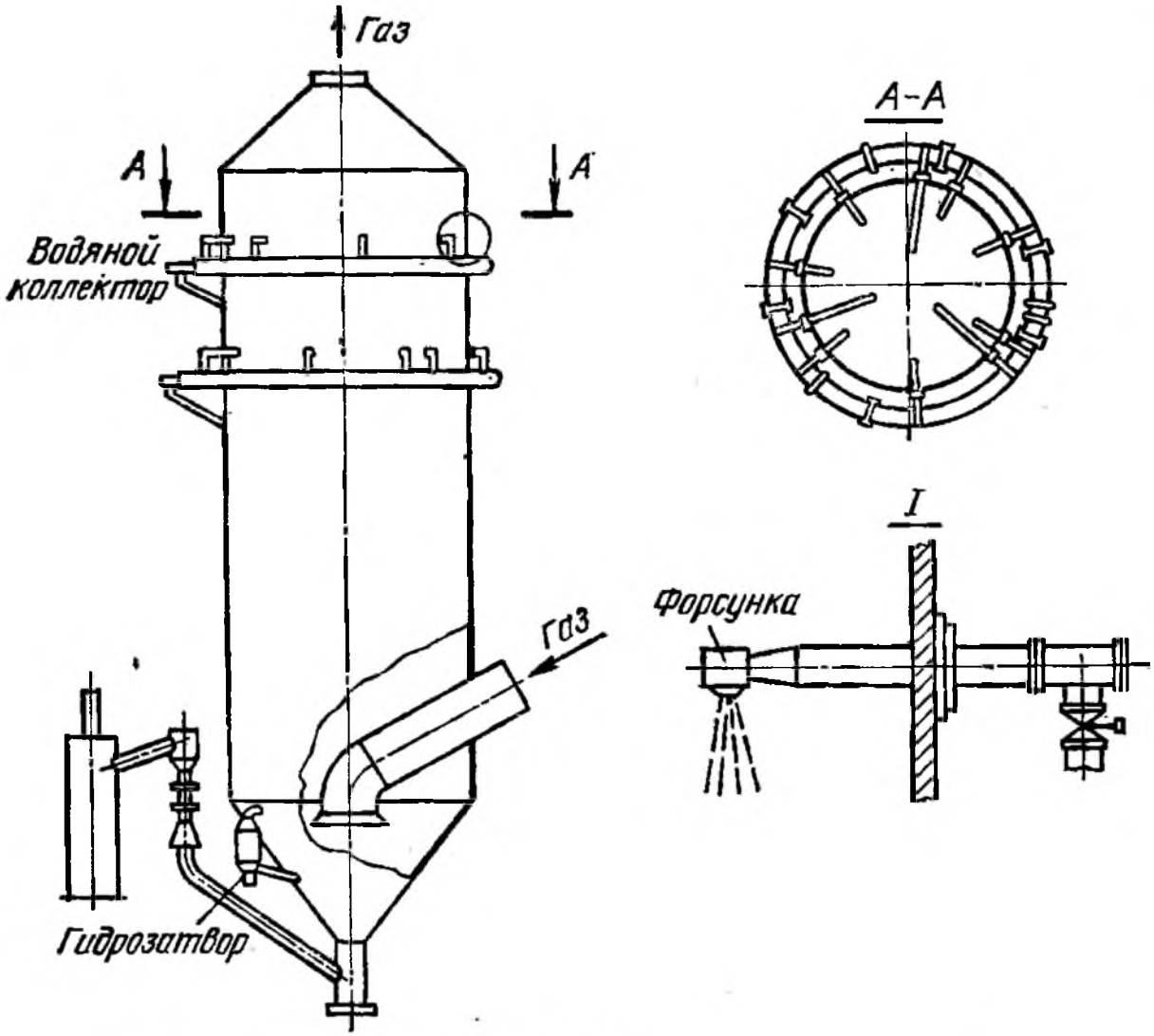


Рис. 99. Полый форсуночный скруббер

В промышленности, в частности, в металлургии широко применяются аппараты, где осаждение частиц происходит на каплях. Распыл жидкости в них чаще всего производят с помощью форсунок (форсуночные скрубберы) или за счет энергии турбулентного газового потока (скрубберы Вентури).

В форсуночных оросительных безнасадочных скрубберах (рис. 99) происходит охлаждение потока и очистка его от крупной пыли размером более 10—15 мкм, т. е. подготовка газа к последующей тонкой очистке. В верхней части скруббера размещается несколько поясов орошения с большим числом форсунок, распыляющих воду равномерно по

сечению. Газ подводится снизу аппарата со скоростью 0,7—1,5 м/с и отводится вверху. Расход воды (обычно 8—10 л/м^3), распределение форсунок и скорость газов выбирается с учетом охлаждения газов до 40—50 °С при увлажнении его до состояния насыщения при условии предотвращения капельного уноса. Форсунки грубого распыла обеспечивают оптимальный для такого процесса диаметр капель $d_к = 0{,}6 \div 1{,}0$ мм. Шлам непрерывно удаляется из аппарата через гидрозатвор в канал — шламопровод. Гидравлическое сопротивление скрубберов не более 150—200 Па. Разновидностью форсуночных скрубберов являются центробежные.

При тангенциальном подводе газа можно повысить эффект очистки. Такие скрубберы в некоторых случаях применяются не только как аппараты для подготовки газа перед тонкой очисткой, но и в качестве основного пылеуловителя. Фракционный коэффициент очистки в них составляет для частиц 5, 10 и 20 мкм соответственно 80, 90, 95 %. Тангенциальный вход газа расположен в нижней части скруббера. Орошение производится не только форсункой во входном патрубке, но и подачей воды на стенку в виде пленки. Укрупненные частицы отбрасываются центробежной силой на стенку и улавливаются стекающей вниз пленкой воды. Условная скорость газа на сечение аппарата принимается 4,5 м/с, скорость во входном патрубке 11—12 м/с, максимальный диаметр 3,3 м, высота $H \approx (3—4)\ D$. Гидравлическое сопротивление центробежного скруббера ВТИ выше и составляет 400—500 Па, при установке дополнительной мокропрутковой решетки во входном патрубке до 800 Па. Удельный расход воды 0,1 л/м^3 газа.

Скрубберы Вентури — наиболее эффективные из всех типов мокрых пылеуловителей и наиболее распространенные в схемах газоочистки промышленных предприятий. Скруббер Вентури состоит из трубы-коагулятора Вентури, в которую вводится орошающая жидкость и каплеуловителя — специального устройства для улавливания капель и вывода шлама. При высокой скорости газа в горловине (100—150 м/с) трубы происходит дробление капель жидкости и осаждение на них частиц пыли. Коагуляции подвергаются практически все и даже частицы размером менее 1 мкм.

На схеме (рис. 100) показано изменение скорости газа и капель по длине трубы Вентури. Отсюда видно, что причина взаимодействия фаз (дробления) и коагуляции частиц на каплях — большая относительная скорость. Максимальное ее значение приходится на участок горловины трубы.

Для случая распыления воды воздухом средний диаметр образующихся капель

$$d_к = \frac{1650}{w} + 9{,}75 \cdot 10^5 \cdot m^{1{,}5} \text{ мкм}, \qquad (95)$$

где w — скорость газа относительно пыли, м/с; m — удельное орошение м³ воды на м³ газа.

Как показывает опыт, эффективность скруббера Вентури растет с увеличением количества капель распыляемой воды и критерия Стокса.

Фракционную эффективность скруббера Вентури можно оценить с помощью эмпирической зависимости

$$\eta_i = 1 - \exp(-mk\,\mathrm{Stk}^{0{,}5}). \qquad (96)$$

где $\mathrm{Stk} = \rho_ч w d_i^2 / 18\mu_г d_к$ критерий Стокса, d_i — диаметр частиц i-той фракции, мкм, k — коэффициент, зависящий от эффективной длины и диаметра горловины $l_{эф}$.

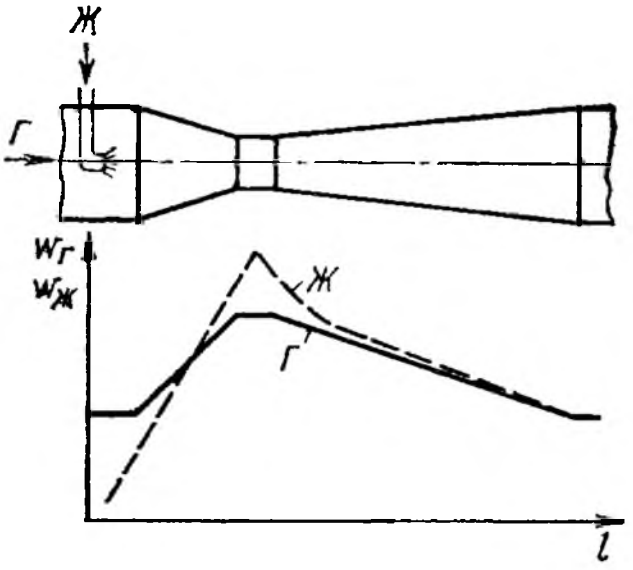


Рис. 100. Схема трубы Вентури

Для $l_{эф} = 100 \div 400$ мм $k = 1{,}25 \div 1{,}56$.

Гидравлическое сопротивление скруббера Вентури складывается из сопротивления двух элементов: трубы Вентури и каплеуловителя. Основную долю составляют потери в трубе Вентури Δp, которые в свою очередь учитывают не только потери «сухой» трубы Вентури, но и потери, обусловленные вводом воды, Па

$$\Delta p = \left(\zeta_с + \zeta_ж \frac{m\rho_ж}{\rho_г}\right) \frac{w^2}{2} \rho_г, \qquad (97)$$

где $\zeta_с$ — коэффициент сопротивления сухой трубы, $\zeta_с = 0{,}12 \div 0{,}30$; $\zeta_ж$ — коэффициент, учитывающий ввод жидкости $\zeta_ж = 0{,}6 \div 1{,}15$.

По гидравлическим характеристикам промышленные скрубберы Вентури условно делятся на высоконапорные и низконапорные. Первые применяются для улавливания высокодисперсной пыли, их гидравлическое сопротивление достигает 10—20 кПа, вторые — как аппараты предварительной очистки газов или для улавливания крупных частиц, их сопротивление не превышает 3—5 кПа.

Существует много конструкций скрубберов Вентури, отличающихся формой сечения горловины, способом ввода жидкостей, устройством регулирования сечения горловины, конструкцией каплеуловителя (рис. 101).

Широкое распространение получают конструкции унифицированного ряда скрубберов с кольцевым сечением горловины, разработанные институтами НИИогаз и Гипрогазо-

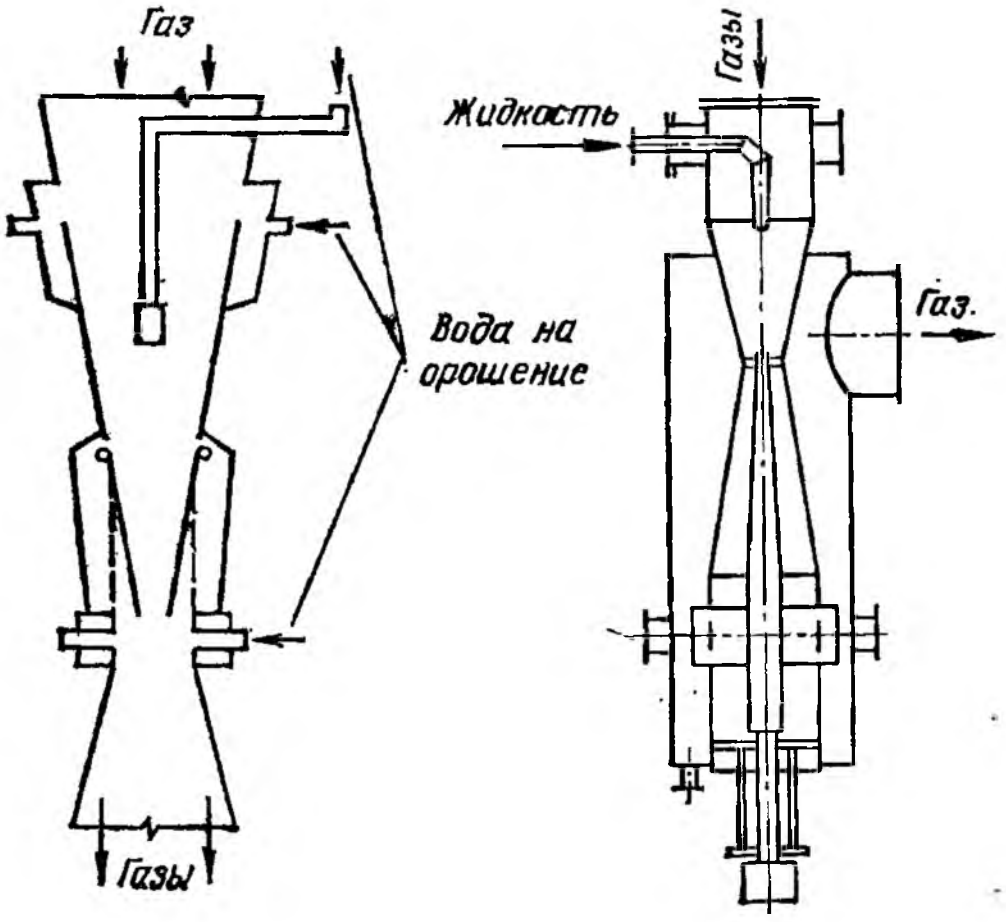


Рис. 101. Трубы Вентури с регулируемой горловиной

очистка. Две модификации этого ряда охватывают производительность по газу от 2 тыс. до 500 тыс. м³/ч. Для всех типоразмеров труб расход орошающей жидкости постоянен для всего диапазона расходов газа и равен 0,8 л/м³.

Центробежные каплеуловители при работе в оптимальном режиме обеспечивают содержание капель в газах на выходе ниже 75—100 мг/м³.

§ 2. Очистка газов доменного производства

В доменном производстве производится технологическая очистка доменного газа и очистка газовых выбросов в атмосферу.

Технологическая очистка доменного газа. Доменный или колошниковый газ получается в процессе доменной плавки

как газообразный продукт окислительно-восстановительной реакции. Газ содержит 30—35 % горючих составляющих (в основном CO) и имеет теплоту сгорания 3,5—4 МДж/м³. Выход газа составляет 2000—2500 м³/т чугуна. Это делает его пригодным к применению в качестве топлива.

Доменный газ на выходе из печи содержит колошниковую пыль, которая состоит из частиц, образованных в результате механического измельчения шихтовых материалов и частиц возгонного происхождения.

При повышенном давлении на колошнике пылевынос составляет 15—20 г/м³; при нормальном давлении 50—60 г/м³ или на 1 т чугуна соответственно 25—75 и 50—150 кг/т.

По размеру пыль относится к грубодисперсным. В ее дисперсном составе массовое содержание частиц размером 100—800 мкм составляет 40—50 %, а частиц размером меньше 20 мкм до 10 %.

Химический состав пыли отражает состав шихты, %: оксиды железа — 33—40, SiO_2 — 8—15, CaO — 10—12, MgO — 4—5, Al_2O_3 — 4—5, C — 30—32.

Как химический, так и дисперсный состав пыли зависит от многих факторов: состава шихтовых материалов, режима ведения плавки, вида выплавляемого чугуна и т. д.

Методы очистки доменного газа. В связи с требованием низкой конечной запыленности доменный газ проходит две—три ступени очистки. Обычно схема газоочистки содержит грубую, полутонкую и тонкую ступени. Каждая ступень состоит из одного—двух типов аппаратов (рис. 102).

Грубая очистка предназначена для улавливания наиболее крупной фракции колошниковой пыли, размером более 100 мкм. Как правило, ее осуществляют в сухих аппаратах — радиальных или тангенциальных пылеуловителях. В аппаратах используется инерционный принцип охлаждения. В радиальном пылеуловителе диаметром 5—8 м грязный газ входит по оси аппарата сверху и удаляется после осаждения крупной пыли также сверху. Частицы выпадают за счет поворота потока на 180° и резкого снижения скорости с 20 м/с в подводящей трубе до 0,6—1 м/с в аппарате. Инерционный эффект складывается с гравитационным. Пыль из бункера удаляется при помощи шнекового барабана, смачиваемого водой. Ступень грубой очистки снижает запыленность доменного газа до 5—9 г/м³, осаждая до 60—70 % колошниковой пыли.

В некоторых схемах газоочистки на печах, работающих без повышенного давления, в ступени грубой очистки при-

меняются тангенциальные пылеуловители. Эффективность их несколько выше, чем у радиальных, но выше и потери давления.

Ступень полутонкой очистки в подавляющем большинстве доменных газоочисток выполняется по мокрой скрубберной схеме в полных форсуночных скрубберах и низконапорных скрубберах Вентури и завершается в дроссельной группе. Процесс сопровождается коагуляцией частиц на каплях.

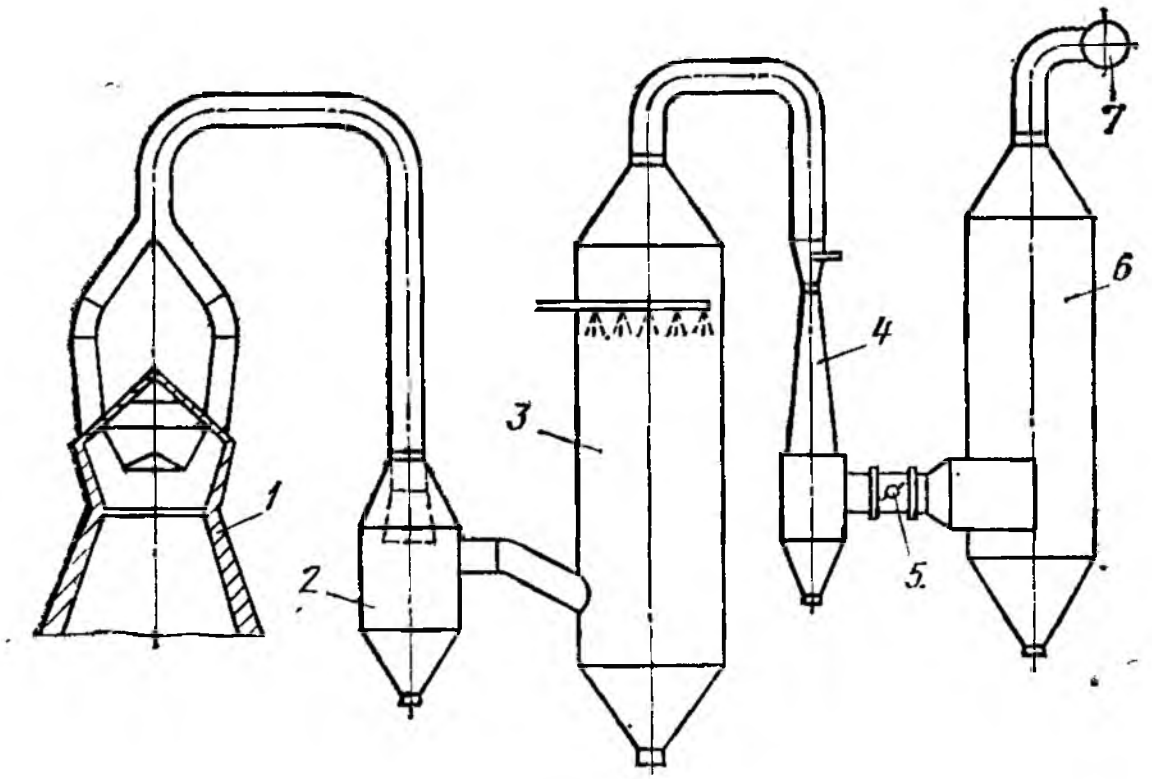


Рис. 102. Схема очистки доменного газа:

1 — доменная печь; *2* — инерционный пылеуловитель; *3* — скруббер; *4* — труба Вентури; *5* — дроссельная группа; *6* — каплеуловитель; *7* — коллектор чистого газа

После этой ступени газ содержит не более 0,5—1 г/м³ пыли размером до 20 мкм. Доменные скрубберы имеют диаметр 6—9 м и высоту 25—30 м. Газ подводится снизу, со скоростью 1—2 м/с проходит скруббер и отводится сверху. Орошение осуществляется с помощью двух—четырех ярусов форсунок, распределенных равномерно по сечению в верхней части скруббера. Удельный расход воды 4—6 л/м³ газа. Очистка газа сопровождается его охлаждением с 250—300 °С до 40—50 °С и полным насыщением влагой. Уловленная пыль в виде шлама выводится через гидрозатвор.

На многих металлургических заводах полутонкая и тонкая очистка завершается в низконапорных скрубберах Вентури. Две — четыре параллельно включенных трубы Вентури с индивидуальными каплеуловителями работают с пере-

падом давления до 5 кПа. Удельный расход воды 0,2—0,5 л/м³, скорость газа в горловине 50—80 м/с.

Тонкая очистка до остаточной запыленности 5—10 мг/м³ может быть достигнута в дроссельной группе, мокром электрофильтре или скруббере Вентури с перепадом 12—15 кПа.

Дроссельная группа, предназначенная в первую очередь для регулирования давления на колошнике доменной печи, устанавливается на горизонтальном участке газопровода и состоит из четырех дроссельных клапанов, перед которыми имеется подвод воды. При подаче 0,4—0,6 л/м³ в дроссельной группе протекает процесс подобный процессу в трубе Вентури. При перепаде давления 20—25 кПа скорость в дросселях достигает 200—250 м/с, в результате чего после каплеуловителя остаточная запыленность доменного газа не выше 2—5 мг/м³. Недостаток — высокие невосполнимые потери давления доменного газа.

В более экономичных схемах газоочисток с применением турбин ГУБТ, роль гидравлического сопротивления выполняет вместо дроссельной группы турбина. Тонкая очистка газа при этом идет в электрофильтрах типа ДМ. Трубчатый, однозонный, мокрый с вертикальным ходом газа электрофильтр обеспечивает не только высокую степень очистки от пыли, но и осушку газа. На случай остановки турбины предусматривается байпасная линия с дроссельной группой.

По техническим условиям работы ГУБТ температура газа на входе не должна быть ниже 100 °С. В связи с этим газ после мокрой очистки приходится подогревать в смесительных теплообменниках.

Перспективной является сухая схема газоочистки, при которой температура газа достаточно высока.

В проектах сухих схем, которые близки к реализации, тонкая очистка газа идет в горизонтальных пластинчатых электрофильтрах, работающих при повышенном давлении и температуре, или в тканевых рукавных фильтрах, а полутонкая — в сухих механических (центробежных) аппаратах.

Наибольшее распространение в мокрых схемах газоочистки имеет оборотная система водоснабжения. На 1000 м³ очищаемого газа образуется 4—6 м³ сточных вод. Общее количество сточных вод, образующихся от смыва осыпи и пыли, составляет 300—360 м³/ч на каждую доменную печь. Общий расход воды на очистку доменного газа крупного металлургического завода составляет 10 % общего водопо-

требления завода или около 10 тыс. м³/ч. Вода, выходящая из аппаратов, выносит уловленную пыль и содержит растворенные газовые компоненты. Оборотный цикл водоснабжения включает сооружения для осветления воды (радиальные отстойники, гидроциклоны), охлаждения и нейтрализации воды, насосы для перекачки воды и сооружения для переработки шлама.

Очистка вредных выбросов в атмосферу. Причиной загрязнения атмосферы в доменном цехе являются неорганизованные выбросы. Среди основных видов вредностей —

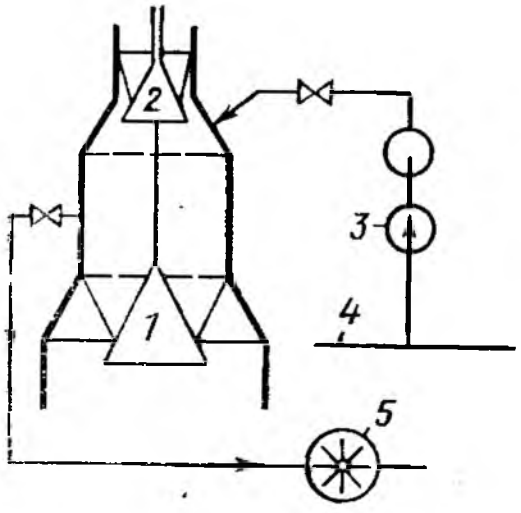


Рис. 103. Схема подавления выбросов из межконусного пространства:

1 — большой конус; *2* — малый конус; *3* — компрессор; *4* — газопровод получистого газа; *5* — скруббер

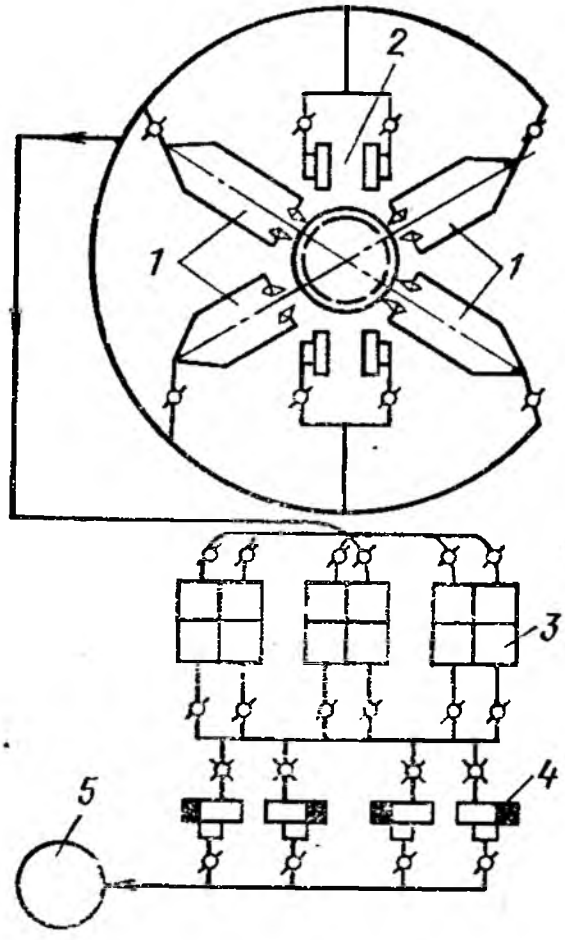


Рис. 104. Схема аспирации литейного двора:

1 — отсос от леток; *2* — отсос от разливочных ковшей; *3* — сухой электрофильтр; *4* — дымосос; *5* — дымовая труба

пыль и окись углерода, которые поступают с выбросами колошникового газа из межконусного пространства, а также выброс пыли на тракте движения сырья, в подбункерном помещении и при движении продуктов плавки на литейном дворе.

Выброс колошникового газа в атмосферу происходит в момент ссыпки скипа в приемную воронку колошника и выпуска газа из межконусного пространства. Валовые выбросы достигают 4 кг/т чугуна по пыли и 2 кг/т по CO.

Радикальным средством подавления этого выброса является подача компремированного газа в межконусное пространство с давлением больше, чем в печи (рис. 103). В ре-

зультате чего, туда в момент открытия большого конуса не поступает газ из печи. А при открытии малого конуса в атмосферу выбрасывается чистый газ.

Второе место по валовым выбросам занимают аспирационные системы подбункерных помещений. Выброс пыли в узлах пересыпки сыпучих в вагон-весы и скип и через трубы аспирационных систем достигает 1200 г/т чугуна, а запыленность воздуха в подбункерном помещении доходит до 500 мг/м³. Существенное улучшение достигается при переходе на транспортерную подачу сырья, при герметизации узлов пересыпки и совершенствовании систем аспирации. Опыт показывает, что на печах объемом 2000 и 5000 м³ выбросы удается сократить до 100 г/т чугуна.

Очистку воздуха аспирационных систем чаще выполняют в скрубберах, эффективность которых достигает 90—95 %.

Основные выделения пыли и газов на литейном дворе образуются вблизи леток, желобов и мест слива в ковши (рис. 104).

Средняя концентрация пыли в воздухе вблизи желоба в период выпуска чугуна составляет 150—1500 мг/м³, размер частиц $d_m = 15 \div 20$ мкм. Валовый выброс, поступающий в воздушный бассейн через фонари здания и аспирационную систему, составляет: пыли 0,4—0,7 кг/т, оксида углерода 0,7—1,0 кг/т.

Объем поступающего на очистку аспирационного воздуха литейного двора крупных печей достигает 1 млн. м³/ч. Очистку производят в сухих электрофильтрах.

Сокращения неорганизованных выбросов можно достичь, повышая газоплотность печи, арматуры и трубопроводов, совершенствуя конструкции укрытий желобов и леток, схему промышленной вентиляции.

§ 3. Очистка газов в сталеплавильном производстве

Очистка отходящих газов мартеновских и двухванных печей

Характеристика запыленности отходящих газов. Основная доля вредных выбросов в атмосферу поступает с отходящими газами. Отходящие газы состоят из продуктов сгорания топлива, газообразных продуктов реакций, протекающих в ванне, газовыделений из нагреваемой шихты и большого количества высокодисперсной пыли. Газовый тракт печи до газоочистки имеет большую протяженность и включает та-

кие элементы, как вертикальные каналы печи, шлаковик, регенераторы, боров и котел-утилизатор. В связи с неплотностью стен газового тракта, который находится под разрежением, по тракту имеют место значительные подсосы воздуха. Это приводит к тому, что количество, состав, запыленность и температура газов перед газоочисткой существенно отличаются от начальных, на выходе из печи. В среднем на 1 т стали величина выбросов газов равна 2800 м³/т при температуре 290 °С. Температура газов снижается с 600—700 °С на выходе из печи до 250—300 °С перед газоочисткой.

Средний состав газов при подаче кислорода в факел: %: CO_2 10—15, H_2O 16—17, O_2 6—7, остальное N_2.

Запыленность газов меняется по ходу плавки и резко возрастает с увеличением расхода кислорода на продувку ванны. Кроме того, на пылеобразование заметное влияние оказывает конструкция и число кислородных фурм, температура металла, скорость выгорания углерода и т. д.

В периоды завалки и прогрева шихты запыленность составляет 1,5—3 г/м³. Пыль крупная, образованная в результате механического и термического разрушения железной руды, известняка и других материалов. Основной вынос пыли происходит в период плавления, когда идет продувка ванны кислородом. Максимальная запыленность 50 г/м³ соответствует середине периода продувки. Пыль возгонного происхождения.

Усредненный дисперсный состав пыли: частиц размером менее 1 мкм содержится 60 %, размером 1,5 мкм — 34 %, размером более 5 мкм — 6 %. Средний медианный размер d_{50} 0,2—0,4 мкм.

Основная часть — оксиды железа. Цвет дыма — бурый.

В период доводки и последующей полировки, несмотря на продувку кислородом, запыленность составляет не более 4—8 г/м³.

Удельные выбросы пыли 5—8 кг/т стали. Запыленность газов и дисперсный состав пыли изменяются по мере движения по тракту от печи до газоочистки. Больше половины всей массы пыли осаждается в шлаковике и регенераторах.

На входе в газоочистку запыленность газов во время продувки кислородом 3—6 г/м³, а между продувками составляет 0,4—0,7 г/м³. Примерный химический состав пыли, соответствующий периоду продувки, %: Fe_2O_3 92,7 %, Al_2O_3 0,9 %, CaO 1,65 %, MgO 0,9 %, MnO 1,1 %, SiO_2 0,8 %.

Удельное электрическое сопротивление пыли 10^7—10^{10} Ом·см при температуре 20—300 °С, т. е. пыль по УЭС

относится ко второй группе пылей, которые хорошо улавливаются в электрофильтрах.

Среди других вредностей газы мартеновской плавки содержат 200—400 мг/м³ оксидов азота, т. е. больше, чем в любом другом металлургическом переделе, и 30—50 мг/м³— оксидов серы, выброс которых длится 10—30 % времени плавки.

Схемы мартеновских газоочисток. За всеми крупными печами газы проходят охлаждение в котлах-утилизаторах и очищаются от пыли перед выбросом в атмосферу в скрубберах Вентури или электрофильтрах (рис. 105). Газовый тракт при этом является ступенью грубой очистки, где осаждается крупная фракция пыли.

В схемах с мокрой очисткой устанавливаются блоки высоконапорных труб Вентури цилиндрического или прямоугольного сечения с регулируемым сечением горловины.

Плотность орошения в трубах поддерживается на уровне 1,0—1,3 л/м³.

Опыт применения электрофильтров типа УГ показал высокую степень очистки 98—99 %. Отсутствие специального цикла оборотного водоснабжения, меньшие удельные энергозатраты на очистку, невысокие эксплуатационные расходы, делают схему сухой электроочистки более выгодной, чем мокрая.

Схема газоочисток двухванных печей. Количество отходящих газов двухванных сталеплавильных агрегатов на 1 т выплавляемой стали примерно соответствует мартеновскому производству. В связи с более высокой интенсивностью продувки кислородом содержание пыли несколько больше, чем в мартеновских газах. Объемный расход газов в тракте увеличивается примерно в 4 раза. Связано это с тем, что в связи с отсутствием регенераторов, газы двухванных печей после шлаковика при температуре 1400—1500 °С охлаждаются вначале впрыском воды в боров до 900—1000 °С, а затем организованным подсосом холодного воздуха через специальные люки до 700 °С.

Как химический, так и дисперсный состав пыли, в которой частиц фракции до 3 мкм более 70 %, мало отличаются от мартеновской.

В связи с этим схемы газовых трактов двухванных печей, как и мартеновских, выполняются со скрубберами Вентури или с электрофильтрами типа УГ или ЭГА.

На некоторых заводах охлаждение газов с 700 °С до 200—250 °С перед подачей в электрофильтр осуществляется в испарительном форсуночном скруббере. Запыленность га-

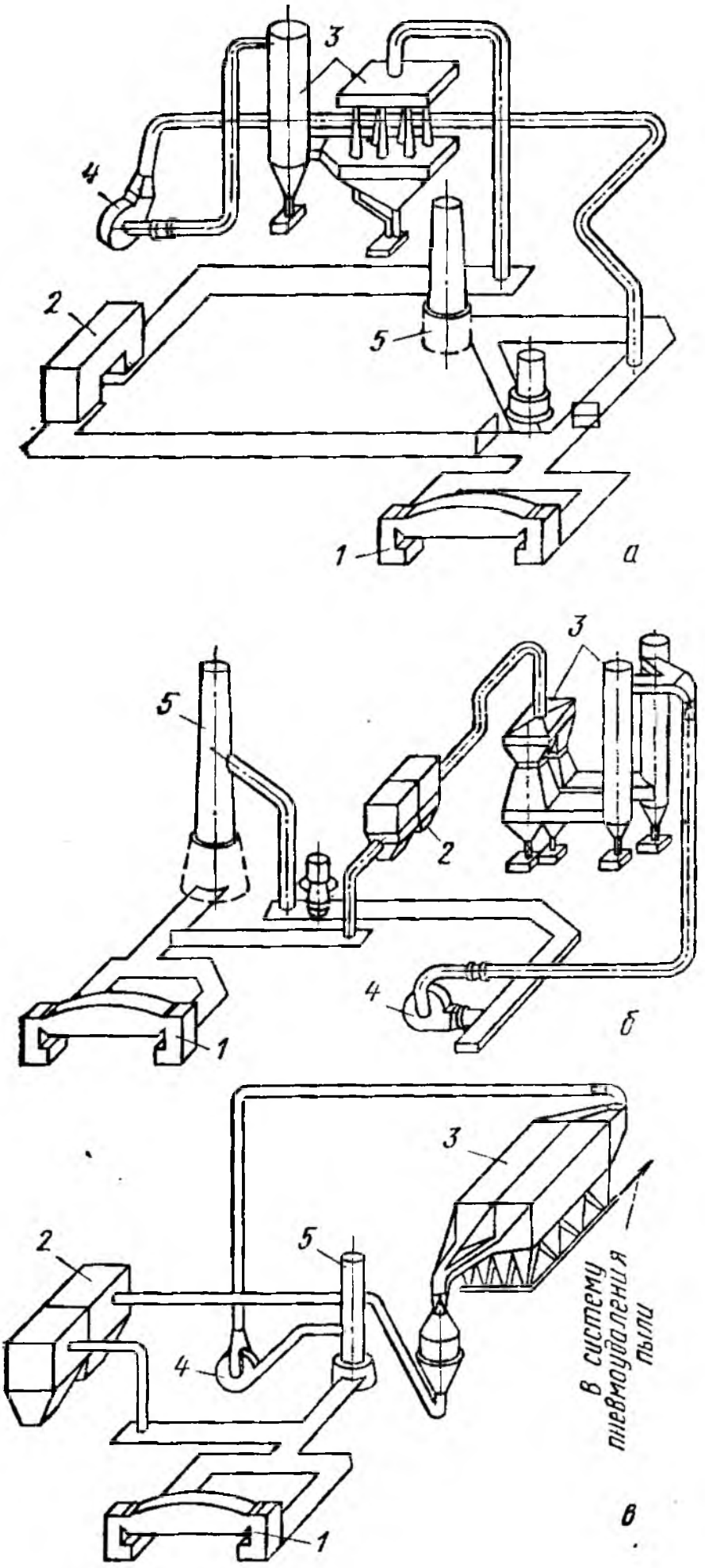


Рис. 105. Схемы мартеновских газоочисток:

а — с блоком круглых труб Вентури; *б* — с прямоугольными трубами Вентури; *в* — с сухим электрофильтром; *1* — печь; *2* — котел-утилизатор; *3* — газоочистка; *4* — дымосос; *5* — дымовая труба

зов перед скруббером или котлом-утилизатором примерно 7—8 г/м³, после очистки на выходе из дымовой трубы — 90—100 мг/м³.

Очистка конвертерных газов

Состав и количество отходящих газов зависит от способа отвода (с дожиганием или без дожигания CO) и конструкции охладителя газов.

Удельный расход газов для различного состава шихты и флюсов находится в пределах 70—90 м³ на 1 т стали. В зависимости от интенсивности продувки кислородом удельные выбросы составляют от 13 до 25 кг/т при подаче руды и 21—32 кг/т при подаче руды и лома. Дисперсный состав пыли также зависит от интенсивности продувки. При увеличении подачи кислорода с 3 до 6 м³/т мин количество крупной фракции увеличивается вдвое. Способ отвода — с дожиганием или без дожигания CO — практически не сказывается на составе пыли. К концу продувки содержание мелких фракций пыли растет. Пример динамики весового распределения частиц пыли в период продувки дан в табл. 14 (по данным ВНИПИЧерметэнергоочистка).

Плотность пыли 4,0 г/см³.

Основная масса пыли перед газоочисткой при полном дожигании состоит из Fe_2O_3, а при частичном дожигании из FeO. Средняя концентрация пыли в конвертерных газах составляет 150—350 г/м³. При любом способе отвода и охлаждения газов газоочистка должна снизить концентрацию пыли на выходе из трубы до такого уровня, чтобы ее концентрация в приземном слое не превышала санитарную норму (ПДК).

При отводе газов по схеме без дожигания содержание CO более 85 %. Высокая вероятность образования взрывоопасных концентраций газа послужила тому, что около 80 % всех кислородно-конвертерных цехов были оборудованы схемами мокрой газоочистки.

Таблица 14. Дисперсный состав пыли перед газоочисткой при полном дожигании CO

Период продувки, мин	Содержание фракций, мкм, % по массе			
	0—3	3—60	60—250	более 250
1—5	60	15	15	10
8—14	82	3	5	10
18—22	86	5,5	5	3,5

Схема мокрой газоочистки. Основными аппаратами мокрых схем газоочистки являются скрубберы-охладители, скрубберы Вентури с различного рода сепараторами капель, а также мокрые электрофильтры.

Первой ступенью газоочистки мокрого или сухого типа, как правило, является скрубберный охладитель — полый цилиндр с форсунками по высоте и бункером внизу. Они широко применяются при температуре газов перед аппаратом достигающей 600—700 °С, а в некоторых случаях и 1200—1400 °С. В процессе охлаждения газов в них одновременно идет и осаждение крупных фракций пыли. В зависимости от количества воды, идущей на охлаждение, скрубберы делятся на водяные и испарительные.

Водяные срубберы выполняются по прямоточной и противоточной схеме. Роль прямоточного скруббера иногда играет наклонная часть газоотводящего тракта, в верхней части которого производится впрыск воды. Газ и вода движутся в одном направлении. Температура воды в такого рода скрубберах всегда ниже температуры газов. Интенсивность орошения до 5—8 кг/м^3, скорость газов 12—20 м/с, температура газов на выходе до 60—80 °С.

В противоточных вертикальных цилиндрических скрубберах скорость газов принимают 1,5—2 м/с при температуре газов на выходе. В зависимости от температуры газов на входе стенки скруббера футеруются или нет. Например, после радиационного котла-охладителя температура газов на входе в скруббер достигает 1100—1300 °С, а это требует защиты металла футеровкой. Плотность орошения в водяных скрубберах достигает 15—20 кг/м^3.

В испарительных скрубберах количество подаваемой воды таково, что вся вода испаряется, охлаждая тем самым газ до 70—250 °С. Такие аппараты часто устанавливают перед высоконапорной трубой Вентури.

В скрубберах Вентури малого сопротивления (2—4 кПа) в результате адиабатного расширения в конфузоре капли испаряются, при этом происходит быстрое пересыщение водяного пара, а затем в горловине и диффузоре трубы — медленная конденсация. Пар конденсируется на частицах пыли, ускоряя их коагуляцию. Наибольший эффект пылеулавливания достигается в тех случаях, когда на выходе из трубы Вентури температура газов близка температуре точки росы 70 °С. Расчетная скорость в горловине труб 40 м/с. При отклонении от расчетного режима эффект конденсации снижается.

Высоконапорные скрубберы Вентури (8—15 кПа) в кон-

вертерных схемах имеют разнообразное конструктивное решение. От батареи из нескольких десятков малых труб с диаметром горловины 90 мм до одиночных труб большого диаметра. По условиям обслуживания схемы с одиночными трубами более удобны и надежны в эксплуатации. В схемах с отводом газов без дожигания трубы выполняют с регулируемым сечением горловины. Независимо от расхода газов в таких трубах можно поддерживать постоянную скорость в горловине.

В схемах очистки газов конвертеров емкостью 300 т и выше применяются прямоугольные трубы Вентури, сечение горловины которых регулируется подвижными створками. Орошение пленочное по периметру с подачей воды в переливные карманы и с помощью форсунок, расположенных по центру трубы (рис. 106).

В мокрых схемах газоочистки при отводе с дожиганием CO есть опыт применения в качестве второй ступени очистки мокрых электрофильтров. Предварительно перед электрофильтром газы охлаждаются в скруббере до температуры полного насыщения влагой 70 °С. Электрофильтр с трубчатыми осадительными электродами (448 труб диаметром 245 мм) при скорости газов около 2,5 м/с обеспечивает степень очистки до 99 %. Электрофильтры такого типа нуждаются в надежной системе обмывки электродов во избежание наростов пыли и связанных с этим электрических пробоев.

Отличительной особенностью и недостатком мокрых схем является необходимость создания оборотной системы воды с очисткой шламовых вод. Это значительно увеличивает стоимость очистки газа в простых аппаратах мокрой схемы. Вместе с тем это стимулирует разработку надежных схем и аппаратов сухой очистки, лишенных недостатков мокрых схем.

Схемы сухой очистки газов. Схемы основаны на сухих электрофильтрах и тканевых рукавных фильтрах. Сухие электрофильтры в схемах конвертерных газоочисток на отечественных заводах еще не применялись. Сухие электрофильтры применяются не только в схемах с полным дожиганием, но и в схемах с частичным ($\alpha=0{,}3$) или без дожигания. Перед подачей в электрофильтр газ кондиционируют впрыском воды.

Взрывобезопасность системы обеспечена рядом конструктивных особенностей аппарата. Корпус цилиндрического сечения диаметром 9,7 м без пылевых бункеров, что предотвращает образование застойных зон. Пыль удаляется

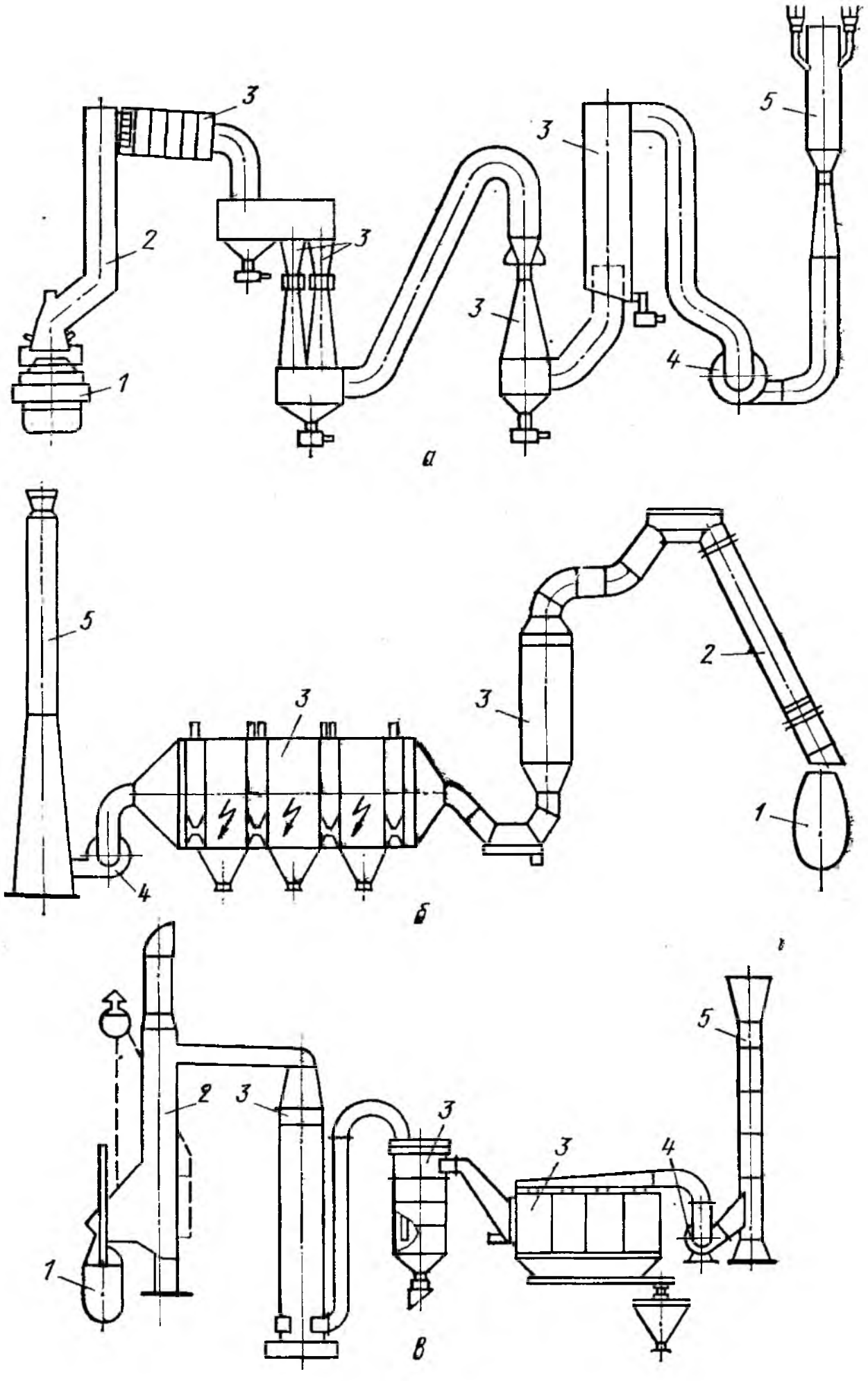


Рис. 106. Схемы конвертерных газоочисток:

а — отвод без дожигания с очисткой в двух ступенях скруббера Вентури; *б* — очистка в сухом электрофильтре; *в* — очистка в тканевых фильтрах; *1* — конвертер; *2* — ОКГ; *3* — газоочистка; *4* — дымосос; *5* — труба

Таблица 15. Показатели работы мокрой и сухой газоочистки

Параметр	Вторая ступень газоочистки	
	электрофильтр сухого типа	скруббер Вентури
Емкость конвертера, т	200	200
Продолжительность плавки, мин	40	40
Продолжительность продувки кислородом, мин	16	16
Расход газов, м³/ч	130×10^3	130×10^3
Потери давления кПа	1,5	18
Потребление электроэнергии в течение плавки, кВт·ч:		
дымососами	66	998
насосами	20	93
электрофильтром	93	—
установкой очистки сточных вод	—	67
Расход воды в течение плавки, м³:		
на испарение	15	19
со шламом и на продувку	—	20

конвейером периодически, между продувками кислородом. Снаружи фильтр покрыт теплоизоляцией, что обеспечивает стабильность температуры газов (около 200 °С). Корпус рассчитан на возможные взрывы газовой смеси с резким возрастанием давления до 200 кПа. Опыт промышленной эксплуатации показал, что такого уровня давления во время хлопков не достигается. Кроме того, на крышках корпуса предусматриваются предохранительные клапаны на 2 кПа.

Три электрических поля состоят из 30 рядов С-образных осадительных и игольчатых коронирующих электродов. Скорость газов в аппарате 1,5 м/с, напряжение 45—60 кВ при плотности тока 0,3—0,5 мА/м². При входной запыленности до 100 г/м³ степень очистки достигает 99,9 %.

Сравнение мокрых и сухих схем чаще говорит в пользу последних. В табл. 15 для примера приведены эксплуатационные показатели двух схем очистки газа с использованием в качестве второй ступени скруббера Вентури и сухого электрофильтра.

Срок окупаемости капитальных затрат на сухую очистку 1—2 года.

Для очистки конвертерных газов за рубежом начинают применять тканевые рукавные фильтры (рис. 106, *в*). Ин-

терес к ним возник в связи с получением тканей требуемых свойств.

В одном из фильтров с использованием материала ткани типа «тергаль» удалось обеспечить остаточную запыленность до 20 мг/м³ при температуре до 145 °С за 50 т конвертером. Система регенерации — встряхиванием.

К недостаткам рукавных фильтров относятся большие габариты аппаратов, связанные с низкой удельной нагрузкой на ткань, и повышенный расход электроэнергии на 1 т выплавленной стали.

Очистка газов электросталеплавильных печей

Количество и состав газов, образующихся в процессе плавки в дуговых печах зависит от состава шихты и количества подаваемого интенсификатора — кислорода.

Отходящие газы дуговых электропечей отводятся одним из трех способов: от четвертого отверстия в своде, через арку рабочего окна или от зонта, расположенного над печью. В зависимости от способа отвода в газоотводящий тракт печи подсасывается различное количество воздуха, что сказывается на составе и концентрации пыли в газе. Устранить подсосы полностью невозможно, так как при подъеме и повороте свода и наклоне ванны, герметичность газового тракта нарушается. Кроме того, подсос необходим для дожигания CO. Удельный выход газов при отсосе через четвертое отверстие в своде составляет 80—110 м³/т, а при отводе под зонт 350—450 м³/т. В отходящих газах содержится, %: CO 15—25; CO_2 5—11; H_2 0,5—3,5; O_2 3,5—10.

Средняя концентрация пыли в газах составляет 15—30 г/м³, а удельный вынос пыли 6,5—9,5 кг/т стали. Причем, меньшие значения соответствуют печам максимальной емкости — более 100 т, а большие значения — печам емкостью 5 т. Период максимального пылевыделения длится около 30 мин. Основная масса пыли (до 70 %) с размером частиц до 3 мкм, и состоит на 60—80 % из оксидов железа.

Дисперсный состав пыли по периодам плавки меняется мало. Пример дисперсного состава при плавке хромистых и среднеуглеродистых сплавов приведен в табл. 16.

Для пыли электросталеплавильных печей характерно высокое удельное электросопротивление до 10^{11} Ом·см.

Кроме оксидов углерода в составе отходящих газов содержатся оксиды азота до 300 г/т стали.

В связи с большой величиной подсосов по газовому тракту и под зонт, приходится увеличивать размеры газо-

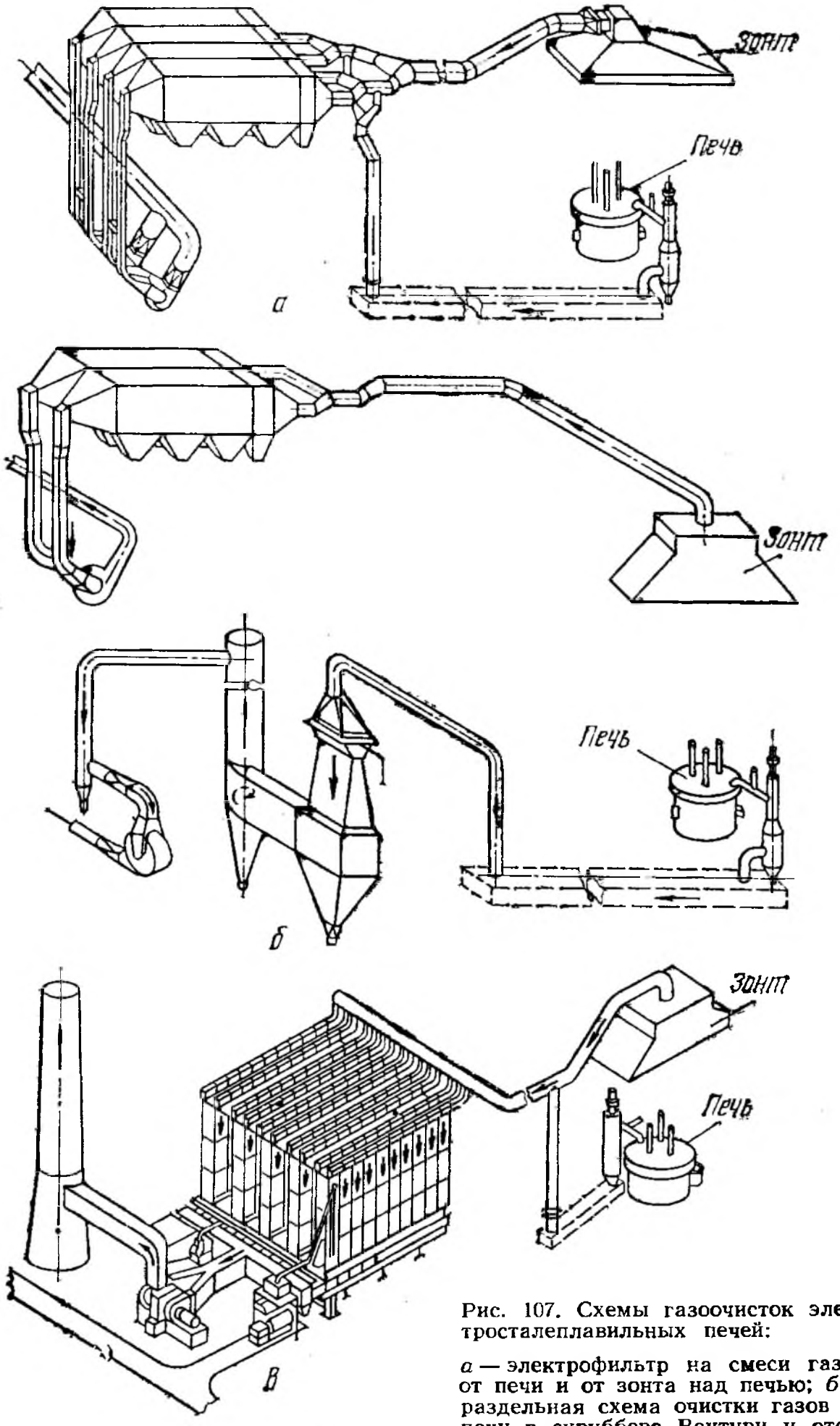


Рис. 107. Схемы газоочисток электросталеплавильных печей:

а — электрофильтр на смеси газов от печи и от зонта над печью; *б* — раздельная схема очистки газов от печи в скруббере Вентури и отсоса от зонта в электрофильтре; *в* — рукавный фильтр на смеси газов от печи и от зонта

Таблица 16. Дисперсный состав пыли ДЭСП по периодам плавки

Период плавки	Количество частиц, % (по массе) по фракциям, мкм			
	0,0—0,7	0,7—7,0	7,0—80,0	более 80,0
Расплавление	47,9	29,9	15,5	6,7
Продувка	42,2	35,5	15,7	6,6
Доводка	44,5	30,6	13,5	11,4

очистки, мощность дымосомов и т. д. Поэтому одной из наиболее важных задач является задача сокращения объема газов, идущих на очистку. Для этого же применяются специальные уплотнения электродных зазоров и рабочих окон.

В большинстве случаев схема газоочистки дуговых электропечей состоит из ступени предварительного охлаждения газов и последующей тонкой очистки (рис. 107).

Опыт очистки газов в сухих электрофильтрах пока не велик. Причина в небольших расходах газов и трудности улавливания высокоомной пыли. Однако опыт установки электрофильтра за крупной (200 т) печью показал целесообразность их применения на печах такой емкости.

Хорошие результаты дает вариант с комбинированной схемой газоочистки. Газы, отводимые от четвертого отверстия в своде печи после дожигания CO и охлаждения в скруббере, подаются вентилятором на группу высоконапорных труб Вентури с центробежным сепаратором-каплеуловителем. Разбавленные газы неорганизованных выбросов, поступающие под зонт над печью, очищаются отдельно в тканевом рукавном фильтре.

Перспективной для большегрузных печей (150—250 т) является схема с укрытием всей печи в специальный кожух. Для снижения температуры поток горячего газа от подсводового пространства смешивается с газом из-под кожуха. Затем газо-воздушная смесь с температурой не выше 130 °С объемом 500—550 тыс. м³/ч поступает на очистку в рукавные фильтры.

§ 4. Очистка газов в ферросплавном производстве

Для производства ферросплавов применяются электродуговые рудовосстановительные печи. В плавильной зоне возле электродов температура достигает 2000 °С, при которой многие компоненты шихты переходят в парообразное состояние. В результате конденсации паров образуются вы-

сокодисперсные частицы пыли. На долю частиц возгонного происхождения размером до 2 мкм приходится основная масса образующейся пыли. Концентрация пыли в зоне тигля, т. е. в зоне ее образования, составляет 100—400 г/м³. Основная часть пыли осаждается в слое шихты в процессе фильтрации газа и уже на выходе из колошника ее содержится 15—40 г/м³.

Большинство видов ферросплавов успешно выплавляется в печах, закрытых сводом. Однако такие ферросплавы, как силикокальций и ферросилиций с содержанием кремния 75 % и 90 %, выплавляют в открытых печах. В этом случае на колошнике при соединении с атмосферным воздухом происходит догорание горючих компонентов реакционных газов. Количество отходящих газов в связи с этим увеличивается в несколько десятков раз по сравнению с закрытой печью, а концентрация пыли снижается до 0,5—5 г/м³.

В закрытой печи количество газов, образующихся в зоне реакции, определяется видом выплавляемого сплава, энергетическим режимом работы печи, а также ее габаритами, и составляет примерно 100—270 м³/ч из расчета на 1 МВт мощности. Газы закрытых печей в связи с их высокой теплотой сгорания (8—10 МДж/м³) можно использовать в качестве топлива или подать на дожигание на свечу. Для этого их предварительно очищают от пыли. Газы открытых печей отводят с помощью зонта и подают на газоочистку, где они очищаются до санитарных норм.

В промышленных системах очистки газов рудовосстановительных печей нашли применение все наиболее эффективные пылеулавливающие аппараты: скрубберы Вентури, тканевые и электрофильтры. Выбор системы пылеулавливания определяется условиями производства: конструкцией печи, видом ферросплава, местными условиями и т. п.

Очистка газов открытых печей. На ферросплавных заводах за открытыми печами применяют газоочистки, схемы которых подобны приведенным на рис. 107. Газо-воздушная смесь отводится через укрытие — зонт с температурой 200°—300 °С и запыленностью 1—3 г/м³. Далее газы проходят аппараты мокрой или сухой очистки.

Для улавливания высокодисперсной пыли требуется установка высоконапорных скрубберов Вентури с перепадом давления до 15 кПа. Большой расход газов, поступающих на очистку, требует установки нескольких аппаратов и повышенных расходов воды.

Как показал отечественный и зарубежный опыт, для

открытых печей более экономичным оказывается применение сухих методов очистки газа в рукавных фильтрах и в электрофильтрах. В схемах с электрофильтром применяют специальную подготовку газов. Для снижения высоких значений УЭС пыли, чем отличается пыль ферросплавов, а также для улучшения работы электрофильтров производят кондиционирование газа впрыском воды или подачей пара до 20 % влажности либо аммиака.

Рукавные фильтры удовлетворительно работают при максимальной нагрузке на ткань не более 0,6 $м^3/м^2 \times$ $\times$мин. В связи с этим приходится применять фильтры с большим количеством рукавов. Фильтрующий материал—стеклоткань графитизированная и обработанная силиконом. Эффективность пылеулавливания сухих аппаратов не менее 99 %.

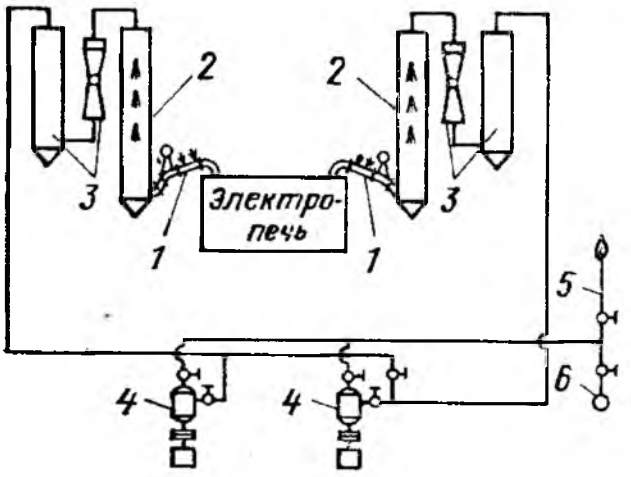


Рис. 108. Схема отвода и очистки газов закрытой ферросплавной печи:

1 — орошаемый газоход; *2* — форсуночный скруббер; *3* — скруббер Вентури; *4* — дымосос; *5* — свеча; *6* — газопровод

Очистка газов закрытых печей. Для этого типа печей применение мокрых систем очистки газов, работающих с оборотной схемой водоснабжения, является наиболее рациональным. С целью равномерного отвода газа на своде устанавливается два, три и более газоотводящих патрубка. От каждого из них газ поступает на отдельную газоочистку. Это дает возможность производить ремонт газоочистки на работающей печи.

Применяется двухступенчатая очистка газа. В первую ступень входит наклонный орошаемый газоход и полый форсуночный скруббер или низконапорная труба Вентури (рис. 108). Наклонный газоход диаметром 400 мм и длиной 3—4 м орошается форсунками. Температура газа снижается до 60—80 °С, а запыленность на 30—50 %. В форсуночном скруббере происходит конденсация водяных паров, снижается температура газов до 30—40 °С, а запыленность до 2—4 $г/м^3$. В случае применения низконапорной трубы Вентури (2—3 кПа) удается уменьшить габариты установки и расход воды.

Окончательная очистка газа осуществляется в скруббере Вентури второй ступени при перепаде давления 12—20 кПа. В горловине трубы скорость газа достигает 120—

150 м/с, что приводит к интенсивной коагуляции частиц пыли. В качестве каплеуловителя применяют центробежный прямоточный циклон, скорость газа в свободном сечении которого составляет 4—5 м/с. В конструкции трубы Вентури предусматривается возможность регулирования сечения горловины. Это позволяет поддерживать перепад в горловине на заданном уровне. Газоочистки работают эффективно и обеспечивают концентрацию пыли на выходе 20—40 мг/м^3.

В качестве тягодутьевого оборудования на ферросплавных печах закрытого типа применяются ротационные газодувки и турбогазодувки, производительностью до 24 тыс. м^3/ч. На некоторых заводах успешно применяются водокольцевые вакуум-насосы, которые могут работать на запыленном газе без забивания пылью.

Опыт сухой очистки газов закрытых печей отсутствует. Одной из причин этого является трудность поддержания давления под сводом на уровне 1—5 Па при существующей системе регенерации рукавных фильтров. Для предварительного охлаждения газов перед фильтром пригоден лишь скруббер полного испарения с тонким распылом жидкости. При этом остается опасность залипания рукавов, их недолговечность. Эти и другие причины сдерживают применение сухих методов очистки.

Очищенный в мокрой газоочистке газ отводится потребителю, где он используется как топливо, а большей частью дожигается на свече перед выбросом в атмосферу.

Глава VIII ТОПЛИВНЫЕ ПЕЧИ И КОНВЕРТЕРЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

§ 1. Классификация и общая характеристика тепловой работы печей

Классификация печей

Классификация печей по принципу теплогенерации

Тепловыделение в печах представляет собой процесс превращения какого-либо вида энергии в тепловую энергию. Источниками получения тепла являются: а) химическая энергия топлива (топливные печи); б) химическая энергия жидкого металла или шихты; в) электрическая энергия.

Превращение химической энергии топлива в тепловую происходит в результате сгорания топлива в так называемых топливных печах. В металлургии к таким печам относятся пламенные печи и печи, работающие по слоевому режиму. Рабочее пространство пламенных печей только в очень малой степени заполнено обрабатываемым материалом, который обычно располагается на поду. Основная часть рабочего пространства заполнена пламенем и раскаленными дымовыми газами, передающими тепло материалу. Подобные печи работают на газообразном и жидком топливах.

Кроме пламенных, сжигание топлива осуществляется в печах, работающих по слоевому режиму, который обычно применяют при обработке кускового материала. Чаще всего это происходит в вертикальных (шахтных) печах, где материал либо распределяется по всему объему и раскаленные газы проходят между его кусками, либо частицы его распределены в газообразном теплоносителе. Для слоевого режима работы печей характерно тесное переплетение всех трех видов теплопередачи (тепловое излучение, конвекция, теплопроводность). Разделить их часто не представляется возможным.

Известны три разновидности слоевого режима: с плотным, кипящим и со взвешенным слоем обрабатываемого материала.

В печах с плотным (фильтрующим) слоем шихта, в состав которой входит и твердое кусковое топливо, расположена плотным слоем по всему объему печи и медленно продвигается вниз. Раскаленные газы — продукты сгорания топлива проходят через слой между отдельными его кусками. Это наиболее распространенный режим работы слоевых печей. Он характерен для шахтных печей, широко распространенных в металлургии.

В печах с взвешенным слоем слой под динамическим действием газов находится в разуплотненном состоянии и энергично перемешивается.

В таких печах может выгорать как размельченное топливо, так и горючие компоненты, содержащиеся в обрабатываемой шихте. Иногда вместе с воздухом подают газообразное топливо. Широкое использование печи с кипящим слоем получили в цветной металлургии для обжига сульфидных концентратов различных металлов, для сушки и кальцинации глинозема.

В печах, работающих со взвешенным слоем, обрабатывают материалы, доведенные до пылевидного состояния.

При этом мелкие частицы материала отделены друг от друга газовой прослойкой и, будучи «взвешены», движутся вместе с ним. В качестве топлива может использоваться размолотое твердое и газообразное топливо. В печах цветной металлургии широко используется тепло горения серы при плавке сульфидов цветных металлов.

Как в черной, так и в цветной металлургии широко распространены печные агрегаты, в которых источником получения тепловой энергии является процесс выгорания элементов, заключенных в обрабатываемом металле или в проплавляемой шихте. В черной металлургии таким основным элементом является углерод, который выжигается из чугуна при производстве стали в конвертерах.

Во всех этих агрегатах процесс теплогенерации происходит непосредственно в материале или в объеме, заполненном размельченной шихтой и поэтому органически сочетается с принятой технологией, причем выделяющееся тепло равномерно распределяется по всей массе обрабатываемого материала.

Существуют и такие печи, в которых тепловыделение обусловлено и химической энергией топлива, и химической энергией жидкого металла. К таким печам, занимающим промежуточное положение между топливными печами и конвертерами, относятся мартеновские печи. В этих печах топливо сгорает над ванной металла, пламя и раскаленные газы также находятся над ванной металла, т. е. идут процессы, присущие пламенным печам. Вместе с тем в металлической ванне происходит выгорание примесей, сопровождаемое выделением тепла, причем очень существенным, вплоть до того, что в некоторые периоды плавки теплогенерация за счет химической энергии жидкого металла может иметь решающее значение.

В основе работы электрических печей лежит генерация тепла за счет электроэнергии. Эта теплогенерация может осуществляться различными методами, рассматриваемыми подробно ниже. Будет показано различие этих методов, что накладывает отпечаток на конструкции и работу печей, поэтому классификация электрических печей осуществляется в соответствии со способом теплогенерации (см. § 1, гл. IX).

Вид процесса теплогенерации, осуществляемого в печном агрегате, в решающей мере определяет не только конструкцию печи, но и характер протекающих в ее рабочем пространстве тепломассообменных процессов.

Классификация печей по технологическим и конструктивным признакам

По технологическому назначению металлургические печи делят на плавильные и нагревательные.

Плавильные печи предназначены для получения металлов из руд и переплавки металла с целью придания ему необходимых свойств. В плавильных печах материалы меняют свое агрегатнос состояние.

Нагревательные печи применяют для нагрева материалов с целью обжига (известняка, магнезита, огнеупорных материалов и др.) и сушки (литейных форм, руды, песка и др.), а также для придания металлу пластических свойств перед обработкой давлением. Значительное число нагревательных печей применяют для термической обработки, чтобы изменить внутреннее строение и структуру металла. В нагревательных печах металлы и материалы не меняют своего агрегатного состояния.

Внутри каждой из этих групп печи подразделяют в соответствии с теми операциями, которые в них проводят. Так, плавильные печи могут быть чугуноплавильные, сталеплавильные, медеплавильные и др. Нагревательные печи могут служить для обжига огнеупорных материалов, нагрева металла перед прокаткой и ковкой, термообработки металла. Эти группы печей, ограниченные определенными технологическими операциями, подразделяют еще и по конструктивным признакам, методам транспортирования металла в печи, характеру продукта, подвергаемого нагреву. Например, нагревательные печи для нагрева перед прокаткой разделяют на следующие группы: а) нагревательные колодцы, методические печи, камерные нагревательные и др.; б) садочные, толкательные, с вращающимся подом; в) для нагрева слитков, блюмов, труб, сутунки и др.

Топливные печи подразделяют по виду применяемого топлива. Так, сталеплавильные мартеновские печи могут быть газовые и мазутные.

В соответствии с методами утилизации тепла отходящих дымовых газов печи подразделяют на регенеративные и рекуперативные.

Электрические печи классифицируют по способу превращения электрической энергии в тепловую: дуговые электрические печи, печи сопротивления и индукционные печи.

Современные печи представляют собой сложные тепловые агрегаты, состоящие из собственно печи и вспомогательного оборудования. Собственно печь включает в себя

рабочее пространство и устройства для получения тепловой энергии: горелки, форсунки в топливных печах и электроды, резисторы в электрических печах. В состав вспомогательного оборудования входят устройства для утилизации тепла отходящих дымовых газов, вентиляторы и дымососы, дымовые трубы, различные клапаны, задвижки и др.

В рабочем пространстве печи осуществляются те технологические операции, для которых предназначена печь. Все остальные элементы печи служат для обеспечения наиболее эффективного проведения главной технологической операции.

Характеристика тепловой работы печей

Теплотехнические характеристики работы печей

Работа каждой печи характеризуется рядом показателей, наиболее важными из которых являются температурный и тепловой режим, коэффициент полезного теплоиспользования и производительность.

Температурный режим. Температура печи — важный теплотехнический показатель работы печи, хотя термин «температура печи» имеет несколько условный характер. Дело в том, что в топливных печах в состоянии взаимного теплообмена находятся пламя (раскаленные газы), металл, кладка, температура которых различная. Причем, температура всей печи не может определяться ни одним из этих значений температуры, а представляет собой какую-то осредненную величину, применительно к которой обычно и применяют термин «температура печи».

Температура зависит от ряда факторов, важнейшие из которых — температура горения топлива и характер потребления тепла (включая тепловые потери), свойственные данной конструкции печи. Иногда для ориентировочного определения пользуются весьма приближенным соотношением $t_д = \eta t_к$, где $t_д$ — действительная температура печи; $t_к$ — калориметрическая температура горения топлива; η — пирометрический коэффициент, зависящий от конструкции печи, $\eta = 0{,}65 \div 0{,}80$.

Температура печи зависит прежде всего от ее назначения и может изменяться во времени и по объему печи.

Изменение температуры печи во времени называется температурным режимом печи. Обычно его представляют соответствующим графиком $t = f(\tau)$. Печи, температура которых не меняется со временем, называются печами постоянного действия (например, методические печи), с пере-

менной во времени температурой — печами периодического действия (печи с выкатным подом). Изменение температуры по длине печи также может иметь различный характер. Нагревательные печи, в которых температура по всему объему приблизительно одинакова, называют камерными. Печи с изменяющейся по длине температурой называются методическими.

Тепловой режим. Работа печи в значительной мере определяется тем, какое количество тепла поступает в нее. Количество тепла, которое подают в печь в каждый данный момент времени, называется тепловой нагрузкой. То наибольшее количество тепла, которое печь может нормально (без недожога топлива в рабочем пространстве) усвоить, называется тепловой мощностью.

Тепловой режим печи представляет собой изменение тепловой нагрузки во времени и может быть представлен графиком зависимости тепловой нагрузки от времени. Тепловой режим теснейшим образом связан с температурным режимом. Печи периодического действия, работающие с переменной во времени температурой, имеют переменную во времени тепловую нагрузку, тогда как печи постоянного действия работают при неизменной тепловой нагрузке.

Качество работы печи, ее совершенство как теплового агрегата характеризуется коэффициентом полезного теплоиспользования (к. п. т.) и коэффициентом использования тепла (к. и. т.).

В общем виде к. п. т. определяют следующим образом:

$$\text{к.п.т.} = \frac{Q_м + Q_{шл} + Q_{энд} - Q_{экз}}{Q_т + Q_ф B}.$$

Учитывая, что

$$Q_т + BQ_ф - BQ_{ух} - Q_{пот} = Q_м + Q_{шл} + Q_{энд} - Q_{экз},$$

к. п. т. может быть выражен в следующей форме:

$$\text{к.п.т.} = \frac{Q_т + BQ_ф - BQ_{ух} - Q_{пот}}{Q_т + BQ_ф}, \qquad (98)$$

где B — расход топлива, м³/с; кг/с;

$Q_т$ — химическое тепло топлива, Вт;

$Q_м$ и $Q_{шл}$ — тепло соответственно металла и шлака, Вт;

$Q_{энд}$ и $Q_{экз}$ — тепло энедотермических и экзотермических (кроме горения топлива) реакций, Вт;

$Q_ф$ — физическое тепло топлива и воздуха, отнесенное к единице количества топлива, Дж/м³, Дж/кг;

$Q_{ух}$ — тепло уходящих газов, отнесенное к единице количества топлива, Дж/м³; Дж/кг;

$Q_{пот}$ — тепловые потери, Вт.

Из выражения (98) легко получить

$$\text{к.п.т.} = \frac{Q_н^р + Q_ф - Q_{ух} - \frac{Q_{пот}}{B}}{Q_н^р + Q_ф}. \qquad (99)$$

Если $Q_ф = 0$, т. е. в печь поступает только тепло топлива, то коэффициент полезного теплоиспользования (к. п. т.) превращается в коэффициент полезного топливоиспользования.

Естественно, что чем выше значение к. п. т. (аналогичного коэффициенту полезного действия для разного рода агрегатов), тем лучше в тепловом отношении работает печь. Из выражения (99) следует, что увеличение подогрева топлива и воздуха, а также снижение температуры уходящих дымовых газов (поскольку $Q_{ух} = V_{ух} \cdot c_{ух} \cdot T_{ух}$) и тепловых потерь благоприятно влияет на к. п. т. печи.

Тепловые потери в печах в большей мере зависят от факторов, связанных с конструкцией печи, поэтому, чтобы характеризовать только топливо и условия его сжигания, применяют коэффициент использования топлива (к. и. т.)

$$\text{к.и.т.} = \frac{Q_н^р + Q_ф - Q_{ух}}{Q_н^р + Q_ф}. \qquad (100)$$

Сопоставляя выражения (98) и (100), можно видеть, что к. п. т. всегда меньше к. и. т., поэтому при проектировании и эксплуатации печей следует стремиться к тому, чтобы к. п. т. по своей величине максимально приближались к к. и. т., для чего необходимо добиваться снижения тепловых потерь.

Производительность печей — важнейший показатель их работы, так как именно в производительности, как в фокусе, сходятся все положительные и отрицательные стороны конструкции и тепловой работы печи. В плавильных печах производительность сильно зависит от характера проплавляемой шихты, в нагревательных печах — от начальной температуры металла. Как в том, так и в другом случаях на производительность большое влияние оказывает темпера-

тура в рабочем пространстве печи и температура отходящих дымовых газов, а также интенсивность и характер теплопередачи от печи к нагреваемому (проплавляемому) материалу. Все это свидетельствует о том, что производительность зависит от очень многих технологических, теплотехнических и конструктивных факторов, поэтому производительность печей различного вида будет рассматриваться в дальнейшем при описании конкретных конструкций.

Обычно различают общую и удельную производительность. Общая производительность характеризует размеры, масштабы агрегата и измеряется в т/ч, или т/сутки. При расчетах печей используется размерность производительности, кг/ч или кг/с. Удельная производительность, выражаемая в кг/(м^2·ч), или т/(м^2·ч), характеризует интенсивность работы печи и служит для оценки качества работы и сравнения печей. Удельную производительность часто называют напряженностью пода печи. Различают напряженность активного пода и напряженность габаритного пода. В первом случае производительность отнесена только к площади пода, занятой металлом, во втором — ко всей площади пода печи.

Тепловой баланс и расход топлива

Как можно видеть из вышеизложенного, расход топлива представляет собой важную характеристику работы печей. На действующей печи расход топлива определяют непосредственным измерением, а для проектируемых печей — расчетным путем, используя тепловой баланс печи.

Тепловой баланс печи состоит из равных между собой приходной и расходной частей, каждая из которых складывается из ряда статей. Для печей постоянного действия тепловой баланс составляют на один час, для печей периодического действия — на один цикл работы.

Статьи приходной части теплового баланса

1. Тепло, получаемое в результате сгорания топлива, Вт

$$Q_х = BQ^р_н,$$

где B — расход топлива, кг/с, или м^3/с;

$Q^р_н$ — теплота сгорания топлива, Дж/кг, Дж/м^3.

2. Тепло, вносимое подогретым воздухом, Вт

$$Q_в = Bc_в t_в nv_в,$$

где $t_в$ — температура подогрева воздуха, °С;

$c_в$ — средняя удельная теплоемкость воздуха в интервале температур от 0 °С до $t_в$, Дж/(м^3·К);

n — коэффициент избытка воздуха;

$v_в$ — количество воздуха, теоретически необходимого для сжигания единицы топлива, м³/кг, м³/м³.

3. Тепло, вносимое подогретым топливом, Вт

$$Q_т = Bc_т t_г,$$

где $c_т$ — средняя удельная теплоемкость топлива в интервале температур от 0 °С до $t_т$, Дж/(м³·К);

$t_т$ — температура подогрева топлива, °С.

4. Тепло экзотермических реакций. В этой статье при составлении теплового баланса учитывают все химические реакции, идущие с положительным тепловым эффектом, кроме реакций горения топлива. В нагревательных печах учитывают тепло, выделяющееся при окислении металла. При окислении 1 кг железа выделяется примерно 56×$\times 10^5$ Дж/кг тепла, поэтому

$$Q_{экз} = 56 \cdot 10^5 Pa \text{ Вт},$$

где P — производительность печи, кг/с;

a — величина угара металла, кг/кг металла.

Статьи расходной части теплового баланса

1. Полезное тепло (Вт), необходимое для нагревания и плавления материалов. Если материалы поступают в печь холодными, то

$$Q_{пол1} = Pc_м t_{м.к},$$

если подогретыми, то

$$Q_{пол1} = P\left(c_м t_{м.к} - c'_м t_{м.н}\right),$$

где P — производительность печи, кг/с;

$t_{м.к}$ — конечная температура нагрева металла, °С;

$t_{м.н}$ — начальная температура металла, °С;

$c_м$ — средняя удельная теплоемкость металла в интервале температур от 0 °С до $t_{м.к}$, Дж/(мг·К);

$c'_м$ — средняя удельная теплоемкость металла в интервале температур от 0 °С до $t_{м.н}$, Дж/(кг·К).

Для плавильных печей учитывают скрытую теплоту плавления материалов.

2. Тепло, уносимое шлаками, Вт

$$Q_{шл.2} = M_{шл} c_{шл} t_{шл},$$

где $M_{шл}$ — масса шлака в единицу времени, кг/с;

$t_{шл}$ — температура шлака, °С;

$c_{шл}$ — удельная теплоемкость шлака, Дж/(кг·К).

3. Тепло эндотермических реакций Q_3. Эта статья характерна для плавильных печей. К ним относится, например, тепло, идущее на разложение известняка.

4. Тепло, уносимое отходящими газами, Вт

$$Q_4 = BV_{ух} c_{ух} t_{ух},$$

где $t_{ух}$ — температура отходящих из печи дымовых газов, °С;

$c_{ух}$ — средняя удельная теплоемкость отходящих из печи газов, Дж/(м³·К).

Некоторое количество дымовых газов удаляется из рабочего пространства печи в результате выбивания через окна, щели и др. Поэтому только с некоторым приближением можно рассматривать как полное количество газов, образующихся при сжигании единицы массы или единицы объема топлива.

5. Тепло от химической неполноты сгорания топлива. При беспламенном сжигании потери тепла от химической неполноты сгорания практически отсутствуют. При пламенном сжигании в отходящих газах обычно содержится 0,5—3 % несгоревших газов (CO и H_2). Можно принять, что на 1 % CO содержится 0,5 % H_2. Тогда теплота сгорания такой смеси составит около $12 \cdot 10^6$ Дж/м³. Если в отходящих газах долю несгоревшего CO принять равной a, то потери тепла, Вт:

$$Q_5 = BV_{ух} a/2 \cdot 10^{-6}$$

где $V_{ух}$ — количество уходящих из печи газов, м³/кг, м³/м³.

6. Тепло от механической неполноты сгорания. Под механической неполнотой сгорания понимают различные потери топлива. Например, при сжигании твердого топлива потери составляют 3—5 %, следовательно:

$$Q_6 = (0{,}03 \div 0{,}05) BQ_н^р \text{ Вт.}$$

В случае газообразного топлива потери тепла от утечки газа составляют 2—3 %, тогда

$$Q_6 = (0{,}02 \div 0{,}03) BQ_н^р \text{ Вт.}$$

В случае жидкого топлива теряется около 1 %, т. е.

$$Q_6 = 0{,}01 BQ_н^р \text{ Вт.}$$

7. Потери тепла в результате теплопроводности через кладку. Потери тепла через свод, стены и под печи непрерывного действия с установившимся режимом работы определяют по уравнению, Вт

$$Q_{кл.т} = \frac{t_{кл} - t_в}{S_1/\lambda_1 + S_2/\lambda_2 + 1/\alpha} F,$$

где $t_{кл}$ — температура внутренней поверхности кладки, °С;

$t_в$ — температура окружающего воздуха, °С;

S_1 и S_2 — толщина огнеупорной кладки и изоляции, м;

λ_1 и λ_2 — соответственно коэффициенты теплопроводности кладки и изоляции, Вт/(м·К);

α — коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху, равный 19,8 Вт/(м²·К); $1/\alpha$ соответственно равно 0,052 м²·К/Вт;

F — поверхность кладки, м².

8. Потери тепла излучением через открытые окна печи, Вт

$$Q_8 = C_0\left(\frac{T}{100}\right)^4 F\Phi\psi,$$

где C_0 — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела, равный 5,768 Вт/(м²·К⁴);

T — средняя температура в печи, К;

F — площадь открытого окна, м²;

Φ — коэффициент диафрагмирования (см. том II настоящего издания);

ψ — доля времени, когда окно открыто.

9. Тепло, затраченное на нагревание тары. Если тара холодная, то количество тепла, требующееся на ее нагрев, составит, Вт

$$Q_9 = M_т c_т t_т,$$

где $M_т$ — масса тары в единицу времени, кг/с;

$c_т$ — средняя удельная теплоемкость тары в интервале температур от 0 °С до $t_т$, Дж/(кг·К);

$t_т$ — температура нагрева тары, °С.

Если тара поступает нагретой, то учитывают только тепло, затраченное на ее дальнейшее нагревание.

10. Тепло, уносимое водой, охлаждающей отдельные части печи Q_{10}.

Для определения потерь тепла на охлаждение пользуются практическими данными. Обычно эти потери составляют 10—15 % всего прихода тепла.

11. Затраты тепла на аккумуляцию его кладкой в печах периодического действия, Дж/период

$$Q_{акк.11} = V_{кл}\,\rho_{кл}\,c_{кл}\left(t_{кл}^{кон} - t_{кл}^{нач}\right),$$

где $V_{кл}$ — объем, кладки, м³;

$\rho_{кл}$ — плотность кладки, кг/м³;

$c_{кл}$ — теплоемкость кладки, Дж/(кг·К);

$t_{кл}^{кон}$ и $t_{кл}^{нач}$ — средние конечная и начальная температуры кладки, определяемые на основании расчета прогрева стен, °С.

В печах с выдвижным подом необходимо также учитывать затраты тепла на аккумуляцию огнеупором тележки. В печах периодического действия, кроме аккумуляции тепла кладкой, тепло теряется через стены в результате теплопроводности. Затраты тепла на аккумуляцию его кладкой определяются для печей периодического действия, температура которых меняется по времени. Тепловой баланс таких печей составляется на весь период (цикл) их работы.

12. Неучтенные потери

$$Q_{12} = (0{,}1 - 0{,}15)(Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10} + Q_{11}).$$

Просуммировав отдельно приходные и расходные статьи теплового баланса, следует приравнять $Q_{приход} = Q_{расход}$ и получить, таким образом, одно уравнение с одним неизвестным, которым является расход топлива, В.

Зная величину B, можно окончательно подсчитать все статьи приходной и расходной частей теплового баланса.

Если анализируют тепловую работу действующей печи, то составляют таблицу теплового баланса, которая позволяет выяснить, какая статья расходной части баланса чрезмерно высока и, следовательно, обнаружить причину неудовлетворительной работы печи.

Для сравнения качества работы отдельных печей пользуются удельными показателями расхода тепла и топлива. Удельный расход тепла показывает, какое количество тепла затрачивается на нагрев 1 кг металла до необходимой температуры.

Часто удельный расход топлива определяют в единицах условного топлива (у. т.). За условное топливо принимают такое, теплота сгорания которого 29300 кДж/кг. Таким образом, удельный расход топлива равен

$$BQ_н^р/(29300P_м) \text{ кг у.т./кг металла}$$

§ 2. Доменные печи

Устройство и работа доменной печи

Доменная печь предназначена для выплавки чугуна из железных руд и является важнейшим агрегатом черной металлургии. Основой технологических процессов, протекающих в доменной печи, являются процессы восстановления окислов железа.

Доменная печь представляет собой высокую шахту круглого сечения (рис. 109), опирающуюся на железобетонный фундамент обычно

многогранной формы. Нижняя часть (подошва) фундамента находится на глубне 6—7 м. Надземная часть фундамента выложена из огнеупорного бетона.

Профиль рабочего пространства печи в вертикальном разрезе составляют колошник (верхняя цилиндрическая часть), шахта (верхняя конусная часть), распар (широкая цилиндрическая часть), заплечики (нижняя конусная часть) и горн (нижняя цилиндрическая часть).

Футеровка колошника защищена металлическими кольцами, собранными из сегментов, от ударного и истирающего действия кусков шихты, падающих с большого конуса засыпного аппарата. Шахту, распар и заплечики футеруют высококачественным шамотным кирпичом, а горн и лещадь (под печи) — высокоглиноземистым кирпичом или углеродистыми блоками. Футеровку нижней части шахты, а также распара, заплечиков, горна и лещади охлаждают водяными холодильниками.

Кладка шахты заключена в цельносварной стальной кожух. Внизу, на уровне перехода шахты к распару, кожух заканчивается опорным кольцом, которое поддерживается колоннами со специальными опорами, передающими нагрузку на несущую плиту фундамента. Горн также опоясан сварным стальным кожухом.

Горячее дутье от воздухонагревателей через футерованный воздухопровод поступает в футерованную кольцевую трубу. Из кольцевой трубы воздух направляется в футерованные рукава и через медные водоохлаждаемые фурмы, расположенные в верхней части горна по окружности, поступает в доменную печь. Фурмы вставлены в конические холодильники, которые входят в амбразуры, плотно прилегающие к кожуху печи.

В нижней части горна на высоте 600—1000 мм от лещади расположены одна или две чугунные летки — каналы для периодического выпуска чугуна и шлака. Шлак отделяют от чугуна в желобе при помощи перевала и перегородки (скимера). В промежутках между выпусками чугуна отверстие летки забивают огнеупорной массой при помощи специального устройства — электрической поршневой пушки.

На высоте 1400—1600 мм от чугунной летки под некоторым углом друг к другу расположены две шлаковые летки, через которые выпускают шлак. Шлаковая летка состоит из полой медной водоохлаждаемой фурмы, которая входит в конический медный холодильник, вставленный в чугунный холодильник со змеевиком. Отверстие шлаковой летки закрыто специальным стопором со стальной пробкой.

Доменную печь загружают шихтой сверху через специальный засыпной аппарат. Он состоит из большого конуса с воронкой, перекрывающего колошник печи, и малого конуса с вращающейся приемной воронкой. Такая конструкция засыпного аппарата позволяет равномерно распределять материал на окружности колошника и устраняет потери газов в атмосферу. Загрузку шихты в доменную печь осуществляют послойно.

Процесс развития доменного производства идет в направлении повышения содержания железа в рудном сырье, снижения расхода топлива и частичной замены природным газом (реже мазутом) дефицитного топлива, которым является кокс. Увеличиваются также размеры доменных печей. Полезные объемы доменных печей достигают 5000 м^3.

Повышение содержания железа в рудном сырье, ведущее к уменьшению количества шлака, снижает затраты физического тепла на нагрев и плавление составляющих шлака, приводит к разогреву низа печи и позволяет снизить расход топлива. Снижение расхода топлива увеличивает в свою очередь экономичность и производительность печи.

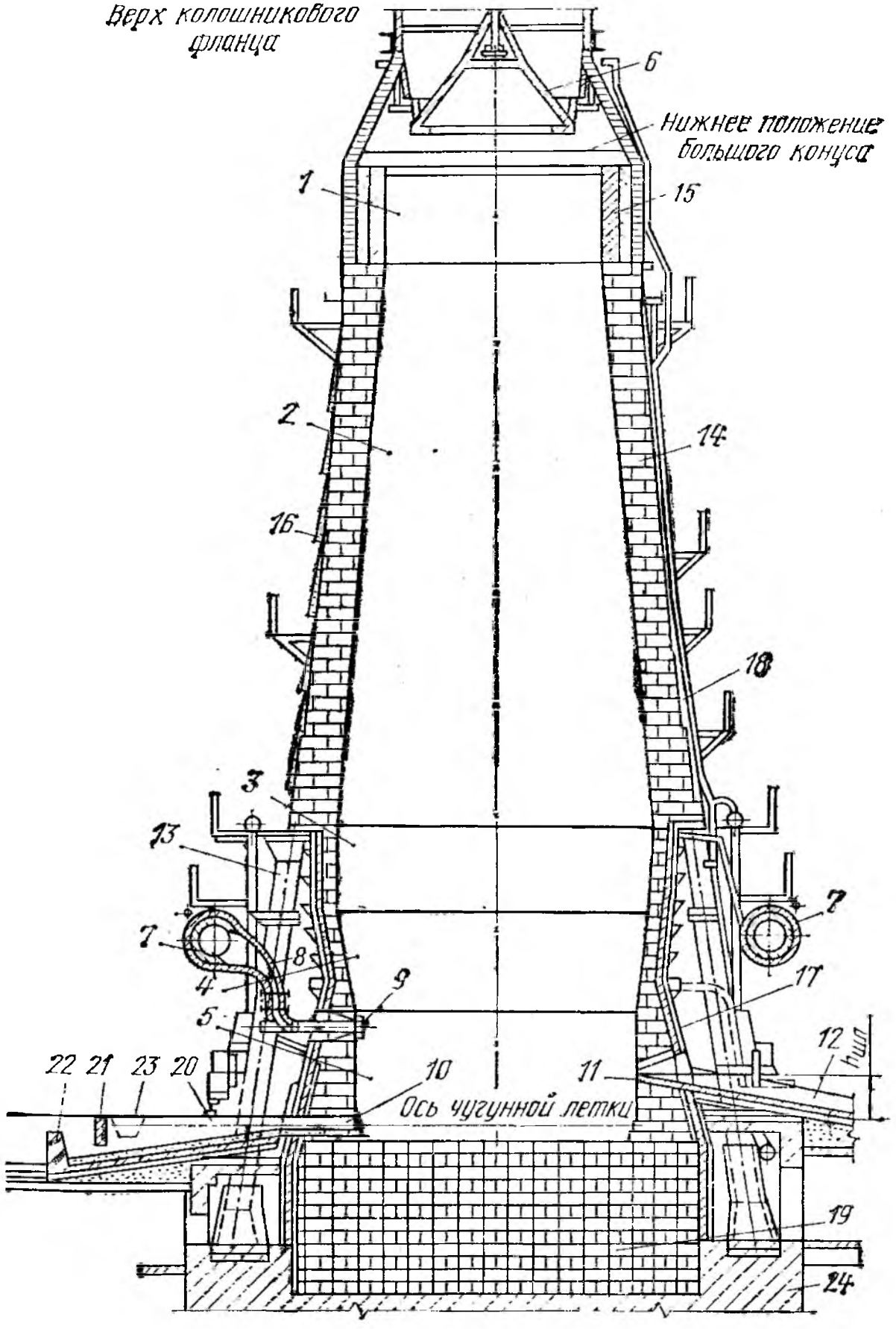


Рис. 109. Доменная печь:

1 — колошник; *2* — шахта; *3* — распар; *4* — заплечики; *5* — горн; *6* — большой конус; *7* — кольцевая труба для дутья; *8* — фурменный рукав; *9* — фурма для дутья; *10* — чугунная летка; *11* — шлаковая летка; *12* — шлаковый желоб; *13* — колонна шахты; *14* — огнеупорная футеровка; *15* — металлическая защита колошника; *16* — металлический кожух печи; *17* — вертикальный холодильник; *18* — горизонтальные коробчатые холодильники; *19* — кладка горна; *20* — желоб для чугуна и шлака, уходящего при выпуске чугуна; *21* — скимер (перегородка для отделения шлака от чугуна); *22* — перевал; *23* — желоб для отвода чугуна; *24* — фундамент печи

В настоящее время в качестве рудной части шихты используют агломерат — продукт обогащения железной руды спеканием измельченной железной руды, железного концентрата, колошниковой пыли и флюсов.

Весьма перспективным является применение окатышей — продукта окомкования и обжига железного концентрата.

Основным видом топлива в доменной печи является кокс. В качестве дополнительного топлива используется природный газ, который подается через фурмы.

Раскаленные газы, получающиеся в области фурм в результате горения опускающегося кокса до CO и вдуваемого природного газа до CO и H_2, продуваются (фильтруются) через столб кусковых материалов под действием напора, создаваемого воздуходувками. Загружаемые через засыпной аппарат рудное сырье и кокс постепенно нагреваются и теряют влагу и летучие. При использовании флюсов и сырых руд происходят также процессы разложения карбонатов. Железорудное сырье восстанавливается. Высший окисел Fe_2O_3 превращается в железо последовательно через промежуточные окислы. Процесс восстановления осуществляется практически по всей высоте печи, но заканчивается выше уровня фурм до поступления составляющих рудного сырья в зону горения. Восстановителями служат компоненты газа (CO и H_2), окисляющиеся в процессе восстановления до CO_2 и H_2O.

Процесс восстановления железа складывается из реакций

$$\begin{array}{l} FeO + CO = Fe + CO_2 \\ + \\ C + CO_2 = 2CO \\ \hline FeO + C = Fe + CO \end{array} \qquad (101)$$

Такой процесс требует затраты углерода и поглощает большое количество (156,64 МДж/моль) тепла.

При высоких температурах, достигаемых после расплавления и разделения составляющих рудной части шихты на металл и шлак, получают некоторое развитие эндотермические процессы прямого восстановления кремния и марганца, а также процесс науглероживания железа. Эти процессы осуществляются при стекании струй чугуна и шлака через слой кокса (коксовую постель), выполняющего роль фильтра, пропускающего расплавы и газы и преграждающего путь еще не расплавленным или полурасплавленным кускам рудных материалов.

Окись углерода, которая образуется по реакциям (101) и представляет собой основную горячую составляющую доменного (колошникового) газа, удаляется из печи с температурой примерно 650 К и используется в дальнейшем для отопления доменных воздухоподогревателей и нагревательных печей.

Для отвода газа в куполе печи предусмотрены четыре боковых восходящих газоотвода. Вертикальные участки газоотводов соединены попарно в два газоотвода, переходящих в один нисходящий газоотвод, который входит сверху по оси в первичный пылеуловитель. Газоотводы футерованы шамотным кирпичом.

Теплообмен в доменных печах

В доменной печи шихта двигается сверху вниз, а раскаленные газы двигаются снизу вверх. Таким образом, осуществляется противоток газа и шихты. Характер теплообмена между газом и кусками шихты зависит от соотноше-

ния их водяных эквивалентов. Водяным эквивалентом газа (шихты) называют произведение расхода газа (шихты) на его (ее) теплоемкость, т. е.

$$W_г = G_г c_г; \quad W_ш = G_ш c_ш,$$

где $W_г$ и $W_ш$ — водяные эквиваленты газа и шихты, Вт/К;
$G_г$ и $G_ш$ — расход газа и шихты, кг/с или м³/с;
$c_г$ и $c_ш$ — теплоемкость газа и шихты, Дж/(кг·К) или Дж/(м³·К).

Соотношение между водяными числами газа и шихты оказывает существенное влияние на теплообмен в шахтных печах. Характерными являются две противоточные схемы теплообмена, представленные на рис. 110.

Если водяной эквивалент газового потока больше водяного эквивалента потока шихты, т. е. $W_г > W_ш$, то температура шихты достигает начальной температуры теплоносителя (газа) $T'_г$, а теплоноситель выходит из теплообменника с температурой $T''_г$.

В этом случае при сохранении постоянным коэффициента теплопередачи и соотношения водяных эквивалентов по высоте шахтной печи температуру шихты на различных горизонтах шахты можно определять по приближенному уравнению Б. И. Китаева:

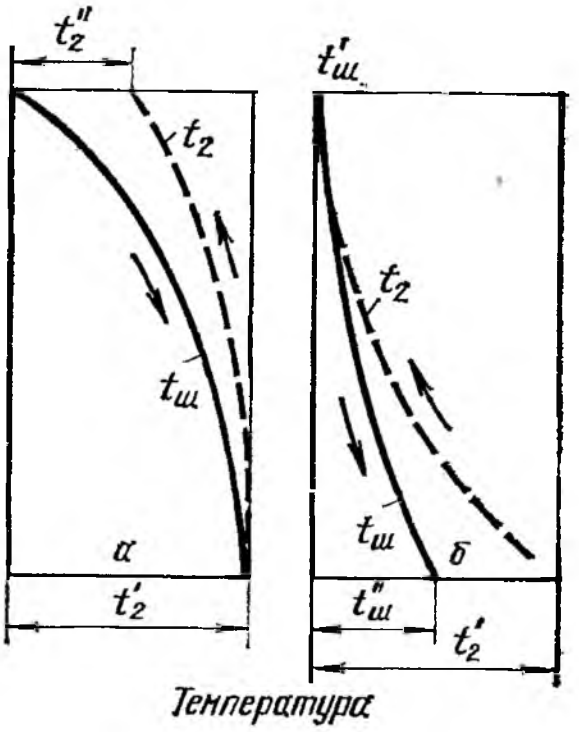


Рис. 110. Схема теплообмена в противотоке газа и шихте:
$а$ — $W_г > W_ш$; $б$ — $W_г < W_ш$

$$\frac{T_ш - 273}{T'_г - 273} = 1 - \exp\left[-\mu \frac{\alpha_v}{c_ш (1 - f)} \left(1 - \frac{W_ш}{W_г}\right) \tau\right], \qquad (102)$$

где $\mu = \dfrac{1}{1 + (115)\mathrm{Bi}}$ — числовой коэффициент, зависящий от критерия Био; α_v — коэффициент теплоотдачи на единицу объема шихты, Вт/(м³·К); f — пористость слоя шихты (доли единицы), равная отношению объема, незанятого кусками шихты, ко всему объему; τ — время от начала загрузки, шихты, с; H — высота положения шихтовых материалов, м.

Когда водяной эквивалент шихты больше водяного эквивалента газа, т. е. $W_{ш} > W_{г}$, газы отдают все свое тепло шихте и охлаждаются до температуры поступающей шихты $T_{ш}$. Однако этого тепла не хватает, чтобы нагреть шихту до начальной температуры газов. Шихта после теплообмена будет недогретой, ее температура $T_{ш}$ будет ниже температуры поступающих в шахту газов $T_{г}$.

Для определения температуры газа на различных горизонтах шахты при этой схеме теплообмена можно использовать второе приближенное уравнение Б. И. Китаева:

$$\frac{T'_{г} - T_{г}}{T_{г} - T_{ш}} = 1 - \exp\left[-\mu \frac{\alpha_v}{c_{ш}(1-f)} \left(\frac{W_{ш}}{W_{г}} - 1 \right) \tau \right]. \qquad (103)$$

Для определения температуры шихты используют уравнение теплового баланса:

$$(T_{ш} - T'_{ш}) W_{ш} = (T'_{г} - T_{г}) W_{г}.$$

Определение коэффициентов теплоотдачи в шахтных печах представляет собой большую сложность, поскольку форма и размер кусков шихты являются крайне неопределенными.

Эта сложность углубляется так же тем, что и расстояние между кусками является весьма неопределенным. Теплообмен от газов к кускам шихты осуществляется тремя видами теплопередачи: конвекцией, теплопроводностью и излучением, с переменным удельным значением каждого вида передачи тепла. Преобладающее значение имеет теплопередача конвекцией, так как расстояние между кусками весьма мало и тепловое излучение невелико.

Все это вызвало необходимость использовать в расчетах теплообмена в шахтных печах коэффициенты теплоотдачи на единицу объема α_v [Вт/(м^3·К)] и на единицу поверхности α_F [Вт/(м^2·К)], связанные между собой следующим соотношением:

$$\alpha_v = \alpha_F F (1 - f), \qquad (104)$$

где F — средняя удельная поверхность кусков шихты (м^2/м^3).

Для определения коэффициента теплоотдачи на единицу поверхности кусков могут быть использованы эмпирические уравнения. Одно из таких уравнений, полученное А. Н. Чернятиным, имеет следующий вид

$$\mathrm{Nu} = 0{,}53 \psi^{0{,}34} \mathrm{Re}^{0{,}66}, \qquad (105)$$

где ψ — коэффициент формы, учитывающий потери поверхности в местах контактов между кусками. Для кусков руды $\psi = 0{,}86$.

Используя выражения (104) и (105), можно найти коэффициенты α_F и α_v, необходимые для расчетов по уравнениям (102) и (103).

В реальных условиях работы доменной печи наблюдаются отклонения в постоянстве соотношения водяных эквивалентов, вызванные влиянием физико-химических процессов, протекающих в объеме печи.

В условиях работы доменной печи по ее высоте разграничивают три зоны теплообмена (рис. 111): 1) верхняя зона, в которой теплообмен происходит в условиях $W_г > W_ш$ и тепло газа используется не полностью; 2) средняя зона, в которой теплообмен происходит вследствие протекающих в ней экзотермических реакций, и 3) нижняя зона (при $W_г < W_ш$), в которой наблюдается самый интенсивный теплообмен.

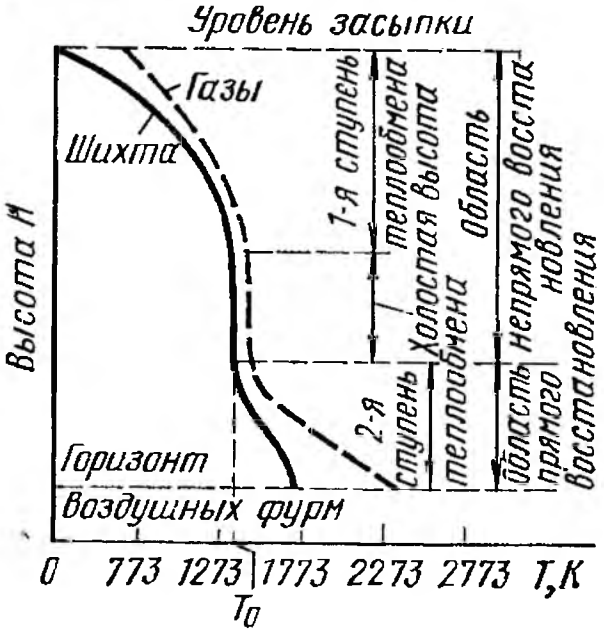


Рис. 111. Схема теплообмена в доменной печи

Эти положения объясняют ряд известных положений, замеченных на практике. Например, тепло нагретого дутья полностью используется в нижней части печи, поскольку здесь $W_г < W_ш$ и происходит интенсивный теплообмен; введение кислорода в дутье или уменьшение удельного расхода кокса снижает температуру колошника благодаря тому, что уменьшаются количество газов и $W_г$.

Показатели работы доменных печей

Основным продуктом доменной плавки является передельный чугун, который в дальнейшем используется для получения стали. Он имеет следующий состав: 3,7—4,3 % C, 0,3—1,0 % Si, до 2,0 % Mn, 0,02—0,06 % S, остальное железо.

Качественный уровень работы доменной печи характеризуется отношением ее полезного объема ($м^3$) к суточной выплавке чугуна (т) и называется коэффициентом использования полезного объема (к. и. п. о.), который обычно ко-

Таблица 17. Примерный материальный баланс доменной плавки на 1000 кг чугуна

Приход влажных материалов, кг		Выход продуктов, кг	
1. Кокс	670	1. Чугун	1000
2. Агломерат	1650	2. Скрап	10
3. Руда железная	158	3. Шлак	761
4. Окалина	110	4. Газ сухой (2684 м³)	3585
5. Известняк	306	5. Влага шихты	39
6. Дутье сухое	2499	6. Влага, образовавшаяся в печи	102
7. Влага дутья	31	7. Пыль	32
8. Природный газ[1] (132,5 м³)	104		
Итого	5528	Итого	5528

[1] Стоимость тепла, выделяющегося при сгорании природного газа, в 10 раз меньше стоимости тепла, выделяющегося при сгорании кокса.

леблется в пределах 0,43—0,75. Примерные материальный и тепловой балансы доменной плавки даны в табл. 17 и 18.

Из теплового баланса видно, что физическое тепло газов используется в доменной печи очень хорошо, в этом отношении доменная печь является весьма совершенным агрегатом. Химически связанное тепло углерода используется не полностью, так как в печи необходимо поддерживать восстановительную атмосферу, поскольку основное назначение доменной печи заключается в восстановлении железа из его оксидов. В результате неполного окисления углерода и водорода влаги в колошниковом газе, кроме CO, содержатся также горючие газы H_2 и CH_4. В данном случае сухой колошниковый газ характеризуется теплотой сгорания $Q_р^н = 4477$ кДж/м³. Следовательно, на 1 кг чугуна с колошниковым газом уходит химической энергии тепла $4477 \times 2{,}684 = 11\,810$ кДж, что составляет приближенно 44 % тепла, получаемого при сгорании кокса и природного газа.

С целью экономии дорогостоящего кокса дутье доменной печи нагревают в воздухонагревателях. Еще недавно температура нагрева дутья достигала 873—973 К. В последнее время в связи с улучшением физико-химических свойств проплавляемых материалов стало возможным применять высокотемпературное дутье (1723—1473 К). Это по-

Таблица 18. Примерный тепловой баланс доменной плавки на 1 кг чугуна

Приход тепла, кДж (%)		Расход тепла, кДж (%)	
1. От сгорания C при соединении с O_2, содержащимся в дутье . . .	4335 (35,9)	1. На диссоциацию оксидов	6816 (57,2)
2. От сгорания природного газа у фурм	272 (2,2)	2. То же, сернистых соединений	8 (—)
3. Энтальпия дутья за вычетом теплоты разложения влаги дутья . .	1465 (14, 6)	3. То же, карбонатов за вычетом теплоты шлакообразования	314 (2,6)
4. От сгорания C в CO при соединении с O_2, содержащимся в руде . .	730 (6,0)	4. На выделение гидратной влаги . . .	21 (—)
5. От сгорания C в CO_2 при соединении с O_2, содержащимся в руде	3663 (30,2)	5. Энтальпия чугуна	1215 (10,3)
6. От сгорания H_2 до H_2O в печи .	1362 (11,1)	6. То же, шлака . .	1153 (10,0)
		7. На испарение влаги шихты	92 (0,8)
		8. На нагрев водяных паров до температуры колошника . . .	92 (0,8)
		9. Энтальпия сухого колошникового газа	1385 (11,6)
		10. На потери с охлаждающей водой	455 (3,7)
		11. На потери в окружающее пространство (по разности) . . .	364 (3,0)
Итого	11 827 (100)	Итого	11 827 (100)

зволило уменьшить расход топлива (кокса) на 10—15 % и более, а также частично заменить кокс природным газом и повысить содержание кислорода в дутье. Применение этих мероприятий позволило увеличить производительность доменных печей.

§ 3. Сталеплавильные агрегаты

Теплотехника сталеплавильных процессов

Общая характеристика

Все технологические процессы, свойственные получению стали, совершаются при высоких (1500 °С и более) температурах. При любых конструкциях сталеплавильных агрегатов технологические процессы совершаются в сталеплавильной ванне — части печи, заполненной расплавленным металлом. Для поддержания необходимой температуры сталеплавильную ванну надо снабжать тепловой энергией, которая может поступать в ванну или извне или выделяться непосредственно в расплавленном металле. В первом случае тепло выделяется вне ванны в результате сжигания топлива или в результате использования электрической энергии и передается поверхности ванны излучением и конвекцией. Таким образом, работают мартеновские и электрические сталеплавильные печи. В другом случае тепло выделяется в самой сталеплавильной ванне или в результате окисления примесей, содержашихся в расплавленном чугуне или в результате приложения электромагнитного поля (индукционные электрические печи). В массовой металлургии с использованием тепловой энергии, выделяющейся при окислении примесей (главным образом углерода), работают конвертеры — наиболее современные и широко распространенные сталеплавильные агрегаты. Возможны и промежуточные случаи. Так, при работе мартеновской печи без продувки жидкой ванны кислородом тепло, выделяющееся при окислении углерода, уже играет заметную роль в общем тепловом балансе агрегата. Однако в настоящее время, с целью повышения производительности мартеновских печей, находит все большее распространение продувка жидкой ванны кислородом, при которой выделение тепла в результате окисления примесей чугуна наряду с теплом, поступающим в ванну извне играет решающую роль. Такие печи, в которых жидкая металлическая ванна получает тепло как извне, так и в результате теплогенерации в жидком металле занимают промежуточное положение между печами-теплообменниками и печами-теплогенераторами.

Тепловая работа мартеновских печей в огромной степени зависит от метода сжигания топлива, от характеристик факела. Факел, в котором осуществляется процесс теплогенерации при сжигании топлива, должен обладать рядом

тепло- и массообменных характеристик, без которых невозможно обеспечить нормальный ход сталеплавильного процесса. Факел должен иметь необходимые температуру, теплообменные и массообменные характеристики. Факел должен обладать необходимой настильностью (соприкасаться с возможно большей частью поверхности сталеплавильной ванны), без чего невозможно обеспечить должную интенсивность передачи ванне тепла и кислорода, необходимых для осуществления технологических процессов сталеварения. Важным моментом в работе сталеплавильных печей-теплообменников является то, что эти печи могут переплавлять, практически, любое количество скрапа. Электрические дуговые печи работают обычно на 100 % лома, мартеновские печи могут, как известно, работать как скрап-процессом (100 % скрапа и твердого чугуна), так и скрап-рудным процессом, в котором наряду со скрапом используется и жидкий чугун. На заводах с полным металлургическим циклом, обеспечивающих выплавку подавляющего количества стали в нашей стране, мартеновские печи работают скрап-рудным процессом и, что очень важно, переплавляют большое количество скрапа. Современная промышленность развивается очень бурными темпами, что влечет за собой стремительное изменение ее качественного уровня и, как следствие, частую смену устаревшего оборудования. Все это порождает образование большого количества стального лома (скрапа). Было бы, конечно, неразумно получать сталь из жидкого чугуна, не перерабатывая накапливающийся стальной лом (скрап). Поэтому сталеплавильные агрегаты должны обладать способностью использовать в завалку не только жидкий чугун, но и стальной скрап. Мартеновские печи, обеспечивающие питание сталеплавильной ванны теплом извне, в этом отношении, практически, ограничения не имеют. Иная картина имеет место при работе сталеплавильных конвертеров.

На тепловую работу конвертеров прежде всего большое влияние оказывает вид используемого окислителя, которым, в принципе, могут быть или кислород воздуха или чистый кислород. С использованием воздушного дутья работали и еще иногда работают бессемеровские и томассовские конвертеры; с использованием чистого кислорода — современные кислородные конвертеры. И воздух, и кислород подаются в конвертеры холодными. Однако газообразные продукты плавки уходят из сталеплавильного агрегата приблизительно при температуре сталеплавильной ванны. Таким образом, азот воздушного дутья* поступив в стале-

плавильную ванну холодным уходит из ванны конвертера с температурой около 1600 °С и уносит с собой огромное количество тепла. В воздушных конвертерах, унос азотом дутья большого количества тепла приводит к тому, что в сталеплавильной ванне не остается запаса тепла, которое могло бы быть израсходовано на нагрев и плавление скрапа. Поэтому воздушные конвертеры, работали, практически, только на жидком чугуне, переплавляя ничтожное количество скрапа. Это обстоятельство и послужило одной из причин того, что воздушные конвертеры не получили распространения. Использование чистого кислорода в конвертерной плавке резко изменило структуру теплового баланса и позволило иметь избыток тепла, который можно использовать для нагрева и плавления скрапа. Использование скрапа в кислородном конвертере выполняет и другую, смежную, задачу, связанную с необходимостью использования указанного избытка тепла, так как в противном случае в конвертере разовьется чрезмерная температура и конвертер выйдет из строя.

Однако различные способы использования чистого кислорода в конвертерах, связанные с методом подачи кислорода и конструкцией конвертера, породили дополнительные теплотехнические аспекты этой проблемы. Углерод как основная примесь чугуна может окисляться как до CO, так и до CO_2. Очевидно, что при окислении углерода до CO_2 выделяется больше тепла, чем при окислении до CO. В кислородных конвертерах с верхней вертикальной подачей кислорода, углерод окисляется, в основном до CO, что влечет за собой возможность использования в завалку 20—25 % скрапа — это приемлемо, но недостаточно. В иных конвертерах, где образовавшийся в ванне CO дожигается до CO_2 количество скрапа в завалке может быть увеличено до 40—45 %.

Повышение количества скрапа в завалку может быть достигнуто также применением предварительного подогрева скрапа или в самом конвертере или вне его. В настоящее время наиболее распространенные кислородные конвертеры с вертикальной (сверху) подачей кислорода (ЛД-конвертеры) почти повсеместно работают с предварительным подогревом скрапа чаще всего в самом конвертере, для чего используются специальные газо-кислородные фурмы.

Таким образом, из вышеизложенного следует, что раз-

---

* Напомним, что азота в воздухе в 3.76 раза больше, чем кислорода (по объему).

вание и совершенствование сталеплавильных агрегатов связано с теплотехникой процесса, для понимания которой необходимо, прежде всего, тщательное знакомство с тепловым балансом рабочего пространства агрегата.

Тепловой баланс рабочего пространства сталеплавильного агрегата

Основные различия между сталеплавильными процессами заключаются в разной структуре теплового баланса, которая в значительной степени определяет тип и конструкцию сталеплавильного агрегата. Сталеплавильные агрегаты работают в периодическом режиме, поэтому тепловой баланс обычно составляется на продолжительность периода плавки — τ ч. Уравнение теплового баланса для этих условий может быть записано следующим образом:

$$Q_{х.т} + Q_{ф.т+в} + Q_{с} + Q_{экз} + Q_{ф.ск} + Q_{ф.ч} = Q_{м} + Q_{шл} + \\ + Q_{энд} + Q_{ух.пр.гор} + Q_{ух.пр.ок} + Q_{ух.N_2} + q_{пот}, \quad (106)$$

где $Q_{х.т}$ — химическое тепло топлива, кДж/период;

$Q_{ф.т.+в}$ — физическое тепло топлива и воздуха, поданного для горения, кДж/период;

$Q_{с}$ — количество тепла, выделившееся при окислении углерода жидкого чугуна, кДж/период;

$Q_{экз}$ — тепло экзотермических реакций (кроме окисления углерода), кДж/период;

$Q_{ф.ск}$ — физическое тепло скрапа, кДж/период;

$Q_{ф.ч}$ — физическое тепло жидкого чугуна, кДж/период;

$Q_{м}$ и $Q_{шл}$ — физическое тепло металла и шлака, кДж/период;

$Q_{энд}$ — тепло эндотермических реакций, кДж/период;

$Q_{ух.пр.гор}$ — физическое тепло уходящих продуктов горения топлива, кДж/период;

$Q_{ух.пр.ок}$ — физическое и химическое тепло уходящих продуктов окисления примесей, кДж/период;

$Q_{ух.N_2}$ — физическое тепло, уносимое азотом дутья, кДж/период;

$q_{пот}$ — все виды тепловых потерь за период, кДж/период.

Общее уравнение теплового баланса может видоизменяться в зависимости от типа сталеплавильного агрегата.

Для мартеновской печи

$Q_{ух.N_2} = 0$; обычно $Q_{ф.ск} = 0$.

Для любого конвертера

$Q_{х.т} = 0$; $Q_{ф.т+в} = 0$; $Q_{ух.пр.гор} = 0$.

Для кислородного конвертера, кроме того,

$Q_{ух.N_2} = 0$.

Таким образом, уравнение теплового баланса кислородного конвертера будет выглядеть следующим образом:

$$Q_с + Q_{экз} + Q_{ф.ск} + Q_{ф.ч} = Q_м + Q_{шл} + Q_{энд} + Q_{ух.пр.ок} + q_{пот}.$$

Следует отметить, что величина $Q_с$ может быть представлена как состоящая из двух слагаемых $Q_с = Q_{C \to CO} + Q_{CO \to CO_2}$. Конечно, нельзя абсолютно точно утверждать, что углерод, содержащийся в расплавленном металле, окисляется только до CO. Однако, экспериментальными работами установлено, что окисление углерода до CO носит преобладающий характер.

Дожигание CO в CO_2 производится вне металлической ванны и связано с соответствующими тепловыми потерями. Обычно конвертеры с дожиганием CO в пределах их рабочего пространства перерабатывают скрапа приблизительно вдвое больше, чем конвертеры без дожигания CO. Дожигание CO позволяет обеспечить передачу расплавленному металлу дополнительного количества тепла за счет

повышения температуры в рабочем пространстве над металлом,

повышения излучательной способности газового объема,

повышения температуры кладки конвертера, что обеспечивает передачу дополнительного количества тепла металлу как излучением, так и в результате контакта металла с раскаленной кладкой при вращении конвертера.

Продувка сталеплавильной ванны

В сталеплавильном производстве важнейшими являются процессы удаления примесей, в основе которых лежат

реакции окисления. Именно окисление примесей является тем процессом, который в решающей степени определяет продолжительность плавки и производительность агрегата. В традиционном мартеновском скрап-рудном процессе (без продувки ванны) необходимый для окисления примесей кислород поступает в расплавленный металл из атмосферы печи через шлак и из железной руды, добавляемой в ванну с целью ускорения процесса удаления примесей. Процесс передачи кислорода через шлак определяется законами диффузии и осуществляется весьма медленно. Значительно ускорить процессы окисления примесей можно обеспечив непосредственный контакт между газообразным кислородом и расплавленным металлом, применив продувку расплавленного металла газообразным кислородом. Применение продувки возможно как в течение всей плавки, так и в течение только определенного периода плавки. Кислородное дутье в течение всей плавки используется в кислородных конвертерах, где, как указывалось выше, питание агрегата теплом осуществляется за счет тепла, выделяющегося при окислении примесей. В отдельные периоды плавки кислородное дутье используется в мартеновских печах, работающих скрап-рудным процессом, в которых основная часть тепла поступает от сжигания топлива. При использовании кислородного дутья важнейшими являются процессы взаимодействия кислородной струи с расплавленным металлом. Кислородное дутье подается через специальные устройства, называемые фурмами. В кислородных конвертерах с верхним дутьем фурмы размещаются над металлом в начале и в конце плавки. В процессе интенсивного окисления углерода под действием пузырей CO ванна вспенивается и средний, наиболее продолжительный по времени (приблизительно 3/4 времени плавки) период плавки фурма работает в погруженном состоянии. При продувке кислородом мартеновской плавки фурмы также в некоторых случаях размещаются над металлом и шлаком, хотя в настоящее время признано наиболее целесообразным размещать фурмы на границе шлак — металл. С положением фурм связана не только интенсивность окисления примесей чугуна, но и такое нежелательное явление как разбрызгивание. Разбрызгивание шлака и металла является причиной износа, а иногда и преждевременного выхода футеровки сталеплавильного агрегата из строя. Изучение взаимодействия кислородной струи с расплавленным металлом в промышленных условиях, практически, невозможно, поэтому подобные исследования выполнялись и вы-

полняются на моделях с использованием положений теории подобия. При воздействии кислородной струи, выходящей из фурмы (расположенной над металлом) чаще всего со сверхзвуковой скоростью, в металле образуется впадина (кратер) с определенными глубиной и диаметром, которые и определяют величину поверхности реакционной зоны. Многочисленными наблюдениями установлено, что глубина и диаметр реакционной зоны зависят от величины критерия Архимеда, представляющего собой соотношение инерционных сил струи к выталкивающим (архимедовым) силам, препятствующих проникновению струи в жидкость

$$\mathrm{Ar} = \frac{\rho_г w_г^2}{g\rho_ж d} \text{ или } \mathrm{Ar}_0 = \frac{\rho_{г0} w_{г0}^2}{g\rho_ж d_0},$$

где $\rho_г$ и $\rho_{г,0}$ — соответственно плотность газа в месте встречи с поверхностью струи и на выходе из сопла (кг/м^3); $w_г$ и $w_{г0}$ — скорость струи в тех же сечениях, (м/с): d_0 — диаметр сопла (м); d — диаметр струи в месте встречи с поверхностью жидкости (м); $\rho_ж$ — плотность жидкости (кг/м^3).

Было получено много эмпирических уравнений, устанавливающих связь между глубиной реакционной зоны h и величиной критерия Архимеда при определенных значениях H — расстояния от среза сопла до поверхности жидкости. Впервые подобное исследование было проведено профессором И. Г. Казанцевым, которым получил следующую зависимость

$$\text{для } \frac{H}{d_0} > 0 \quad h = 0{,}23n\,\mathrm{Ar}\,H, \quad \text{где}$$

n — коэффициент названный И. Г. Казанцевым коэффициентом проникновения.

Для случая погружения фурмы в расплавленный металл $\left(\frac{H}{d_0} = 0\right)$ было получено следующее выражение

$$h = K\frac{P^{0.5} d_0^{0.6}}{\rho_ж^{0.4}}$$

а P — давление дутья перед соплом, показывающее, что при погружении фурмы в ванну достигается максимальная глубина проникновения. Здесь уместно подчеркнуть зависимость глубины проникновения от диаметра сопла d_0, которая объясняет уменьшение глубины проникновения кислородной струи при использовании многосопловых фурм, в

которых диаметр каждого сопла меньше, чем у односопловой фурмы. При этом снижение величины h не уменьшает общей реакционной поверхности, так как диаметр кратера у многосопловых фурм больше.

Изучение зависимости диаметра реакционной зоны (D) от характеристик продувки также привело к эмпирическим зависимостям типа $D/d_0=f(\mathrm{Ar}_0)$ для различных значений $H/d_0>0$, позволившим установить влияние скорости истечения, диаметра сопла фурмы и ее расположения относительно поверхности ванны на диаметр реакционной зоны.

Взаимодействие кислородной струи с металлом обеспечивает также перемешивание сталеплавильной ванны.

Перемешивание способствует ускорению прогрева расплавленного металла, выравниванию его температуры; благоприятно влияет на развитие процессов окисления примесей, так как обеспечивает доставку кислорода в различные зоны и объемы ванны; снижает возможность возникновения выбросов в конвертерной плавке из-за неодинаковой интенсивности окисления углерода и газовыделения по ходу плавки. От перемещения объемов металла возникают конвективные потоки, которые способствуют расплавлению скрапа. Не случайно, что в конвертерах с донным кислородным дутьем, металлическая ванна в которых интенсивно перемешивается, могут расплавляться более крупные куски скрапа чем в конвертерах ЛД, где перемешивание развито слабее. На перемешивание влияют очень многие факторы, главным из которых является воздействие на металл газовых струй и воздействие газовых пузырей CO и CO_2, возникших при окислении углерода, содержащегося в металле.

Как указывалось, кислородное дутье подается через специальное устройство, называемое фурмами. Фурма очень ответственный элемент сталеплавильного агрегата. Они должны обеспечивать должную интенсивность окислительных процессов, иметь необходимую стойкость и долговечность, не вызывать чрезмерного разбрызгивания.

Фурмы работают в крайне тяжелых температурных условиях, находясь под воздействием расплавленных металла и шлака. В таких условиях может работать только водоохлаждаемая конструкция, да и то выполненная из металла с высоким значением коэффициента теплопроводности. В настоящее время наконечники фурм чаще всего выполняются из меди, что обеспечивает их удовлетворительную стойкость.

Разбрызгивание шлака и металла при продувке ванны кислородом обязательно сопутствующее продувке и крайне нежелательное явление, приводящее к износу футеровки сталеплавильного агрегата. Избежать разбрызгивание, практически, невозможно; надо стараться всемерно его уменьшить. Для уменьшения разбрызгивания надо поднимать фурму и уменьшать скорость истечение кислорода, что, как ясно из вышеизложенного, влечет за собой уменьшение глубины проникновения, снижение интенсивности окислительных процессов и, как следствие, падение производительности.

Таким образом, при конструировании фурм приходится учитывать весьма противоположные требования к ним и, как это часто бывает в технике, решать задачу на оптимум, не удовлетворяющий в полной мере ни одному из предъявляемых требований.

Процесс разработки фурм требует обязательно экспериментальной проверки качества их работы, так как установить влияние на характер продувки числа сопел и угла их наклона по отношению к вертикали возможно лишь опытным путем.

Любая фурма обычно состоит из двух частей: собственно фурмы и головки или наконечника. Наконечник может меняться по мере необходимости. Фурма представляет собой водоохлаждаемую конструкцию, в которую вмонтированы кислородопроводы. Сама фурма выполняется из стали, наконечник из меди. В наконечнике может быть одно или несколько сопел. Вся фурма, но особенно наконечник, должны хорошо охлаждаться водой. В настоящее время повсеместно (в том числе и при продувке мартеновской ванны) используются многосопловые фурмы, в которых обеспечивается рассредоточенное дутье, при котором через каждое сопло (при той же скорости высокой) проходит меньшая масса кислорода, что и обеспечивает более спокойный ход плавки. Многосопловые фурмы при некотором снижении глубины кратера обеспечивают увеличение поверхности реакционной зоны, способствуют более равномерному газовыделению из ванны, более организованному перемешиванию металла. При этом снижается разбрызгивание, повышается выход годного. В настоящее время применяются фурмы, имеющие чаще всего от 3 до 8 сопел. Наиболее распространены четырехсопловые и шестисопловые фурмы. Конструкции фурм многообразны. На рис. 112 в качестве примера приведена конструкция четырехсопловой фурмы. Выбор числа сопел и угла их наклона к вер-

тикали связан прежде всего с допустимыми размерами диаметра реакционной зоны, т. е. в конечном счете с размерами конвертера. При малом расстоянии между соплами и при малом угле (до 5—6°) наклона их осей к вертикали индивидуальные струи сливаются, практически, в одну струю, что резко снижает эффективность применения многосопловых фурм. При слишком большом угле наклона сопел заметно уменьшается глубина проникновения и уменьшается периферийное разбрызгивание на уровне установки фурмы, что способствует чрезмерному износу футеровки. Существуют установленные практикой оптимальные углы наклона к вертикали сопел в многосопловых фурмах: в малых конвертерах (до 30 т) 6°; в больших конвертерах (100 т и более) 8—10°.

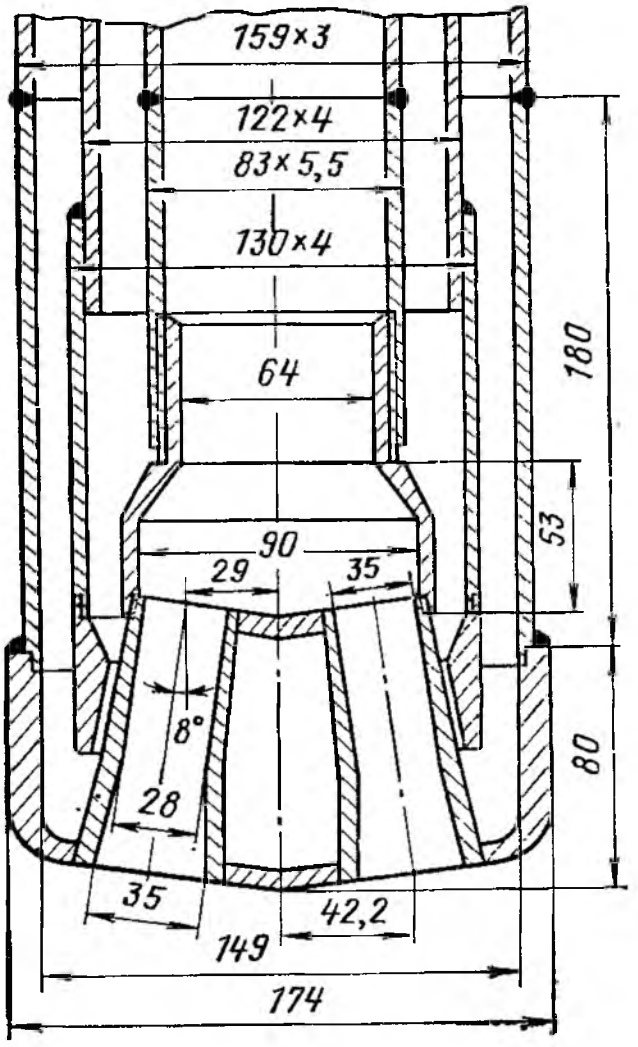


Рис. 112. Четырехсопловая кислородная фурма

В каждом кислородном конвертере используется одна фурма. Иное дело в мартеновских и двухванных печах, имеющих большое рабочее пространство вытянутой формы. Для этих целей целесообразно использовать 2—3 фурмы. Кислородное дутье вызывает интенсивное дымо- и пылеобразование, снижающее выход годного металла (из-за угара железа) и требующего непременной очистки отходящих газов. Дожигание CO в конвертерах с верхней продувкой и очистка отходящих из всех сталеплавильных агрегатов с кислородной продувкой газов требуют специальных достаточно крупных и дорогостоящих котлов-утилизаторов и очистных сооружений. Размеры и стоимость очистных сооружений находятся в прямой зависимости от количества и степени запыленности отходящих газов. По этой причине ведутся настойчивые работы, направленные на поиски путей снижения дымо- и пылеулавливания. Одним из таких путей является газо-кислородная продувка.

Снижение дымообразования может быть достигнуто добавкой к кислороду каких-либо газов, уносящих из зоны реакций окисления физическое тепло и тем самым снижающих температуру в зоне реакций. Для практического использования наиболее пригодны водяной пар и метан, так как другие газы дороги. Метан является очень доступной и недорогой добавкой, поскольку природный газ на 95—98 % состоит из метана. Благоприятное влияние добавок метана на дымообразование объясняется тем, что при его добавке сильно увеличивается количество газовой фазы, уносящей значительное количество физического тепла. Однако использованию добавок метана (природного газа) присущи следующие побочные отрицательные явления:

кислород расходуется на окисление метана, что влечет за собой снижение скорости окисления углерода,

образование значительного количества газовой фазы влечет за собой увеличение разбрызгивания шлака и металла.

В силу этих причин создание газокислообразных фурм должно исходить из необходимости использования минимально необходимого количества метана с использованием специальных мер, направленных на снижение разбрызгивания.

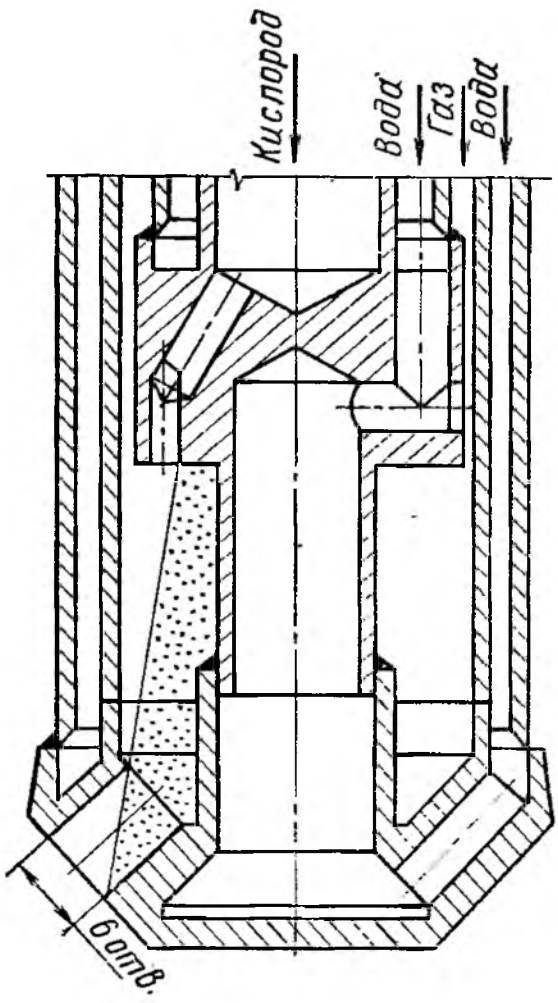


Рис. 113. Газо-кислородная фурма с внутренним смешением

Газокислородные фурмы, в принципе, могут быть двух типов: с внешним (вне фурмы) смешением кислорода и природного газа и с внутренним смешением. Фурмы с внешним смешением оказались малопригодными, т. к. смешение кислорода и метана было неудовлетворительным и дымообразование практически не уменьшалось. К тому же, в таких фурмах невозможно отключать газ, что иногда бывает нужно делать в практических условиях.

Фурмы с внутренним смешением необходимо выполнять таким образом, чтобы исключить возможность забрызгива-

ния газового или кислородного сопла. Одна из таких фурм представлена на рис. 113. Промышленные исследования газокислородной продувки на мартеновских и двухванных печах различной емкости показали, что при этом можно снизить вынос пыли в 2—4 раза по сравнению с применением чистого кислорода и повысить выход годного приблизительно на 1 %.

Таким образом, газо-кислородная продувка расплавленной ванны подовых сталеплавильных печей — процесс, таящий в себе большие возможности и требующий дальнейшего изучения.

Предварительный подогрев скрапа и его значение

Необходимость использования все увеличивающегося в каждой стране количества скрапа требует увеличения его доли в металлической завалке современных конвертеров и двухванных печей. Из анализа теплового баланса конвертера, приведенного в § 2 данной главы следует, что одним из методов повышения доли скрапа является обеспечение его предварительного подогрева. Предварительный подогрев скрапа целесообразно применять и в электрических плавильных печах, что позволяет экономить дорогую электрическую энергию. В предельном случае целесообразно использовать расплавленный скрап.

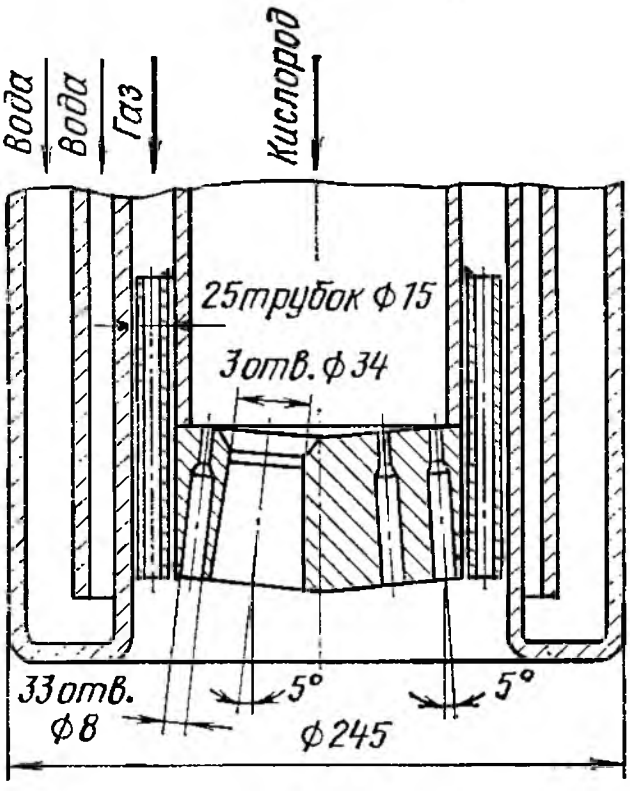


Рис. 114. Газо-кислородная горелка

Предварительный подогрев скрапа для использования его в кислородных конвертерах может осуществляться как непосредственно в конвертере, так и в специальных загрузочных емкостях. Подогрев лома в конвертерах осуществляется с использованием газо-кислородных горелок, в которых чаще всего сжигается природный газ в атмосфере кислорода. Одна из таких горелок представлена на рис. 114. Газ в этой горелке подается по заполненной трубками диаметром 15 мм кольцевой щели между кислородной трубой и водяной рубашкой. Большая часть кислорода поступает

по трем расширяющимся соплам со сверхзвуковой скоростью, что обеспечивает высокую скорость факела в месте встречи его с ломом. Остальной кислород подается с дозвуковой скоростью по 33 мелким отверстиям двойного диаметра, расположенным по периферии головки, что способствует стабилизации горения и уменьшению шума. Сжигание газа в чистом кислороде обеспечивает температуру факела, превышающую 2000 °С. В этих условиях для быстрого нагрева скрапа необходимо топливо сжигать в непосредственной близости от металла, обеспечивая тем самым высокий уровень теплоотдачи излучением и конвекцией. Учитывая высокую производительность конвертеров подогрев скрапа должен производиться быстро, во избежание снижения общей производительности конвертера и цеха. По этой причине газо-кислородная горелка должна иметь высокую тепловую мощность. Предварительный подогрев скрапа в самом конвертере дает весьма существенное увеличение количества скрапа в завалку. Обычно подогрев скрапа в конвертере производится до температуры, не превышающей 700—800 °С, так как при более высоких температурах развиваются процессы окисления железа. Как для конвертеров, так и для электроплавильных печей предварительный подогрев скрапа может осуществляться в специальных устройствах, одно из которых представлено на рис. 115. Установка состоит из футерованной загрузочной корзины, которая после помещения в нее металла устанавливается на вытяжной колодец, соединенный с дымососом и трубой, и накрывается крышкой, в которой смонтирована горелка. Предварительный подогрев скрапа для электропечей позволил сократить время плавления на 23—30 мин, повысить производительность печей на 15—18 %, сократить расход электроэнергии на 78—85 кВт·ч на 1 т стали.

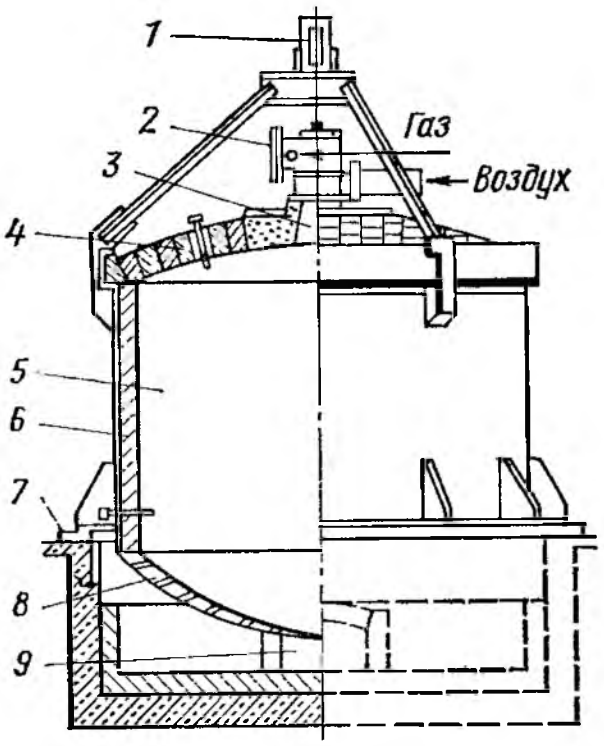


Рис. 115. Установка для подогрева шихты:

1 — устройство для подвески крышки; *2* — газовая горелка; *3* — камера предварительного сжигания; *4* — крышка; *5* — завалочная корзина; *6* — шамотная футеровка; *7* — песочный затвор; *8* — фартук с замком; *9* — канал для отходящих газов

Весьма перспективным является процесс предварительь-

ного расплавления скрапа в жидкий полупродукт в высокоэкономичных топливных печах с последующей доводкой в электропечах. Работы в этом направлении ведутся, однако пока промышленных печей такого типа в эксплуатации нет.

Кислородные конвертеры

Общая характеристика

Кислородные конвертеры получили широкое распространение благодаря ряду технико-экономических преимуществ, главными из которых являются высокая производительность по сравнению с мартеновскими печами, способность переплавлять скрап и давать сталь лучшего качества по сравнению с воздушными конвертерами. В настоящее время кислородные конвертеры являются наиболее распространенными и перспективными сталеплавильными агрегатами в мире. В достаточно широкой эксплуатации находятся кислородные конвертеры с верхней, наклонной и донной продувкой ванны кислородом. Наибольшее распространение получили конвертеры с верхней продувкой. Они обычно называются конвертерами ЛД по имени австрийских городов Линц и Донавиц, где они были впервые построены. В этих конвертерах, работающих на мартеновских чугунах, получают сталь достаточно хорошего качества, они способны переплавлять около 25 % стального скрапа в металлическую завалку. Скорость выхода кислорода из фурм в этих конвертерах в 2—2,5 раза превышает скорость звука. Увеличение доли скрапа сверх 25 % в этих конвертерах невозможно, так как оксид углерода, образующийся при окислении углерода, дожигается вне пределов рабочего пространства конвертера. Это является существенным недостатком этого конвертера, так как требует специальных, весьма крупных и дорогостоящих устройств для дожигания CO улавливания выделившегося при этом тепла. Эти устройства, среди которых главным является большой котел-утилизатор, располагаются над конвертером, что требует строительства специальных цехов большой высоты. Это обстоятельство несколько сдерживает распространение конвертеров ЛД, так как они не могут быть размещены в существующих и подлежащих реконструкции мартеновских цехах. Тем не менее конвертеры ЛД в настоящее время являются наиболее распространенными.

Стремление дожечь оксид углерода в пределах рабочего пространства и получить дополнительное количество тепла,

необходимое для использования большей, чем 25 % доли скрапа в металлическую завалку, послужило толчком для создания конвертера с подачей кислорода под углом к поверхности металлической ванны со скоростью, не превышающей 200—250 м/с. Конвертер расположен наклонно, имеет развитую поверхность металлической ванны и во время плавки вращается вокруг оси, что улучшает перемешивание металла и позволяет полезно использовать тепло, аккумулированное кладкой. Все это позволило обеспечить дожигание CO в пределах рабочего пространства конвертера и поднять долю скрапа в завалку до 45 %. Впервые такой конвертер был построен в 1956 г. в шведском городе Домнарвете по предложению известного металлурга профессора Каллинга и получил название конвертера Кал-До. В настоящее время в конвертерах Кал-До выплавляется приблизительно 35 млн. т стали. Распространение этих конвертеров несколько сдерживается сложностью их строительства и эксплуатации. Конвертер Кал-До также как и ЛД работает на мартеновских чугунах и требует строительства специального цеха, так как в существующих мартеновских цехах размещен быть не может.

В 1966—1967 гг. за рубежом были построены кислородные конвертеры с донным дутьем. Необходимость создания такого конвертера возникла, в основном, по двум причинам. Во-первых, необходимостью переработки чугунов с повышенным содержанием марганца, кремния и фосфора, поскольку передел такого чугуна в конвертерах ЛД сопровождается выбросами металла в ходе продувки и не обеспечивает должной стабильности химического состава готовой стали. Второй причиной является то, что конвертер с донной продувкой стал наиболее приемлемой конструкцией для реконструкции существующих бессемеровских и томассовских цехов и вписывается в здание существующих мартеновских цехов, подлежащих реконструкции. Этому конвертеру свойственно наличие большого числа реакционных зон, интенсивное окисление углерода с первых минут плавки, низкое содержание оксидов железа в шлаке. В силу специфики работы сталеплавильной ванны при данной продувке в конвертерах подобного типа выход годного несколько выше, чем в конвертерах ЛД и Кал-До, а запыленность отходящих газов ниже. В 1979 г. в мире работало 79 конвертеров с донным дутьем, общая производительность которых достигала 37—38 млн. тонн стали, т. е. около 7 % мирового производства кислородно-конвертерной стали.

Первоначально предполагалось, что особенность процес-

са производства стали с донной продувкой кислородом сделают его экономически более выгодным по сравнению с конвертерами ЛД, благодаря тому, что на бывших вначале в эксплуатации 25—30-тонных конвертерах переплавлялось до 40 % скрапа и выход годного был выше. Однако опыт эксплуатации крупных конвертеров не подтвердил этого: удельный расход скрапа оказался на уровне 20—25 %, выход годного одного порядка с конвертерами с верхним дутьем. Недостаточный опыт эксплуатации конвертеров с донным дутьем не позволяет пока сделать окончательный вывод о преимуществах одного из этих процессов производства стали. Необходимо отметить, что всем конвертерам свойственны значительный угар железа и высокая запыленность отходящих газов, требующая применения весьма совершенных методов очистки газов. Без применения газоочисток с самой высокой степенью очистки эксплуатация кислородных конвертеров недопустима.

Кислородные конвертеры с верхней продувкой (ЛД)

Устройство кислородного конвертера и его размещение в цехе представлено на рис. 116. Основная, средняя часть корпуса конвертера цилиндрической формы, стены ванны сферической формы, днище — плоское. Верхняя, шламная часть конической формы. Кожух конвертера выполняют из стальных листов толщиной 30—90 мм. В конвертерах садкой до 150 т днище выполняют отъемным и крепят его к корпусу болтами. Отъемное днище облегчает ремонтные работы. При садке 250—350 т конвертер делают глуходонным, что вызвано необходимостью создания жесткой конструкции корпуса и условиями техники безопасности, гарантирующей от случаев прорыва жидкого металла.

Корпус конвертера крепится к специальному опорному кольцу, к которому привариваются цапфы. Одна из цапф через зубчатую муфту соединена с механизмом поворота. В конвертерах большой емкости (более 250 т) обе цапфы являются приводными. Конвертер цапфами опирается на подшипники, установленные на станинах. Механизм поворота позволяет вращать конвертер на любой угол вокруг горизонтальной оси.

Корпус и днище конвертера футеруют огнеупорным кирпичом. Футеровку цилиндрической части конвертера выполняют из трех слоев: внутренний (рабочий) слой толщиной 600—800 мм, промежуточный слой толщиной 50—150 мм и наружный (арматурный) слой толщиной 115—350 мм. Рабочий слой выкладывают смолодоломитомагнезитовым

кирпичом. Арматурный слой, примыкающий к кожуху, выкладывают из хромомагнезитового кирпича. Промежуточный слой заполняют смолодоломитовой или смоломагнезитовой набивкой. Рабочий слой днища выкладывают смолодоломитовым, наружный — хромомагнезитовым кирпичом общей толщиной 800—900 мм.

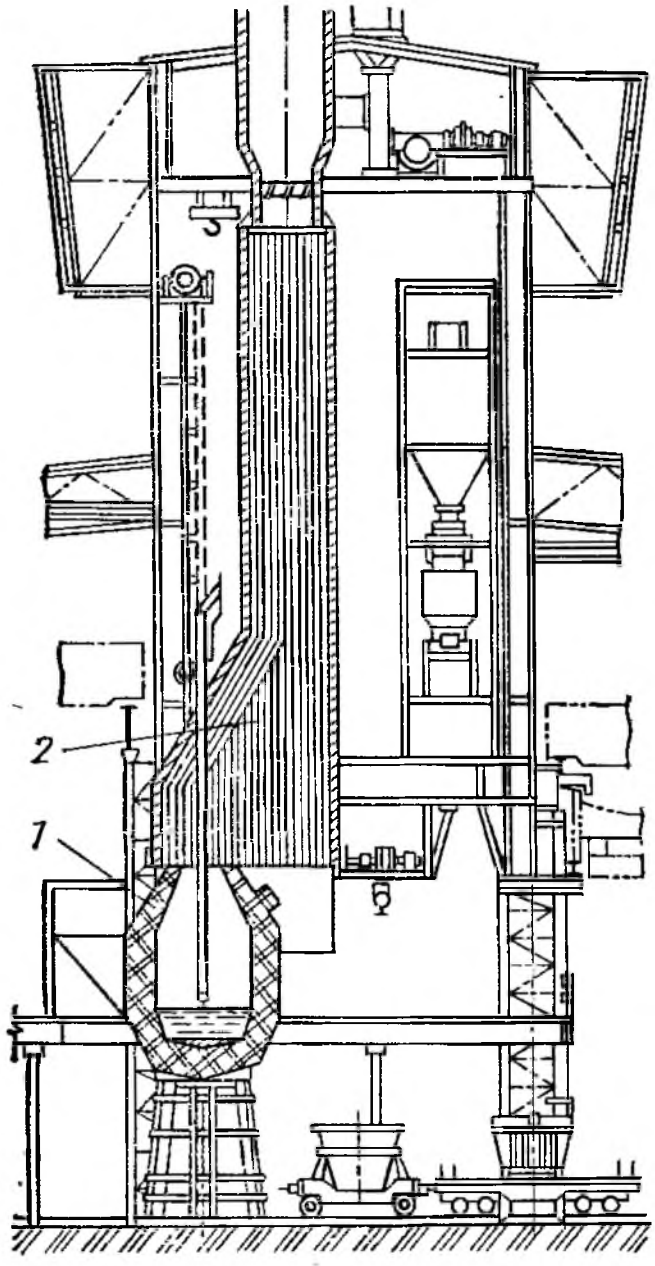


Рис. 116. Размещение конвертера ЛД в цехе:

1 — конвертер; *2* — камин

Подача кислорода в ванну конвертера для продувки металла производится через специальную фурму, вводимую в горловину конвертера.

Первой операцией конвертерного процесса является загрузка скрапа. Разогретый конвертер наклоняют на некоторый угол от вертикальной оси и специальным коробом-совком емкостью 8—10 м³ через горловину загружают в конвертер скрап. Обычно загружают 20—25 % скрапа на плавку. Если скрап не подогревают в конвертере, то затем сразу же заливают жидкий чугун. После этого конвертер устанавливают в вертикальное положение, через горловину в конвертер вводят кислородную фурму.

Для наводки шлака в конвертер по специальному желобу вводят шлакообразующие материалы: известь в количестве 5—7 % и в небольшом количестве железную руду и плавиковый шпат.

После окисления примесей чугуна и нагрева металла до заданных величин продувку прекращают, фурму из конвертера удаляют и сливают металл и шлак в ковши. Легирующие добавки и раскислители вводят в ковш.

Продолжительность плавки в хорошо работающих конвертерах почти не зависит от их емкости и составляет ~45 мин, продолжительность продувки 15—25 мин. Каж-

дый конвертер в месяц дает 800—1000 плавок. Стойкость конвертера 600—800 плавок. Расход огнеупоров 3—3,5 кг/т стали. Выход жидкой стали 89—91 %. Количество шлака 10—12 %. Расход кислорода 50—55 м³/т. Продолжительность продувки ванны кислородом по существу определяет производительность конвертера. Продолжительность продувки зависит от удельного расхода кислорода. Чрезмерное увеличение удельного расхода кислорода нецелесообразно, так как увеличивает разбрызгивание и ускоряет износ футеровки конвертеров. Практически интенсивность продувки составляет 3,5—4 м³ O_2/мин на 1 т стали. Длина водоохлаждаемой фурмы для подачи кислорода составляет 13—18 м. Слишком низкое расположение фурмы приводит к ее быстрому износу. Поэтому фурму обычно располагают на расстоянии 1—2 м от уровня спокойной ванны, обеспечивая на выходе из сопла значение критерия Маха около 2.

В месте соприкосновения струи кислорода с жидкой ванной благодаря высокой температуре образуются пары металлического железа и оксидов, которые выносятся из ванны конвертерными газами в виде бурого дыма, т. е. происходит интенсивное пылеобразование.

Движение металла в конвертере является весьма сложным; помимо кислородной струи, на жидкую ванну воздействуют пузыри оксида углерода. Процесс перемешивания усложняется еще и тем, что шлак проталкивается струей газа в толщу металла и перемешивается с ним. Движение ванны и вспучивание ее выделяющимися оксидами углерода приводят значительную часть жидкого расплава в состояние эмульсии, в которой капли металла и шлака тесно перемешаны друг с другом. Это создает большую поверхность соприкосновения металла со шлаком, что обеспечивает высокую скорость окисления углерода и высокую скорость нагрева металла. При окислении углерода на 1 м³ поданного в ванну кислорода выделяется 2 м³ CO. Для 200-т конвертера расход газа в горловине достигает 60 000 м³/ч. Дожигание CO над ванной практически не происходит и газ, отходящий из конвертера, состоит из 90 % CO и 10 % CO_2, а его температура в среднем составляет 1700 °С. Запыленность отходящих газов очень велика, поэтому газ необходимо очищать. Применяемые установки мокрой очистки и электрофильтры требуют предварительного охлаждения газа (соответственно до 400°С и 250 °С). Размеры установок для дожигания, охлаждения и очистки конвертерных газов во много раз превышают размеры самих конвертеров (см. рис. 116). Чаще всего на заводах газ (CO) до-

жигают в камине при подаче холодного воздуха, засасываемого через зазор между горловиной и камином или подаваемого принудительно. Стенки камина представляют собой поверхности котла-утилизатора или водяные холодильники. Газ дополнительно охлаждают впрыскиванием воды, а затем очищают.

Следует отметить, что степень использования тепла в кислородном конвертере гораздо выше, чем в сталеплавильных агрегатах подового типа. К. п. д. (тепловой) конвертера составляет ~70 %, в то время как для хорошо работающих мартеновских печей он не более 30 %, что является большим преимуществом конвертерного процесса перед мартеновским. Кроме того, газы, отходящие из конвертера, имеют теплоту сгорания 10—11,5, МДж/м^3, что используется или при дожигании газа в котлах-утилизаторах, или как топливо при отводе газов из конвертера без дожигания.

Кислородные конвертеры Кал-До

Значительное количество химического тепла, содержащееся в оксиде углерода и выделяющееся из ванны, можно использовать в самом конвертере. Сжигание CO над ванной конвертера ЛД, как правило, не применяют, так как вследствие малой площади ванны конвертер не приспособлен к функциям теплообменника. Кроме того, при сгорании CO значительно повышается температура рабочего пространства и усиленно изнашивается кладка.

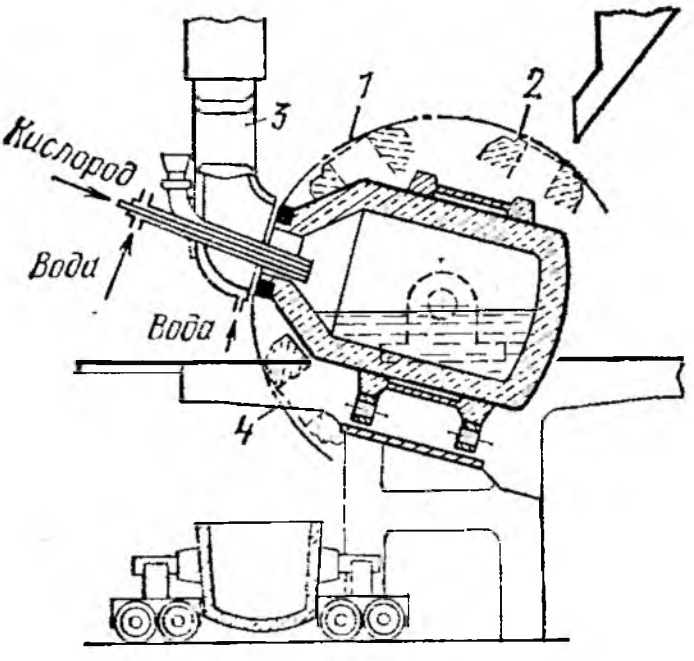


Рис. 117. Кислородный конвертер Кал-До:
1 — положение при заливке чугуна; *2* — положение при загрузке сыпучих; *3* — камин; *4* — положение при выпуске стали

Конструкция конвертера, приспособленного к сжиганию CO (конвертера Кал-До), показана на рис. 117. Корпус печи покоится на роликах, два из которых — приводные, они обеспечивают вращение конвертера вокруг его оси со скоростью до 30 об/мин. Все ролики закреплены в люльке, которая может поворачиваться вместе с печью вокруг горизонтальной оси (поворотная цапфа на рисунке показана пунктиром). В рабочем положении ось

конвертера наклонена к горизонту под углом 17°, благодаря чему площадь ванны получается достаточно большой. Кладка напоминает футеровку конвертеров ЛД.

Кислород подают через водоохлаждаемую фурму, направленную под углом к ванне. Окисление примесей ванны происходит в результате диффузии кислорода через шлак. Так как поверхность ванны больше, толщина шлака меньше, что способствует достаточно быстрой передаче кислорода в металл. Большое значение для ускорения окисления ванны имеет также вращение конвертера, усиливающее перемешивание металла и шлака.

В этих условиях нет необходимости вводить кислород со сверхзвуковой скоростью. Наоборот, его подают так, чтобы шлак сильно не разбрызгивать. Обычно скорость кислорода на выходе из фурмы составляет 200—250 м/с. Угол наклона и расстояние фурмы от поверхности ванны изменяют по ходу плавки.

Поскольку часть тепла, необходимого для процесса, поступает к ванне при сжигании CO, конвертер Кал-До не является чистым теплогенератором. Он одновременно служит топкой и теплообменником.

Большая роль в процессе передачи тепла к ванне принадлежит кладке, выполняющей функции регенератора; часть ее, находящаяся над ванной, нагревается от газовой среды с высокой температурой, а затем, вступая в контакт с более холодным металлом и шлаком, отдает им свое тепло. Вследствие охлаждения металлом средняя температура кладки сохраняется на допустимом уровне. Все же стойкость кладки конвертера Кал-До значительно ниже стойкости кладки печи ЛД и составляет для крупных печей от 50 до 150 плавок. Опыты по применению обожженного магнезитового кирпича высокой чистоты говорят о том, что стойкость кладки можно значительно повысить.

Для сохранения кладки конвертеров Кал-До расход кислорода в них поддерживают более низким, чем в конвертерах ЛД: 1,5—2,5 м³/мин на 1 т металла. Поэтому общая продолжительность плавки получается большей: для агрегатов емкостью 110—135 т она составляет 70—80 мин.

Благодаря тому, что в ванну тепло поступает извне в печах Кал-До необходимо снижать приход тепла путем теплогенерации или увеличивать расходные статьи. Для этого уменьшают долю чугуна в шихте или увеличивают количество твердых окислителей. Оба способа дают Кал-До-процессу значительные экономические преимущества. Первый позволяет перерабатывать большие количества относитель-

но дешевого стального лома (до 45 % вместо 25 % при ЛД-процессе), второй приводит к более высокому выходу жидкого металла.

В отличие от конвертеров ЛД из горловины печи Кал-До выходит газ, содержащий лишь незначительное количество CO. Так как кислород поступает преимущественно в результате диффузии через шлак и меньше разбрызгивается ванна, потери железа с пылью в печи Кал-До составляют 11 кг на 1 т стали по сравнению с 17 кг для печи ЛД. По этим причинам размеры установок для охлаждения и очистки газа для конвертеров Кал-До значительно меньшие и стоимость их значительно ниже.

Удельная продолжительность продувки в конвертере Кал-До с возрастанием расхода кислорода уменьшается, так же как и для конвертера ЛД. Часть кислорода расходуется на дожигание CO. Выделяющееся при этом тепло в зависимости от условий горения и теплообмена может усваиваться ванной в большей или меньшей степени. Тепло от сгорания примесей выделяется в ванне и усваивается ею полностью.

Кислородные конвертеры с донной продувкой

Попытки применения кислородного дутья в томассовских и бессемеровских конвертерах с донным воздушным дутьем делались неоднократно, но не принесли положительных результатов, так как футеровка днища не выдерживала тех высоких температур, которые развивались в местах подачи кислорода в металлическую ванну. В этих местах происходило очень интенсивное окисление примесей чугуна и развивалась чрезмерно высокая температура. Для предохранения кладки днища конвертера от действия высоких температур фурму выполняют в виде двух коаксиальных трубок (рис. 118), в которых по центральной подается кислород, а по периферийной какое-либо углеводородное топливо, чаще всего природный газ. Таких фурм обычно делается 16—22, диаметр кислородного сопла фурм колеблется в пределах 28—50 мм, зазор для подачи топлива зависит от вида топлива и составляет 0,5—2,0 мм. Большое число более мелких фурм обеспечивает лучшее перемешивание ванны и более спокойный ход плавки. Струя топлива отдаляет реакционную зону от днища, снижает температуру около днища в месте выхода кислородных струй за счет отбора тепла на нагрев топлива, крекинг и диссоциацию составляющих топлива и продуктов их окисления. Охлаждающий эффект кроме того обеспечивается пылевидной

известью, которая подается в струю кислорода. Как показывает практика, количество поданного в фурмы топлива должно составлять приблизительно 5—7 % по отношению к массе кислорода. Излишнее увеличение расхода топлива, в надежде увеличить приход тепла и получить возможность увеличить удельное количество скрапа не приносит желаемого результата, так как приводит к образованию настылей на днище, повышению содержания водорода в стали. Теплотехнические расчеты показывают, что количество тепла, выделяемое при окислении составляющих топлива, очень не намного превышает количество тепла, которое расходуется на диссоциацию CO_2 и H_2O. Однако конвертер с донным кислородным дутьем имеет несколько меньшие тепловые потери (по сравнению с конвертером ЛД), т. к. отсутствуют потери тепла на охлаждение фурм; при донном дутье приблизительно вдвое уменьшаются потери металла с дымом и, следовательно, уменьшаются потери тепла на испарение железа. Для футеровки конвертера с донным дутьем применяют, в основном, те же материалы, что и для конвертеров с верхним дутьем. Футеровка горловины и верха цилиндрической части в этих конвертерах изнашивается меньше чем в конвертерах ЛД; в наибольшей степени изнашивается днище, которое растрескивается из-за большого перепада температур по толщине кладки. Средняя стойкость футеровки стен составляет 1400—1500 плавок, стойкость днищ 550—600 плавок. Промежуточная замена днищ — большой недостаток конвертеров с донной продувкой.

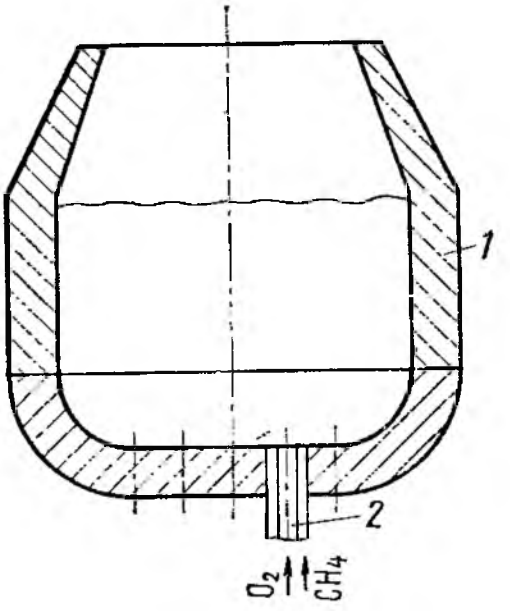


Рис. 118. Схема кислородного конвертера с донной продувкой:

1 — корпус конвертера; *2* — фурма

Продувка расплавленного металла несколькими струями кислорода снизу создает ряд особенностей в работе конвертера с донным кислородным дутьем. Обеспечивается большое число реакционных зон и большая межфазная поверхность контакта кислородных струй с металлом. Это позволяет увеличить интенсивность продувки, повысить скорость окисления углерода, интенсивность продувки кислородом в таких конвертерах достигает 4—5 м³ O_2/т·мин. Улучшается перемешивание ванны, повышается степень ис-

пользования кислорода. Улучшение перемешивания влечет за собой возможность расплавления больших по массе кусков скрапа. Лучшая гидродинамика ванны обеспечивает более ровный и спокойный ход всей плавки, практически исключает выбросы. В силу этого в конвертерах с донным дутьем можно перерабатывать чугун с повышением содержания марганца и фосфора.

Использование конвертеров с донной продувкой кислородом из-за меньшего угара железа позволяет получить больший выход годной стали, превышающий таковой для конвертеров ЛД на 1,5—2 %. Плавка в 180-тонном конвертере с донной кислородной продувкой длится 32—39 мин, продувка 12—14 мин, т. е. производительность выше, чем у конвертеров ЛД. Однако, необходимость промежуточной замены днищ нивелирует это различие в производительности.

Конвертеры с донным дутьем могут размещаться в реконструируемых мартеновских цехах, что подкрепляет их перспективность. При установке конвертеров в мартеновском цехе обеспечивается экономия на здании (с учетом его реконструкции), равная 20—25 % стоимости нового цеха, что является очень существенным. Отсутствие в конвертерах с донным дутьем вертикально расположенной конвертерной фурмы упрощает и удешевляет конструкции газоочистных устройств.

Мартеновские печи

Мартеновские печи долгое время оставались основным сталеплавильным агрегатом благодаря своей универсальности в отношении шихты, состава готовой стали, используемого топлива. Преобладающая часть тепла поступает в мартеновскую ванну из рабочего пространства печи в результате теплоотдачи от факела и элементов кладки.

На заводах с полным металлургическим циклом в мартеновских печах переплавляют обычно 50—75 % жидкого чугуна и 25—50 % скрапа (скрап-рудный процесс). На металлургических заводах, не имеющих доменных печей и на машиностроительных заводах шихта мартеновских печей состоит практических из скрапа (скрап-процесс), твердый чугун добавляется в том случае, если необходимо обеспечить требуемое содержание углерода в готовой стали.

Мартеновские печи делят на стационарные и качающиеся. У качающихся печей рабочее пространство может наклоняться в сторону разливочного пролета для выпуска ста-

ли и в сторону печного пролета для скачивания шлака. Качающиеся мартеновские печи обычно применяют для переработки чугунов с содержанием в них до 2 % фосфора. Для удаления фосфора необходимо наводить в печи большое количество шлака и периодически его удалять, что и делается наклоном печи в сторону печного пролета. Эти печи удобны в работе и когда необходимо выпускать металл отдельными порциями (например, при фасонном литье, дуплекс-процессе и др.). Качающиеся печи удобны в эксплуатации, но сложны по конструкции и требуют больших затрат при строительстве. Основное количество мартеновской стали выплавляют в стационарных печах.

В СССР эксплуатируются промышленные мартеновские печи садкой до 900 т. Под садкой (или емкостью) печи понимают массу чугуна и скрапа, загружаемые в печь для одной плавки. Кислород необходимый для процесса окисления примесей, поступает в ванну обычно из двух источников: из атмосферы печи диффузией через шлак и из твердых окислителей (чаще всего железной руды), вводимых в ванну. Развитие тепло-массообменных процессов в рабочем пространстве мартеновской печи определяется условиями сжигания топлива и характеристиками факела. Необходимость иметь в рабочем пространстве печи температуру около 1750 °С требует таких условий сжигания топлива, при которых калориметрическая температура горения должна быть около 2500 °С. Такую температуру горения невозможно получить без обеспечения подогрева воздуха, идущего на горение, или воздуха и газа. Из рабочего пространства печи уносится приблизительно 80 % тепла, поданного в печь. Это тепло уносится с отходящими газами, имеющими температуру 1600—1700 °С. Поэтому целесообразно подогрев воздуха (или воздуха и газа) производить утилизируя тепло отходящих продуктов сгорания. В силу этого все мартеновские печи оборудованы регенераторами: если печь работает на топливе с высокой теплотой сгорания (природный газ, мазут), то подогревается только воздух, если на топливе с низкой теплотой сгорания, то подогревается и воздух и само газообразное топливо. Подогрев и воздуха и газа осуществляется до температуры 1050—1150 °С. Таким образом, если печь отапливается смешанным газом (смесь доменного и коксового газа) с низкой теплотой сгорания (до 14000 кДж/м^3), то необходимо подогревать как воздух, так и газ, для чего требуется две пары регенераторов. При отоплении печей природным газом или мазутом требуется только одна пара регенераторов для подогрева воздуха.

Основным видом передачи тепла в печи является тепловое излучение (~90 %), поэтому повышение температуры в рабочем пространстве, наряду с обеспечением оптимальных радиационных характеристик факела являются весьма эффективным средством интенсификации теплообмена и повышения производительности печей. Повышение температуры ограничено огнеупорностью футеровки печи, поэтому в отдельные периоды плавки (доводка), когда тем-

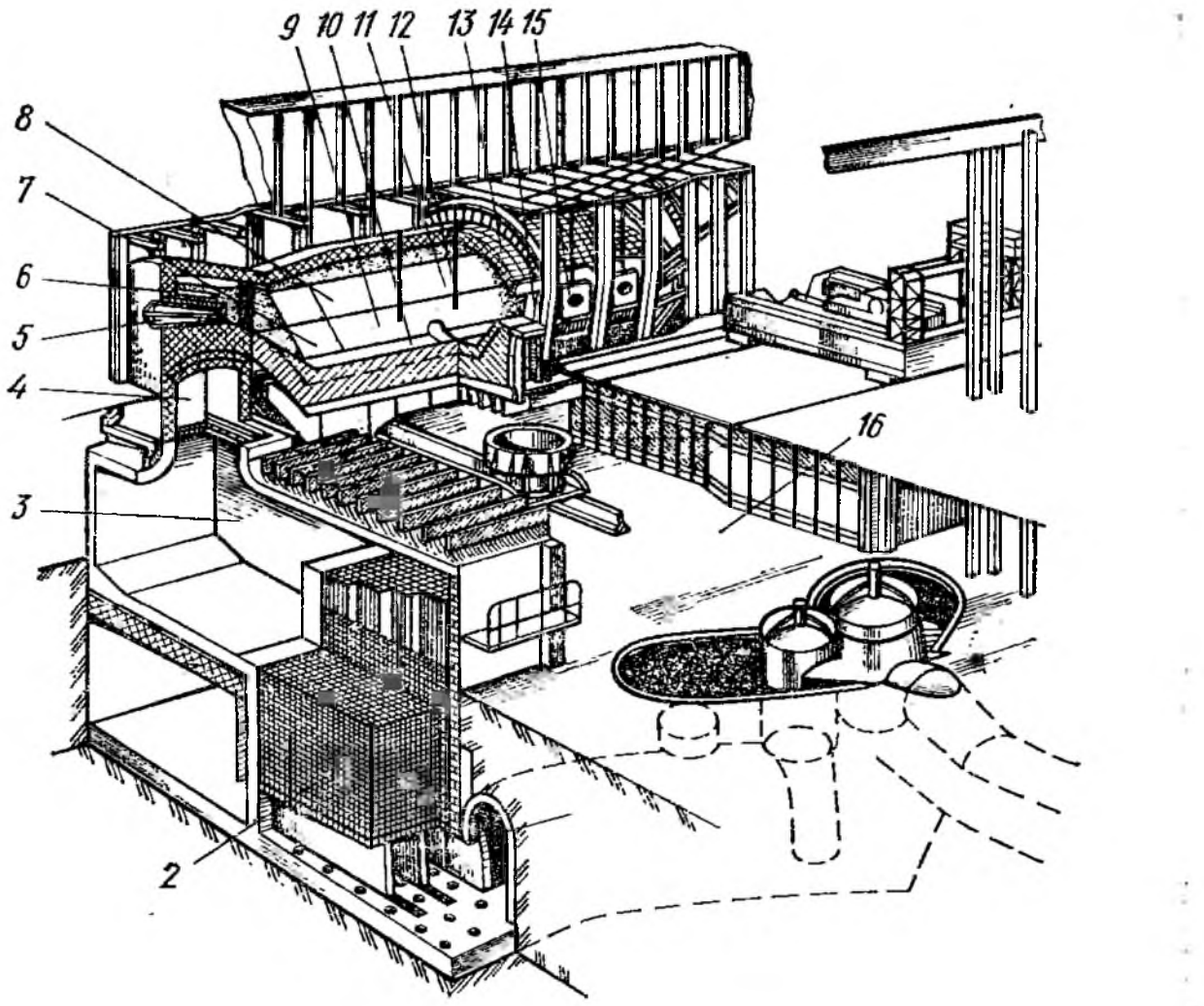


Рис. 119. Мартеновская печь, отапливаемая высококалорийным топливом

пература футеровки находится на пределе, достижение необходимого уровня теплоотдачи возможно лишь за счет повышения излучательной способности факела.

В последние годы получила распространение продувка мартеновской ванны кислородом, которая позволила значительно увеличить производительность печей, хотя и породила свои дополнительные проблемы.

На рис. 119 показана одна из конструкций стационарной мартеновской печи, отапливаемой высококалорийным топливом. Печь можно условно разделить на верхнее (выше рабочей площадки *16*) и нижнее (ниже рабочей пло-

щадки) строения. Верхнее строение печи состоит из рабочего пространства *8*, головок *6* и вертикальных каналов *4*. Нижнее строение печи включает в себя регенераторы *2*, шлаковики *3*, борова *1*.

Рабочее пространство — это та часть печи, где протекают процессы выплавки стали, сгорания топлива и передачи тепла материалам шихты.

В передней стенке рабочего пространства предусмотрены завалочные окна *15*, обрамленные с обеих сторон столбиками *14*. Завалочные окна служат для завалки шихты в печь, заливки чугуна и скачивания шлака. Число окон обычно нечетное (от 3 для малых печей до 7 для больших). В задней стенке *11* расположены отверстия для выпуска стали и шлака. Среднее окно предназначено также для обслуживания сталевыпускного отверстия. На некоторых печах жидкий чугун заливают через отверстие, находящееся в задней стенке рабочего пространства. Стены печи наклонены для того, чтобы при заправке с них не осыпались заправочные материалы.

Нижняя часть рабочего пространства, ограниченная подиной *10* и откосами *7* и *9* печи (нижней частью передней, задней и торцевых стенок), называется ванной. Ванна вмещает весь жидкий металл и шлак. Верхним уровнем ванны являются пороги — стальные плиты, образующие нижнюю часть завалочных окон. Сверху рабочее пространство ограждено арочным сводом *13*. В своде есть отверстия, через которые в печь вводят кислородные фурмы *12* для продувки ванны кислородом.

С торцевых сторон к рабочему пространству примыкают головки печи. Головки служат для подвода топлива в печь при помощи горелок *5*, смешения его с воздухом и подготовки к сжиганию, а также для отвода из печи продуктов сгорания топлива и технологических газов. Поэтому требования, предъявляемые к ним, противоречивы. С одной стороны, когда через головку в печь подается топливо и воздух для создания больших скоростей истечения газов, т. е. для хорошего перемешивания топлива с воздухом и получения жесткого факела, необходима небольшая площадь газовых каналов. С другой стороны, каналы малого сечения характеризуются большим гидравлическим сопротивлением в тот период, когда головка служит для отвода газов из печи. Правильный выбор конструктивных размеров головок печи особенно усложняется для печей, отапливаемых низкокалорийным топливом и, следовательно, оборудованных газовыми (для подогрева газообразного топли-

ва) и воздушными (для подогрева воздуха) регенераторами. В этом случае головки должны быть так сконструированы и иметь такие размеры окон для выхода газа и воздуха, чтобы обеспечить правильное распределение проходящих через них продуктов сгорания между воздушными и газовыми регенераторами.

Применение таких топлив с высокой теплотой сгорания, как природный газ и мазут, упрощает конструкцию головки и всей печи в целом, так как исключается потребность в регенераторах для подогрева топлива. Печи с такими головками имеют только одну пару регенераторов для подогрева воздуха и оборудованы обычно одноканальными головками. В одноканальных головках (см. рис. 119) воздух подается по вертикальному каналу, а топливо — через горелку или форсунку. Как уже отмечалось, факел мартеновской печи должен обладать достаточной светимостью, т. е. иметь хорошую излучательную способность. Если печь отапливается мазутом, то дополнительных мер принимать не надо, так как мазутный факел обладает достаточной светимостью. При отоплении печей газообразным топливом обычно обеспечение должной светимости достигается добавками мазута или смолы (искусственная карбюризация факела). Иногда обеспечивается самокарбюризация факела за счет разложения углеводородов газообразного топлива.

Вертикальные каналы мартеновских печей служат для соединения рабочего пространства со шлаковиками.

К нижнему строению печи относятся шлаковики, регенераторы, дымовые борова, перекидные устройства. Шлаковики предназначены для очистки газов, уходящих из рабочего пространства, от крупной пыли. Очистка основана на том, что газы, попадая в шлаковик, теряют свою скорость вследствие резкого и внезапного расширения канала. Газы, движущиеся с небольшой скоростью, не могут увлечь за собой крупные частицы пыли, и последние оседают на дно шлаковика. Частично очищенные газы изменяют на 90° направление своего движения и поступают в регенераторы, где отдают свое тепло огнеупорной насадке. Объем шлаковика должен быть таким, чтобы в нем умещалась пыль, оседающая за время межремонтного периода (2—3 мес.). Проходя через регенераторы, дымовые газы охлаждаются с 1500—1600 до 800—600 °С. После перекидки клапанов, когда через разогретую насадку регенераторов пропускается воздух или газ, тепло насадки передается им, в результате чего температура воздуха или газа поднимается до 850—1150 °С. Борова предназначены для отвода продуктов

сгорания из регенераторов и подвода к ним газа́ или воздуха. Переключение регенераторов с нагрева на охлаждение и наоборот осуществляется с помощью перекидных устройств — клапанов тарельчатого и золотникового типов и шиберов. Перекидка клапанов осуществляется автоматически, а в необходимых случаях вручную.

Футеровка печи, особенно рабочего пространства, работает в очень тяжелых условиях. Механические удары и истирание, химическое взаимодействие плавильной пыли и шлаков, высокие температуры являются причиной использования для кладки мартеновских печей высококачественных огнеупорных материалов. Чтобы предотвратить разъедание кладки основными оксидами шлака, рабочее пространство выкладывают из основных огнеупоров. Под печи, заднюю и переднюю стенки, а также откосы выполняют из магнезитового кирпича. В качестве тепловой изоляции служит шамотный и пеношамотный кирпич, который применяют для кладки наружных слоев. Внутреннюю поверхность пода покрывают толстым слоем магнезитовой наварки. Иногда подину печи не наваривают, а набивают магнезитовым порошком.

Для свода печи применяют термостойкий магнезитохромитовый кирпич. В процессе кладки свода между отдельными кирпичами устанавливают тонкие металлические прокладки. При сильном разогреве свода эти прокладки расплавляются, и отдельные кирпичи свариваются между собой.

Головки и стены вертикальных каналов выкладывают из хромомагнезитового кирпича, стены шлаковиков и верхнюю часть стен регенераторов — из динасового кирпича с облицовкой хромомагнезитом. Облицовка защищает кладку от вредного воздействия плавильной пыли. Нижнюю часть стен и большую часть насадки регенераторов выполняют из шамотного кирпича; верхние ряды насадки регенераторов— из форстеритовых или высокоглиноземистых огнеупоров, более устойчивых против агрессивного действия плавильной пыли. Борова и внутреннюю часть дымовой трубы футеруют шамотным кирпичом. Современная мартеновская печь обычно оборудована котлом-утилизатором, позволяющим использовать до 50 % тепла дымовых газов для получения пара, установкой для очистки дымовых газов от пыли, комплексом контрольно-измерительных приборов и приборов автоматического управления тепловым режимом печи. Печи снабжены также системой испарительного охлаждения.

Длительность одной плавки в мартеновской печи по ор-

ганизационно-технологическим и теплотехническим признакам разбивается на следующие периоды: заправка, завалка, прогрев (если печь работает на жидком чугуне, то этот период отсутствует), плавление, доводка.

Обычно для мартеновских печей составляется тепловой график плавки, один из которых в качестве примера приведен на рис. 120. Как видно из графика, по ходу плавки контролируются такие величины, как тепловая нагрузка *1*,

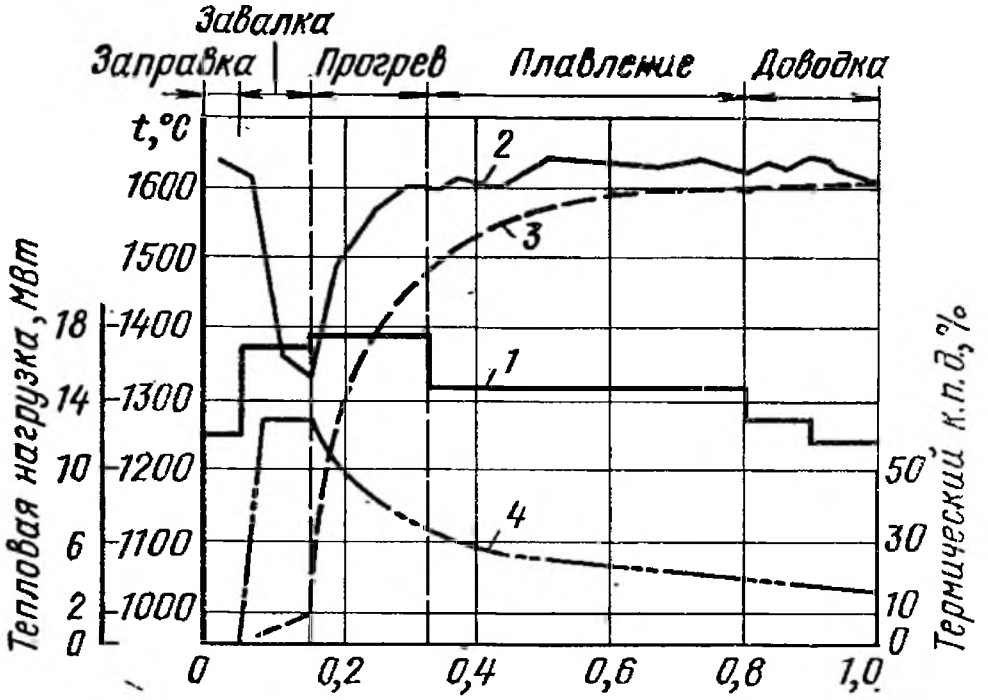


Рис. 120. Изменение тепловой нагрузки, температуры и термического к. п. д.

температура поверхности свода *2*, температура поверхности шихты и ванны *3*, рассчитывается термический к. п. д. Тепловая нагрузка и температура свода — основные величины, по которым ведется плавка.

Производительность мартеновских печей определяется несколькими показателями: годовой (т/год), часовой (т/ч) производительностью и съемом стали с 1 м^2 площади пода в сутки. Удельный расход тепла колеблется от 2100 МДж/т (крупные печи) до ~6300 МДж/т (малые печи). Годовая производительность — наиболее важный показатель работы печи зависит от часовой производительности и длительности простоев на ремонт. Для современных мартеновских печей холодные и горячие ремонты составляют 5—7 % времени эксплуатации. Годовая производительность для 200-т печей составляет 200—240 тыс. в год; для 400-т печей 370 тыс. т в год; для 600-т печей 490 тыс. т в год; для 900-т печей 670 тыс. т в год; часовая производительность соответственно 24—29; 45; 59 и 81 т/ч.

При интенсивной продувке мартеновской ванны выделяется значительное количество CO, которую трудно полностью дожечь в самом рабочем пространстве. Часть несгоревшей CO и большое количество пыли выносятся дымовыми газами из рабочего пространства печи. Для лучшего

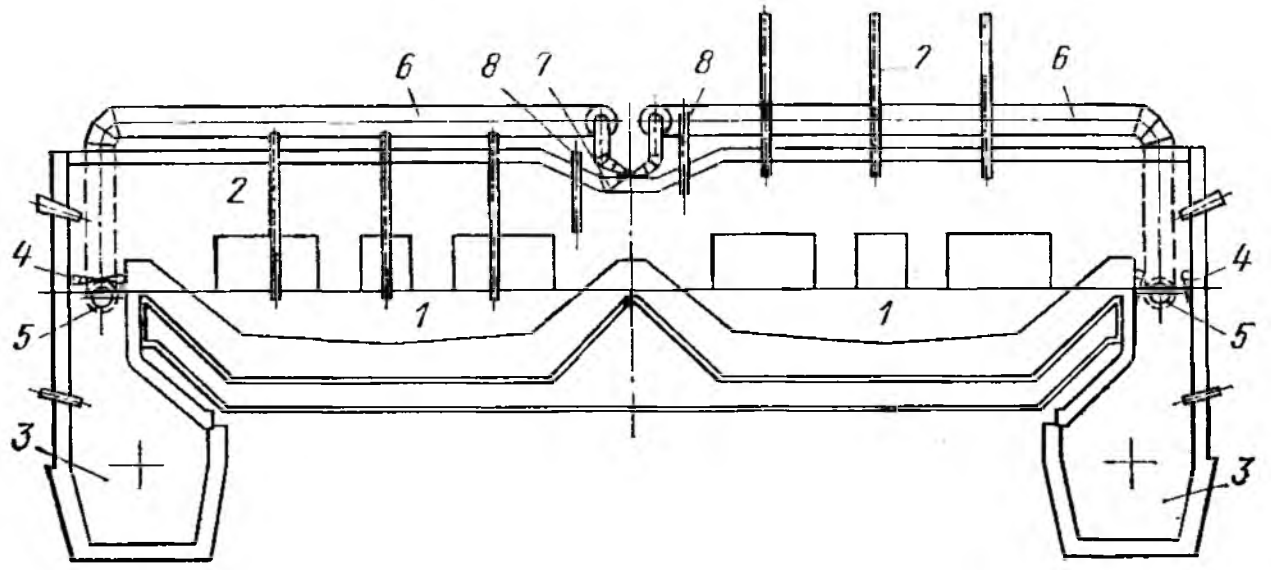


Рис. 121. Двухванная печь 2×300 т:

1 — ванны печи; *2* — фурмы; *3* — шлаковики; *4* — водоохлаждаемая заслонка; *5* — амбразура для отбора воздуха из вертикального канала; *6* — футерованный воздухопровод; *7* — амбразура в своде печи; *8* — эжектор

использования CO и частичного улавливания пыли в самом рабочем пространстве создана двухванная сталеплавильная печь (рис. 121).

Рабочее пространство такой печи разделено переводом на две ванны. Обе ванны имеют общий свод, так что продукты сгорания, образующиеся в одной ванне, проходят вторую часть рабочего пространства.

Печь работает следующим образом: в одной ванне (горячей) происходит плавление и доводка с интенсивной продувкой металла кислородом, а во второй ванне (холодной) в то же время идет завалка и прогрев твердой шихты. Газы из горячей части печи направляются в холодную и состоят до 35 % из оксида углерода. В холодной части печи CO догорает до CO_2 и за счет выделяющегося тепла происходит нагрев твердой шихты. Недостающее для процесса нагрева тепло восполняется подачей природного газа через горелки, установленные в своде печи. Сгорание природного газа и догорание CO совершаются за счет дополнительного кислорода.

Когда готовую сталь из первой ванны выпускают, во вторую ванну заливают жидкий чугун. После заливки чу-

гуна тут же начинают продувку ванны кислородом. Заканчивается продувка за 5—7 мин до выпуска. С выпуском металла из первой ванны цикл плавки заканчивается и начинается новый. В то же время с помощью перекидных шиберов изменяется направление движения газов. Теперь бывшая холодная ванна становится горячей. Первую ванну заправляют и производят завалку шихты, и цикл повторяется.

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

Металл продувают кислородом в каждой ванне через две—три кислородные фурмы с интенсивностью 20—25 м³/ч на 1 т металла. Каждая часть печи оборудована сводовыми кислородными фурмами и газокислородными горелками. Горелки необходимы для сушки и разогрева печи после ремонтов, а также для подачи дополнительного топлива.

Современные двухванные печи работают на техническом кислороде без вентиляторного воздуха, поэтому регенераторы отсутствуют. Холодная ванна печи частично выполняет роль регенераторов, аккумулируя тепло газов, покидающих горячую часть печи с температурой ~1700 °С, и частично улавливает плавильную пыль, тем самым выполняет роль шлаковиков. Тем не менее количество пыли в продуктах сгорания, покидающих печь, составляет большую величину (20—40 г/м³). Пыль состоит на 85—90 % из окислов железа.

Дымовые газы, покидающие рабочее пространство печи с температурой около 1500 °С, поступают по вертикальному каналу в шлаковик, в котором охлаждаются водой до температуры 900—1000 °С, а затем направляются в боров. В борове за счет подсоса холодного воздуха происходит дальнейшее понижение их температуры до 700 °С.

Распространение двухванных печей определилось их преимуществами в сравнении с мартеновскими печами: малым удельным расходом огнеупоров (4—5 кг в сравнении с 12—15 кг на мартеновских печах), меньшим объемом ремонтов, значительным облегчением условий труда ремонтных рабочих, в 3—5 раз меньшим расходом топлива,

более высокой стойкостью, достигающей 800—1000 плавок.

Производительность двухванных печей в 3—4 раза выше, чем мартеновских; их устанавливают на месте существующих мартеновских печей без реконструкции здания и изменения грузопотоков в цехе.

В двухванных печах выплавляют стали широкого сортамента, в том числе низколегированные, не уступающие по качеству сталям, выплавляемым в мартеновских печах.

К недостаткам существующих конструкций двухванных печей следует отнести меньший выход годной стали, повышенный расход жидкого чугуна и выбивание большого количества технологических газов через завалочные окна в цех.

Выбивание газов из рабочего пространства происходит через завалочные окна при поднятых заслонках и по периметру закрытых заслонок, а также через стационарные желоба для заливки чугуна. Как показала практика, оптимальное с точки зрения тепловой работы существующих двухванных печей давление под сводом печи составляет 3—4 Па. При этом нулевая линия давления располагается на уровне порога печи или несколько выше его. При этих условиях, как показывают расчеты, через одно открытое окно выбивается 6—8 тыс. $м^3$ газа в час (запыленность 20—40 $г/м^3$). В отдельные периоды плавки расчетное количество выбивающихся газов превышает 20 % всего количества газов, поступающих в дымоотводящий тракт.

На некоторых печах вследствие недостаточной пропускной способности дымоотводящего тракта давление под сводом при интенсивной продувке повышается до 5—6 Па, что приводит к еще большему увеличению количества газов, поступающих в цех.

Выбивание газов ухудшает условия труда, затрудняет обслуживание печи, загрязняет воздушный бассейн. Часть пыли не удаляется через фонарь здания, а циркулирует над рабочей площадкой печного пролета и попадает в разливочный пролет. Выбивание приводит также к ухудшению тепловой работы печи, так как часть оксида углерода и физического тепла дыма не используется для нагрева лома.

§ 4. Нагревательные печи прокатных цехов

Характеристика нагревательных печей заводов черной металлургии

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

В последнее время производительность вновь строящихся прокатных станов непрерывно увеличивается. Поэтому основными чертами общей тенденции развития печей являются интенсификация нагрева металла (с соблюдением требований, предъявляемых к качеству нагрева) и стремление к максимально возможной механизации и автоматизации работы печей. Повышение интенсификации нагрева позволяет увеличить производительность печного агрегата и при современной, весьма высокой производительности прокатных станов устанавливать к каждому стану рациональное число печей.

В настоящее время на заводах черной металлургии применяют как разливку стали по изложницам, так и непрерывную разливку стали. В первом случае печное хозяйство включает в себя печи для нагрева слитков перед прокаткой на блюмингах и слябингах, во втором случае подобные печи отсутствуют.

Наиболее распространенным является нагрев прямоугольных заготовок для чего применяют печи периодического (садочные) и постоянного (проходные) действия. В печах периодического действия металл загружается в полностью или частично остуженную печь, и затем постепенно нагревается вместе с печью. Такой метод нагрева, когда температура печи меняется во времени, применяют при нагреве крупных слитков, которые надо греть медленно во избежание возникновения чрезмерного температурного перепада. В черной металлургии на периодическом режиме работают нагревательные колодцы-печи, в которых слиток, стоящий вертикально, нагревается с четырех сторон. Поскольку размеры слитков значительные (толщина обычно около 600 мм, масса около 7 т), подобный нагрев с четырех сторон обеспечивает необходимую равномерность и производительность.

В печах постоянного действия температура во времени остается неизменной. Вместе с тем температура по длине рабочего пространства таких печей может изменяться в со-

ответствии с необходимостью создания целесообразного режима нагрева. Проходные печи постоянного действия — это наиболее распространенные нагревательные печи в черной металлургии. Они очень многообразны как по способу транспортировки заготовки через печь, так и по методам отопления. Это толкательные печи, печи с шагающим и роликовым подом; с торцевым, сводовым, боковым отоплением. В таких печах может осуществляться как постепенный (методический) режим нагрева, так и весьма форсированный камерный режим.

Наряду с тепловым и температурным режимом для работы печей большое значение имеет режим давления в печи. Идеальным был бы такой режим давления в печи, при котором холодный воздух не попадал бы в печь, а дымовые газы не выбивались бы из печи. Если холодный воздух попадает в печь, то это приводит к излишнему расходу тепла и увеличивает угар металла. Чрезмерное выбивание дымовых газов приводит к увеличению потерь тепла, пагубно влияет на арматуру печи и затрудняет ее обслуживание. Для обеспечения оптимального режима давления в нагревательных колодцах стремятся под крышкой поддерживать небольшое избыточное давление. В проходных печах на уровне нагреваемых заготовок также целесообразно поддерживать небольшое избыточное давление, исключающее подсос воздуха в печь и большое выбивание дымовых газов. Однако полностью выдержать такое давление по всей длине печи не удается.

Печи для нагрева слитков (нагревательные колодцы)

Слитки металла, полученные в мартеновском, конвертерном или электросталеплавильном цехах, перед прокаткой на обжимном стане подвергают дополнительному нагреву. Обычно толщина их не менее 400 мм, поэтому для ускорения и повышения качества нагрева целесообразно греть их с четырех сторон, располагая вертикально. Подобный нагрев достигается применением нагревательных колодцев, которые по сравнению с печами других типов с точки зрения условий нагрева крупных слитков отличаются следующими особенностями:

1) вертикальным расположением слитков, обеспечивающим ускоренный и равномерный нагрев металла, а также исключающим возможность смещения усадочной раковины;

2) удобством транспортирования, загрузки и выгрузки металла при вертикальном положении слитков.

К нагревательным колодцам предъявляют определенные требования:

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

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

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

4) возможность надежного автоматического регулирования теплового режима;

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

6) наиболее простая конструкция и невысокие капитальные затраты на строительство.

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

Тепловой и температурный режимы. Современные нагревательные колодцы являются камерными печами периодического действия с переменным во времени тепловым и температурным режимом. В подавляющем большинстве нагревательных колодцев нагрев металла осуществляется садками, т. е. после выдачи всех нагреваемых слитков ячейки колодцев вновь загружают слитками. При выдаче и посадке слитков в результате частого открывания крышки кладка рабочего пространства нагревательных колодцев охлаждается. Поэтому при работе колодцев на горячем посаде в первый момент нагрева температура слитков выше температуры поверхности кладки и основной потребитель тепла в этот период — кладка колодца.

На рис. 122 показан температурный режим и приведен тепловой баланс колодца при нагреве слитков горячего посада для различных периодов нагрева. Из этого рисунка видно, что в начальный период нагрева подают максимальное количество тепла, соответствующее тепловой мощности

колодцев. После того, как кладка достигнет своей рабочей температуры, начинается интенсивный нагрев металла.

Расход тепла поддерживают максимальным до тех пор, пока температура той части слитка, которая нагревается быстрее, не достигнет предельного значения. Этот период называется периодом нагрева. Вслед за ним наступает период выдержки, в течение которого происходит постепенное уменьшение расхода тепла, так как в течение этого времени температура поверхности слитков остается постоянной и тепло расходуется только на прогрев слитка по сечению. В этот период температура отходящих продуктов сгорания остается приблизительно постоянной.

Тепловую мощность нагревательных колодцев выбирают так, чтобы обеспечить быстрый подъем температуры кладки и поверхности слитков в начале нагрева. При заниженной мощности период нагрева затянется, а период выдержки сократится, и полный цикл нагрева будет нерационально большим. При завышенном максимальном расходе топлива период нагрева сократится, но увеличится неравномерность температуры по сечению слитка и период выдержки затянется. Это также вызовет чрезмерное увеличение длительности полного цикла нагрева.

На работу нагревательных колодцев очень большое влияние оказывает начальная температура слитков. Обычно нагревательные колодцы работают в подавляющей степени на горячем посаде, т. е. в ячейку для нагрева до температуры прокатки ($\sim$1200 °С) помещают еще не полностью остывшие после разливки слитки, температура которых 700—850 °С. Чем выше процент горячего посада и начальная температура слитков, тем больше производительность нагревательных колодцев и тем ниже удельный расход тепла на нагрев металла. Процент горячего посада и начальная температура слитков зависят от уровня организации производства на данном предприятии. На тех заводах, где культура производства достаточно высока, горячий посад достигает 95 %, а начальная температура слитков перед нагревом 800—850 °С.

Оптимальное значение тепловой мощности (по химическому теплу топлива) лежит в пределах 200—300 МДж/т садки.

Рабочая температура в нагревательных колодцах составляет 1350—1400 °С. Для обеспечения такой рабочей температуры нужно сжигать топливо так, чтобы калориметрическая температура горения достигала 2100—2200 °С.

Шлакоудаление. В процессе нагрева металла происходит его окисление. Образовавшаяся окалина стекает по граням слитков на подину колодцев и должна быть оттуда удалена. Существуют два метода удаления окалины или, как говорят, два метода шлакоудаления: сухое шлакоудаление и жидкое.

При сухом шлакоудалении на подину колодца насыпается мелкий коксик, который впитывает окалину и через 5—6 всадов вместе с ней удаляется через специальные лючки. Затем сверху при открытой крышке засыпается и разравнивается новая порция коксика.

Вслед за этим металл нагревают вновь.

При жидком шлакоудалении коксик на поду отсутствует; подину выполняют из огнеупорных материалов, не взаимодействующих с окалиной

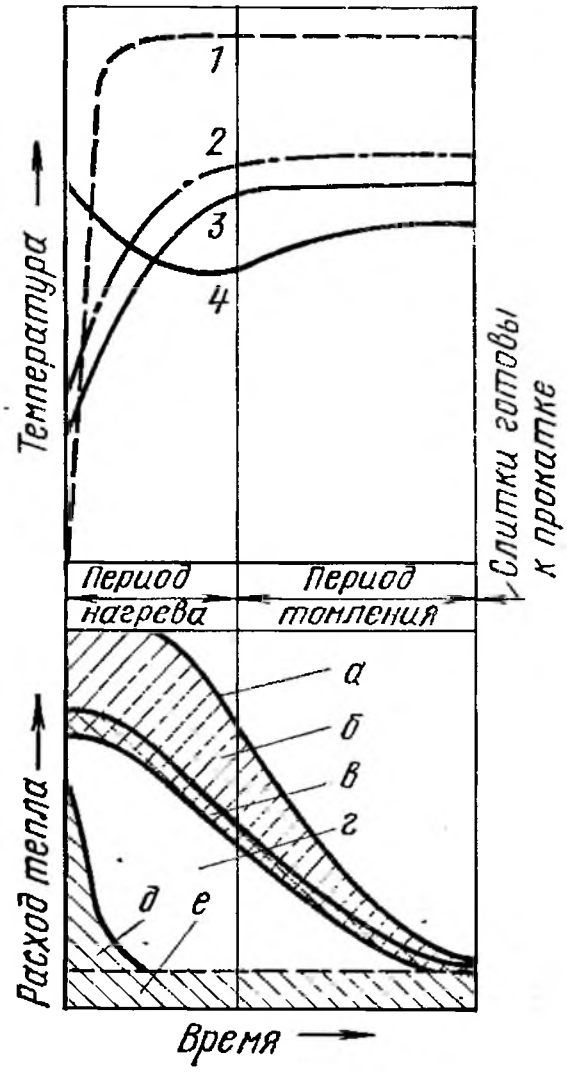


Рис. 122. Температурный режим и тепловой баланс нагревательного колодца при нагреве слитков горячего посада:

1 — температура крышки; *2* — температура отходящих продуктов сгорания; *3* — температура поверхности слитка; *4* — температура середины слитка; *а* — общий расход тепла; *б* — потери тепла с продуктами сгорания; *в* — потери тепла вследствие неполноты горения топлива; *г* — расход тепла на нагрев металла; *д* — тепло, поглощенное кладкой, охлажденной при открывании колодца; *е* — потери тепла через кладку

(обычно хромомагнезит); окалина в жидком состоянии удаляется с пода ячейки через специальную летку.

Каждому из этих методов присущи область применения, свои недостатки и преимущества.

Недостатки сухого шлакоудаления:

1) непроизводительные затраты времени на засыпку и удаление коксика;

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

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

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

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

Жидкое шлакоудаление позволяет устранить недостатки, свойственные сухому шлакоудалению; но и оно также не лишено недостатка, заключающегося в том, что при жидком шлакоудалении неравномерно изнашивается подина колодца, и слитки теряют устойчивость.

Футеровка и ее служба. В нагревательных колодцах наиболее уязвимы следующие части огнеупорной футеровки:

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

2) те пояса футеровки стен, на которые опираются слитки;

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

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

Подину колодцев выкладывают обычно в три слоя: 1) внутренний из хромомагнезитового кирпича; 2) шамотный кирпич; 3) внешний теплоизоляционный слой из диатомитового кирпича. При сухом шлакоудалении уровень подины по всей площади колодцев одинаков, при жидком подину выкладывают с уклоном в сторону шлаковой летки.

Стены колодцев также выполняют трехслойными. Внешний слой — теплоизоляционный, затем слой шамотного кирпича. Внутренний слой в нижней части стен (приблизительно на 1 м высоты) выполняют из хромомагнезита, остальное из динаса. Интенсивнее всего стены изнашиваются на том уровне, где опираются слитки. В связи с этим в этом месте выполняют выступ кладки внутрь колодца. Эти выступы выкладывают из динаса, хромомагнезита, каолинового кирпича. Стойкость выступов из динаса наименьшая.

В настоящее время применяют крышки как с арочной футеровкой, так и с подвесным сводом. И в том, и в другом случае можно применять шамотный кирпич. В последнее

время для футеровки крышек все шире используют каолиновый кирпич. Каолиновый кирпич в футеровке крышек значительно более стоек, поскольку обладает большой огнеупорностью и меньшей дополнительной усадкой.

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

В рекуператорах насадку следует сменять раз за 1,2—2 года.

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

Конструкции колодцев

Нагревательные колодцы бывают с регенеративным и с рекуперативным подогревом воздуха. Регенеративные колодцы — это устарелые конструкции, которые нигде уже не строятся. Поэтому рассмотрим конструкции наиболее распространенных рекуперативных нагревательных колодцев.

Колодцы с отоплением из центра пода. Такие колодцы (рис. 123) применяют для нагрева слитков перед прокаткой на блюминге производительностью около 2,5 млн.

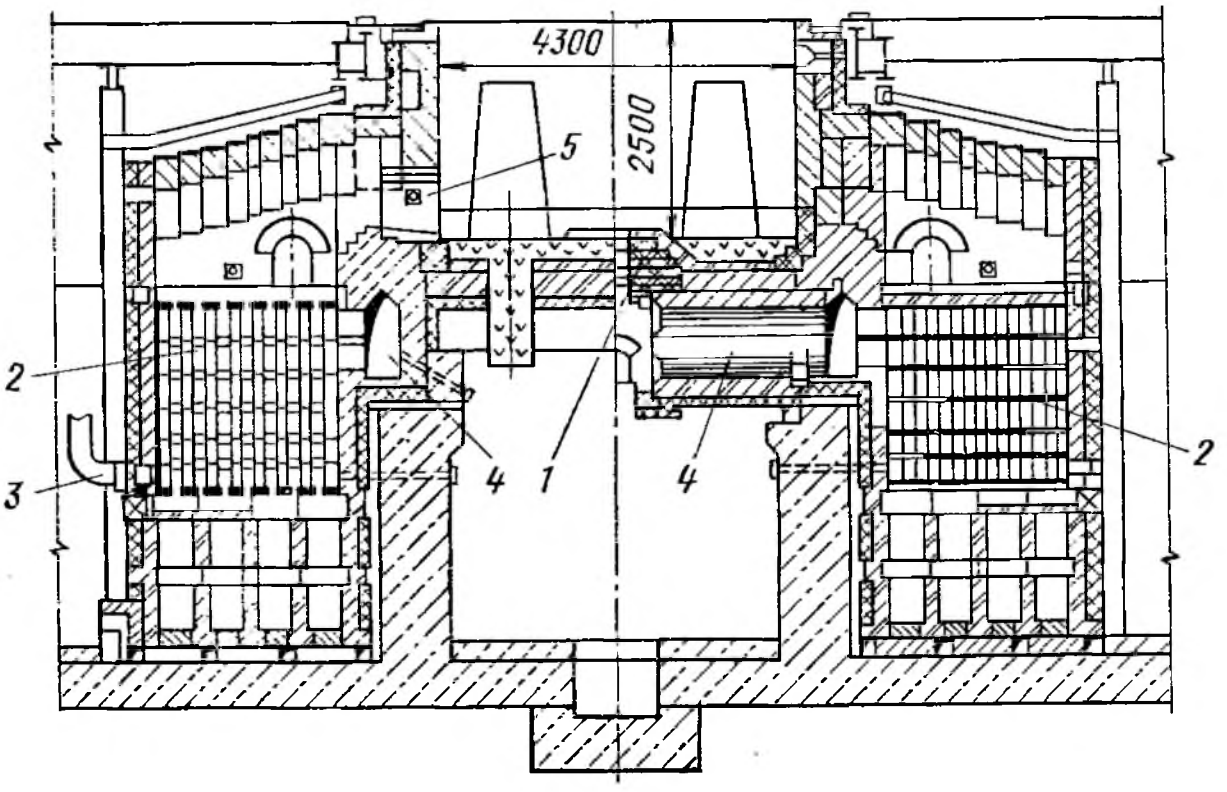


Рис. 123. Рекуперативные колодцы с отоплением из центра пода:

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

т/год. Они достаточно надежны в эксплуатации, отапливают их смешанным коксо-доменным газом с теплотой сгорания 5800—8400 кДж/м³ при помощи горелок, расположенных в центре пода. Группа состоит из двух ячеек. В каждую ячейку помещается по 12—16 слитков квадратного сечения.

Колодцы оборудованы керамическими рекуператорами из восьмигранных карбо-шамотных трубок для подогрева воздуха до 800—850 °С. Воздух, пройдя через рекуператоры, поступает к горелке с двух сторон по сборным каналам. Газ подается в горелку по специальной трубе снизу вверх, поэтому факел тоже направлен снизу вверх. Продукты сгорания удаляются из рабочего пространства через специальные окна и, пройдя через рекуператор, уходят в дымовую трубу. Рекуперативные колодцы с отоплением из центра пода в настоящее время работают на 90—95 % горячего посада, обеспечивая при этом производительность одной группы около 220—270 тыс. т/год. Удельный расход тепла на нагрев металла составляет 1100—1200 кДж/кг. Процесс нагрева металла в этих колодцах можно автоматизировать. Импульсную точку выбирают на одной из боковых стен в зоне наиболее высоких температур, т. е. несколько выше верхней кромки слитка. Тепловая мощность колодцев с отоплением из центра пода составляет обычно 21,0—29,0 ГДж/ч.

Качество металла в рекуперативных колодцах с отоплением из центра пода недостаточно. Вследствие вертикального расположения факела зона наибольших температур создается в верхней части рабочего пространства, что приводит к перегреву верхней части слитка при недостаточном нагреве его основания. Перепад температур по высоте рабочего пространства достигает 100 °С и более, что вызывает неравномерность нагрева слитка. Однако положительным является то, что все слитки, входящие в садку, греются почти одинаково.

Общая площадь рекуператора нагревательных колодцев составляет около 400 м². В рекуператоре шесть рядов труб. Два нижних и два верхних ряда — из карбошамотных трубок, средние ряда — из шамотных.

Рекуператоры работают при температуре дымовых газов на входе 1200—1250 °С; скорости воздуха 1,5 дымовых газов 0,7—1,0 м/с.

Воздух в рекуператор поступает обычно под давлением, в результате чего между воздушной и дымовой сторонами рекуператора возникает значительный перепад давлений

(до 200 Па), в результате чего создается возможность для утечки воздуха в дымовые каналы. Утечка иногда достигает 40—50 % всего воздуха, поданного в рекуператор. Низкая герметичность рекуператоров сильно влияет на работу колодцев, так как в результате утечек количество воздуха, достигшего горелки, становится недостаточным и, что очень важно, неопределенным. При недостатке воздуха топливо не сгорает полностью в пределах рабочего пространства и поэтому становится возможным его дожигание в рекуператоре, что вызывает разрушение рекуператора и дальнейшее увеличение утечек.

При уменьшении количества воздуха, попадающего в ячейку, приходится сокращать количество подаваемого топлива, т. е. снижать тепловую нагрузку, а это в свою очередь приводит к снижению производительности.

Ненадежная (в смысле герметичности) работа рекуператоров наряду с высокой стоимостью сооружения является, пожалуй, самым большим недостатком этих нагревательных колодцев.

Колодцы с отоплением из центра пода работают в основном на жидком шлакоудалении, которое позволяет увеличить производительность ячейки и сократить расход топлива. Однако при жидком шлакоудалении резко возрастает число ремонтов, а следовательно, и удельный расход огнеупоров. Колодцы при жидком шлакоудалении работают более форсированно, что увеличивает толщину окалины и возможность оплавления слитков.

Колодцы с верхним отоплением. В последние годы строят колодцы с одной верхней горелкой, что объясняется увеличением производительности строящихся блюмингов до 6 млн. т/год и более. Повышением производительности блюмингов обусловлены новые требования, предъявляемые к нагревательным колодцам, которые в определенной мере реализуются применением колодцев с одной верхней горелкой. Конструкция колодцев представлена на рис. 124. Колодец вытянутой формы шириной 2,2—2,5 м. В ячейку помещают в два ряда 14 слитков массой по 7—8 т. Каждая группа колодцев включает чаще всего 2 или 4 ячейки. Тепловую нагрузку в этих колодцах поддерживают около 38—42 ГВт; удельный расход тепла составляет 1300—1350 кДж/кг. Поскольку на поду подобных колодцев температура относительно низкая, применяют сухое шлакоудаление.

Производительность колодцев подобного типа на группу из двух ячеек несколько меньше (200—220 тыс. т/год), чем

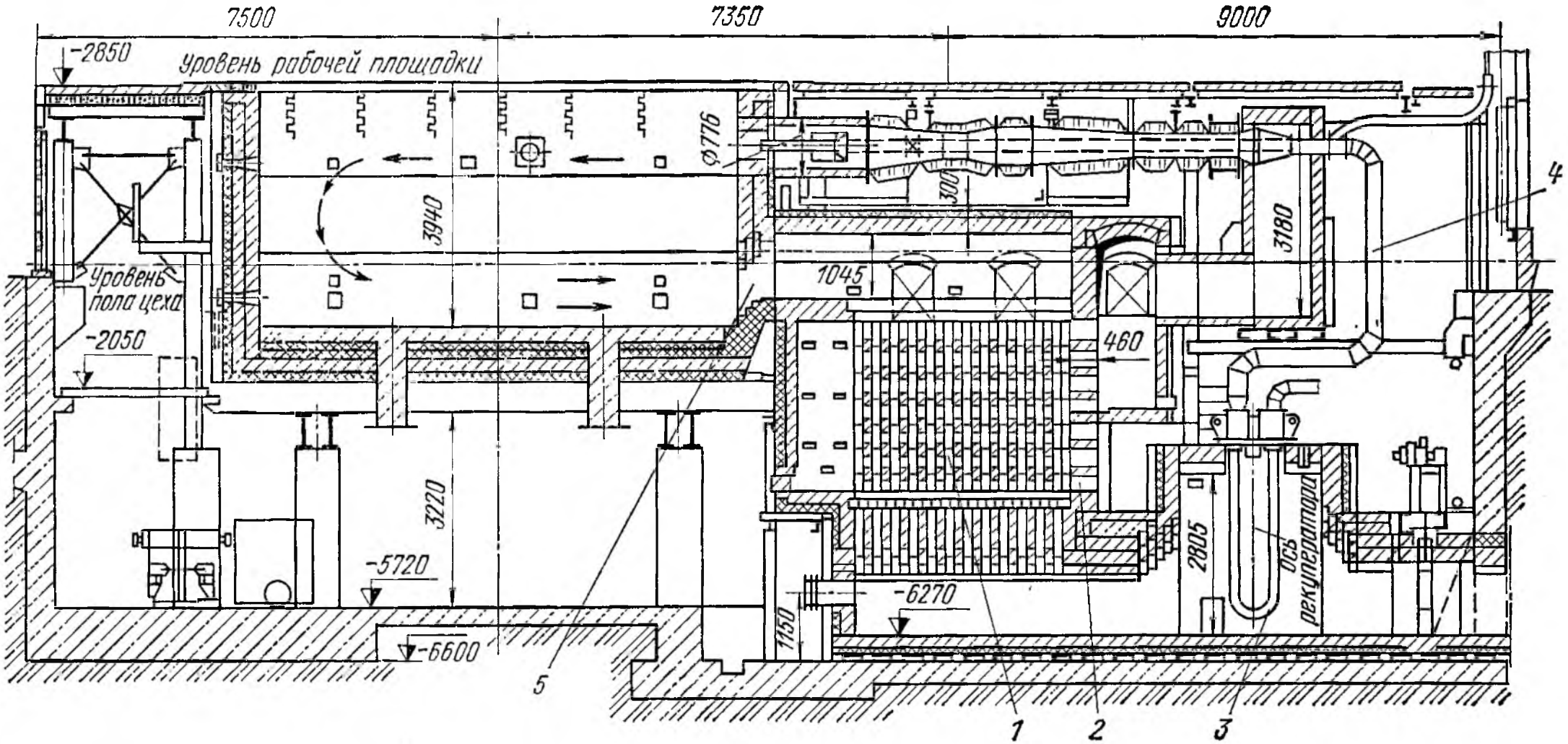


Рис. 124. Нагревательный колодец с одной верхней горелкой:

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

колодцев с отоплением из центра пода. Это объясняется особенностями их тепловой работы.

Колодец отапливают газообразным топливом при различной степени подогрева воздуха. Выходные скорости в горелке должны быть подобраны так, чтобы кинетической энергии струй было достаточно для проталкивания газов от горелки до дымоотборного окна по петлеобразной траектории. Плохое смешение топлива и воздуха приводит к тому, что наибольшая температура развивается около стены, противоположной горелке; на этой стене и выбирают импульсную точку для автоматизации теплового режима. Причем, раньше других нагреваются слитки, находящиеся около этой стены.

Когда температура в импульсной точке достигает заданного значения, то во избежание ее дальнейшего повышения расход топлива снижается и кинетическая энергия струй топлива и воздуха уменьшается. Это приводит к тому, что газы уже не достигают противоположной стенки и двигаются по прогрессивно укорачивающейся петле.

Таким образом, процесс нагревания садки протекает неравномерно, затягивается, поэтому производительность группы, состоящей из двух ячеек таких колодцев, меньше производительности колодцев с отоплением из центра пода. Однако, колодцы с одной верхней горелкой более компактны и при одной и той же общей длине отделения нагревательных колодцев их можно установить несколько больше, чем колодцев с отоплением из центра пода.

На нагревательных колодцах с одной верхней горелкой применяются керамические воздушные рекуператоры, при использовании которых возможны два способа подачи воздуха: при первом, для подвода воздуха от рекуператора к горелке применяют эксгаустер из жароупорного материала. Воздух просасывается через рекуператор, и возможность утечки практически устраняется. Однако, в этом случае температура подогрева воздуха ограничивается 400—450 °С, так как при более высокой температуре существующие эксгаустеры работать не могут.

Второй способ предусматривает подачу воздуха из рекуператора к горелке при помощи инжектора. Инжектирующей средой служит воздух высокого давления (20—40 кПа), количество которого составляет 25—30 % общего расхода и который подогревается в металлическом трубчатом рекуператоре до 250—350 °С. В этом случае температура воздуха перед горелкой составляет 650—700 °С. Если для инжектирования применять компрессорный воздух

Таблица 19. Показатели работы рекуперативных нагревательных колодцев

Параметр	С центральной горелкой	С одной верхней горелкой
Средняя производительность одной группы, тыс. т/год	230	340
Число оборотов колодцев в год	1360	870
Удельный расход топлива, кДж/кг	1150	1320
Простои колодцев на ремонтах, % к календарному времени	3,77	3,98
Удельный расход огнеупоров на 1 т, кг/т	1,85	1,27

(5—7 % общего расхода), то температура воздуха перед горелкой составит 700—800 °С.

Сравнение различных нагревательных колодцев по эксплуатационным показателям приведено в табл. 19.

Печи для нагрева блюмов и слябов

Блюмы и слябы перед дальнейшей прокаткой на рельсобалочных, сортовых, листовых и других станах нагревают до температуры прокатки почти исключительно в нагревательных проходных печах различного типа. Наряду с тепловым и температурным режимом определяющее значение для работы этих печей имеет метод транспортирования металла через печь. Толкательные противоточные печи для нагрева прямоугольной заготовки получили широкое распространение. В таких печах лежащие на поду и соприкасающиеся друг с другом заготовки задаются и перемещаются в печи при помощи специального механизма-толкателя. Выдача металла из печи может быть торцевой и боковой. При торцевой выдаче функции выталкивателя выполняет толкатель: задавая очередную заготовку в печь, он перемещает все заготовки и выталкивает ближайшую к окну выдачи заготовку. При боковой выдаче применяют специальный выталкиватель. Преимуществом толкательных печей является то, что проталкивание — наиболее простой и дешевый метод транспортирования металла через печь. Основные недостатки данного метода заключаются в следующем:

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

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

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

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

5) современные печи выполняют весьма широкими (до и более 12 м), что крайне затрудняет операцию удаления окалины (осуществляемую фактически вручную);

6) в толкательных печах без выгорбливания возможно проталкивание не более 200—250 квадратных заготовок, что ограничивает размеры и производительность печей.

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

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

Печи с шагающим подом или балками также весьма перспективны. Они свободны от недостатков, присущих толкательным печам. В толкательных печах металл в лучшем случае может нагреваться с двух сторон, тогда как в печах с шагающим подом нагрев металла происходит как минимум с трех сторон. Кроме того, в печах с шагающим подом легко менять режим нагрева, что является большим преимуществом в случае частой смены сортамента нагреваемого металла.

---

* Разделение печей на печи с шагающими подом и балками весьма условно: в первом случае это печи с односторонним отоплением, во втором — с двухсторонним.

Однако печи с шагающим подом сравнительно дороги: капитальные затраты на их сооружение на 40—45 % выше, чем для толкательной печи аналогичной производительности. Сравнивая их с роликовыми печами, надо отметить, что масса оборудования печей с шагающими балками на 1 м² площади пода на 40 % больше, чем роликовых печей. Затворы, применяемые на этих печах, не обеспечивают полной герметизации и в печь снизу попадает воздух.

Наиболее ответственной частью футеровки проходных нагревательных печей являются участки монолитного пода, футеровка элементов шагающего пода, т. е. все элементы футеровки, подвергающиеся воздействию окалины при достаточно высокой температуре (1200—1250 °С), при которой окалина может активно взаимодействовать с огнеупорными материалами. В силу этого верхние слои таких участков футеровки печи обычно выполняют из хромомагнезита, магнезитохромита и талькового кирпича — материалов, не взаимодействующих с окалиной. Есть положительный опыт выполнения монолитного пода из электроплавленного корунда (93 % Al_2O_3): к кладке пристает сравнительно небольшое количество окалины, а образующиеся бугры ее легко очищаются. Подину обычно выполняют трехслойной: из хромомагнезита (или другого окалиностойкого материала); шамота класса Б; диатомитового кирпича.

В печах с нижним обогревом под нижнего обогрева также делают трехслойным (хромомагнезит, шамот, диатомит).

Своды печей выполняют арочными и подвесными. В качестве огнеупорного материала чаще всего используют шамот класса А и каолиновый кирпич. Стены печей выкладывают в низкотемпературных зонах двухслойными (шамот класса Б и диатомит), в высокотемпературных зонах трехслойными (шамот класса А или каолин, шамот класса Б, диатомит).

Тепловой режим и отопление печей

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

Остановимся на тепловом и температурном режиме противоточных печей, составляющих в настоящее время подавляющее большинство проходных нагревательных печей.

Выше отмечалось, что при нагреве в металле возникают температурные напряжения, которые не должны превышать максимально допустимых. Температурные напряжения пропорциональны перепаду между температурами поверхности и центра металла. Чем выше температура в печи, в которую попадает холодный металл, тем быстрее растет температура поверхности металла. Если нагревается тело, массивное в тепловом отношении, то резкое повышение температуры поверхности может вызвать возникновение чрезмерного температурного перепада. Поэтому массивный металл нагревают сравнительно медленно, постепенно (методически), до тех пор, пока он не приобретет необходимых пластических свойств, т. е. до 500 °С. Этим и вызвано использование методического температурного режима работы печей (рис. 125). В I зоне (методической) происходит постепенный нагрев металла; во II зоне (сварочной) — нагрев металла до тех пор, пока его поверхность не достигнет конечной температуры нагрева; в III зоне (томильной) при неизменной температуре поверхности осуществляется выравнивание температуры по толщине металла. Следует одновременно с этим заметить, что температура печи в месте загрузки металла очень сильно влияет на производительность печи. Вызвано это тем, что чем выше разница температур между печью и металлом, тем больше тепла он поглощает, и тем быстрее нагревается. Поэтому нередко в существующих печах, стремясь увеличить производительность, принимают различные меры для повышения температуры в зоне посадки металла выше 850—900 °С. Для нагрева металла, который по своим размерам и свойствам ближе к тонкому телу, чем к массивному (например, слябы), созданы печи, работающие по режиму, занимающему промежуточное положение между камерным и методическим. Чтобы обеспечить общий подъем температурного уровня, в печи выполняют две сварочные зоны, в каждой из которых происходит сжигание топлива. Назначение III зоны при этом сохраняется. При нагреве металла тонкого в тепловом отношении используют камерный режим, при котором под-

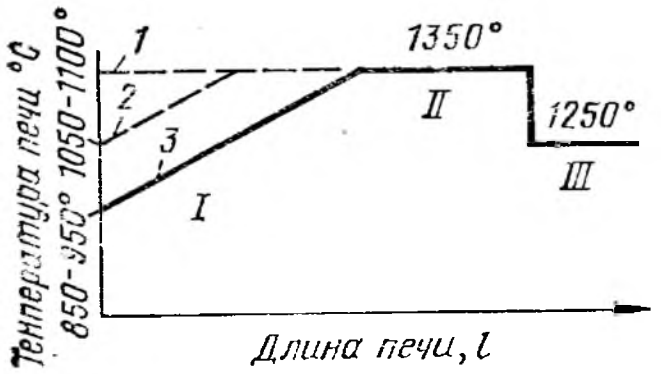


Рис. 125. Температурные режимы нагревательных печей:

1 — камерный; *2* — промежуточный; *3* — методический

держивается практически одинаковая температура по всему рабочему пространству. Обеспечение того или иного температурного режима работы печей достигается выбором метода отопления и соответствующего расположения горелочных устройств и дымоотводящих каналов.

Для обеспечения камерного режима необходимо горелки (форсунки) и дымоотборные каналы равномерно распределить по длине рабочего пространства.

Методический режим нагрева металла имеет место в тех случаях, когда при встречном движении металла и дымовых газов горелочные устройства располагают на одном конце рабочего пространства в зоне интенсивного нагрева металла, в дымоотборные каналы — на другом, где металл загружается в печь. При этом дымовые газы будут постепенно остывать, отдавая тепло металлу, температура которого будет постепенно повышаться. Выбор режима отопления определяет, по существу изменение температуры по длине печи при любом практически методе транспортировки металла. Нельзя, разумеется, утверждать, что метод транспортировки металла не оказывает влияния на интенсивность его нагрева и, как следствие, на температуру в печи. Это влияние, конечно, имеет место. Однако, выбор метода отопления оказывает решающее влияние на температурный режим проходной нагревательной печи. В крупных проходных нагревательных печах прокатных цехов заводов черной металлургии наибольшее распространение имеют торцевое и сводовое отопление печей. Рассмотрим это подробнее.

При торцевом отоплении (см. рис. 126) характер изменения температуры по длине печи определяет число и назначение ее зон. Металл поступает в зону наиболее низких температур и, продвигаясь навстречу дымовым газам, температура которых все повышается, постепено (методически) нагревается. Методические печи по числу зон нагрева металла могут быть двух-, трех- и многозонными с односторонним и с двусторонним нагревом металла. Рассмотрим назначение зон на примере трехзонной печи.

Методическая зона — первая (по ходу металла), с изменяющейся по длине температурой. В этой зоне металл постепенно подогревается до поступления в зону высоких температур (сварочную). Как было отмечено, во избежание возникновения чрезмерных термических напряжений часто необходим медленный нагрев металла в интервале температур от 0 до 500 °С. Вместе с тем методическая зона представляет собой противоточный теплообменник. Находящие-

ся в состоянии теплообмена дымовые газы и металл двигаются навстречу друг другу.

Металл нагревается дымовыми газами, т. е. утилизирует тепло дымовых газов, отходящих из зоны высоких температур. Общее падение температуры дымовых газов в мето-

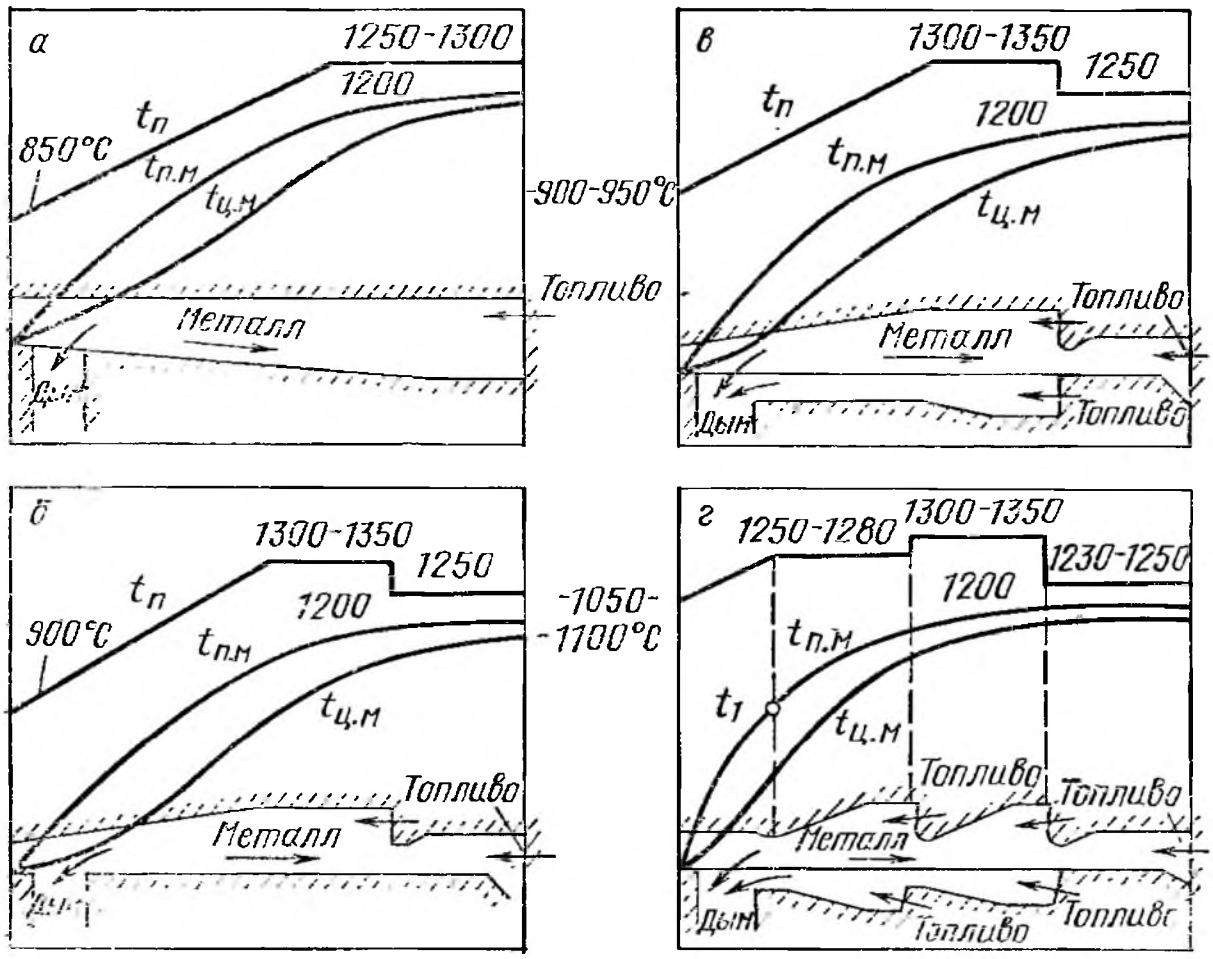


Рис. 126. Температурный режим и профиль толкательных печей с торцовым отоплением:

а — двухзонная печь с монолитным подом; *б*—трехзочная печь с монолитным подом; *в* — то же, с нижним обогревом; *г* — многозонная печь с нижним обогревом

дической зоне весьма значительно. Обычно в зоне высоких температур методических печей температура газов держится на уровне 1300—1400 °С, в конце же методической зоны она находится в пределах 850—1100 °С. Методическая зона значительно увеличивает коэффициент использования тепла, который достигает 40—45 %, тогда как в камерных печах он составляет 18—20 %.

Зона высоких температур или сварочная — вторая по ходу металла. В этой зоне осуществляется быстрый нагрев поверхности заготовки до конечной температуры. Температура нагрева металла в методических печах обычно состав-

ляет 1150—1250 °С. Для интенсивного нагрева поверхности металла до этих температур в сварочной зоне необходимо обеспечивать температуру на 150—250 °С выше, т. е. температура газов в сварочной зоне должна быть 1300—1400 °С.

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

Подобный трехступенчатый режим нагрева необходим в тех случаях, когда нагревают заготовки, в которых может возникнуть значительный перепад температур по толщине (более 200 °С на 1 м толщины металла). Такие печи (с тремя зонами) называют трехзонными методическими печами (рис. 126, *б*).

В ряде случаев при нагреве тонких заготовок нет необходимости делать выдержку для выравнивания температур по сечению, так как возникший в сварочной зоне перепад температур небольшой. Томильную зону при этом не предусматривают и применяют двухзонные печи — с методической и сварочной зонами (рис. 126, *а*).

В других случаях при нагреве металла перед прокаткой на листовых и сортовых станах выполняют четырех- и пятизонные методические печи для повышения общего температурного уровня печи и получения большей производительности. В этом случае делают две или три сварочные зоны, в каждой из которых устанавливают горелки. Это позволяет повышать температуру в конце (по ходу газов) методической зоны, уменьшить ее длину и увеличить общую длину зоны высоких температур, в результате чего достигается более форсированный нагрев металла. В зависимости от толщины заготовки в методических печах можно применить односторонний или двусторонний нагрев заготовок. При толщине заготовок до 100 мм двусторонний нагрев не рационален, так как для таких заготовок интенсивный (ускоренный) нагрев поверхности заготовки в сварочной зоне приведет к удлинению выдержки в томильной камере. Причем увеличение длительности выдержки будет больше, чем выигрыш во времени нагрева в сварочной зоне, достиг-

нутый за счет применения нижнего обогрева. При одностороннем нагреве заготовки движутся по монолитному поду (рис. 126, *а* и *б*). Для обеспечения двустороннего обогрева на всю длину сварочной и методической зон делают специальную камеру со своим собственным отоплением.

При сводовом отоплении плоско-пламенные горелки могут располагаться с разным шагом и группируются в зоны, каждая со своим автоматическим регулированием. Благодаря этому можно менять подводимое количество топлива и влиять на распределение температуры по длине печи, обеспечивая необходимый режим нагрева металла.

Толкательные противоточные (методические) печи

Методические толкательные печи до самого последнего времени удовлетворяли требованиям по производительности и удельному расходу тепла. В последнее время наметилась прогрессивная тенденция к увеличению длины заготовки, и как следствие, к увеличению ширины нагревательных печей. Уширение толкательных методических печей значительно усложняет их эксплуатацию, особенно удаление окалины с пода печи. Поэтому расширяется применение более совершенных печей с шагающими балками, которые могут работать так же, как и толкательные печи, в режиме методического нагрева.

При нижнем обогреве вдоль печи прокладывают глиссажные трубы, по которым движется металл. В томильной зоне глиссажных труб нет, так как в местах соприкосновения заготовки с водоохлаждаемыми трубами металл прогревается хуже, и на его поверхности образуются темные пятна. Поэтому в трехзонных печах с нижним обогревом томильная зона предназначена не только для выравнивания температуры по толщине металла, но и для ликвидации темных пятен на нижней поверхности заготовки.

В двухзонных печах с нижним обогревом часть сварочной зоны выполняют без нижнего обогрева для ликвидации темных пятен от охлаждающего действия глиссажных труб.

В настоящее время предпринимаются попытки использования двустороннего нагрева и в пределах томильной зоны. Для этого используют мощные глиссажные шины особой конструкции, в которых отсутствует возможность охлаждения металла снизу. Конструкция таких шин рассмотрена ниже.

Большое значение для работы методических печей имеет способ выдачи металла из печи. Различают торцевую и боковую выдачи металла. При торцовой выдаче необходим

толкатель, который выполняет и роль выталкивателя. Для печей с боковой выдачей устанавливают не только толкатель, но и выталкиватель, поэтому такие печи при размещении в цехе требуют больших площадей. Однако с точки зрения тепловой работы печи с боковой выдачей имеют преимущества. При торцовой выдаче через окно выдачи, расположенное ниже уровня пода печи, происходит интенсивный подсос холодного воздуха. Явление подсоса усиливается инжектирующим действием горелок, расположенных в торце томильной зоны. Подсосанный в печь холодный воздух вызывает излишний расход топлива и способствует интенсивному зарастанию подины печи образовавшейся окалиной.

Методические нагревательные печи по сравнению с камерными обеспечивают более высокий к. п. д. и более высокий к. и. т. в рабочем пространстве, чем объясняется наличие методической зоны. Если в камерной печи при температуре в рабочем пространстве 1400 °С и нагреве металла до 1200 °С температура уходящих продуктов сгорания составляет 1350—1400 °С, то в методической печи при тех же условиях эта температура составит 850—950 °С. Поэтому к. п. д. методических печей может достигать 40—45 %. Основными статьями расходной части теплового баланса методических печей являются, %: тепло, затрачиваемое на нагрев металла 30—45; потери тепла с уходящими газами 45—50; с охлаждающей водой 10—15 %.

Конструкцию методических печей выбирают в зависимости от типа стана и вида топлива. Тип стана определяет производительность печей, толщину применяемой заготовки, температуру нагрева металла и его сортамент. От вида используемого топлива зависит конструкция горелочных устройств и применение рекуператоров.

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

Рассмотрим одну из печей для мелкосортных станов (рис. 127), созданную под руководством Б. Р. Имешитова. Это трехзонная печь с нижним обогревом и наклонным подом. В ее конструкции наиболее гармонично и рационально

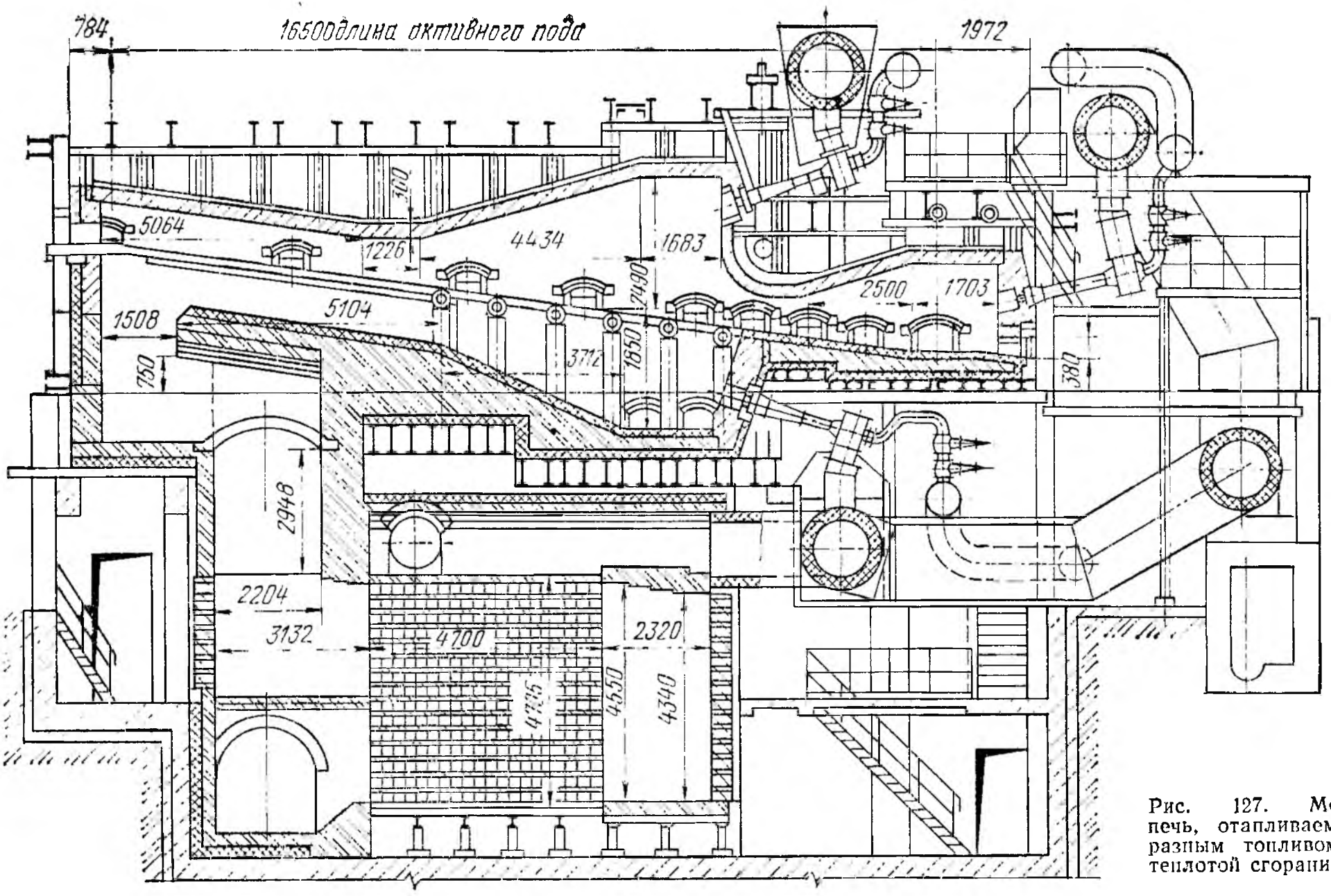


Рис. 127. Методическая печь, отапливаемая газообразным топливом с низкой теплотой сгорания

воплощены все возможности для максимального увеличения калориметрической температуры горения. В этих печах применение инжекционных горелок на подогретом до 550 °С воздухе позволяет наиболее рационально использовать химическое тепло топлива. Воздух для горения засасывается из атмосферы через расположенный под печью керамический рекуператор из шамотных блоков и систему воздухопроводов. Аэродинамическое сопротивление воздушного пути преодолевается за счет геометрического давления подогретого воздуха, движущегося вверх через рекуператор и воздухопроводы, а также в результате инжектирующего действия горелок. Поэтому утечки воздуха практически нет, а управление тепловым режимом можно автоматизировать.

Подобные печи обеспечивают удельную производительность 550 кг/(м^2·ч) при удельном расходе тепла 2100 кДж/кг. В подобных печах газообразное топливо подогревают до 250—300 °С в металлических трубчатых рекуператорах, устанавливаемых в дымовом борове последовательно за воздушным рекуператором. Однако дальнейшее распространение этих печей ограничено, так как при теплоте сгорания доменного газа 3770 кДж/м^3, $T_в$=550 °С и $T_г$=300 °С калориметрическая температура горения равна примерно 1700 °С, что является самым нижним возможным пределом. Повысить температуру подогрева воздуха свыше 550 °С нельзя, так как возможно воспламенение смеси в корпусе горелки. Осуществить устойчивый подогрев газа выше 300 °С также трудно, поскольку температура дымовых газов за керамическим рекуператором не превышает 550—600 °С. Кроме того, на заводах наметилась тенденция к уменьшению теплоты сгорания доменного газа.

При использовании трехзонных методических толкательных печей на среднесортных и крупносортных станах под печи выполняют прямым, с торцовой подачей и выдачей металла. При этом так же, как в печи, изображенной на рис. 127, сохраняются три зоны отопления при увеличении общей тепловой мощности печи в соответствии с ее производительностью.

Существенное увеличение производительности крупносортных и особенно листовых станов требует, естественно, увеличения производительности пролета нагревательных печей. Решать эту задачу можно двумя способами: либо увеличить число печей при прежней интенсивности нагрева, либо поднять интенсивность нагрева и, значительно увеличив производительность отдельного печного агрегата,

применить меньшее число агрегатов при общем увеличении производительности всего пролета. Следует предпочесть второй способ, так как при нем снижаются затраты на строительство печей. Однако, чтобы поднять интенсивность нагрева, необходимо повысить температуру в низкотемпературной зоне печи, что возможно для тех заготовок, скорость нагрева которых практически неограничена. Именно в таких случаях и применяют многозонные печи (рис. 128), где методическая зона по существу, отсутствует, а температурный режим печи приближается к камерному. В этих печах первая по ходу металла весьма короткая зона не может уже называться методической, так как не выполняет функции медленного, постепенного нагрева заготовки. Ее правильнее называть начальной зоной печи. Как показали исследования изменения температуры слябов в действующих печах, металл в этой зоне многозонной печи нагревается всего до 350—400 °С, тогда как в трехзонных методических печах к концу методической зоны металл достигает 750—800 °С. Это говорит о том, что начальная зона многозонных печей имеет подчиненное значение и не играет практически самостоятельной теплотехнической роли. Повышение интенсивности нагрева, достигаемое в многозонных печах, позволяет увеличить напряженность пода печей до 600—650 кг/(м^2·ч), а производительность отдельных печей к листовым станам (слябы длиной до 12 м) довести до 200—250 т/ч.

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

Зона	Тепловая мощность зоны, % от общей тепловой мощности печи
Томильная	30—45
Верхняя сварочная	55—70
Томильная	18—25
Верхняя сварочная	30—40
Нижняя сварочная	35—45
Томильная	15—20
Две верхние сварочные (каждая)	20—30
Нижняя сварочная	25—40
Томильная	12—18
Две верхние сварочные (каждая)	18—22
Две нижние сварочные (каждая)	20—25

На рис. 129 представлена методическая нагревательная печь со сводовым отоплением. Нижний подогрев таких пе-

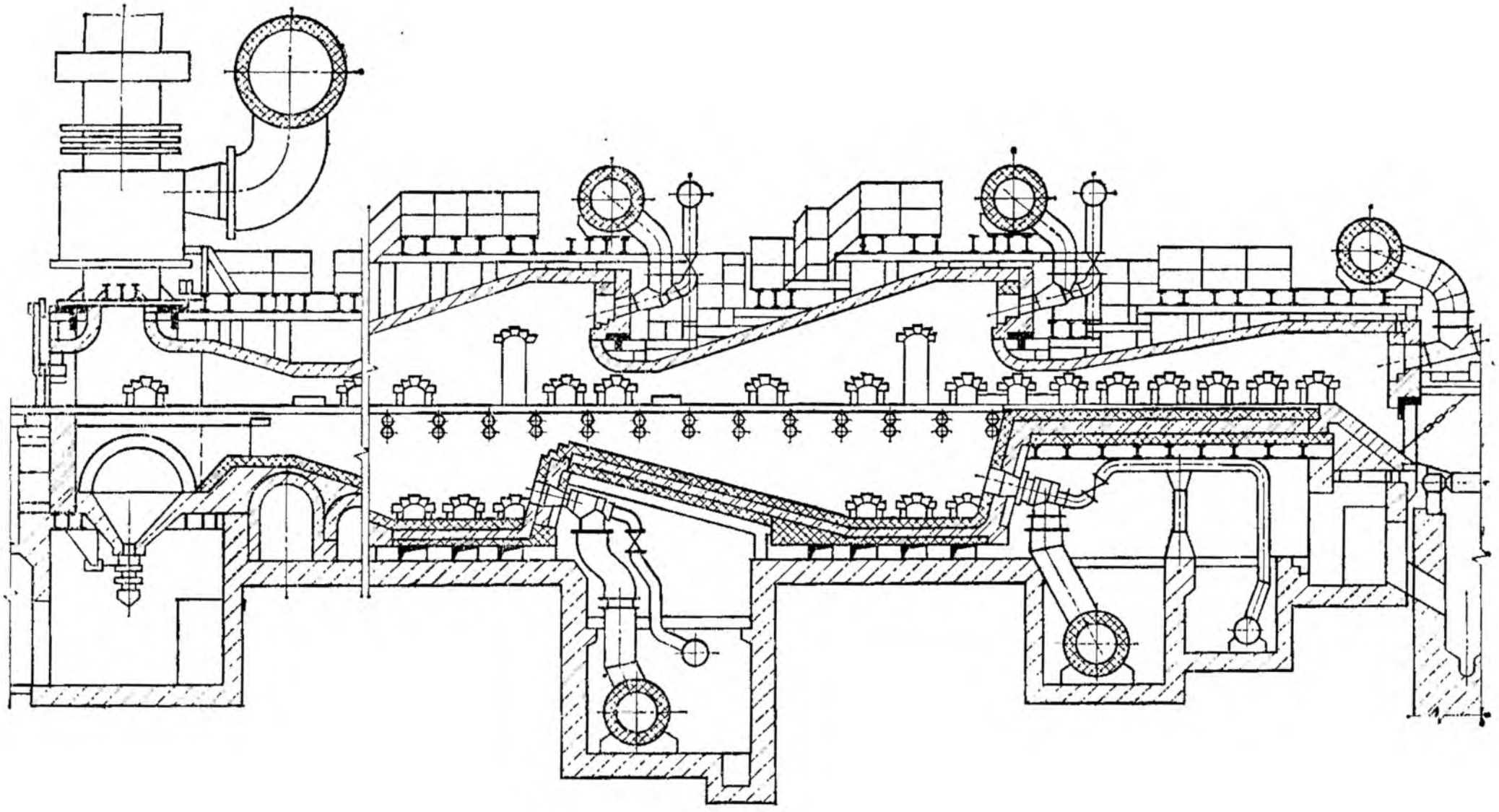


Рис. 128. Многозонная нагревательная печь

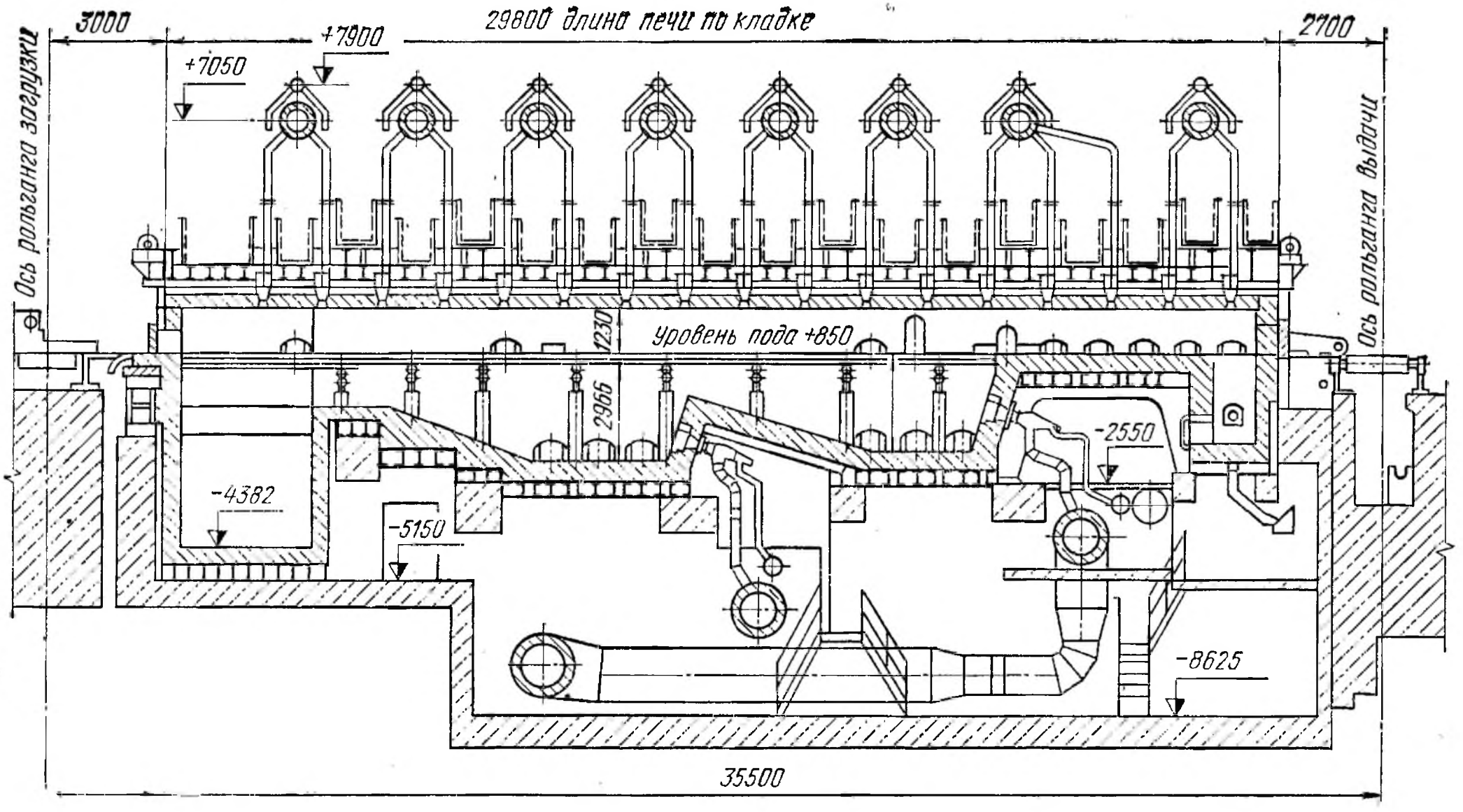


Рис. 129. Методическая печь со сводовым отоплением

чей в настоящее время осуществляется с использованием или торцового (как на рис. 127) или бокового отопления. В печи подогреваются слябы, полученные на установке непрерывной разливки. Печь работает на природном газе, обеспечивает производительность 150—170 т/ч, при напряженности активного пода 600—650 кг/(м²·ч) и удельном расходе топлива 2100 кДж/кг.

Глиссажные трубы. В методических печах с нижним обогревом на каждый ряд движущихся в печи заготовок устанавливают по две—три продольные глиссажные трубы. Для предохранения труб от истирающего воздействия движущегося металла к ним приваривают металлические прутки. Продольные глиссажные трубы в значительной части методической зоны опираются на продольные огнеупорные столбики. В высокотемпературной зоне продольные глиссажные трубы опираются на поперечные водоохлаждаемые трубы, расположенные на расстоянии 1—1,5 м одна от другой.

Концы поперечных труб выведены за пределы печи и прикреплены к вертикальным стойкам каркаса. В середине поперечные глиссажные трубы опираются на вертикальную опору, выполненную из пары водоохлаждаемых труб, футерованных снаружи огнеупорным кирпичом. Чтобы снизить охлаждающее действие глиссажных труб, предусматривают тепловую изоляцию, в качестве которой применяют специальные огнеупорные блоки. Блоки нанизывают на трубу и прикрепляют специальными металлическими штырями (рис. 130).

Потери тепла с охлаждающей водой при использовании набивной изоляции с шипами по сравнению с потерями при неизолированной трубе снижаются в 2—3 раза, а при навесной изоляции из сегментов или блоков их удается снизить в 4,6—6,3 раза. Промышленная проверка срока службы блочной изоляции показала, что для печей, отапливаемых газом, где температура под металлом не превышает 1375 °С, применимы набивные и сборные шамотные блоки, срок службы которых в указанных условиях составляет от 9 мес. (в области повышенных температур) до 2 лет (в области пониженных температур). В печах, отапливаемых мазутом, где температура над металлом достигает 1500 °С, хорошие результаты показали набивные блоки, изготовленные из магнезитовой (магнезитохромитовой) массы, срок службы которых составляет более 9 мес.

Глиссажные трубы устанавливают только в методической и сварочной зонах; в томильной зоне глиссажных труб

нет, и металл прогревается по сечению, находясь на монолитном огнеупорном поду. Одновременно с прогревом по сечению удаляются темные пятна на нижней поверхности металла, возникшие от охлаждающего действия глиссажных труб в методической и сварочной зонах. Как отмечалось выше, в настоящее время разработаны глиссажные шины особой конструкции, позволяющие и в томильной зоне создать двусторонний подвод тепла к поверхности металла.

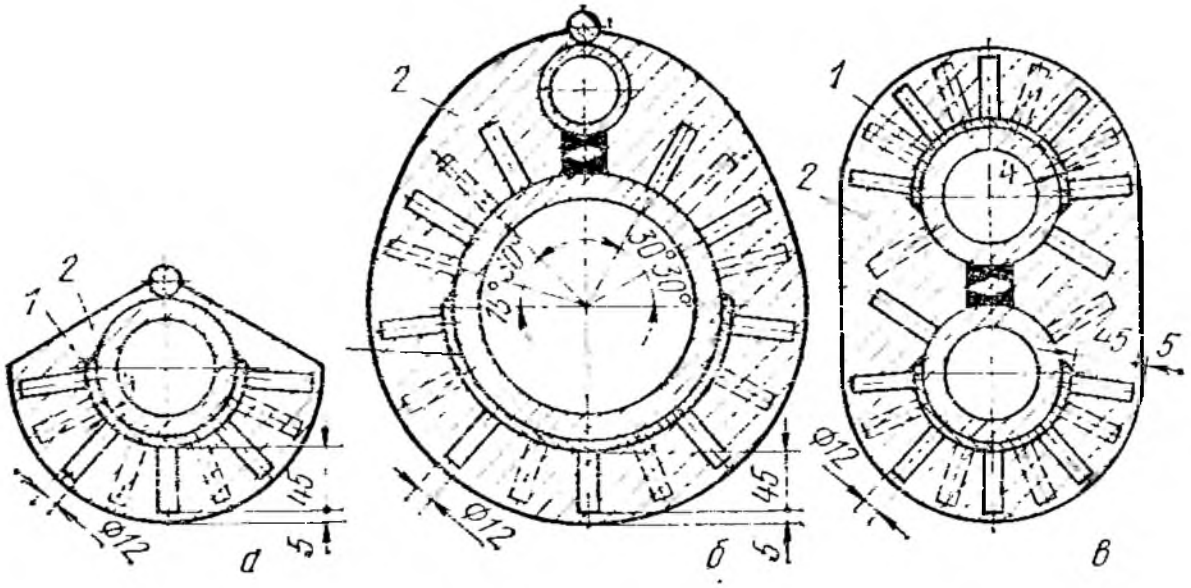


Рис. 130. Изоляция подовых труб:

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

Подобные шины представлены на рис. 131. Наличие в конструкции керамического бруса предотвращает охлаждающее действие воды на нагреваемый металл.

Угар металла и удаление окалины. В нагревательных печах, работающих с открытым пламенем, неизбежно происходит угар (окисление) металла. Количество металла, перешедшего в окалину, зависит от основных факторов: состава атмосферы, температуры и времени пребывания металла в печи. Чем больше содержится окисляющих газов (O_2, SO_2, CO_2, H_2O) в атмосфере печи, тем больше угар металла (обычно составляющий 1,5—2 %), который не только вызывает экономические потери, но и серьезно усложняет эксплуатацию печей. В большинстве современных методических печей есть участки, имеющие монолитный под, с материалом которого и взаимодействует окалина, образуя бугры и препятствуя нормальному проталкиванию заготовок. Поэтому необходимо стремиться и к уменьшению угара и к тому, чтобы конструкция печи была приспособлена к надежной работе при неизбежном угаре металла.

Выше отмечалось, что интенсивное увеличение окисления металла начинается с температуры поверхности металла 850—900 °С. Поэтому температурный режим печи следует выбирать таким образом, чтобы время нагрева металла с 850—900 °С до температуры прокатки (1200 °С) было как можно короче. Заготовки должны сравнительно медленно, без возникновения существенного перепада температур по сечению, нагреваться до 850—900 °С в зоне предварительного нагрева печи, в которой максимальная температура достигает 1000 °С. Затем они попадают в зону ускоренного нагрева с температурой 1350 °С, где как можно быстрее должны нагреваться до температуры прокатки. Из сказанного ясно, что скорость перемещения металла в пределах зон предварительного и ускоренного нагревов может быть неодинаковой. Поэтому необходимо предусмотреть возможность перемещения металла с разной скоростью, например, использование шагающего пода, разделенного на две части.

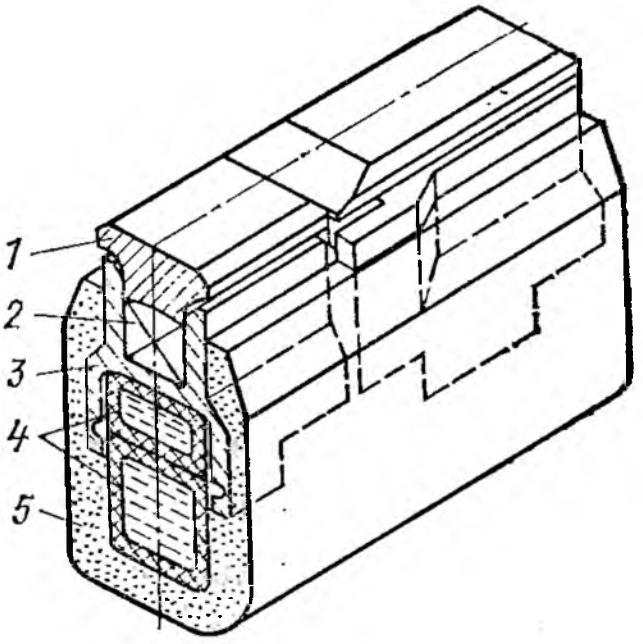


Рис. 131. Глиссажные шины для двустороннего нагрева в томильной зоне:

1 — металлические направляющие; *2* — керамический брус; *3* — металлический корпус для установки керамического бруса и металлических направляющих; *4* — водоохлаждаемые трубы; *5* — тепловая изоляция

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

Печи с шагающим подом (шагающими балками)[1]

Строительство печей с шагающим подом обходится значительно дороже, чем пятизонных печей аналогичной про-

[1] Печами с шагающими балками обычно называются печи, имеющие нижний подогрев металла.

изводительности, однако печи с шагающим подом широко применяют для нагрева металла перед сортовыми, толстолистовыми и другими станами. Преимущества этих печей перед печами толкательного типа, обусловленные методом транспортирования металла через печь, могут быть разделены на две группы:

1) эксплуатационные,

2) связанные с возможностью обеспечения значительно более высокой интенсивности нагрева металла.

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

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

Тепловой и температурный режимы печей с шагающим подом неизменны во времени, так как это проходные печи постоянного действия. Говоря о температурном режиме, следует заметить, что печи подобного типа могут работать как по камерному режиму, так и с переменной температурой по длине печи. Как уже отмечалось, температурный режим печей зависит от характера их отопления, а также от распределения горелок и дымоотводов. В печах с шагающим подом применяют самое разнообразное расположение горелок: торцовое, боковое и сводовое (рис. 132). Наиболее часто пользуются комбинированным расположением горелок: торцевым и боковым или боковым и сводовым. При

боковом отоплении ширина печи ограничивается 11—12 м. При большой ширине печи возможно возникновение неравномерности нагрева по длине заготовки (сляба). При сводовом отоплении заготовки греются достаточно равномерно, поэтому целесообразен такой метод отопления, когда нижний обогрев оборудован боковыми горелками, а в зонах верхнего обогрева использованы сводовые горелки. Продукты сгорания топлива отводят на стороне загрузки металла,

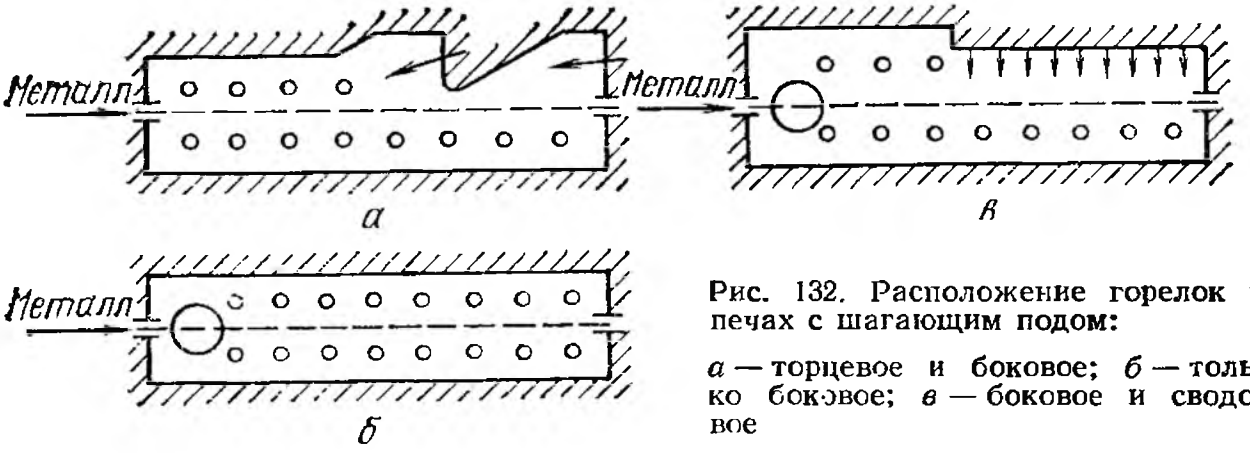


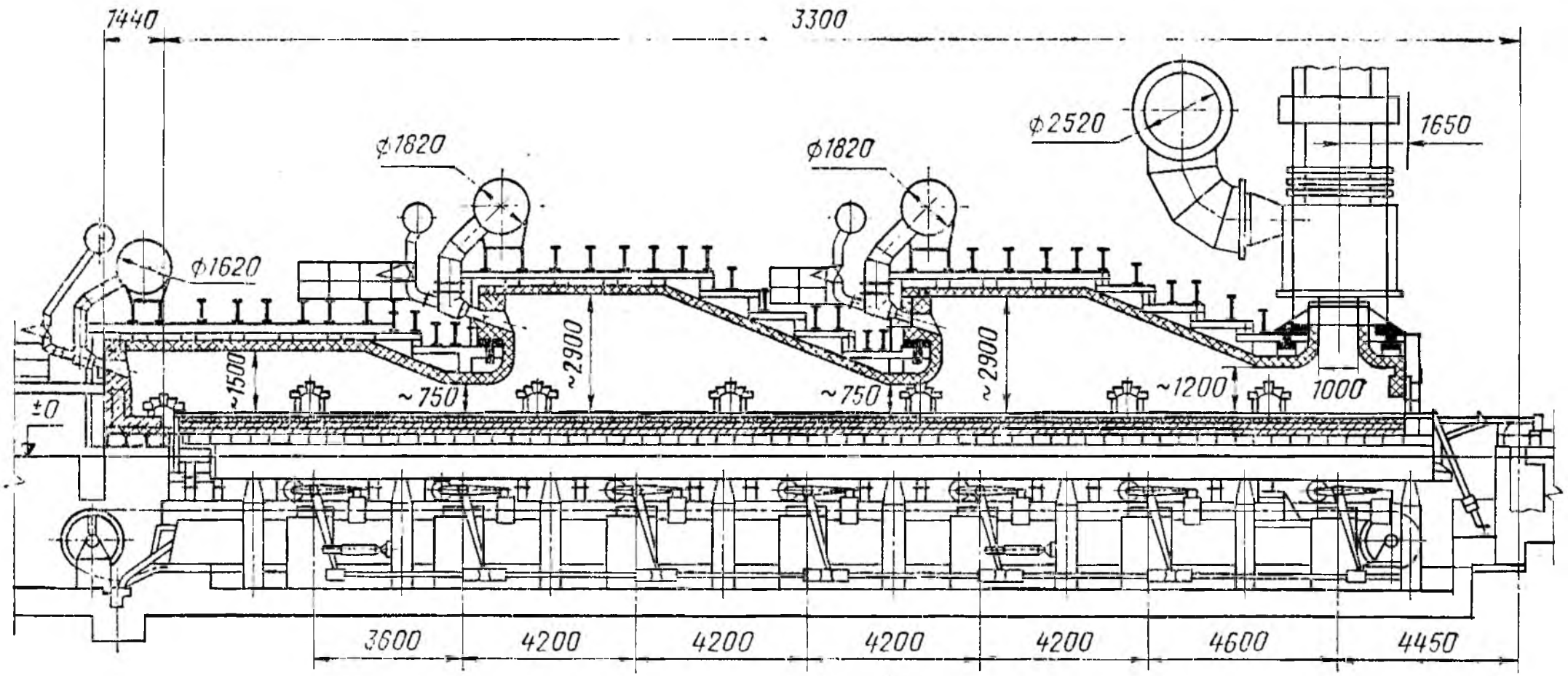
Рис. 132. Расположение горелок в печах с шагающим подом:

а — торцевое и боковое; *б* — только боковое; *в* — боковое и сводовое

и печи с шагающим подом работают обычно с переменной температурой по длине. В отличие от методических толкательных печей в печах с шагающим подом нагрев металла происходит во всех зонах, но интенсивность его в разных зонах может быть различной. Например, печь, нагревающая заготовки размером 80×80 мм для прокатки на проволочном стане (рис. 133), работает при следующем температурном графике:

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

Печи с шагающим подом выполняют как без нижнего обогрева (рис. 133), так и с нижним обогревом (рис. 134). При наличии нижнего обогрева конструкции шагающего пода делаются водоохлаждаемыми, в результате чего на нагреваемых заготовках образуются темные пятна. Чтобы исключить возникновение темных пятен, на трубы шагающих балок приваривают специальные стояки или подставки, промежутки между которыми заполняют теплоизоляцией. Кроме того, горизонтальные трубы шагающих балок, несущие металл, расположены не параллельно оси печи, и место контакта их со слябом при продвижении металла в печи постоянно меняется.


7440
3300
ф1820
ф1820
ф2520
1650
ф1620
~1500
~750
~2900
~750
~2900
~1200
1000
±0
3600
4200
4200
4200
4200
4600
4450

а

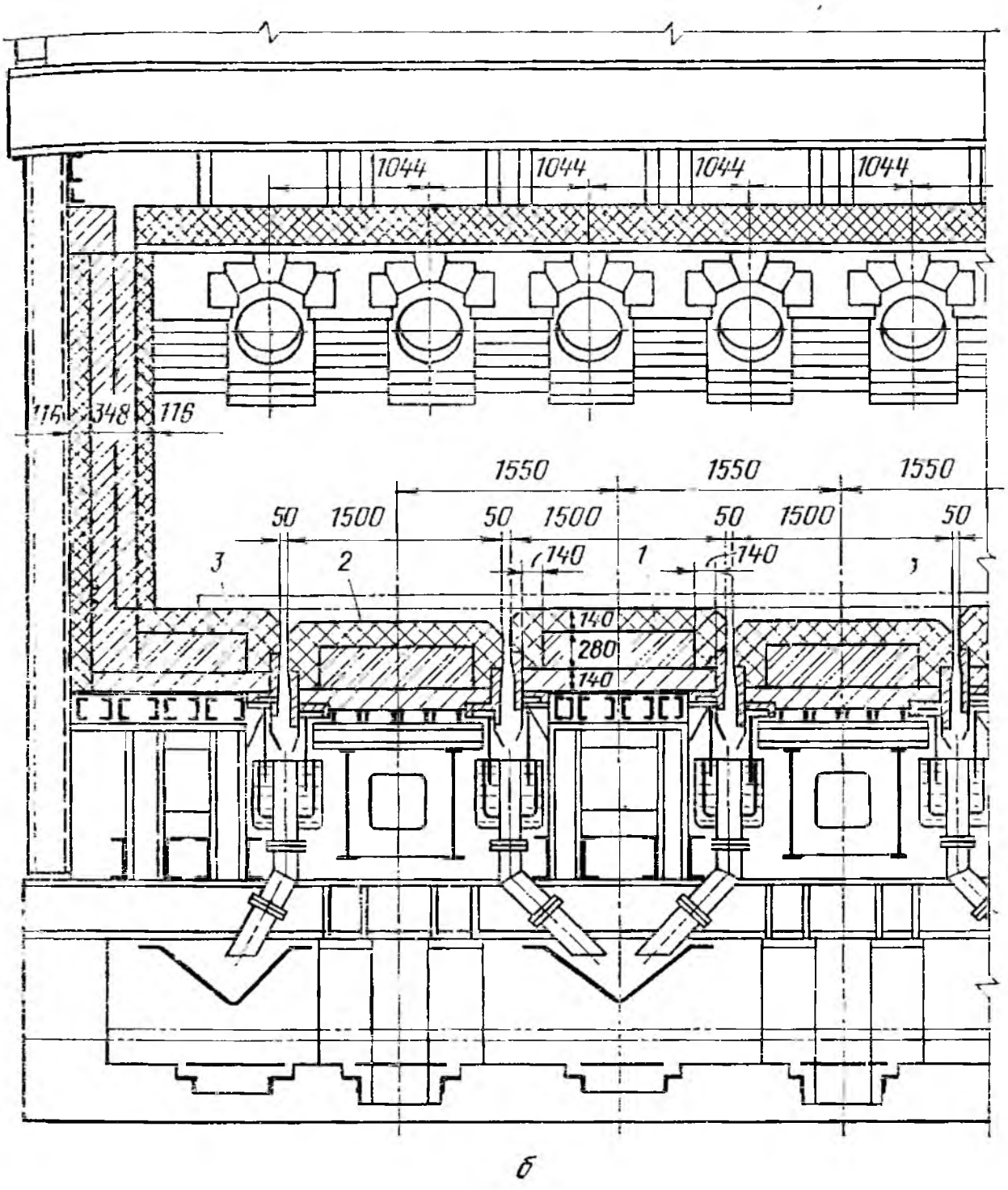


Рис. 133. Печь с шагающим подом без нижнего обогрева:

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

Конструкция печей. Рассмотрим под таких печей. Возможны следующие варианты конструктивного оформления идеи «шагания» пода:

1) под печи может состоять из трех частей в двух вариантах; а) неподвижного пода (у стен), шагающих и стационарных балок; б) неподвижного пода (у стен) и двух групп шагающих балок;

2) под может не иметь элементов неподвижного пода и состоять из двух групп шагающих балок.

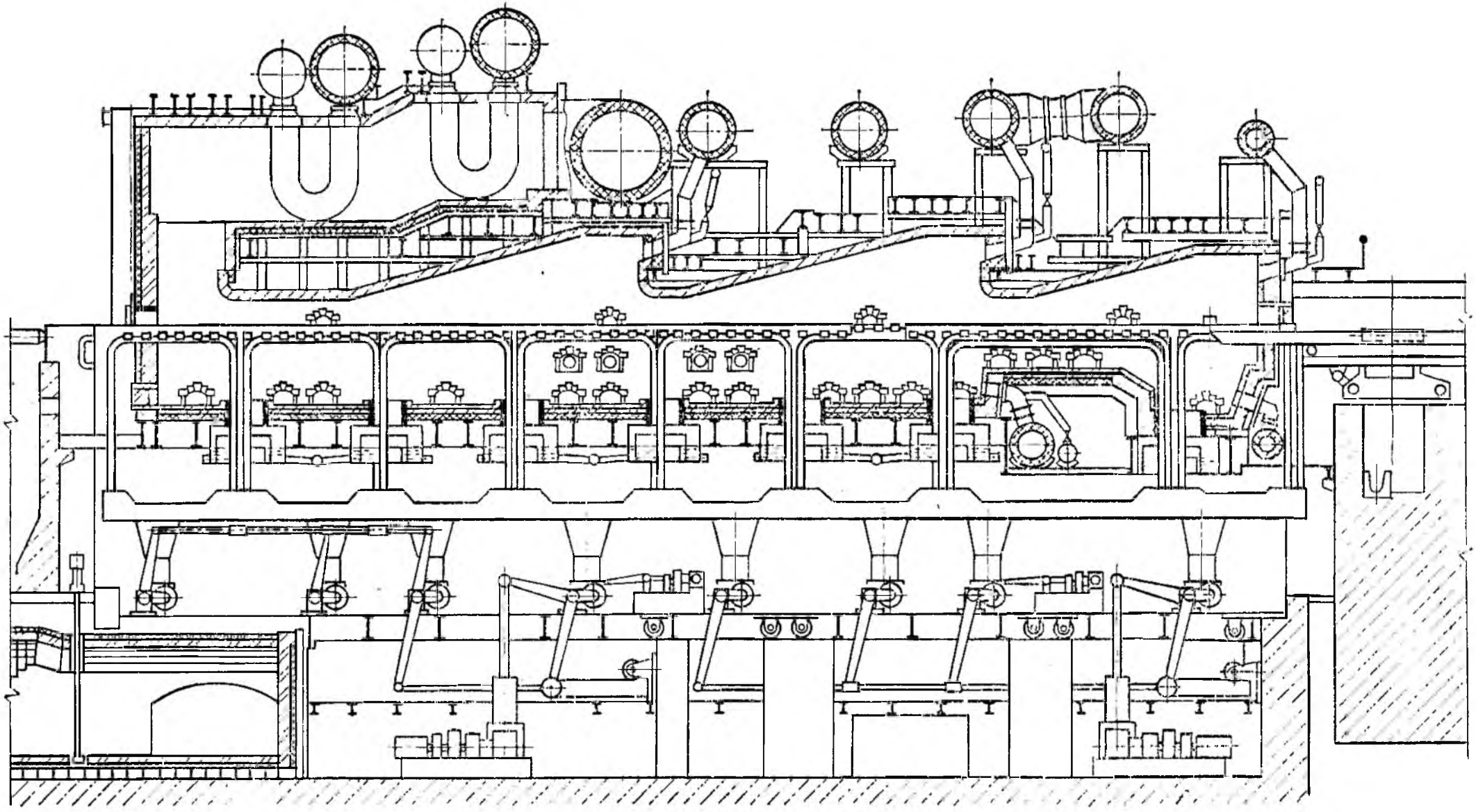


Рис. 134. Печь с шагающими балками с нижним обогревом металла

При двух группах шагающих балок обеспечивается более высокий темп выдачи заготовок, но стоимость строительства печи возрастает. Щели между шагающими (или шагающими и стационарными) балками полностью перекрыты при помощи кожуха, погруженного в неподвижный водяной затвор. Водяные затворы смещены относительно щели между балками, а напротив щели предусмотрен короб для гидравлического удаления окалины. Устройство водяных затворов исключает попадание в печь воздуха из атмосферы. В печах без нижнего обогрева стационарные и подвижные балки футеруют (сверху вниз) следующим образом: хромитовая пластичная масса; огнеупорный материал, содержащий 35—44 % Al_2O_3; легковесный изоляционный бетон. Части футеровки балок, примыкающие непосредственно к щели, выполняют из огнеупорного бетона, легко восполнимого при ремонтах. В некоторых случаях для футеровки балок применяют магнезитохромитовые кирпичи, что не дает пока вполне удовлетворительного результата.

Эксплуатируются печи с шагающим подом без нижнего обогрева и с нижним обогревом. В печах без нижнего обогрева приняты две зоны отопления при следующем распределении тепловых мощностей: первая зона нагрева 38 % и вторая зона нагрева 64 %.

Эти печи оборудованы двухпроводными горелками и имеют весьма большие резервы по тепловой мощности. В подавляющем большинстве случаев печи могут работать с подачей топлива лишь во вторую зону нагрева. Горелки первой зоны нагрева включаются в том случае, если с целью увеличения производительности печи необходимо поднять температуру в этой зоне и в конце печи. Напряженность активного пода в этих печах достигается 1300—1400 кг/(м^2·ч), время пребывания заготовок размером 80×80 мм в печи составляет 23—30 мин, удельный расход тепла 1800—2000 кДж/кг.

Дымовые газы удаляются в дымосборник, расположенный у торца загрузки, а затем поступают в петлевой металлический рекуператор, расположенный ниже уровня пода цеха. Температура подогрева воздуха в рекуператоре около 300 °С.

Определение размеров печей

Размеры рабочего пространства определяют, исходя из производительности, размера и времени нагрева заготовки. Если P — заданная производительность печи, а τ — время нагрева (ч), то для обеспечения

этой производительности в печи в процессе нагрева должна постоянно находиться садка металла, равна $G=P\tau$.

Зная размеры нагреваемой заготовки (a — ширина, м; b — толщина, м; l — длина, м), можно определить массу g одной заготовки и число заготовок, постоянно находящихся в печи $n=G/g$.

Обычно при $n<200$ шт. делают однорядную печь, длина которой будет равна $L=a\cdot n$, м.

Для двухрядной печи $L=a\cdot n/2$.

Если $n/2>200$, то печь выполняют трехрядной и т. д.

Ширину печи определяют суммированием длины заготовки и необходимых зазоров между заготовкой и стенами печи или между двумя заготовками. Эти зазоры обычно равны примерно 0,25 м, поэтому ширина однорядной печи будет равна $B=l+2\cdot 0{,}25$ м; двухрядной $B=2l+3\cdot 0{,}25$ м и т. д.

Длину печи с шагающим подом следует определять с учетом зазоров между заготовками. Обычно расстояние между гранями соседних заготовок составляет 0,5—0,7 их толщины.

Поэтому длина печи в этом случае составит

$$L=an+(0{,}5—0{,}7)b(n+1).$$

Высоту свода печей h чаще всего определяют, исходя из опыта хорошо работающих печей. Так, для трехзонных и многозонных толкательных печей и с шагающим подом расстояние от высшей точки свода до уровня пода составляет, м:

Начало печи (место посада металла)	1,2—1,5
Высота сварочных зон:	
верхних	2,2—2,6
нижних	2,4—3,0
Высота томильной зоны	1,5—1,7

Часто при достаточном конструктивном опыте и наличии информации о хорошо работающих печах размер площади пода печей определяют не через время нагрева, а используя величину напряженности активного пода H_a.

В этом случае

$$F_a=P/H_a,$$

а длина печи $L_a=F_a/B$, где B — ширина печи.

Печи трубо- и колесопрокатных цехов

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

В печах с вращающимся подом, кроме нагрева круглой трубной заготовки, удобно нагревать фасонные заготовки, например, к колесопрокатным станам. В печах с вращающимся подом он может быть кольцевым или так называемым тарельчатым. В трубо- и колесопрокатных цехах применяют печи с кольцевым подом. Наряду с кольцевыми печами для нагрева труб и трубной заготовки применяют секционные печи.

Печи с кольцевым подом. На ряде отечественных металлургических заводов работают печи с кольцевым подом (рис. 135).

Заготовки, лежащие неподвижно на вращающемся поду, вместе с подом проходят все необходимые зоны нагрева и выдаются через окно выдачи, расположенное рядом с окном загрузки.

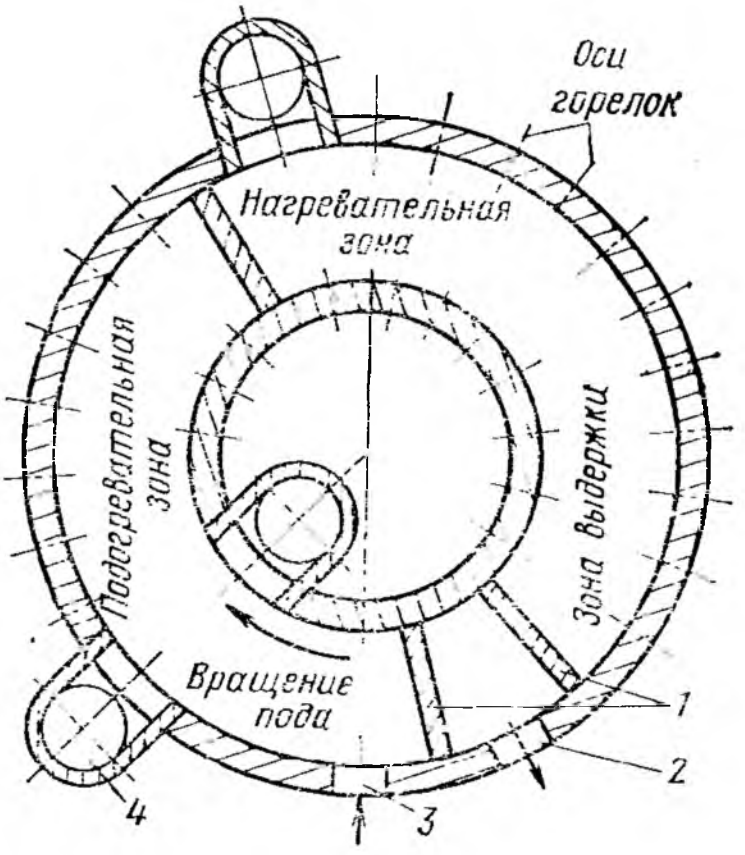


Рис. 135. Печь с кольцевым подом:

1 — занавески; *2* — окно выдачи; *3* — окно загрузки; *4* — дымоотводящий канал

Загрузку и выдачу заготовок осуществляют одновременно двумя кранами. Угол между осями окна загрузки и окна выдачи обычно составляет 28°. Следовательно, заготовка, пройдя 332° полного оборота пода, может нагреваться до необходимой температуры, т. е. время полного оборота пода, соответствующее 332°, равно времени нагрева заготовки. Под движется толчками, причем при каждом толчке он поворачивается на угол, соответствующий расстоянию между двумя соседними заготовками.

Кольцевые печи могут работать на жидком и газообразном топливах. Горелки (форсунки) устанавливают во внутренних и наружных стенах печи. Применяют также и сводовое отопление таких печей. Продукты сгорания можно отбирать в одном месте (у окна выдачи) и в нескольких местах. Расположение горелок и дымоотводящих каналов — весьма важная характеристика кольцевых печей. В зависимости от этого печь может работать по методическому или камерному режиму.

При работе по методическому режиму дым отбирается через два дымоотводящих канала, расположенных один напротив другого около окна загрузки. На подобных печах часто предусматривают промежуточные дымоотводящие каналы. Если эти промежуточные дымоотборы отключены, то обеспечивается методический режим. Если они включены, то печь работает по камерному режиму.

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

В соответствии с температурным режимом печь делят на ряд участков, к каждому возможен свой отдельный автоматически регулируемый подвод газов и воздуха. Причем, для поддержания определенных температурных условий на отдельных участках используют подвесные перегородки («занавески»). Между подом печи и «занавеской» остается зазор, необходимый для свободного перемещения заготовок. Перегородки обычно устанавливают в следующих местах:

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

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

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

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

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

печи — механизированные и автоматизированные агрегаты, что позволило устранить тяжелый физический труд по кантовке металла.

Применение кольцевых печей позволяет без затруднений переходить от методического режима к камерному, и наоборот.

Угар в кольцевых печах составляет 0,5—1 %, т. е. меньше, чем в печах иных конструкций. Для заготовок диаметром 110—150 мм удельная производительность печей составляет 350—400 кг/(м^2·ч) при удельном расходе тепла 1670—2500 кДж/кг. Коэффициент полезного действия кольцевых печей при максимальной производительности достигает 40—45 %.

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

Секционные печи скоростного нагрева применяют в трубопрокатных цехах для нагрева перед прокаткой круглой заготовки диаметром до 200 мм и для термообработки (нормализации, отжига) труб различного диаметра. Скоростной нагрев металла достигается в результате применения всестороннего обогрева при условии, что температура печных газов и кладки значительно превышает конечную температуру нагрева металла.

Секционные печи состоят из секций, между которыми расположены водоохлаждаемые ролики, для каждого из них продусмотрен собственный привод. Ролики установлены под углом к направлению движения, что обеспечивает вращение нагреваемых изделий. Каждая секция представляет собой зафутерованную небольшую камеру (рис. 136) с высокой тепловой нагрузкой. Печи отапливают газообразным топливом. В каждой секции размещено 5—6 горелок.

Горелки установлены тангенциально, с одной стороны — под металлом, а с другой стороны — над ним. При тангенциальном расположении горелок создается интенсивное движение газов, что приводит к значительному разогреву поверхности кладки и интенсификации конвективного теплообмена. Несколько секций объединены в одну тепловую

зону, которая снабжена отдельной регулировкой. Тепловая нагрузка тех секций, в которые поступает холодный металл, всегда больше секций последующих зон. Печи для отжига холоднокатаных труб обычно состоят из девяти секций и обеспечивают производительность 2,5—4 т/ч. Печи для нагрева заготовок перед прокаткой шаров и труб со-

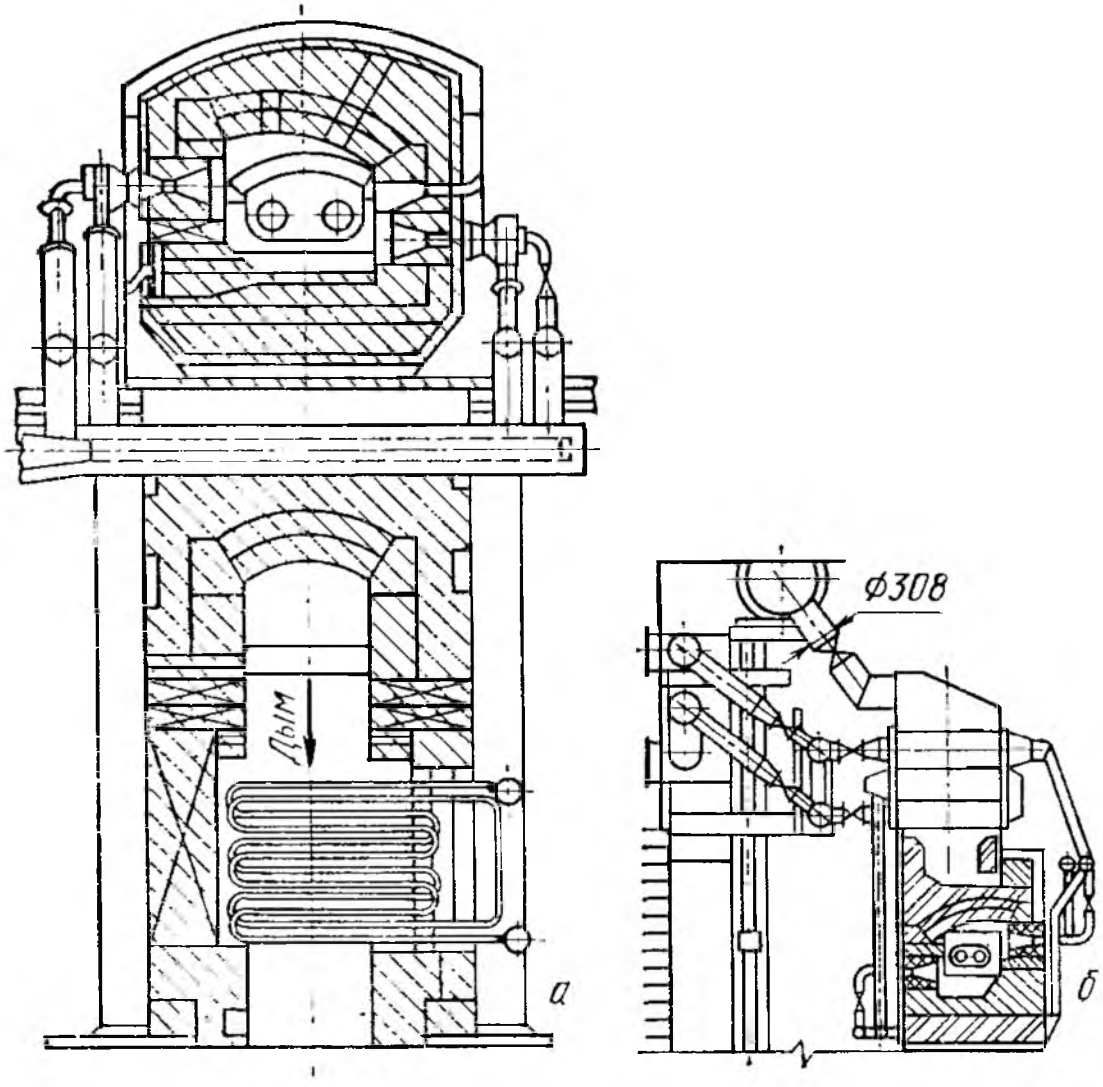


Рис. 136. Секционная печь:

а — расположение рекуператоров под печью; *б* — расположение рекуператоров над печью

стоят из 20—35 секций и могут обеспечивать производительность 20—40 т/ч.

Недостаток секционных печей скоростного нагрева заключается в возможности перегрева изделий и кладки при производственных неполадках в поточных линиях. Во избежание этого следует всеми средствами снижать аккумулирующую способность футеровки секций, чтобы в случае необходимости можно было быстро уменьшить расход топлива и снизить температуру до величины, соответствующей уровню холостого хода печи.

§ 5. Термические печи прокатных цехов

Характеристика термических печей заводов черной металлургии

В прокатных цехах заводов черной металлургии термической обработке подвергаются сортовой прокат, горячекатаный и холоднокатаный листы, холоднокатаная лента, рельсы и другая продукция. Применяемые виды термической обработки достаточно разнообразны (табл. 20).

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

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

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

Такое разделение оказывает решающее влияние на выбор типа применяемых печей. При термической обработке прокатной стали применяют печи двух типов (садочные и проходные).

Металл в садочных печах загружают на неподвижный под или на выкатную подину, и в процессе нагрева он находится в неподвижном состоянии. Загрузка металла осуществляется обычно в полуостывшую печь, и нагрев его происходит вместе с нагревом печи.

В проходных печах металл в процессе нагрева перемещается от одного конца печи к другому при помощи специальных механизмов.

Преимущество садочных печей заключается в их универсальности, поскольку в них могут быть обеспечены лю-

Таблица 20. Виды термической обработки

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

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

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

При осуществлении режимов термообработки, связанных с длительной выдержкой, применение проходных печей нецелесообразно, так как для обеспечения необходимой производительности термического отделения пришлось бы создавать нерационально большое число крайне длинных печей. Разумное исключение в данном случае составляют протяжные печи для термообработки холоднокатаной ленты. Большое значение при выборе конструкции термических печей имеет качество получаемого металла. В частности, для автостроения необходим холоднокатаный лист, имеющий невысокую жесткость и пригодный для глубокой вытяжки — процесса широко распространенного на автомобильных заводах. Еще не так давно для отжига автолиста в рулонах повсеместно применяли садочные печи колпакового типа. Металл в них охлаждается медленнее, чем в протяжных печах и, имея меньшую жесткость, пригоден для штампования.

Однако в настоящее время для отжига автолиста все шире применяются протяжные печи, приспособленные для обработки автолиста при таких режимах, при которых лист получается с необходимыми характеристиками по жесткости.

При нагреве металла в термических печах обязательными являются равномерность и относительно невысокая скорость нагрева без окисления и обезуглероживания поверхности. Широко распространены топливные и электрические печи. Для отопления термических печей используют обычно газообразное топливо. Чтобы обеспечить равномерность нагрева металла, горелки и дымоотборы стараются размес-

тить равномерно по длине рабочего пространства. Температура в термических печах может превышать конечную температуру металла не более чем на 50—70 °С. Особое место занимают протяжные печи для нагрева тонкой ленты, в которых создается и поддерживается очень высокая скорость нагрева при значительном перепаде температур (500—600 °С). Сравнительно невысокая температура в термических печах не позволяет во многих случаях сжигать топливо непосредственно в рабочем пространстве.

Сжигание топлива в рабочем пространстве затруднено, поскольку факел, характеризуемый высокой температурой, может вызвать нежелательный перегрев нагреваемого металла, и температура рабочего пространства бывает порой недостаточна для достижения устойчивого горения топлива.

По указанным причинам топки термических печей часто размещают либо вне рабочего пространства или под подом печи (подподовые топки), либо выносят за пределы печи (выносные топки). Применение подподовых топок позволяет обеспечить необходимую для равномерного нагрева циркуляцию газов.

На рис. 137 представлена термическая печь с подподовыми топками, в которых сжигают топливо. Образовавшиеся дымовые газы проходят под подом и поступают в рабочее пространство через правый канал. В топке развивается высокая температура, необходимая для сгорания топлива, однако рабочее пространство ограждено от воздействия излучающего высокотемпературного факела.

Очень важное значение имеет левый канал, через который в подподовую топку подсасываются более холодные дымовые газы из рабочего пространства. В результате этого снижается до требуемой величины температура вновь образующихся при горении дымовых газов перед их выходом в рабочее пространство и обеспечивается их циркуляция.

Обычно выполняют ряд подподовых топок по длине печи с шахматным расположением форсунок или горелок. При шахматном расположении горелок в рабочем пространстве печи достигается развитая циркуляция газов и обеспечивается тем самым равномерный нагрев металла Наряду с подподовыми топками в термических печах применяют экранированные топки, в которых нагреваемый металл не воспринимает прямого излучения факела.

В зависимости от величины рабочей температуры печи можно разделить на три группы: высокотемпературные среднетемпературные и низкотемпературные.

Высокотемпературные печи (рабочая температура 1100—1150 °С) применяют для закалки и высокотемпературного отжига нержавеющих, кремнистых и других легированных сталей. При этом топливо сжигают в рабочем пространстве печи.

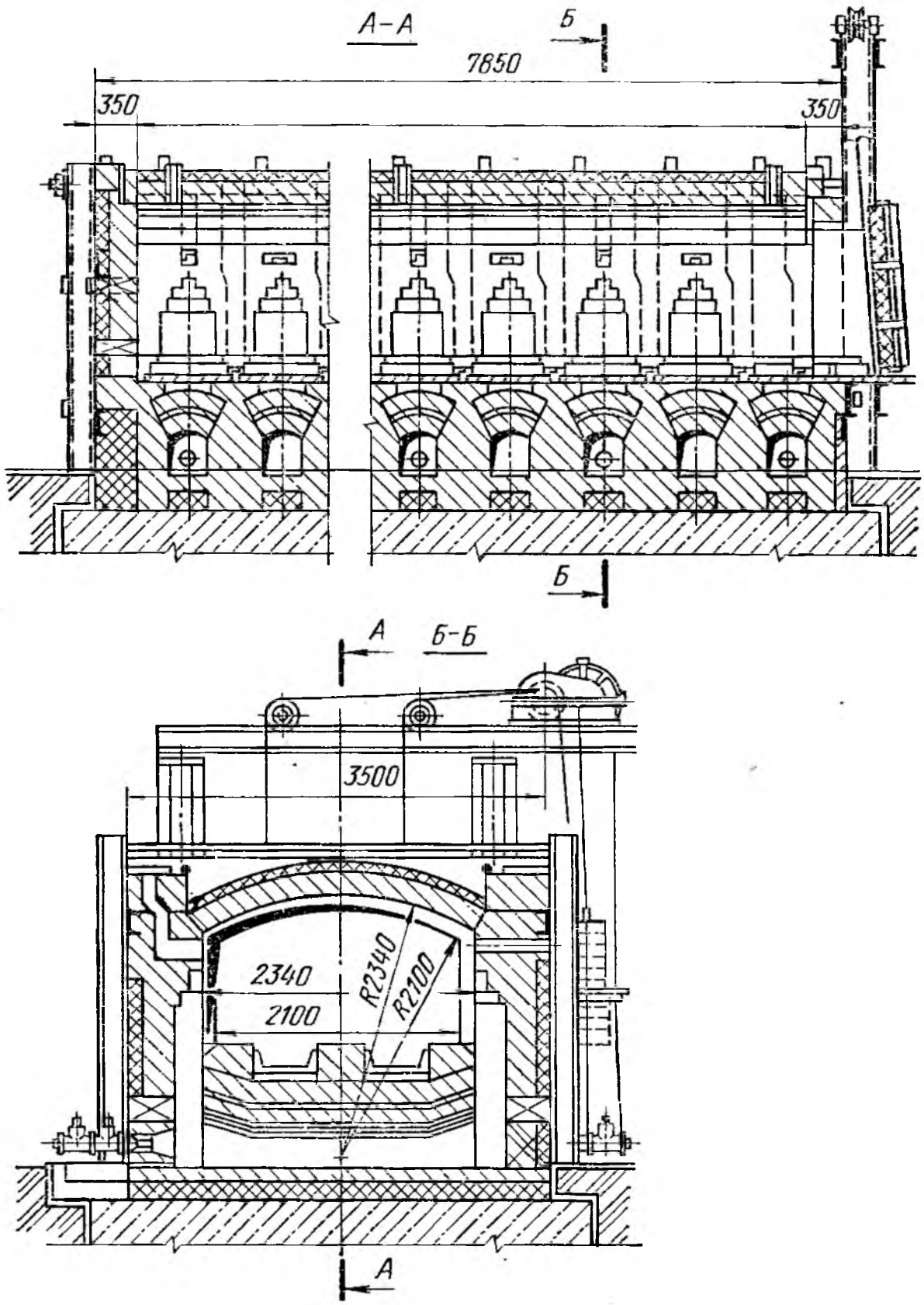


Рис. 137. Камерная термическая печь с подподовыми топками

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

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

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

В печах косвенного нагрева (муфельных) нагреваемый металл отделен от печных газов. Такой метод нагрева применяют в тех случаях, когда недопустимо даже малейшее окисление поверхности металла. Различают два принципа отделения металла от печных газов: муфелирование металла и муфелирование пламени.

В первом случае садку металла закрывают специальным металлическим колпаком — муфелем (съемным или стационарным). Под муфель подают специальную защитную атмосферу, препятствующую окислению металла. Тепло от печных газов передается муфелю, а от него — нагреваемому металлу.

Во втором случае топливо сжигают в радиационных трубах. Продукты сгорания в рабочее пространство печи не попадают, а пройдя по трубе, уходят в атмосферу. В этом случае печь также заполняют защитной атмосферой во избежание окисления металла. Как при муфелировании металла, так и при муфелировании пламени необходима высокая степень герметизации, чтобы избежать попадания в печь атмосферного воздуха. Печи прямого нагрева обычно применяют для нормализации (закалки) и отжига сортового проката и горячекатаного листа. Печи косвенного

нагрева используют для светлого отжига холоднокатаного листа, ленты и других видов проката.

Методы муфелирования применяются как в садочных, так и в проходных печах.

Современное металлургическое производство является высокомеханизированным и автоматизированным производством. В полной мере это относится и к термическим печам, степень механизации которых непрерывно повышается. Садочные печи оборудованы выкатными подинами, специальными загрузочными машинами, кранами. Проходные печи для транспортирования металла через печь снабжены шагающим подом, роликовым подом, специальными конвейерами. На многих термических печах (протяжных, колпаковых) начинают внедряться АСУ ТП.

Печи для термической обработки сортового проката

Для отжига сортового проката чаще всего применяют садочные печи: с выкатным подом и с загрузочной машиной (с внешней механизацией). Кроме того, иногда применяют колпаковые печи с радиационными трубами или без них с использованием защитной атмосферы. Для нормализации применяют проходные печи: с шагающим подом, конвейерные и роликовые.

Садочные печи. Некоторое время наиболее были распространены печи с выдвижным подом (рис. 138). В этой печи металл загружают при помощи подвижной тележки и нагревают вместе с печью. Масса садки печей с выдвижным подом меняется в очень широких пределах и составляет около 2 т/м^2 площади пода. Печь обычно отапливают газообразным топливом, для этого предусмотрено два ряда горелок, расположенных в шахматном порядке. Дымовые газы удаляются в боров через шесть отводящих каналов, расположенных попарно в середине и по концам печи. Специфическим недостатком печей с выкатным подом является то, что при выкатывании подины теряется тепло.

С целью устранения этого недостатка для отжига сортового проката применяют печи с механизированной загрузкой (см. рис. 137). Печь оборудована подподовыми топками, чаще всего ее отапливают смесью коксового и доменного газов с теплотой сгорания 7500—8300 кДж/м^3 при помощи горелок типа «труба в трубе».

Характер движения газов в рабочем пространстве определяется наличием подподовых топок. Для удаления дымовых газов из рабочего пространства печи в стенках выполнены специальные каналы, расположенные на уровне

пода печи, что обеспечивает удовлетворительный нагрев низа садки. Масса садки печей составляет 15—20 т. Металл загружают в печь при помощи специальной машины. Отжигу в рассматриваемых печах обычно подвергают круглые заготовки диаметром 30—60 мм или квадратные сечением 120—180 мм. Между отдельными пакетами металла помещают специальные прокладки, что способствует циркуляции газов внутри садки и повышает равномерность нагрева. В печах с механизированной загрузкой применяют изо-

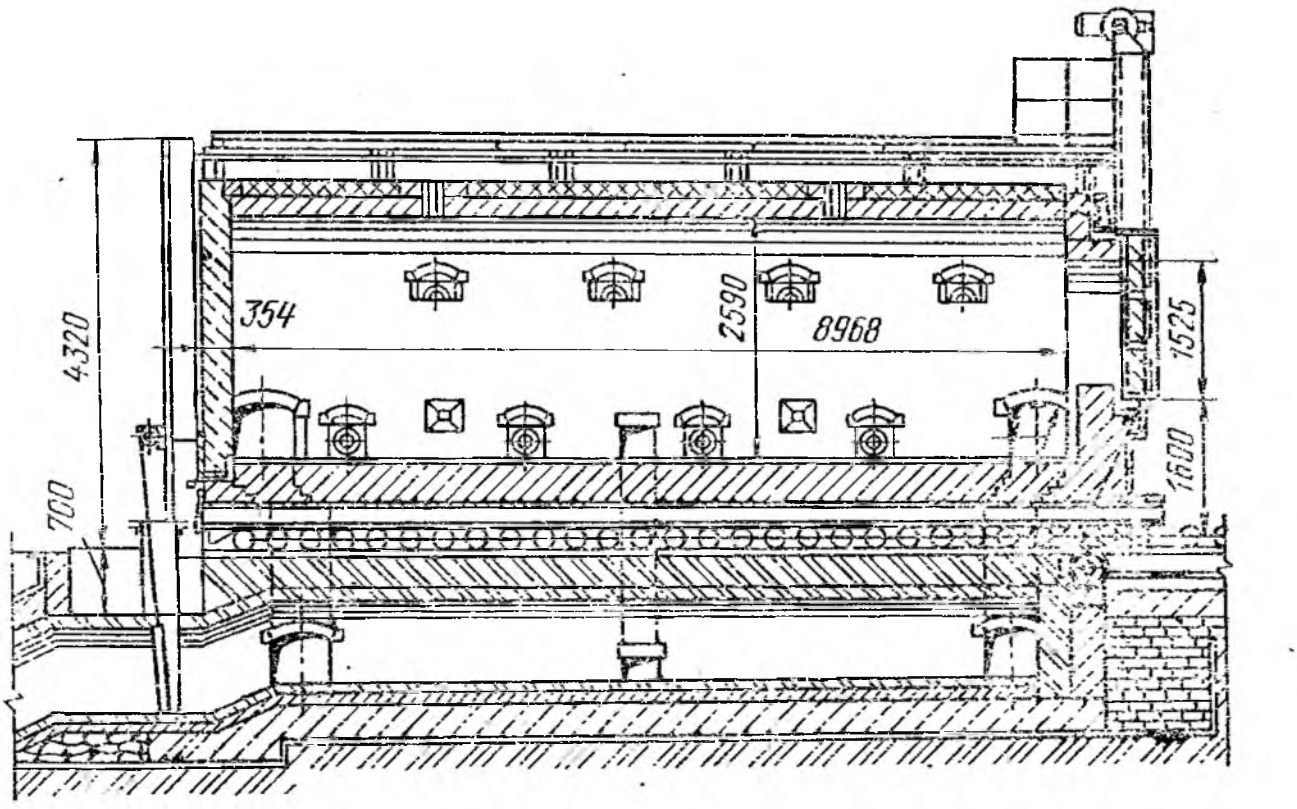


Рис. 138. Термическая печь с выдвижным подом

термический отжиг с нагревом металла до 780 °С и охлаждением до 650 °С с выдержкой при этой температуре.

В садочных печах, как в печах периодического действия, значительное количество тепла тратится на нагрев кладки. Для таких печей характерно, что на нагрев металла расходуется 17—18 % тепла, унос с продуктами сгорания составляет 54—56 % и потери кладкой обычно равны 18—19 %. Иначе говоря, тепло, теряемое кладкой, равновелико полезному расходу тепла.

Футеровку садочных термических печей выполняют обычно двухслойной: внутренний слой из шамота класса Б, наружный — из теплоизоляционного диатомитового кирпича.

Поскольку садочные печи имеют переменный во времени температурный режим, тепловой расчет таких печей

выполняют на весь цикл работы, а не на 1 ч, как это делают для печей постоянного действия.

Садочным печам присущи следующие серьезные недостатки:

а) непостоянный во времени температурный режим, отрицательно сказывающийся на равномерности нагрева металла;

б) высокий удельный расход топлива, вызванный периодическим нагревом кладки печи;

в) сложность автоматического регулирования теплового режима печи;

г) непригодность для высокопроизводительного поточно-массового производства.

Однако эти печи пока являются наиболее приемлемыми агрегатами для выполнения таких операций термообработки, которые связаны со значительными выдержками и замедленным охлаждением. Садочные печи также пригодны для термохимической обработки металла.

Проходные печи. Применение проходных печей позволяет обеспечить более совершенный метод нагрева металла. Для термической обработки сортового проката применяют непрерывные (постоянного действия) печи прямого нагрева трех конструкций: с шагающим подом, с роликовым подом и конвейерные.

В печах с шагающим подом, применяемых для термической обработки, температура по длине печи чаще всего постоянная. В печах для нормализации иногда предусматривают по длине две зоны: нагрева до 900 °С и охлаждения до 300—400 °С. Обычно температура печи составляет около 1000—1050 °С. Металл нагревается до 900—950 °С. Печи отапливают холодным газообразным топливом. Горелки расположены равномерно по всей длине, дымовые газы удаляются из печи под зонт через рабочие окна и специальные в своде каналы. Печи с шагающим подом, предназначенные для термообработки, обеспечивают удельную производительность около 400—450 кг/(м^2·ч) при удельном расходе тепла около 2100 кДж/кг.

Наиболее широкое распространение для термической обработки приобретают печи с роликовым подом, подробно рассмотренные в следующем разделе.

Печи для термической обработки горячекатаных листов

Для термообработки горячекатаных листов применяют садочные (колпаковые печи и проходные) и главным образом роликовые печи.

В колпаковых печах осуществляют чистый черный отжиг металла, который нагревается под муфелем, но без защитной атмосферы. Печи подобного типа широко применяют при производстве холоднокатаного листа и ленты, поэтому они рассмотрены ниже.

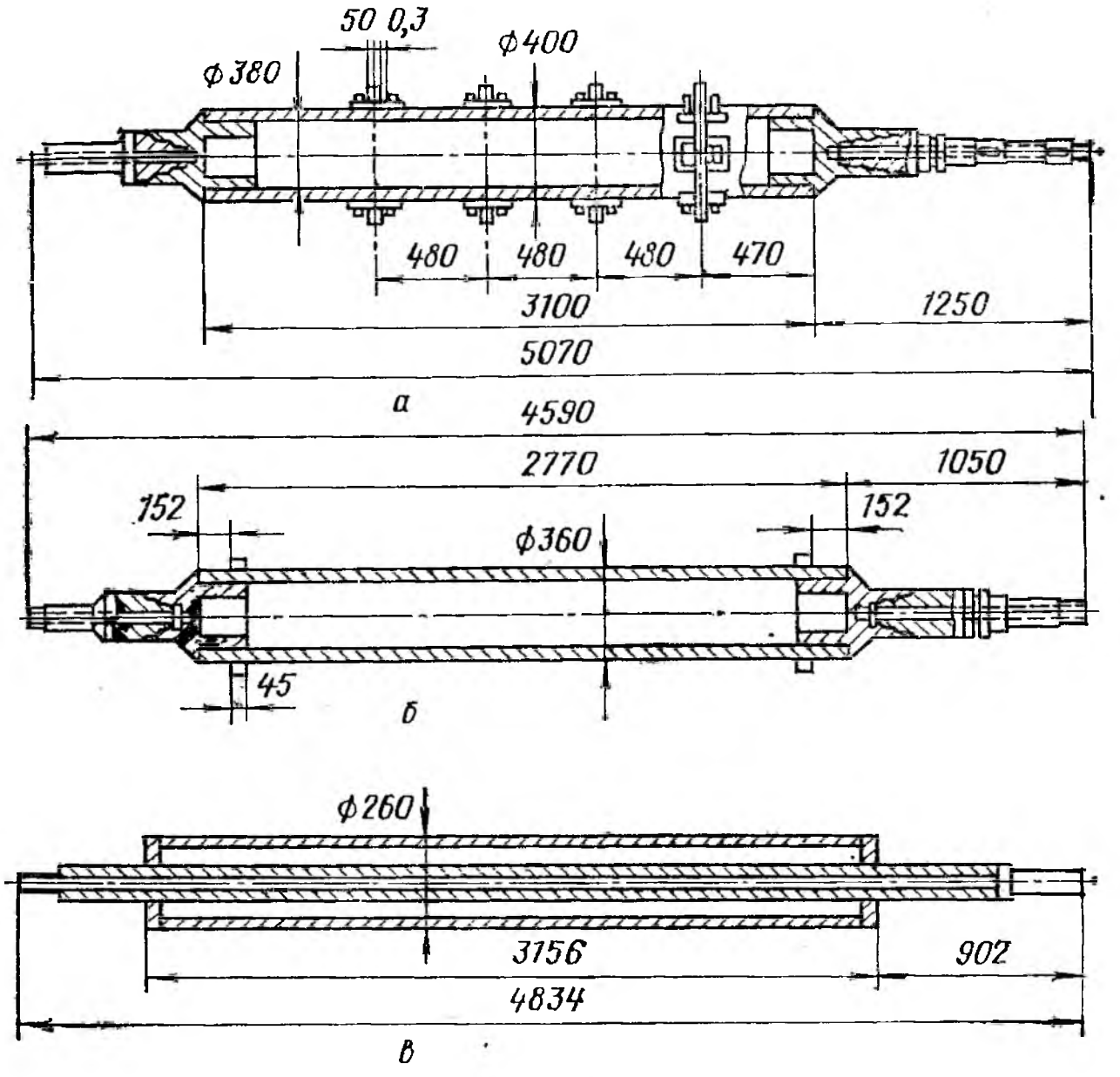


Рис. 139. Ролики с дисками (*а*), с неводоохлаждаемой бочкой (*б*) и с водоохлаждаемым валом (*в*)

В печах с роликовым подом, широко применяемых для нагрева листов, сорта, рельсов, бунтов проволоки, металл прямо с рольганга поступает на ролики печи, вращающиеся по несколько штук от одного привода или от индивидуальных приводов. Скорость вращения роликов может быть различной. Ролики обычно выполняют из жаропрочной стали (например, содержащей 20—30 % Ni и 20—25 % Cr).

Конструкция роликов зависит от назначения и температуры рабочего пространства печи. В печах для термообработки тонкого листа иногда применяют ролики с диска-

ми (рис. 139). Диски, располагаемые в шахматном порядке, заходят друг за друга и препятствуют попаданию листа под ролики. Печи для толстого листа (рельсов, сорта) с рабочей температурой 800—1000 °С оборудуют роликами с

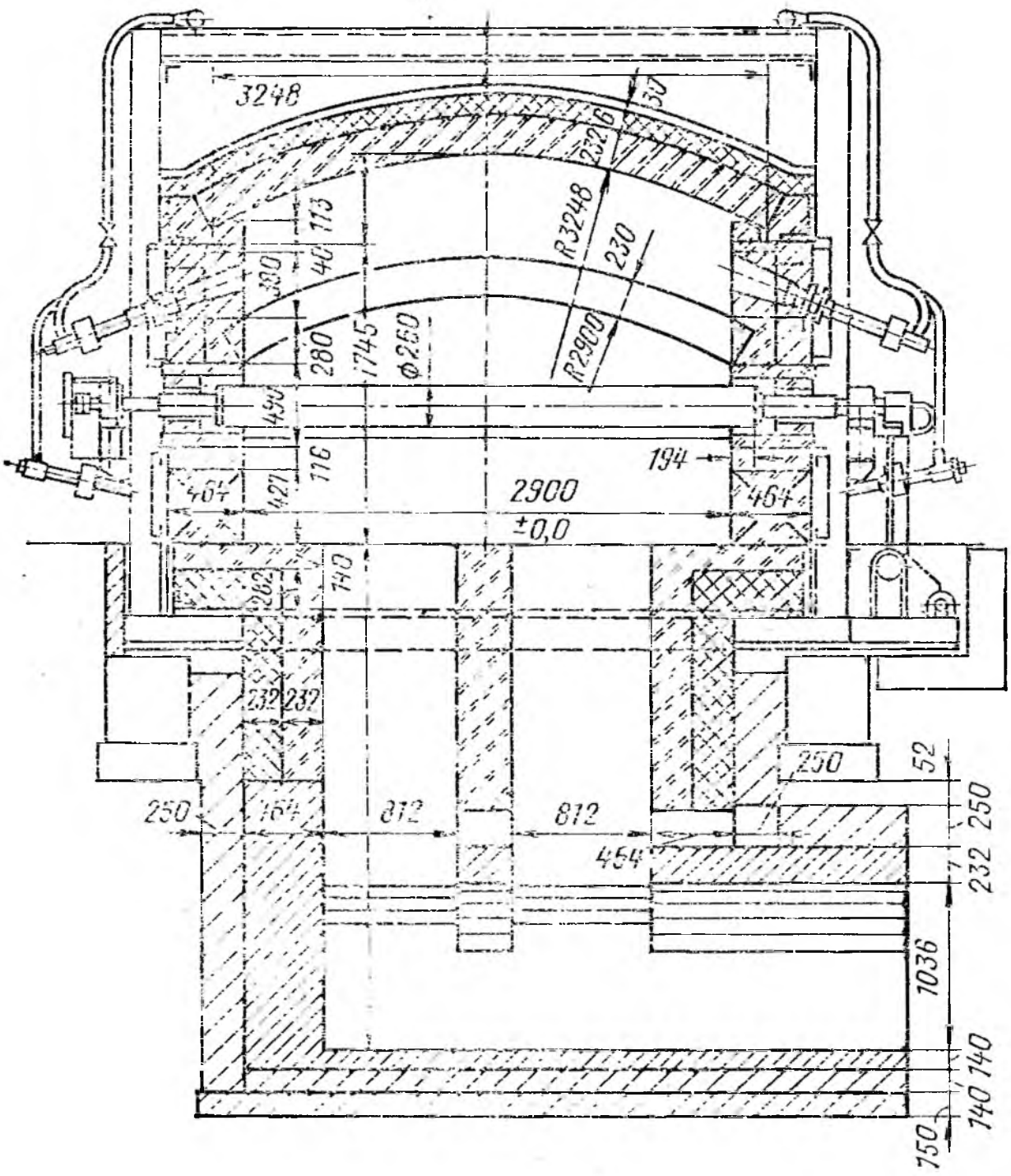


Рис. 140. Печь с роликовым подом

неводоохлаждаемой бочкой. Для температуры печи 1000—1200 °С ролик выполняют с водоохлаждаемым несущим валом и укрепленной на нем жаропрочной бочкой. Пространство между бочкой и валом заполняют теплоизоляцией (шамотным или диатомитовым порошком).

Роликовые печи в зависимости от их назначения делают различной ширины (рис. 140 и 141).

Правильный выбор ширины роликовой печи очень важен, так как, чем шире печь, тем большую нагрузку испытывают ролики. В работающей печи нельзя останавливать вращения роликов во избежание их прогиба. Поэто-

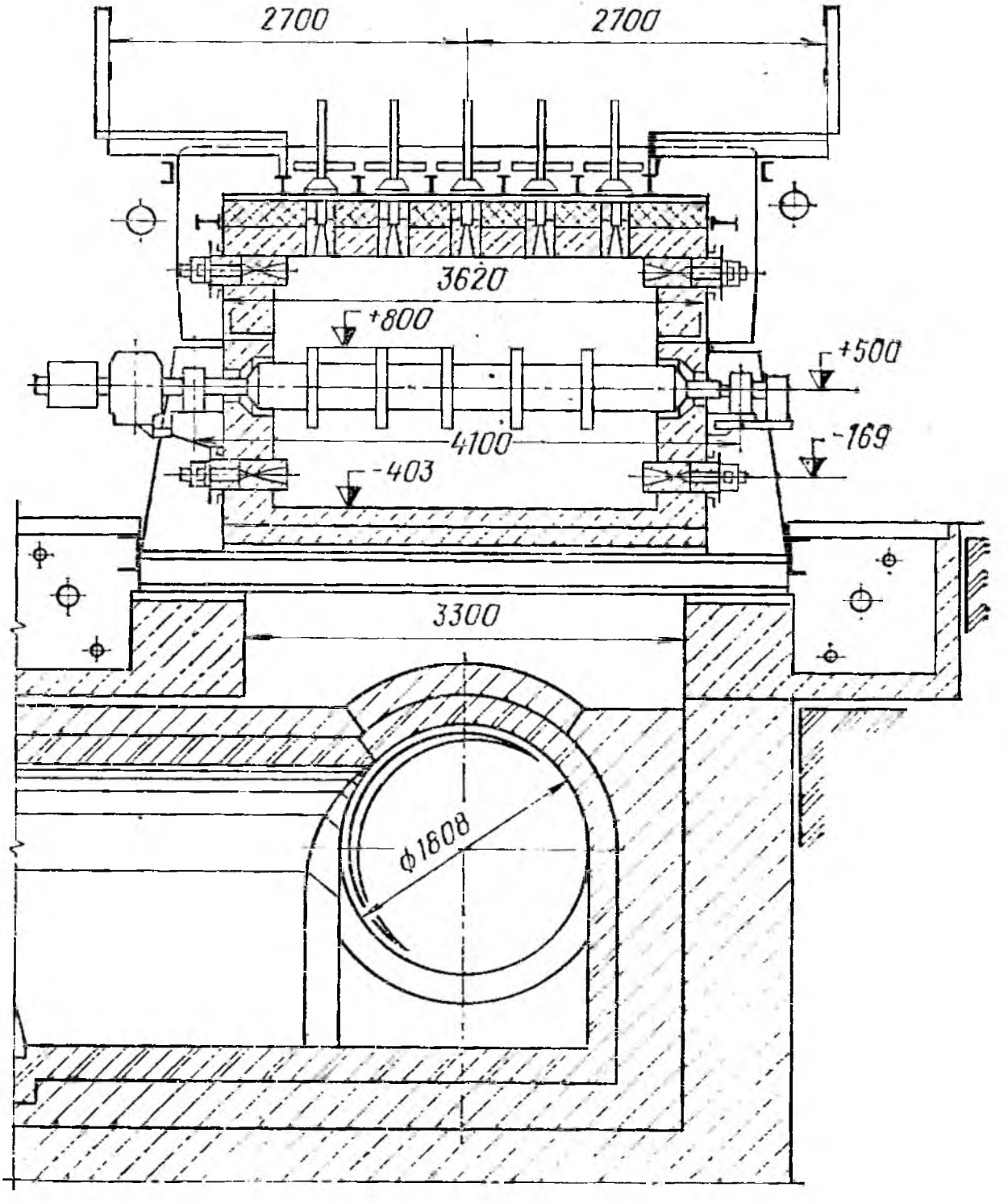


Рис. 141. Печь с роликовым подом для нагрева широких листов

му длина роликовых печей всегда больше суммарной длины листов, загружаемых в печь. В этом случае в процессе нагрева необходимо непрерывное вращение роликов, осуществляемое перемещением листов то немного вперед, то немного назад.

Роликовые печи обычно отапливают различным газообразным топливом; горелки располагают в боковых стенах печи выше и ниже уровня роликового пода. Для обеспечения более равномерного нагрева широких листов горелки устанавливают и на своде печи.

Производительность роликовых печей колеблется от 4—5 до 40 т/ч при удельной производительности около 250 кг/(м^2·ч) и удельном расходе тепла 3300—5000 кДж/кг.

Роликовые печи по сравнению с конвейерными и печами с шагающим подом отличаются рядом преимуществ:

1) наилучшим соответствием поточному производству, так как роликовый под может служить продолжением цехового рольганга;

2) отсутствием подсоса холодного воздуха, увеличивающего окисление металла;

3) отсутствием уноса из печи тепла элементами механизмов для транспортировки металла;

4) скоростью и равномерностью нагрева, которые выше, чем в печах других типов.

Печи для термической обработки холоднокатаных листов и ленты

Для термической обработки применяют колпаковые садочные печи и протяжные печи постоянного действия. В колпаковых печах термообработке подвергают стопы листов или рулоны ленты. В протяжных печах происходит обработка одного слоя ленты, что обеспечивает большую скорость и равномерность нагрева. Протяжные печи — более прогрессивные агрегаты, соответствующие требованиям современного поточного производства. Они обычно входят в состав непрерывных линий, в которых наряду с термообработкой металла осуществляют ряд других технологических операций (травление, нанесение покрытий и др.). Однако несмотря на эти преимущества, современное производство холоднокатаного листа не может обойтись пока без колпаковых печей.

Основным видом термической обработки холоднокатаного металла является низкотемпературный рекристаллизационный отжиг. Скорость охлаждения ленты в протяжных печах по сравнению с колпаковыми очень велика. Поэтому получается более мелкозернистая структура и, как следствие, выше предел текучести и твердость металла В протяжных печах структура получается однородной, чего нельзя сказать о металле, отожженном в колпаковых печах. Колпаковым печам, как печам садочного типа, свойственна неравномерность нагрева металла. В результате

этого у одного и того же металла, отожженного в колпаковых печах, структура и свойства могут быть различными.

Режим работы протяжных печей теснейшим образом связан с технологией термической обработки. Температура рекристаллизации определяет температуру нагрева металлов. Скорость нагрева металла обычно составляет 25—100 К/с, чем и определяется время нагрева. Для завершения рекристаллизации необходима выдержка при температуре рекристаллизации, которая должна быть не менее 25 с. Скорость охлаждения ленты следует выбирать такой, чтобы из твердого раствора в феррите успевал полностью выпадать углерод и не образовываться перенасыщенный раствор. При температуре около 500 °С содержание углерода примерно такое же, как и при 20 °С, поэтому регулируемое охлаждение надо вести до 480—500 °С. Время регулируемого охлаждения не должно быть менее 25 с. Дальнейшее охлаждение ниже 480—500 °С можно вести с любой скоростью, но до 120 °С ленту следует охлаждать в защитной атмосфере, а ниже 120 °С — обдувкой холодным воздухом. Ускорение охлаждения от 500 до 120 °С представляет собой значительный резерв увеличения производительности и удешевления печи.

Колпаковые печи

В колпаковых печах лист отжигают в пакетах, а рулоны — в стопах (при этом рулоны установлены один на другой). Для ускорения нагрева используют принудительную циркуляцию защитной атмосферы. Между рулонами предусмотрены специальные прокладки, которые позволяют защитной атмосфере циркулировать между рулонами и способствовать тем самым их прогреву в осевом направлении.

Применяют многостопные и одностопные колпаковые печи. В многостопных печах один нагревательный колпак приходится на несколько стоп, которые взаимно экранируют друг друга. Это приводит к неравномерности нагрева стопы и необходимости увеличения времени выдержки и, следовательно, к снижению производительности.

Более совершенны с этой точки зрения одностопные колпаковые печи, в которых рулоны прогреваются равномернее. Однако в экономическом отношении эффективнее многостопные печи. Их целесообразно применять при массовом производстве, когда сортамент отжигаемого металла сравнительно неширок. В случае большого разнообра-

зия сортамента отжигаемого металла одностопные печи позволяют более гибко вести производство.

Печи с муфелированием металла. Колпаковая печь для светлого отжига листа представлена на рис. 142. Она предназначена для отжига листов, уложенных в стопу. Нагрев стопы листов целесообразно вести так, чтобы тепло поступало к торцам листов, а не в поперечном направлении Между листами, сложенными в стопу, находится газовая

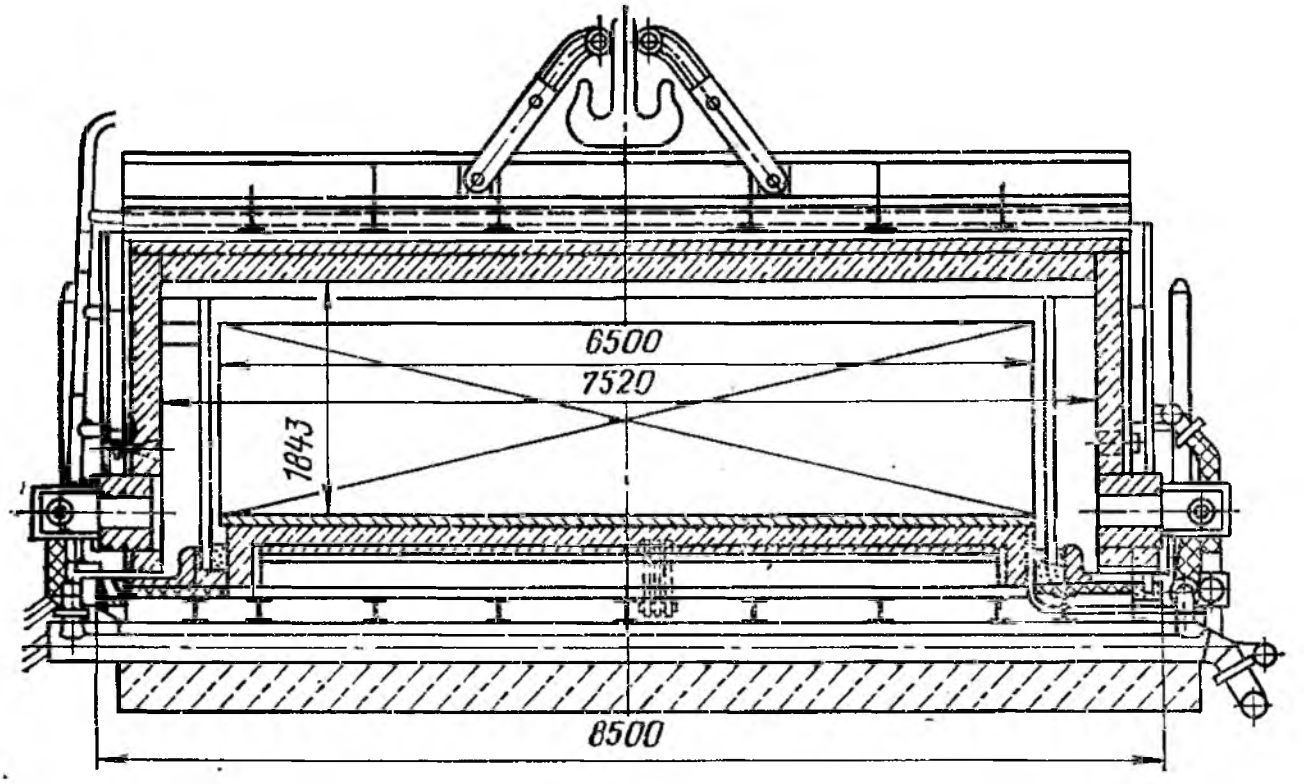


Рис. 142. Колпаковая печь для светлого отжига листов

прослойка, которая снижает теплопроводность в поперечном направлении в 30—40 раз по сравнению с теплопроводностью сплошного металла. У печи два колпака: внутренний — из листового железа и наружный футерованный колпак, на котором и размещены горелки. Внутренний колпак — это муфель, которым закрывают стопы, помещенные на неподвижный под (стенд) печи. Внизу внутреннего муфеля устроен песочный затвор, обеспечивающий необходимую герметизацию. Под внутренний муфель по специальной трубке подается защитная атмосфера.

Весь процесс отжига делится на следующие стадии а) загрузка стоп металла на стенд; б) установка внутреннего муфеля и продувка подмуфельного пространства защитной атмосферой для удаления воздуха; в) нагрев садки до 650—750 °С (с защитной атмосферой); г) охлаждении садки под внутренним муфелем до 150 °С (с защитной ат-

мосферой); охлаждение от 150 °С на воздухе и разгрузка стенда.

Выдавать металл на воздух с температурой выше 150 °С нельзя во избежание появления на поверхности металла цветов побежалости.

Время нагрева садки до 650—750 °С приблизительно в три раза меньше суммарного времени охлаждения садки до 150 °С, загрузки и разгрузки металла. Поэтому обычно на один наружный колпак приходится три стенда. Когда один стенд находится под наружным колпаком, второй разгружают и нагружают, а на третьем охлаждают металл под внутренним муфелем. Колпак переносят с одного стенда на другой специальным мостовым краном. Масса наружного колпака около 40 т.

При переносе с одного стенда на другой внутренняя поверхность футеровки колпака остывает до 300—350 °С. В нижней части наружного колпака с двух сторон по всей его длине расположена серия небольших инжекционных горелок, что обеспечивает торцовой подвод тепла к стопам листов. Перед каждой горелкой установлена карборундовая пластина, предохраняющая внутренней муфель от местного перегрева. У наружного колпака также устроен внизу песочный затвор. В качестве топлива можно использовать любое газообразное топливо, чаще всего употребляют смеси коксового и доменного газов с $Q_р^н = 5\,800$—$10\,000$ кДж/м^3.

Дымовые газы отдают тепло внутреннему муфелю, а он в свою очередь передает тепло нагреваемому металлу. Удаляют дымовые газы из рабочего пространства при помощи эжекторов. Газ и инжектирующий воздух подают через специальные гибкие шланги. Дымовые газы удаляются в дымоотводящие трубопроводы, присоединенные к дымовой трубе, оборудованной дымососом.

Масса садки в колпаковых печах составляет 80—120 т, удельная производительность достигает 250—300 кг/(м^2·ч), удельный расход топлива равен 1200—1400 кДж/кг.

Колпаковые печи для отжига рулонов ленты чаще всего одностопные (рис. 143). Показатели работы одностопных колпаковых печей приведены ниже:

Удельный расход тепла, кДж/кг . .	1200—1400
Масса наружного колпака, т	15
Производительность, т/ч	1,2—2,0

В работе колпаковых печей для отжига ленты в рулонах большое значение имеет циркуляция защитного газа.

Если сравнивать работу колпаковой печи в отсутствие циркуляции и с циркуляцией, то при циркуляции производительность увеличивается в 2—3 раза, а удельный расход тепла на отжиг уменьшается. Циркуляция позволяет не только ускорить нагрев рулонов, но и повысить равномерность нагрева садки.

Циркуляцию осуществляют при помощи вентиляторов с крыльчаткой центробежного типа. Крыльчатка помещена под стопой внутри специального направляющего аппарата. Вентилятор засасывает защитный газ из внутренней полости стопы рулонов и через направляющий аппарат подает его между наружным и внутренним цилиндрами двойного муфеля или вдоль стен внутри одинарного муфеля. Поднимаясь вдоль стен муфеля, газ нагревается и затем поступает во внутреннюю полость стопы через специальные кольца, проложенные между рулонами. Проходя с большой скоростью между рулонами, газ отдает свое тепло торцу рулона, значительно ускоряя его нагрев. Чтобы защитный газ направлялся между рулонами, внутреннюю полость их сверху закрывают специальной крышкой.

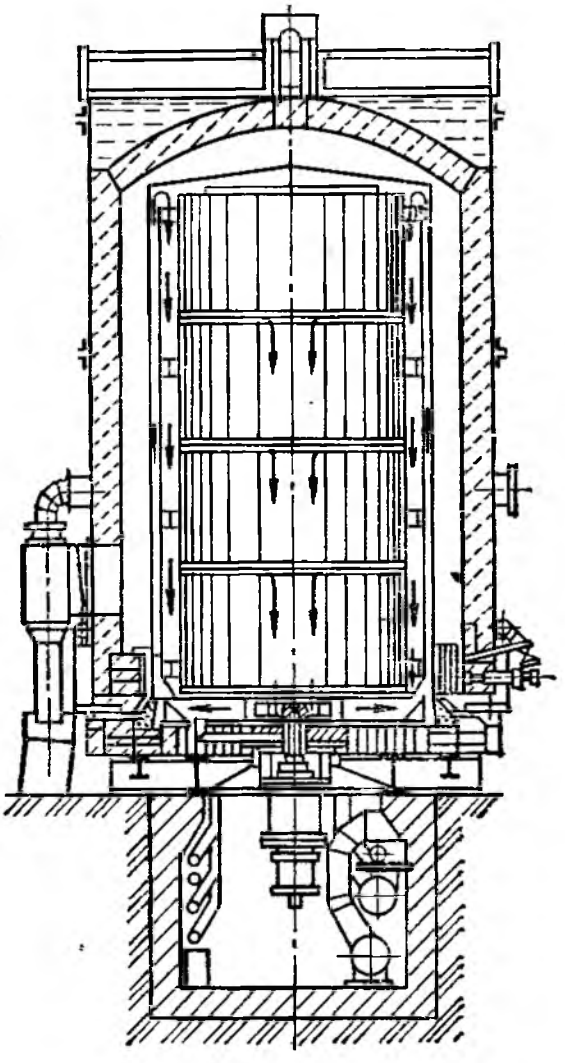


Рис. 143. Одностопная печь для светлого отжига рулонов ленты

Печи с муфелированием пламени. Светлый отжиг металла также осуществляют в колпаковых печах, в которых топливо сгорает внутри радиантных труб.

Печи с радиантными трубами применяют для светлого отжига металла в рулонах (рис. 144). Эти печи отапливают газообразным топливом с теплотой сгорания не ниже 7500 кДж/м^3. Температура нагрева металла 650—750 °С. Масса садки зависит от размеров печи и колеблется в пределах 20—80 т. Удельная производительность печей составляет 150—250 кг/(м^2·ч) при удельном расходе тепла 1050—1400 кДж/кг.

Для предотвращения окисления металла в печах применяют внутренний металлический муфель. Этот муфель позволяет осуществить циркуляцию защитной атмосферы.

Протяжные печи

Выше было отмечено, что отжиг рулонов в колпаковых печах широко распространен. Однако этому методу прису-

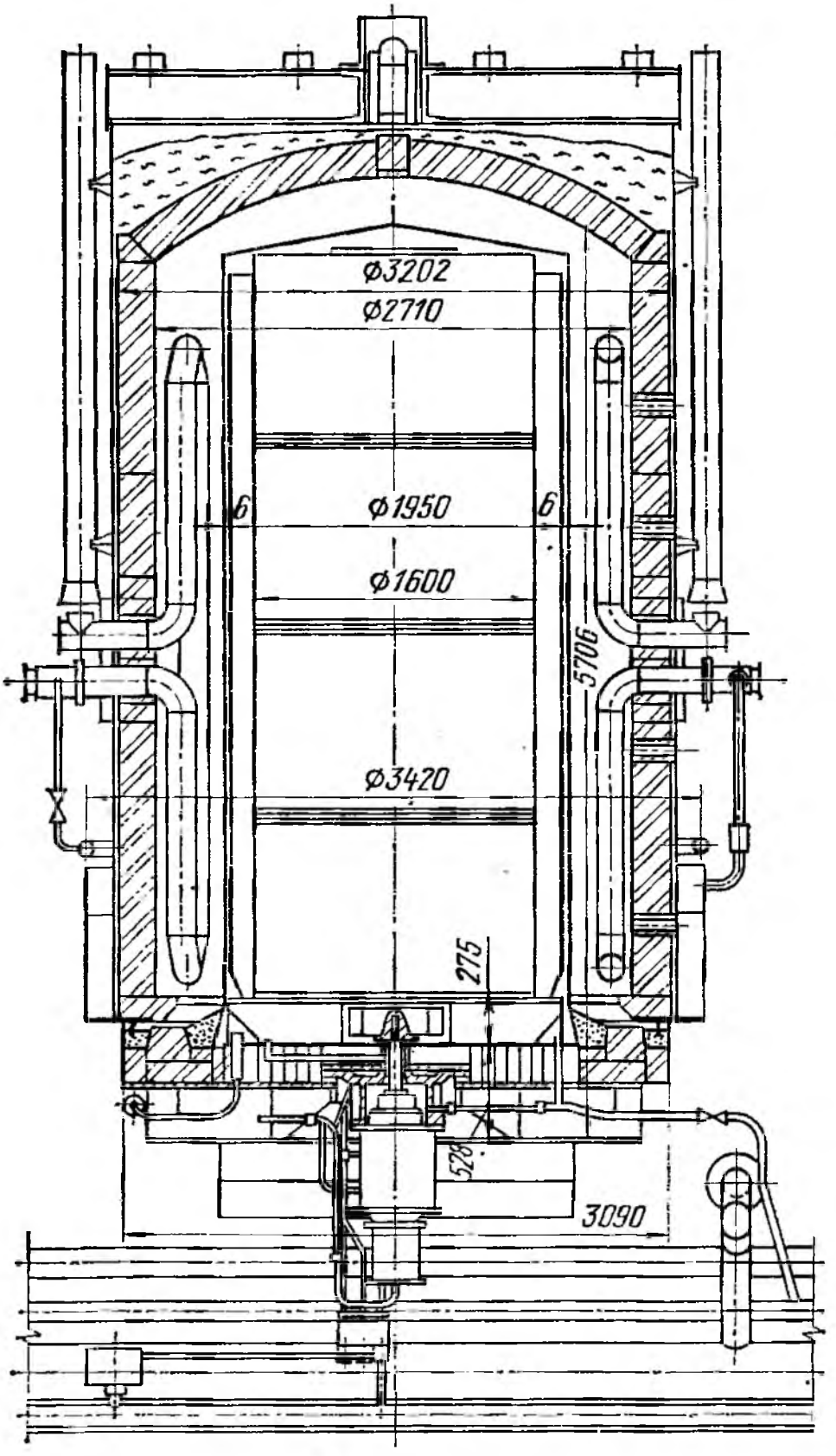


Рис. 144. Одностопная печь с вертикальчыми радиационными трубами

щи следующие недостатки: а) цикл отжига длится очень долго — до нескольких дней; б) равномерный нагрев металла не обеспечивается; в) невозможно полностью механизировать и автоматизировать загрузку, транспортирование и уборку рулонов; г) требуются большие производственные площади.

Поэтому все шире применяют непрерывные линии с протяжными печами, которые используют для обезуглероживающего отжига электротехнической стали, светлого отжига жести, светлой закалки нержавеющей полосы, цинкования тонкого листа и лужения жести. Все шире начинают применять протяжные печи для отжига тонкого автомобильного листа.

Протяжные печи могут быть разделены на две большие группы: горизонтальные и вертикальные (башенные). Длина ленты в горизонтальных печах допускается не более 200 м, а скорость движения до 2 м/с, так как при больших значениях трудно обеспечить центрирование при движении ленты через печь. Производительность горизонтальных печей невелика и их обычно применяют при небольшом объеме производства. В вертикальных печах условиях центрирования благоприятнее, поэтому длина ленты в таких печах может достигать 1 км, а скорость движения 10 м/с. Такие печи распространены шире, так как при весьма высокой производительности они занимают небольшую производственную площадь. Подобные печи обычно состоят из трех частей: входной, печной и выходной (рис. 145).

Входная и выходная секции отделены от печной секции петлевыми башнями, в которых накапливается запас полосы. Во входной и выходной секциях скорости синхронизируются со скоростями движения полосы в рабочей (печной) секции. Для этого устраивают специальные петлевые ямы, в которых положение свободно висящей ленты контролируется фотоэлементами. Скорость движения полосы во всех агрегатах задают в зависимости от скорости нагрева и охлаждения полосы.

На входном участке происходит сварка рулонов между собой, а также обезжиривание и очистка полосы при помощи специальных щелочных ванн; на выходном участке — разрезка полосы после намотки рулона требуемого размера.

Печная секция состоит из четырех камер: нагрева, выдержки, замедленного и быстрого охлаждения. В камере нагрева металл нагревается до конечной температуры 700—730 °С. Эту камеру в топливных печах обычно отапливают коксовым или природным газом, сжигаемым в ра-

диантных трубах. Светлый отжиг полосы проводят чаще всего в азотной защитной атмосфере (96 % N_2 и 4 % H_2). Чтобы дымовые газы не попадали в печь, радиантные трубы работают под разрежением. Разность между температурой в печи и конечной температурой металла около 200 °С; при этом время нагрева полосы толщиной 0,25 мм составляет 15—20 с. Предельная температура печи 1000 °С,

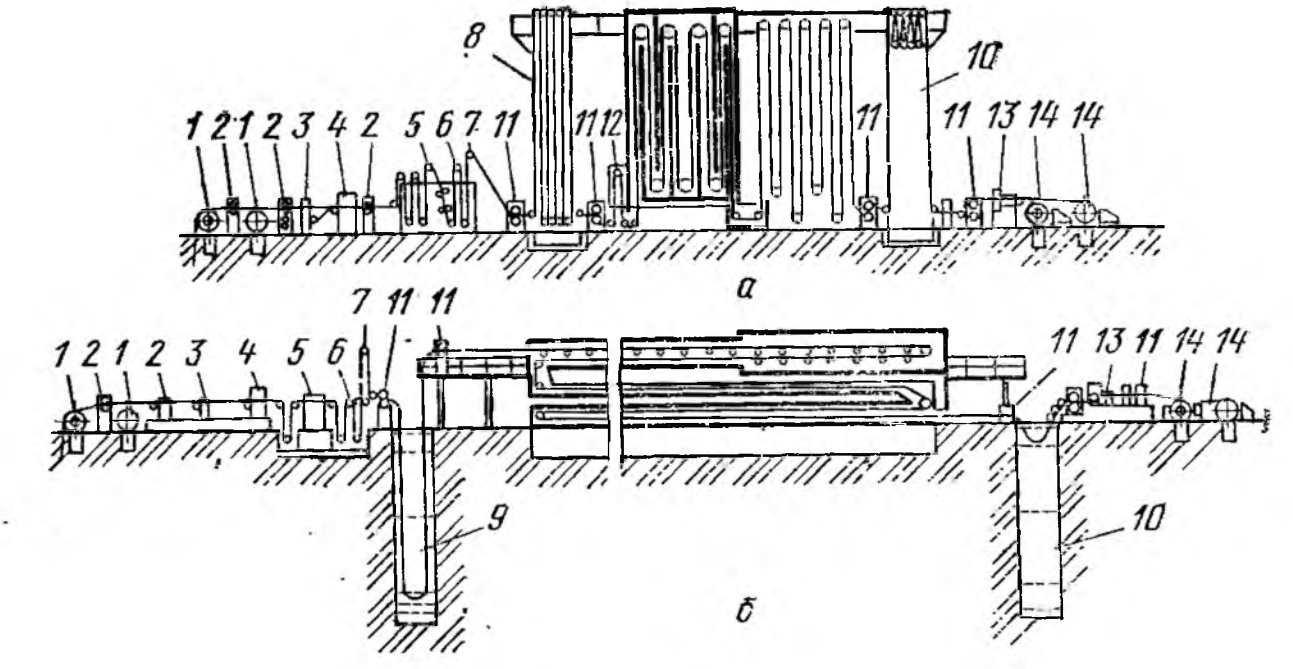


Рис. 145. Схема линий с протяжными печами:

а — линия для отжига жести с вертикальной печью; *б* — то же, с многоэтажной горизонтальной печью; *1* — разматыватель рулонов; *2* — тянущие ролики; *3* — ножницы; *4* — машины для сварки концов; *5* — устройства для очистки ленты; *6* — моющее устройство; *7* — устройство для сушки ленты; *8* — петлевая башня; *9* — петлевая яма; *10* — вторая петлевая башня или яма; *11* — устройства для натяжения ленты; *12* — регулятор натяжения ленты; *13* — ножницы; *14* — сматыватели

выше которой возможен перегрев и разрыв полосы. Камера нагрева с радиантными трубами приведена на рис. 146. Камеры выдержки конструктивно весьма схожи с камерой нагрева с той лишь разницей, что в камеру выдержки подается такое количество тепла, которого было бы достаточно для покрытия тепловых потерь. Кроме радиационных труб, камеры нагрева и выдержки иногда оборудованы электронагревателями.

В камере замедленного охлаждения температура металла падает с 700—780 до 480 °С в течение 25 с. Камера оборудована воздухоохлаждаемыми трубами и электронагревателями. Скорость охлаждения регулируют изменением расхода воздуха. Электронагреватели включают при разогревах и остановках печи.

В камере быстрого охлаждения металл охлаждается до заданной температуры. Применяют две системы высоко-

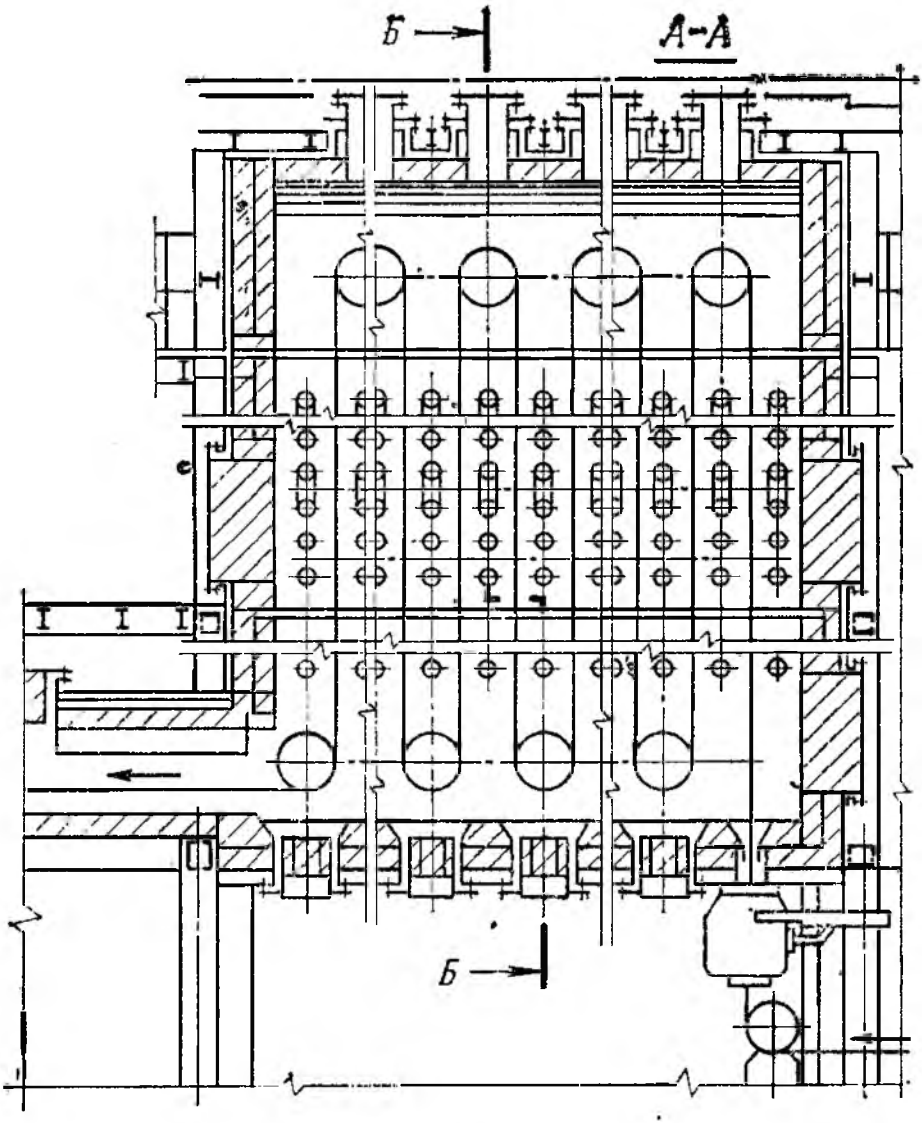
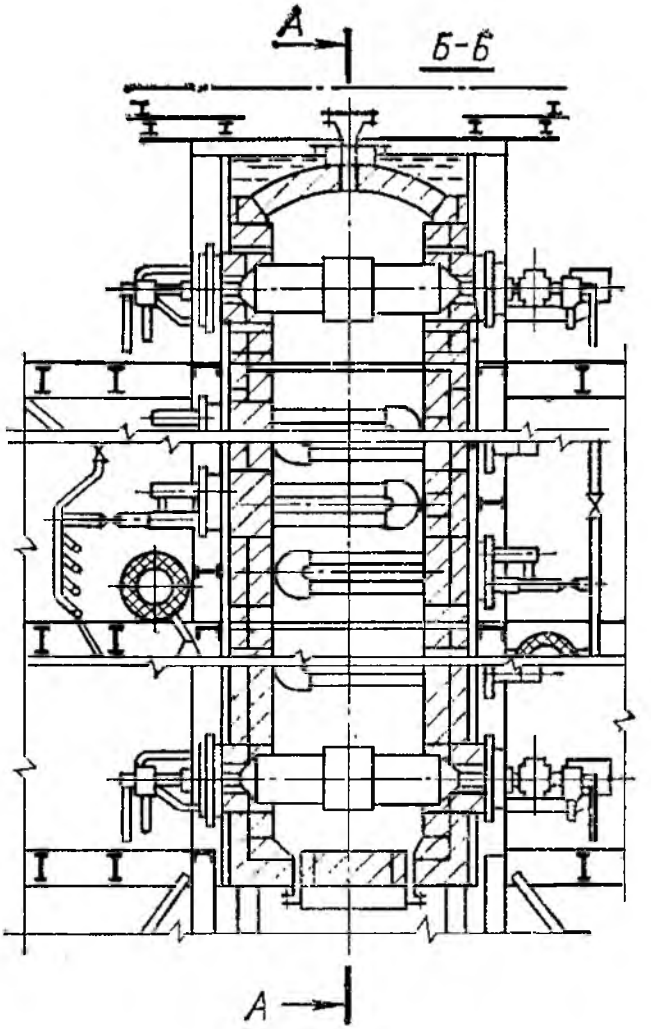


Рис. 146. Камера нагрева башенной печи


А
Б-Б
А

скоростного охлаждения: первой предусмотрена установка в камере большого числа водяных теплообменников со встроенными вентиляторами для обеспечения интенсивного движения охлажденного защитного газа. По второй системе охлажденный в водяных холодильниках защитный газ подается вентиляторами в вертикальные проходы и через щелевые отверстия с большой скоростью обдувает с двух сторон движущуюся полосу. Такое струйное охлаждение резко уменьшает время операции и позволяет сократить длину камеры.

Непрерывные агрегаты для светлого отжига жести с вертикальными башенными печами распространены достаточно широко. Обычно обработке подвергают полосу толщиной 0,2—0,3 мм, движущуюся со скоростью 150—600 м/мин. Производительность агрегатов колеблется в пределах 25—60 т/ч. В камере нагрева обычно предусмотрено 6—12 проходов, вмещающих 100—200 м полосы, камера выдержки вмещает 120—170 м полосы, камеры медленного охлаждения около 100—130 м, общая длина полосы составляет 600—1200 м.

При отоплении камеры нагрева коксовым газом на 1 т отжигаемой полосы расходуется около 40 $м^3$ газа и 9 кВт·ч электроэнергии. Расход защитной азотной атмосферы при производительности агрегата 55 т/ч составляет 700—900 $м^3$/ч. В печах поддерживают давление 50—150 $Н/м^3$. При использовании башенной печи с защитной атмосферой для светлой закалки полосы из нержавеющей стали толщиной от 0,08 до 0,3 мм полосу нагревают до 1100—1150 °С, температуру в печи поддерживают на 200—250 °С выше конечной температуры металла. Такие печи работают со скоростью движения полосы 20—30 м/мин и обеспечивают производительность до 10 т/ч.

Протяжными печами оборудуются непрерывные линии для горячего цинкования ленты и для электролитического лужения жести.

Глава IX ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЕЧИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

§ 1. Характеристика процесса электрического нагрева

Особенности электрического нагрева

Электрические печи широко применяются в металлургии. Они используются для расплавления металлов и сплавов, восстановления металлов из руд, нагрева различных изделий и заготовок.

Электрические печи позволяют в ряде случаев осуществить процессы, которые невозможно было бы провести в топливных печах, не говоря о многих других существенных достоинствах электрического нагрева. Так, получению качественных сталей в электропечах способствует возможность более точного регулирования температуры в рабочем пространстве, что позволяет обеспечить требуемую технологию плавки и снизить угар дорогих легирующих элементов. Очень важную роль играет здесь также возможность создания малоокислительной или слабовосстановительной атмосферы. Легированные стали некоторых марок вообще можно получать исключительно в электрических печах.

Ферросплавы, широко применяющиеся в современном сталеплавильном производстве, имеют высокую температуру плавления и их производство наиболее эффективно осуществляется в мощных дуговых печах, где концентрируется выделение большого количества тепла в сравнительно малом объеме. Плавка высокореакционных и тугоплавких металлов (титан, молибден, вольфрам и др.) и сплавов на их основе ведется исключительно в электрических дуговых вакуумных печах или в электронно-лучевых установках в глубоком вакууме.

При использовании электрических печей для нагрева деталей и заготовок существенно облегчается регулирование теплового режима, заметно возрастает точность соблюдения заданной температуры в печи и создаются возможности равномерного подвода тепла к поверхности всех изделий, находящихся в печной камере. Кроме того, электронагрев позволяет осуществить при необходимости местный нагрев отдельных участков изделия, а также нагрев поверхности (для поверхностной закалки). Рабочая камера электрической печи может быть сравнительно легко герметизирована, что позволяет при необходимости при-

менять нагрев в защитных или специальных атмосферах или в вакууме.

Отсутствие отходящих дымовых газов значительно повышает тепловую эффективность работы электрических печей и упрощает их конструкцию по сравнению с топливными. Чистота и хорошие условия труда в цехах, оборудованных электрическими печами, также являются существенными преимуществами электрического нагрева.

Все эти достоинства предопределяют большую роль и растущее распространение электротермических процессов в производстве и обработке металлов и сплавов.

Однако электронагреву свойственны и определенные недостатки, сдерживающие его применение: стоимость единицы тепла, полученной за счет электроэнергии, значительно выше стоимости единицы тепла, генерируемой в рабочем пространстве топливных печей за счет сжигания топлива, что влечет за собой более высокие эксплуатационные расходы; капитальные затраты на сооружение электрических печей также обычно заметно больше в связи с их сравнительной сложностью и использованием более дорогих материалов, надежность и долговечность электрических печей ниже, а их эксплуатация находится в жесткой зависимости от обеспеченности предприятия электроэнергией и работы энергосистемы.

Таким образом, все отмеченные раньше несомненные достоинства электрических печей не означают, что электрификация термических процессов в черной металлургии является целесообразной абсолютно во всех случаях. Во многих процессах, когда применение электрической энергии не вызывается технологической или теплотехнической необходимостью, технико-экономические показатели оказываются лучшими при использовании топливных печей. Следовательно, использование электротермических установок должно быть технически и экономически обоснованно, а также учтены народнохозяйственные соображения (месторасположение предприятия, сравнительная доступность различных энергетических ресурсов), потребность в металлах или сплавах, получаемых только в электрических печах, качество продукции и т. д.).

Методы генерации тепла за счет электрической энергии

В основе практических методов получения тепла за счет электроэнергии лежат следующие основные принципы, которые в различных вариантах используются в промышленных электрических печах:

1) теплогенерация в рабочем теле при приложении к нему разности потенциалов;

2) теплогенерация при помещении рабочего тела в переменное электромагнитное поле;

3) теплогенерация в поверхностном слое рабочего тела при ударе о него ускоренного в вакууме потока электронов.

Рабочее тело может быть твердым, жидким или газообразным. Первый принцип лежит в основе работы печей сопротивления (твердое рабочее тело), печей электрошлакового переплава (жидкое рабочее тело), дуговых печей и дуговых плазматронов (газообразное рабочее тело). Второй принцип используется в качестве основы работы индукционных печей. Третий принцип реализуется в электроннолучевых печах.

Теплогенерация в рабочем теле при приложении к нему разности потенциалов

Обязательным условием этого вида генерации тепла является наличие в рабочем теле свободных зарядов (ионов и электронов), т. е. электропроводность рабочего тела. Приложение разности потенциалов вызывает направленное движение свободных зарядов, т. е. возникает электрический ток и при его протекании по проводнику, имеющему сопротивление, выделяется тепло. Согласно закону Джоуля — Ленца, количество выделяющегося в проводнике тепла

$$Q = UIt = I^2 Rt, \qquad (107)$$

где U — приложенная разность потенциалов, В;

I — сила тока, А;

R — сопротивление рабочего тела, Ом;

t — время, с.

Получение тепла в твердом проводнике находит широкое применение в печах сопротивления прямого (контактного) и косвенного действия. В печах прямого действия рабочим телом служит нагреваемое изделие, включаемое в электрическую цепь, тепло выделяется непосредственно в этом изделии. В печах косвенного нагрева в качестве рабочего тела используются нагревательные элементы, выполненные из специальных материалов. Передача тепла от этих элементов к поверхности нагреваемого материала осуществляется излучением и конвекцией.

В печах электрошлакового переплава тепло выделяется при протекании электрического тока через слой жидкого шлака и передается от него теплопроводностью к поверх-

ности оплавляемого электрода. Эти установки могут быть, таким образом, отнесены к печам сопротивления косвенного действия.

Получение тепла в газообразном теле при приложении к нему разности потенциалов осложнено тем, что в обычных условиях газ не является проводником. Однако при определенных обстоятельствах в газе могут появиться отрицательно и положительно заряженные ионы и свободные электроны. Такой газ становится электропроводным, а само это явление называется ионизацией. Ионизация может вызываться различными причинами, в том числе и нагревом газа до высокой температуры, когда тепловое движение частиц в нем становится настолько интенсивным, что столкновение атомов и молекул приводит к возникновению заряженных частиц. Движение этих частиц под действием приложенной разности потенциалов обеспечивает протекание электрического тока через газ, т. е. возникает газовый разряд. Широко распространенной формой газового разряда является электрическая дуга.

Электрической дугой называют конечную устойчивую форму газового разряда между двумя электродами (катодом и анодом) через разделяющий их газовый промежуток. Источником свободных электронов является катод, при нагреве которого скорость теплового движения электронов в твердом материале может стать столь большой, что их кинетическая энергия превысит потенциальный барьер на границе твердое тело — газ. Тогда электроны покидают катод, т. е. происходит термоэлектронная эмиссия. Электроны, эмитированные катодом, разгоняются в межэлектродном промежутке и вызывают ионизацию молекул газа или пара. Средняя между электродами часть, называемая столбом дуги, представляет собой ярко светящуюся смесь электронов, ионов и нейтральных атомов и молекул, т. е. плазму. В такой плазме температура всех элементарных частиц почти одинакова. Установлено, что температура столба дуги при атмосферном давлении колеблется от 3200 до 10000 К, а интенсивность излучения достигает 8000—10000 кВт/м^2. Длина столба дуги возрастает с увеличением напряжения питающего ее тока и зависит также от материала электродов.

Промышленные сталеплавильные печи работают обычно на переменном токе. Поэтому полярность электродов меняется в соответствии с частотой тока; один и тот же электрод является попеременно катодом и анодом. Так как значение напряжения, изменяясь, проходит через нуль, то

дуга должна гаснуть в этот момент. Для поддержания непрерывного горения дуги в цепь вводят индуктивное сопротивление.

В вакуумных дуговых печах горение дуги происходит в разреженных парах переплавляемого металла. Эти пары, ионизируясь, также становятся проводником электрического тока, что делает возможным дуговой разряд в вакууме.

Плазму, возникшую при дуговом разряде в газах, можно заставить двигаться в определенном направлении, т. е. создать поток плазмы. В этом потоке имеются положительно и отрицательно заряженные частицы. Их соотношение таково, что общий заряд газового объема равен нулю. Плазма подчиняется газовым законам и в то же время обладает большой электропроводностью. Плазма имеет также магнитные свойства вследствие насыщенности заряженными частицами.

Для создания потока плазмы с целью использования в металлургических печах применяются специальные устройства, получившие название плазматронов. В них используется обычно дуга постоянного тока, горящая между нерасходуемыми (водоохлаждаемыми) электродами. Поток газа в плазматроне подается в дуговой промежуток, ионизируется и образующаяся плазма подвергается принудительному сжатию охлаждаемыми стенками или магнитным полем. Сжатие столба дуги увеличивает плотность тока и повышает концентрацию энергии. Это вызывает резкий рост температуры потока плазмы по сравнению с плазмой обычной дуги, свободно горящей между электродами, а скорость истечения газа в зоне наибольшего сжатия может достигать скорости звука. В результате очень существенно возрастает интенсивность теплоотдачи от потока плазмы к нагреваемой поверхности.

Для получения потока плазмы в промышленности используют аргон, гелий, водород и азот. Водород и азот — самые дешевые газы и обладают достаточно высокой удельной теплоемкостью, но для металлургических процессов с технологической точки зрения они часто менее пригодны, чем аргон и гелий. Обычно используют аргон, иногда добавляя к нему 10—15 % водорода.

Теплогенерация в проводнике, помещенном в переменное электромагнитное поле

При помещении проводника в переменное электромагнитное поле в нем наводятся (индуктируются) вихревые

токи. Их протекание по проводнику вызывает выделение тепла. Этот вид теплогенерации получил название индукционного нагрева. Выделяющееся в проводнике количество тепла пропорционально квадрату плотности тока в соответствии с законом Джоуля — Ленца.

В процессе индукционного нагрева вихревые токи под действием магнитного поля оттесняются к поверхности проводника и плотность тока на его поверхности оказывается выше, чем в середине. Это явление называется поверхностным эффектом. Глубина проникновения магнитного потока в металл, а следовательно, практическая толщина нагреваемого слоя приближенно определяется формулой Штейнметца:

$$\Delta = 503\sqrt{\rho/\mu f}, \text{ м}. \qquad (108)$$

Таким образом, глубина проникновения Δ возрастает с увеличением удельного электрического сопротивления ρ (Ом·м), уменьшается с увеличением частоты f (Гц) и относительной магнитной проницаемости материала μ. Следовательно, при повышении частоты (до 1000 Гц и более) можно получить тонкий нагретый слой для поверхностной термической обработки, широко применяющейся в промышленности; используя ток промышленной частоты (50 Гц), можно обеспечить сквозной прогрев изделий.

Существуют два пути увеличения количества тепла, выделяемого в проводнике при индукционном нагреве. Первый путь — это уменьшение сопротивления магнитному потоку на тех участках пути, где он не проходит по нагреваемому материалу, что достигается применением металлических магнитопроводов (сердечников). Второй путь — увеличение частоты с целью уменьшения магнитного потока рассеяния. Это достигается при питании индуктора от источника тока высокой частоты.

Эти два пути и предопределили создание индукционных печей со стальным сердечником, работающих на токе промышленной частоты, и печей без сердечника, питаемых преимущественно от источников тока повышенной и высокой частоты. Установлено, однако, что при увеличении емкости печей без сердечника возможна их достаточно экономичная работа на токе промышленной частоты.

При индукционном нагреве стали течение процесса осложняется тем, что ее электротехнические параметры претерпевают значительные изменения в процессе нагрева. В результате возрастания удельного сопротивления и уменьшения магнитной проницаемости по ходу нагрева изменя-

ется глубина проникновения тока. При достижении точки Кюри магнитная проницаемость уменьшается в 50—100 раз и становится равной единице. На этой стадии нагрева происходит резкое увеличение глубины проникновения и общее уменьшение поглощаемой мощности в нагреваемом теле.

Таким образом, когда температура по всему сечению нагреваемого тела достигает температуры магнитных превращений (или превышает ее), неравномерность нагрева быстро сглаживается и происходит сквозной прогрев тела.

Теплогенерация при ударе ускоренного потока электронов о поверхность рабочего тела

Теплогенерация с помощью потока электронов, выделяемых с поверхности катода, основана на том, что этот поток во всех случаях движется к аноду. Если между помещенными в вакуум катодом и анодом приложить большую разность потенциалов (порядка нескольких десятков киловольт), то электроны могут приобрести значительную скорость. При их столкновении с поверхностью твердого или жидкого тела кинетическая энергия электронов в значительной мере превращается в тепло. Выделенная мощность зависит от плотности потока электронов и разности потенциалов между катодом и анодом. Кинетическая энергия электрона K пропорциональна его заряду $q=1{,}6\cdot10^{-19}$ Кл и величине ускоряющего напряжения U, В: $K=qU$ Дж. Нормальная работа электротермических установок, основанных на этом принципе, возможна только при поддержании в рабочей камере глубокого вакуума (порядка 10^{-2}—10^{-4} Па). Это необходимо для того, чтобы исключить соударение потока электронов с молекулами газа.

Классификация электрических печей

В основу классификации электрических печей положены признаки, оказывающие наибольшее влияние на их конструкцию и работу. К этим признакам в первую очередь относится способ генерации тепла в печи из электроэнергии. Исходя из этого, печи разделяют на следующие группы.

Печи с теплогенерацией в газообразном (или парообразном) рабочем теле при приложении к нему разности потенциалов

К этим установкам относятся все дуговые и плазменные печи. Различают дуговые печи прямого и косвенного действия.

Дуговой разряд в печах прямого действия (с зависимой дугой) протекает между электродами и нагреваемым металлом. Благодаря тому, что электрическая дуга приближается здесь к поверхности металла, эти печи позволяют развить высокую температуру в зоне технологического процесса. Они используются обычно для выплавки металлов и сплавов с высокой температурой плавления (ферросплавы, сталь).

К печам с зависимой дугой относятся и вакуумные дуговые печи (ВДП), широко используемые для рафинирующего переплава жаропрочных сплавов на железной и никелевой основе, шарикоподшипниковых, нержавеющих, инструментальных и высокопрочных конструктивных сталей. Наибольшее распространение для этих целей получили ВДП с так называемым расходуемым электродом, выполненным из подлежащего переплаву материала. Дуга в таких печах горит между концом электрода и поверхностью лунки, находящейся в верхней части кристаллизующегося слитка. По мере плавки весь электрод расходуется и переплавляется в слиток.

В печах косвенного действия (с независимой дугой) разряд протекает между двумя электродами, расположенными на некотором расстоянии от металла. Печи такого типа используются для плавления чугуна и цветных металлов.

Во всех дуговых печах преобладает теплопередача излучением к нагреваемому металлу.

В плазменных печах высокая температура и большая скорость потока плазмы, вытекающего из дугового плазматрона, обеспечивает чрезвычайно интенсивный перенос тепла к металлу путем излучения и конвекции. Эти печи позволяют развить высокую температуру в рабочем пространстве без опасности загрязнения выплавляемого металла газами и материалом электрода (используемых в обычных дуговых печах). Поэтому такие печи начинают получать применение для производства высококачественных сталей, несмотря на их более сложную конструкцию по сравнению с обычными дуговыми печами.

Печи с теплогенерацией в твердом (или жидком) электропроводном рабочем теле при приложении к нему разности потенциалов

Эти установки известны как печи сопротивления. Различают печи сопротивления прямого и косвенного действия.

Если проводником служит нагреваемое изделие, то такая печь называется печью сопротивления прямого действия

и в ней отсутствует внешний (по отношению к металлу) теплообмен: тепло выделяется внутри нагреваемого тела.

Если проводником, включенным в электрическую цепь, является специальный нагревательный элемент, от которого тепло передается к поверхности нагреваемого тела, то это группа установок представляет собой печи сопротивления косвенного действия. В зависимости от уровня температуры в рабочем пространстве этих печей преобладает передача тепла либо конвекцией, либо излучением.

Печи сопротивления прямого и косвенного действия нашли применение в качестве нагревательных устройств в прокатных и термических цехах.

Плавильными устройствами, основанными на принципе печи сопротивления косвенного действия, являются установки электрошлакового переплава (ЭШП) Переплавляемый металл в виде штанги (расходуемого электрода) опускают в шлаковую ванну, нагреваемую пропускаемым через нее электрическим током, подводимым через этот электрод. Конец электрода оплавляется при нагреве от жидкого шлака; капли металла проходят через химически активный шлаковый расплав, подвергаясь рафинированию; металл затвердевает в кристаллизаторе, формируя слиток. Эти установки получили широкое распространение для переплава качественных сталей, в том числе шарикоподшипниковых, инструментальных и других.

Печи с теплогенерацией в проводнике, помещенном в переменное электромагнитное поле

Как отмечалось выше, в этом случае в проводнике индуктируется электрический ток и такие печи получили название индукционных. Они применяются для плавления черных и цветных металлов и сплавов, нагрева с целью термической обработки стальных деталей. Эти печи используются и для нагрева металла перед прокаткой и ковкой.

В зависимости от того, снабжена ли индукционная установка металлическим магнитопроводом (сердечником), различают печи с сердечником и без него. Индукционные печи легко помещаются в вакуумную камеру и это обусловливает широкое применение индукционных вакуумных печей для выплавки качественных сталей.

В любых индукционных печах тепло выделяется внутри самого нагреваемого или расплавляемого металла и поэтому внешний теплообмен в них практически отсутствует.

Печи с теплогенерацией при ударе ускоренного потока электронов о поверхность нагреваемого тела

Выше было показано, что в этих установках электрическая энергия превращается в тепло за счет столкновения ускоренного в вакууме потока электронов с поверхностью металла. Такие установки применяют для вакуумного переплава особо чистых металлов и сплавов, так как в этих печах полностью отсутствуют источники загрязнения металла (электроды или футеровка), свойственные другим электроплавильным устройствам.

В промышленных установках электронно-лучевого нагрева анод обычно выполняется в виде диафрагмы с отверстием. Предусматривается дополнительно управляющий электрод для собирания эмиттируемых электронов в узкий пучок, который должен пройти через отверстие небольшого диаметра в диафрагме — аноде. На управляющий электрод подается некоторый потенциал относительно катода. За анодом располагаются фокусирующая и отклоняющая системы в виде электромагнитных линз, предназначенных соответственно для собирания электронов, прошедших анод, в узкий пучок и направления его в требуемую точку поверхности нагреваемого тела. Такое устройство для получения луча электронов, сообщения им больших скоростей и собирания потока электронов в пучок с выведением его в рабочее пространство, где электрическое поле отсутствует, получило название электронной пушки. Она является основой установок электроннолучевого нагрева.

К другим классификационным признакам относят режим работы электрических печей. Различают печи периодического действия (камерные) и печи непрерывного (методического) действия.

В зависимости от осуществляемого технологического процесса электрические печи могут быть также разделены на плавильные и нагревательные.

Основные параметры и показатели работы электрических печей

Общим для конструкций всех электрических печей является то, что они состоят из двух основных частей: собственно печи, т. е. рабочей камеры, где происходит технологический процесс, и электрического оборудования, включающего тот или иной преобразователь электроэнергии (трансформатор, высокочастотный генератор), а также пусковые, распреде-

лительные, защитные и сигнальные устройства. Для вакуумных печей свойственна еще одна (третья) важная часть конструкции: вакуумное оборудование, с помощью которого создается и поддерживается необходимое разрежение в рабочей камере.

Помимо этого, современные электрические печи оборудованы комплексом контрольно-измерительных и регулирующих приборов, предназначенных для измерения и регулирования парамстров технологического процесса (температуры, давления и т. д.) в рабочей камере. При работе электрической печи имеют место потери энергии, обусловленные как потерями тепла из рабочей камеры, так и потерями электрической энергии в системе питания печи, токоподводах и устройствах для генерации тепла. Все эти причины приводят к снижению общего КПД электрической печи, который определяют по формуле

$$\eta_{общ} = \eta_{эл}\,\eta_{т}, \tag{109}$$

где $\eta_{эл}$ и $\eta_{т}$ — электрический и тепловой к. п. д.

Электрический к. п. д. может быть выражен так:

$$\eta_{эл} = (Q_{с} - Q_{эл})/Q_{с}, \tag{110}$$

где $Q_{с}$ — количество электрической энергии, полученное установкой из сети за данный промежуток времени;

$Q_{эл}$ — электрические потери за тот же промежуток времени (в токоподводах, трансформаторе и т. п.).

Тепловой к. п. д.:

$$\eta_{т} = Q_{пол}/(Q_{с} - Q_{эл} + Q_{экз}) = (Q_{с} - Q_{эл} + Q_{экз} - Q_{т})/(Q_{с} - Q_{эл} + Q_{экз}), \tag{111}$$

где $Q_{пол}$ — количество полезно расходуемого в печи тепла на проведение технологического процесса за определенный период времени;

$Q_{экз}$ — количество тепла, освобождающегося при протекании в печи экзотермических реакций за тот же период времени;

$Q_{т}$ — тепловые потери печи за тот же период времени.

Величиной $Q_{экз}$ в электрических нагревательных печах можно пренебречь. Тогда общий к. п. д. установки

$$\eta_{общ} = \eta_{эл}\,\eta_{т} = Q_{пол}/Q_{с}. \tag{112}$$

Таким образом, чем меньше потери тепла из рабочей камеры и электрические потери при данной мощности печи, тем выше ее к. п. д.

Работа любой электрической печи и степень совершенства ее конструкции характеризуются, помимо к. п. д., производительностью и удельным расходом электроэнергии, т. е. расходом энергии на единицу обрабатываемого металла. Эти характеристики связаны с мощностью печи, ее геометрическими размерами, полезной емкостью рабочей камеры и другими параметрами. Производительность и размеры рабочей камеры связаны между собой через время осуществления технологического процесса, т. е. время нагрева или расплавления металла. Очевидно, что чем больше подводимая к печи мощность, тем меньше время нагрева и, следовательно, выше производительность при данной массе садки (емкости печи).

Производительность печи при данной мощности возрастает при сокращении неизбежных периодов простоя (загрузка и выгрузка изделий) и технологической выдержки. Установлено, что влияние подводимой к печи мощности сказывается на ее производительности наиболее существенно в период нагрева, так как в моменты простоя и технологической выдержки энергии расходуется только на покрытие тепловых потерь из печной камеры.

Следовательно, для уменьшения удельного расхода электроэнергии необходимо стремиться к увеличению электрического и теплового к. п. д., т. е. к уменьшению потерь тепла в период нагрева и выдержки. Общий технико-экономический анализ показывает, что при конструировании электрических печей необходимо стремиться так сократить тепловые потери, чтобы соблюдалось условие $\eta_т \geqslant 0{,}8$.

Известно, что тепловые потери пропорциональны теплоотдающей поверхности кожуха печи, поэтому с увеличением размеров рабочей камеры, когда соотношение между теплоотдающей наружной поверхностью и массой садки уменьшается, снижается и удельный расход электроэнергии. Однако при определении размеров электрической печи следует учитывать ее мощность, так как при взаимно противоположном изменении этих двух показателей можно получить одну и ту же производительность. Поэтому в каждом случае необходимо выполнение технико-экономического анализа с целью определения мощности и емкости, которые обеспечивают заданную производительность печи и которым соответствуют наименьшие суммарные расходы на единицу продукции.

§ 2. Дуговые и плазменные печи

Дуговые печи для производства ферросплавов

Возможность создания и концентрации зоны высоких температур при контролируемом составе атмосферы в полной мере используется в печах для производства ферросплавов, обладающих высокой температурой плавления. Этот фактор обусловливает применение в ферросплавной промышленности дуговых печей прямого действия, в которых зона максимальных температур дуги находится в непосредственной близости к шихте. Дуговые ферросплавные печи бывают восстановительными и рафинировочными.

В восстановительных печах, как правило, осуществляется непрерывный процесс с использованием углерода в качестве восстановителя. Электроды в этих печах постоянно погружены в твердую шихту, которую добавляют в печь по мере ее расплавления, а получаемый сплав и шлак периодически выпускаются. В этих печах выплавляют ферросилиций, углеродистые феррохром и ферромарганец, силикокальций, силикохром, силикомарганец. Поскольку процессы восстановления в этих печах являются эндотермическими, они требуют подвода большой мощности и оснащаются трансформаторами мощностью до 60 МВА. Удельный расход электроэнергии составляет 11 — 36 МДж/кг (3—10 кВт·ч/кг).

В рафинировочных печах периодического действия осуществляют полное расплавление всей загружаемой шихты вплоть до получения полностью жидкой ванны на ее поду. Только в начале плавки электроды погружены в шихту, а затем дуги горят между электродами и поверхностью жидкой ванны. По окончании плавки выпускают из печи весь шлак и металл. Процесс в рафинировочных печах также имеет восстановительный характер, но в качестве восстановителя используются сплавы, содержащие кремний или алюминий. В таких печах выплавляют безуглеродистые и среднеуглеродистые феррохром, ферромарганец, феррованадий, ферровольфрам и другие сплавы. Экзотермический характер восстановительных процессов при использовании для этой цели алюминия и кремния обусловливает возможность подвода сравнительно небольшой мощности к этим печам и они обычно имеют трансформаторы мощностью до 6 МВА. Удельный расход электроэнергии в рафинировочных печах существенно ниже, чем в восстановительных.

В восстановительных ферросплавных печах применяют

футеровку из углеродистых огнеупоров. При рафинирующей плавке малоуглеродистых ферросплавов требуется исключить контакт расплава с углеродистой кладкой. В этих случаях применяют печи с футеровкой и набивкой сравнительно тонкого рабочего слоя из магнезита, укладываемого на углеродистые блоки.

При производстве ферросплавов с очень высокой температурой плавления (например, ферровольфрама) получаемый материал удается расплавить и поддерживать в жидком состоянии без существенного перегрева только в небольшой зоне наиболее интенсивной теплогенерации дуги. Выпустить этот расплав из печи не удастся и тогда процесс ведут вплоть до заполнения всей рабочей камеры наплавляемым слой за слоем продуктом; после этого печь останавливают, остужают и извлекают из нее затвердевший блок ферросплава. Такой периодический процесс значительно уступает процессам плавки, ведущимся с выпуском готового продукта, по всем технико-экономическим показателям, и его применяют только в случае невозможности осуществления выпуска расплавленного ферросплава из печи.

При выплавке ферросплавов обычно выделяется значительное количество запыленных газов, состоящих преимущественно из CO и имеющих теплоту сгорания примерно 11 750 кДж/м^3. Эти газы необходимо удалять, подвергая очистке от пыли и использовать в качестве топлива. Для этой цели применяют закрытые печи.

Однако иногда используются и печи с открытым верхом, через который загружается большое количество шихты, а уходящие газы дожигаются на колошнике до CO_2. Условия работы электрододержателей и токоподводов, омываемых раскаленными уходящими газами, на этих печах очень тяжелы, а энергетический потенциал дожигаемого на колошнике оксида углерода, безвозвратно теряется. Системы газоочистки дуговых ферросплавных печей описаны в гл. VII, § 4.

Для того, чтобы уяснить принцип устройства и основные конструктивные элементы восстановительной дуговой ферросплавной печи непрерывного действия, рассмотрим типовую закрытую печь типа РКЗ—16,5 (мощностью 16,5 МВА), показанную на рис. 147. Печь имеет круглую рабочую камеру (ванну), футеровка которой выложена в сварном кожухе из листовой стали 10—15 мм, усиленном ребрами жесткости. Подовый лист кожуха уложен на двутавровые балки, опирающиеся на круглую (в плане) железобетонную опорную плиту. Плита может вращаться вокруг своей оси

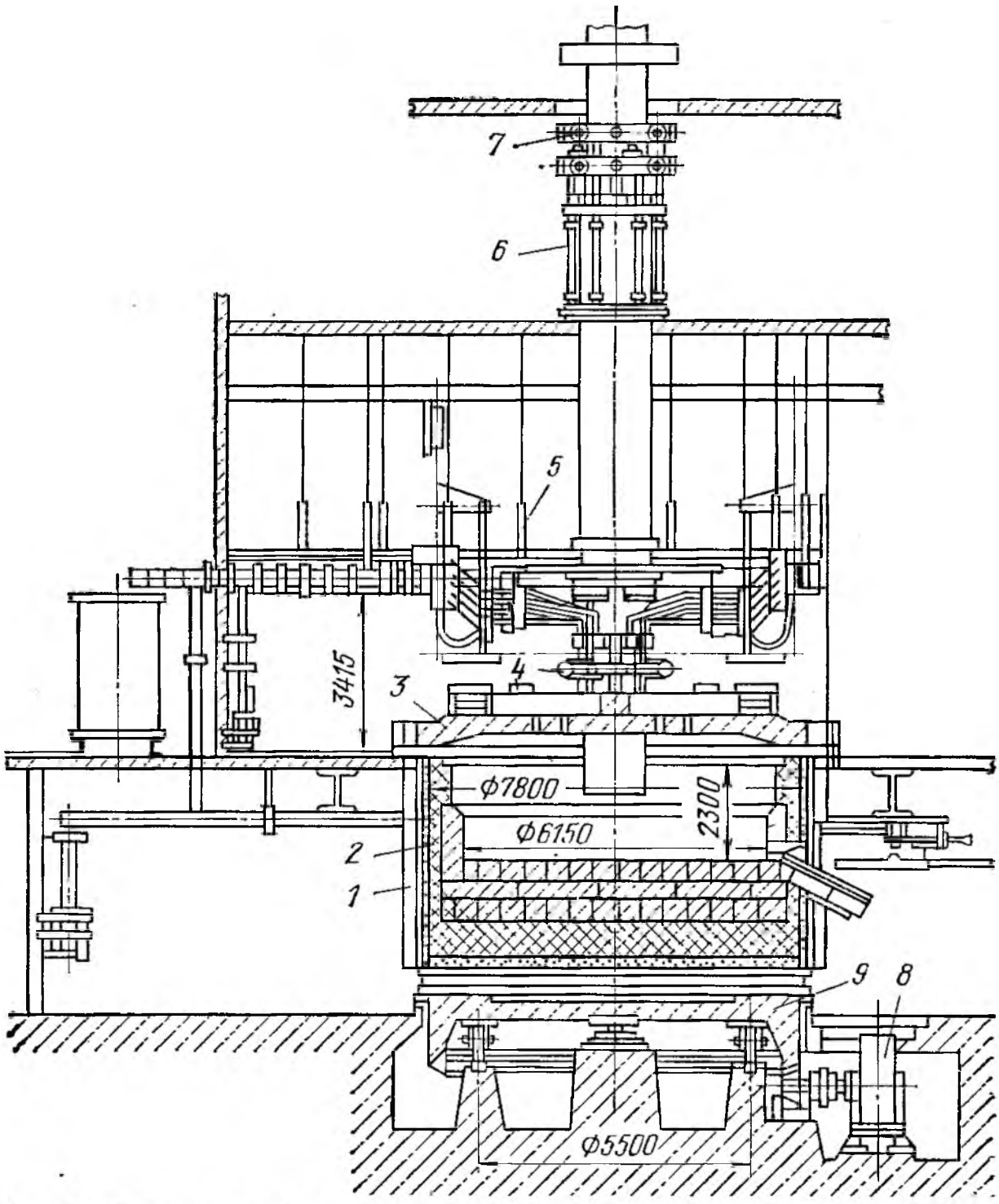


Рис. 147. Вертикальный разрез печи типа РКЗ-16,5:

1 — кожух; *2* — футеровка; *3* — свод; *4* — механизм подъема свода; *5* — устройство для перепуска электродов; *6* — электрододержатели (два из них на рисунке не видны); *7* — гидроцилиндры; *8* — механизм вращения ванны; *9* — опорная плита

благодаря ее установке на колесах, движущихся по кольцевому рельсу. Плита центрируется с помощью стальной осевой цапфы, а ее привод осуществляется от электродвигателя постоянного тока через редуктор, передающий вращение на стальной зубчатый венец, заложенный в опорную плиту. Печь делает один оборот за время от 33 до 132 ч; скорость вращения может регулироваться. Вращение ванны способствует равномерной работе печи, повышает ее производительность и снижает расход электроэнергии.

Футеровка рабочего слоя пода и нижней части стен ванны выполняется из углеродистых блоков, укладываемых на кладку из нескольких слоев шамотного кирпича. Между кожухом и шамотной кладкой помещают теплоизоляционный слой из асбеста и шамотной крошки. Поскольку футеровка верхней части стен закрыта толстым слоем шихты от излучения электрических дуг, ее выполняют сравнительно тонкой из шамота (порядка 300 мм).

Под печи, подвергающийся активному воздействию высокотемпературного расплава, делают толстым, выкладывая его из 4—5 рядов шамотного кирпича с рабочим слоем из 2—3 рядов углеродистых блоков, уложенных с перевязкой швов, забиваемых электродной массой. Леточное отверстие также футеруют слоем шамота и углеродистым блоком с выточенным в нем желобом. Футеровка рабочей камеры, работающая в очень тяжелых условиях, должна быть надежной, так как межремонтный срок ее службы составляет не менее года. Большая толщина футеровки пода обеспечивает большую тепловую инерцию и аккумулированное кладкой тепло способствует стабилизации температурного режима работы печи.

Во время работы на поду и нижней части стен печи образуется так называемый гарнисаж, т. е. затвердевший слой расплава.

Свод печи выполнен из отдельных секций, каждая из которых представляет собой водоохлаждаемый кессон из нержавеющей стали. Рабочая сторона свода покрыта слоем жароупорного бетона. В своде имеются отверстия для прохода электродов с примыкающими к ним отверстиями, через которые поступает шихта из загрузочных воронок. Загрузочные отверстия расположены в своде так, чтобы шихтовые материалы, поступающие в печь из воронок, распределялись бы как можно равномернее в непосредственной близости от электродов. В загрузочные воронки шихта попадает из бункера через дозирующие устройства и питатели, расположенные над печью. В своде предусмотрен также патрубок для отвода уходящих газов в систему очистки их от пыли (на рис. 147 не показан). В своде печи установлены также взрывные клапаны и имеются отверстия для термопар, а отдельные секции свода и загрузочные воронки электрически изолированы друг от друга. Свод оборудован гидравлическим механизмом подъема, позволяющим в случае поломки электродов или других нарушений работы печи быстро его поднять.

Поскольку газы, образующиеся при восстановительной

плавке, состоят в основном из CO, то закрытые печи взрывоопасны и в них следует поддерживать небольшое избыточное давление во избежание подсосов окружающего воздуха в рабочую камеру и образования в ней гремучей смеси.

В печи применяют набивные самоспекающиеся электроды диаметром 1200 мм. Они представляют собой цилиндрический кожух из листовой стали толщиной 1,5—2 мм, заполняемый по мере расходования электродной массой, которая спекается в нем благодаря теплу, отводимому через электрод из зоны высоких температур. В состав массы входит термоантрацит, графитовая стружка или кокс и смолопек. Подвод тока к электродам осуществляется через контактные щеки электрододержателя с гидравлической прижимающей системой. Электроды удерживаются и опускаются по мере их расходования с помощью удерживающего и тормозного механизма с гидравлическими цилиндрами, расположенными в верхней части электродов. Когда электрод опускается, сверху к железному кожуху приваривают новую секцию, которую заполняют затем электродной массой. Для осуществления всех этих операций предусмотрена специальная рабочая площадка над печью.

Ток к каждому из электродов подводится от индивидуального однофазного трансформатора со вторичным напряжением, изменяющимся со 130 до 210 В. Общая мощность печи РКЗ-16,5 составляет 16,5 МВА; максимальный ток в каждом электроде достигает 59 000 А. Ток от вторичной обмотки трансформаторов подводится к электродам с помощью массивных (иногда частично водоохлаждаемых) медных шин и бронзовых или медных водоохлаждаемых контактных щек. Участок гибких кабелей, необходимых для обеспечения перемещения электродов, стремятся сделать как можно короче.

Всесоюзным научно-исследовательским институтом электротермического оборудования (ВНИИЭТО) разработан ряд закрытых и открытых ферросплавных печей для осуществления восстановительных процессов. Крупные закрытые печи типа РПЗ-48 и РПЗ-72 имеют ванну прямоугольной формы с электродами, расположенными в один ряд, а печи меньшей мощности — круглую ванну с вертикальными электродами, установленными в вершинах равностороннего треугольника (закрытые печи типа РКЗ-10,5, РКЗ-24 и РКЗ-33, подобные описанной выше печи РКЗ-16,5, а также открытые печи типа РКО-10,5 и РКО-16,5, отличающиеся в основном способом загрузки через открытый верх печи и удалением уходящих газов под вытяжной зонт).

Рафинирующая плавка малоуглеродистых ферросплавов осуществляется в печах сравнительно небольшой емкости и мощности типа РКО-2,5 и РКО-3,5. Мощность этих печей составляет соответственно 2,5 и 3,5 МВ·А, они имеют круглую в плане ванну с магнезитовой футеровкой и выполняются открытыми с загрузкой из бункеров по трубам. Эти печи выполняются наклоняющимися для выпуска металла; ванна имеет механизм вращения вокруг вертикальной оси, позволяющий поворачивать ее со скоростью до 3—5 об/ч. Для уменьшения загрязнения металла углеродом на этих печах используются графитированные электроды; конструкция электрододержателей, токоподводов и системы питания имеет много общего с описываемыми ниже элементами конструкций дуговых сталеплавильных печей.

Дуговые сталеплавильные печи

Дуговые печи прямого действия применяют для выплавки преимущественно легированных сталей из металлолома с небольшими добавками твердого чугуна благодаря возможности создания и концентрации зоны высоких температур, управлению составом атмосферы, тщательной очистке металла от нежелательных примесей и малому угару легирующих элементов. Высокая стоимость легированных сталей и легирующих добавок оправдывает сравнительно большой удельный расход электроэнергии, затрачиваемой на их производство в дуговых печах. Эти печи находят также применение в качестве основного агрегата на заводах с циклом прямого восстановления железной руды для переплава металлизованных окатышей.

Как отмечено, дуговые сталеплавильные печи потребляют значительное количество электроэнергии и, следовательно, имеют большую мощность. Их выполняют трехфазными и оборудуют тремя электродами. Поскольку к электродам должен подводиться очень большой ток (например в печи емкостью 200 т ток достигает 87500 А), а в период расплавления шихты существует опасность коротких замыканий электродов с металлом, питание дуговых сталеплавильных печей осуществляется через индивидуальные понижающие трансформаторы.

В последние годы наблюдается тенденция к применению более мощных питающих трансформаторов, обеспечивающих удельную мощность свыше 500 кВ·А/т (иногда до 800 кВ·А/т), что способствует стабилизации дуг, увеличению их диаметра и интенсификации теплообмена в печи. Это

позволяет очень существенно сократить время плавки и повысить производительность печей.

Питание производится обычно от сети переменного тока с напряжением 6000—10000 В через дроссель, представляющий собой индуктивное сопротивление, обеспечивающее более равномерное горение дуги и уменьшающее «толчки» тока при коротких замыканиях. После разогрева печи и проплавления шихты (когда отсутствует опасность толчков тока) дроссель можно шунтировать. С помощью трансформатора напряжение сети снижается до 100—600 В. Для регулирования мощности печи можно изменять напряжение во вторичной обмотке переключением схемы соединения первичной обмотки с треугольника на звезду и наоборот. Для этой цели трансформатор может иметь несколько ступеней напряжения на вторичной обмотке.

По участку электрической цепи от вторичной обмотки трансформатора до печи, называемому короткой сетью, протекают токи большой силы. Для уменьшения потерь электрическое сопротивление короткой сети должно быть минимальным, что достигается возможно близким расположением трансформатора к печи и использованием для проводки короткой сети медных шин большого сечения. Чтобы обеспечить перемещение электродов, небольшой участок короткой сети у печи выполняют из гибкого кабеля.

Общий вид дуговой сталеплавильной печи показан на рис. 148. Основой несущей конструкции печи служит двухсекторная люлька, на которой смонтированы кожух с футеровкой и консольный мост (портал) с механизмами поворота и подъема свода и вращения корпуса. Футеровка рабочего пространства печи выкладывается в кожухе, имеющем верхнюю цилиндрическую часть. Его нижняя часть выполняется в виде усеченного конуса, а днище — плоским или полусферическим. Кожух изготовляют из листовой стали толщиной 12—30 мм и усиливают ребрами жесткости. Кожух небольших печей выполняют цилиндрической формы. В верхней части кожуха предусматривается кольцо жесткости. На кожухе закреплены водоохлаждаемая рама рабочего окна и желоб сливного носка. Крупные печи имеют два окна.

Рабочее пространство закрывается съемным сводом, который выкладывают в кольцеобразном сводовом каркасе. В небольших печах емкостью до 5 т, используемых преимущественно для получения стального фасонного литья и работающих с кислыми шлаками, футеровку выполняют обычно из динаса (кислой). Более крупные печи, применяемые для

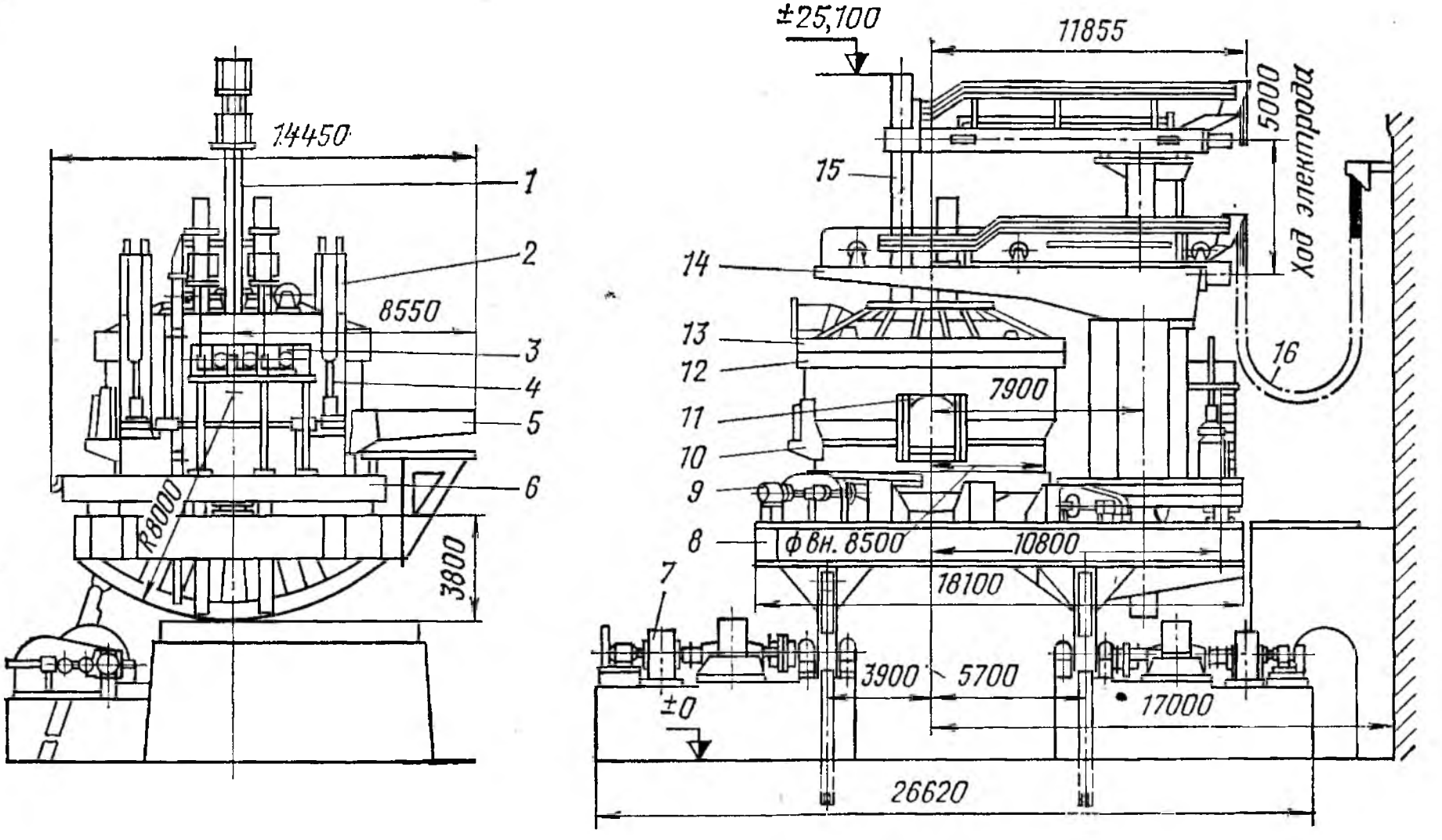


Рис. 148. Дуговая сталеплавильная печь типа ДСП-200:

1 — система электрододержателей; *2* — вертикальные стойки; *3* — механизм перемещения электродов; *4* — механизм подъема свода; *5* — сливной носок; *6* — тумба поворотная; *7* — привод механизма наклона печи; *8* — люлька; *9* — механизм вращения; *10*, *11* — рабочие окна; *12* — кожух; *13* — каркас свода; *14* — портал; *15* — электрод; *16* — кабель гибкий

выплавки высококачественной стали, тщательно очищаемой от серы и фосфора с помощью основных шлаков, имеют основную футеровку из магнезитовых огнеупоров. Кладку пода тех и других печей выполняют многослойной (несколько рядов кирпичей, положенных на ребро), так как она должна обеспечить его механическую прочность при высокой температуре и малые тепловые потери. Рабочий слой футеровки пода толщиной 150—300 мм, соприкасающийся с расплавленным металлом, всегда делают набивным с тем, чтобы образовать ванну, непроницаемую для жидкого металла. Набивные массы изготовляют соответственно из динасового или магнезитового порошков на каменноугольной смоле или жидком стекле. Для увеличения срока службы футеровки после каждой плавки проводят наварку пода и стен в кислых печах кварцевым песком, а в основных — магнезитовым порошком. Стены печей с кислой футеровкой выкладывают из динасового кирпича, а с основной футеровкой — из магнезитового кирпича или крупных набивных блоков, изготовленных в специальных формах из смеси магнезитового (50 %) и доломитового (50 %) порошков с каменноугольным пеком. Слой теплоизоляции стен и пода, состоящий из асбестового листа, диатомитового и шамотного кирпича, сравнительно невелик и достигает 115 мм.

Стойкость стен основных печей весьма невелика: 40—60 плавок при выкладке их из магнезитовых кирпичей, 80—100 из армированных (в железных кассетах) блоков и кирпичей. В кислых печах, где кладка работает в более легких условиях, ее стойкость выше и стены служат до 200 плавок, своды до 300—400 плавок, а под свыше 1500 плавок.

Хорошо себя зарекомендовали водоохлаждаемые сводовые и стеновые панели (выше уровня шлака), устанавливаемые вместо футеровки на печах со сверхмощными трансформаторами. Они устраняют необходимость предохранять огнеупорную футеровку от перегрева и разрушения, что позволяет сократить время плавки. Пока еще не решен вопрос об оптимальной конструкции панелей (сварные, литые, из трубчатых элементов) и об использовании тепла охлаждающей воды. Несмотря на разработку в последние годы более стойких огнеупоров для футеровки электродуговых печей, технико-экономические преимущества водоохлаждаемых стеновых панелей и зачастую целых водоохлаждаемых сводов остаются неоспоримыми. Однако в настоящее время большое число дуговых печей имеют футерованный свод.

Свод не соприкасается непосредственно с металлом и шлаком, поэтому в печах с кислой и основной футеровками

могут применяться своды из специального высококачественного динасового кирпича. На основных печах кладка свода проводится преимущественно из термостойкого хромомагнезитового и плавленого магнезитового кирпича. Стойкость динасового свода основных печей достигает 100—140 плавок, а свод из хромомагнезитового кирпича служит в 1,5—2 раза дольше благодаря тому, что попадающие на него брызги шлака не оказывают разъедающего действия. Однако большая плотность и теплопроводность хромомагнезита (это вынуждает делать свод толще, чем динасовый) приводят к тому, что масса хромомагнезитового свода оказывается большой. На малых печах хромомагнезитовые своды иногда закрывают слоем теплоизоляции.

Известны успешные опыты выполнения свода дуговых печей из высокоглиноземистых огнеупоров.

Электроды проходят через отверстия в своде. Вертикальное расположение электродов обеспечивает минимальные напряжения в них и облегчает их перемещение. От свойств электродов и качества их изготовления в значительной мере зависит работа печи. Электрические и тепловые потери в электродах должны быть невелики, электроды должны быть свободны от серы и золы, наличие которых может привести к загрязнению металла. Электроды должны обладать достаточной механической прочностью, чтобы не разрушаться и не науглероживать металл, и возможно более высокой температурой окисления на воздухе, так как от этого зависит их расход.

В дуговых печах обычно применяют графитированные и угольные электроды, которые в наибольшей мере удовлетворяют перечисленным требованиям. Для исключения потерь дорогостоящих электродов с огарками в настоящее время применяют наращиваемые (свинчиваемые с помощью резьбовых штифтов-ниппелей) электроды, которые наращивают по мере их расходования. Диаметр электродов зависит от емкости печи. Так, на малых сталеплавильных печах емкостью 12 т диаметр электродов составляет 350 мм, а на печах емкостью 200 т — 710 мм.

Электроды удерживаются электрододержателями, с помощью которых к ним подводится ток. Благодаря эффективным пружинно-гидравлическим зажимам электрододержатели обеспечивают и возможность ослабления зажима для передвижения электродов. Электрододержатели изготовляют либо из стали (без водяного охлаждения), либо водоохлаждаемыми из бронзы. Электрододержатели прикрепляют к кареткам или телескопическим стойкам с по-

мощью механизмов подъема электродов. Для предохранения электродов от чрезмерного нагрева и окисления на воздухе на своде печи установлены водоохлаждаемые кольца (охладители), уплотняющие места входа электродов в печь.

Для выпуска металла и скачивания шлака печь может поворачиваться вокруг горизонтальной оси при помощи механизма наклона, имеющего электрический или гидравлический привод. Механизация загрузки шихты в дуговые сталеплавильные печи осуществляется с помощью специальной бадьи с секторным раскрываемым днищем через открывающийся верх рабочего пространства. Свод при этом поднимается специальным устройством и отводится в сторону.

Крупные печи оборудованы также устройством для вращения корпуса вокруг вертикальной оси и устройством для электромагнитного перемешивания жидкого металла в печи. Для этого применяют двухфазные статоры, создающие переменное магнитное поле при питании их током низкой частоты. Статоры располагают в нижней части кожуха печи. Днище кожуха выполняется при этом из немагнитной стали. Возникающие в жидком металле электродинамические усилия вызывают его принудительное перемешивание, что ускоряет процессы рафинирования стали и растворения в ней легирующих добавок. Применение в этих печах зависимых (горящих между электродами и шихтой) дуг ускоряет нагрев и расплавление металла, а также облегчает условия работы футеровки свода и стен благодаря экранированию дуг электродами. При этом дуги находятся ближе к нагреваемому металлу, чем к футеровке, что и обеспечивает направленный теплообмен в его сторону.

Наибольшая мощность подводится обычно к печи в период расплавления металла, так как электроды в этот период погружены в шихту, горение дуг происходит внутри ее и футеровке печи не грозит перегрев. Углубления, образующиеся в шихте постепенно, по мере ее расплавления, превращаются в «колодцы», внутрь которых погружены непрерывно опускающиеся электроды (рис. 149). К моменту, когда они достигают самого низкого положения, на поду печи образуется расплавленный металл и дуги начинают гореть над ним. Шихта, окружающая колодцы, постепенно оплавляется и оседает, при этом уровень жидкого металла в ванне печи повышается и электроды начинают поднимать.

После образования колодцев в шихте свод и электроды поднимают и поворачивают корпус печи на некоторый угол. Затем проплавляют еще три колодца и снова корпус печи

поворачивают в другую сторону и проплавляют оставшуюся твердую шихту. При таком способе плавки зона непосредственного воздействия электрических дуг значительно увеличивается, что ускоряет процесс расплавления.

После полного расплавления шихты длина электрических дуг увеличивается, сами дуги и поверхность ванны излучают значительную энергию на свод и стены печи. По-

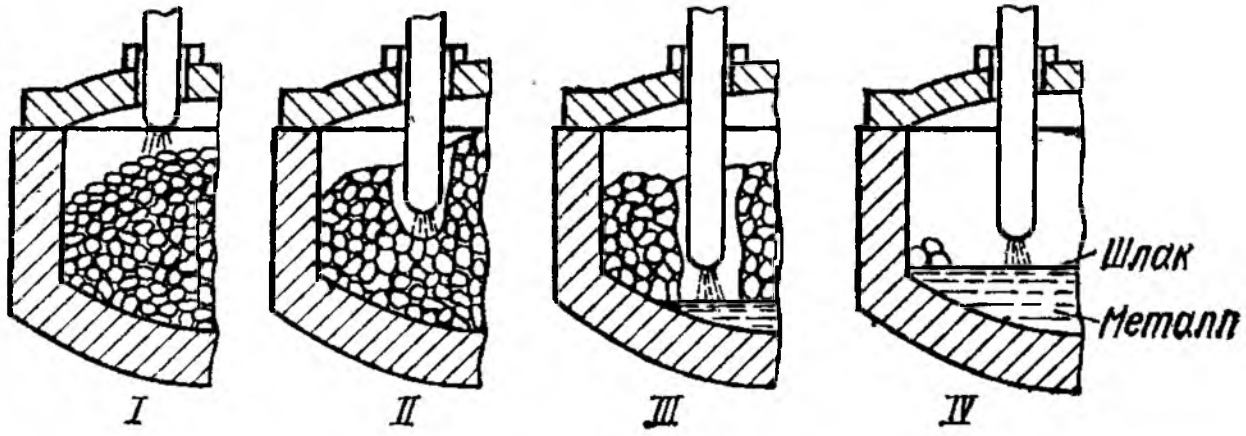


Рис. 149. Процесс плавления шихты:

I — начало плавления; *II* — образование колодцев и опускание электродов; *III* — образование расплава на поду печи и завершение проплавления колодцев; *IV* — полное расплавление шихты

этому для защиты футеровки подводимую к печи мощность снижают.

В последнее время для ускорения расплавления скрапа и снижения удельного расхода электроэнергии применяют газокислородные горелки. Горелки вводят внутрь печи через отверстия в стене. Широкое распространение получила продувка ванны кислородом через водоохлаждаемую фурму в период плавки, когда в жидкой ванне происходит окисление примесей. Фурму вводят в печь через отверстие в своде и устанавливают так, чтобы ее сопла находились на расстоянии 200—250 мм над уровнем шлака. При удельном расходе кислорода 5—10 м^3/т потребление электроэнергии снижается на 10—15 %, а производительность печи возрастает на 5—10 %. Стойкость фурм достигает 200 плавок.

Все современные дуговые сталеплавильные печи оборудуются газоочистными устройствами, описанными в § 3, гл. VII.

Для выплавки стали используют печи емкостью от 12 до 200 т (табл. 21), причем применение крупных дуговых печей обеспечивает более высокий к. п. д., меньший удельный расход электроэнергии и более высокую производительность.

При выполнении расчета дуговых сталеплавильных печей определяют (по эмпирическим формулам) геометрию и

Таблица 21. Характеристики дуговых сталеплавильных печей

Параметр	Тип печи				
	ДСП-12	ДСП-25	ДСП-50	ДСП-100	ДСП-200
Емкость печи, т . .	12	25	50	100	200
Мощность трансформатора, МВ·А . .	8+20 %	12,5+20 %	20+20 % 32+20 %	50+20 %	125
Диаметр ванны на уровне откосов, мм .	2740	3540	4560	5600	7100
Глубина ванны от порога, мм	555	775	890	1100	1480
Диаметр графитированного электрода, мм	350	400	500	610	710
Максимальный ток электрода, кА . . .	17,3	22,3	32,3—38,8	62,0	87,5
Удельный расход электроэнергии на расплавление твердой завалки, кДж/кг	1700	1700	1600	1500	1400

размеры ванны и рабочего пространства исходя из заданной емкости, а также путем составления теплового (энергетического) баланса увязывают между собой производительность печи и мощность трансформатора.

Вакуумные дуговые печи

Вакуумные дуговые печи (ВДП), широко используемые для рафинирующего переплава многих качественных сталей и жаропрочных сплавов, имеют обычно расходуемый электрод. Электрическая дуга горит между этим электродом и поверхностью жидкого металла.

По ходу плавки длина электрода непрерывно уменьшается вплоть до его практически полного израсходования. Получаемый металл в процессе плавки не загрязняется ни газами, ни неметаллическим включениями, поскольку в вакуумных дуговых печах с расходуемым электродом исключены источники этих загрязнений.

Поскольку поддерживать стабильную дугу в вакууме на переменном токе трудно, то эти печи питаются преимущественно постоянным током. Температура дуги сильно зависит от материала переплавляемого электрода, так как ток дугового разряда протекает здесь через разреженные пары

металла. Длину дуги в вакуумных дуговых печах поддерживают сравнительно небольшой (20—50 мм), поскольку ее увеличение может привести к перебросу дуги на стенку водоохлаждаемого кристаллизатора, прожиганию этой стенки и взрыву печи. Поддержание требуемой постоянной длины дуги осуществляется обычно с помощью системы автоматического регулирования.

За счет тепловыделения в дуге электрод нагревается и начинается его оплавление. Капли расплавленного металла стекают с конца электрода, и пройдя зону дугового разряда, попадают в водоохлаждаемый кристаллизатор, где формируется слиток. В верхней части слитка незатвердевший еще металл образует лунку жидкого расплава.

Основные конструктивные элементы вакуумной дуговой печи показаны на рис. 150. Печь состоит из рабочей камеры, в которой размещается расходуемый электрод (обычно круглого сечения). В качестве расходуемого электрода используется металлический стержень, выполняемый из металла или сплава, подлежащего рафинирующему переплаву. Расходуемый электрод изготовляют отливкой, механической обработкой или методами порошковой металлургии (прессование и спекание порошков). Электрод прикрепляют к токоведущему подвижному штоку с помощью электрододержателя или приваривают к торцу зажатого в него огарка. Шток выполнен в виде системы коаксиальных труб с водяным охлаждением и рабочая камера печи также имеет водоохлаждаемую рубашку. Шток проходит через вакуумное уплотнение в верхней части рабочей камеры и перемещается с помощью электромеханического (лебедочного или винтового типа) или гидравлического приво-

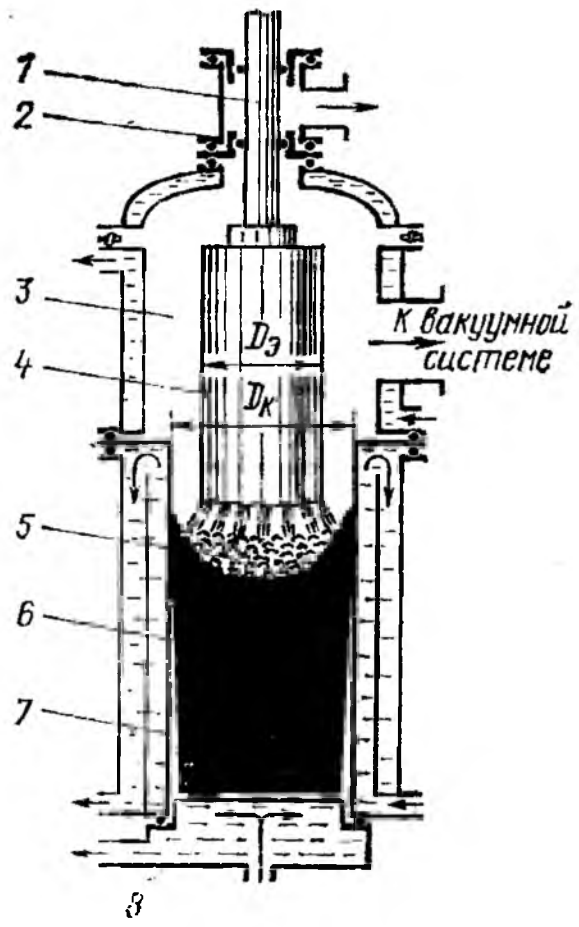


Рис. 150. Схема дуговой вакуумной печи с расходуемым электродом:

1 — токоведущий шток с электрододержателем; *2* — вакуумное уплотнение штока; *3* — рабочая камера; *4* — расходуемый электрод; *5* — лунка жидкого металла; *6* — затвердевший слиток; *7* — водоохлаждаемый кристаллизатор; *8* — водоохлаждаемый поддон

да. В боковой стенке рабочей камеры предусмотрен патрубок с фланцем для присоединения откачной (вакуумной) систем. В стенках рабочей камеры выполняются «глядел-ки» для наблюдения за дугой и за перемещением расходуемого электрода, закрываемые стеклами. На камере предусматриваются также предохранительные клапаны на случай возможного прожигания стенки кристаллизатора и резкого увеличения давления паров воды.

К нижней части рабочей камеры (также с использованием вакуумного уплотнения) присоединяется водоохлаждаемый кристаллизатор, выполняемый из меди или хромистой бронзы. Кристаллизаторы могут иметь либо неподвижный поддон, либо подвижный. При работе печей с неподвижным поддоном кристаллизатора происходит постепенное наращивание высоты слитка вплоть до заполнения кристаллизатора, чем и завершается плавка. В печах с подвижным поддоном осуществляется перемещение поддона на штоке с помощью специального механизма вниз по мере наплавления слитка. Эту схему применяют при переплаве тугоплавких металлов и сплавов на их основе, так как она позволяет обеспечить более высокую степень разрежения в печи (10^{-3}—10^{-2} Па). Кристаллизаторы с подвижным поддоном выполняются более короткими, чем с неподвижными. Диаметр кристаллизатора выбирают несколько большим диаметра расходуемого электрода.

Условия кристаллизации в водоохлаждаемом кристаллизаторе благодаря интенсивному отводу тепла обеспечивают высокую степень физической и химической однородности слитка, причем часть слитка, загрязненная всплывшими включениями, обычно составляет лишь незначительную долю его общего объема. При постоянной мощности, выделяемой в дуге, устанавливается стационарный режим работы печи, характеризующийся постоянной скоростью нарастания слитка в кристаллизаторе. Это также способствует однородности получаемого металла.

В верхней части слитка, где поддерживается лунка расплава, металл вплотную прилегает к стенке кристаллизатора. Нижняя часть затвердевшего и остывающего слитка вследствие термической усадки постепенно отходит от стенок кристаллизатора, и образуется зазор. Нижней частью слиток опирается на поддон.

После завершения плавки проводят развакуумирование рабочей камеры печи и извлекают слиток из кристаллизатора. Разработаны различные конструктивные варианты из-

влечения слитка, из числа которых два получили наибольшее распространение:

1. Поддон выполняют съемным, а кристаллизатор постоянно соединен с рабочей камерой печи. В этом случае извлечение готового слитка из кристаллизатора осуществляется снизу путем опускания поддона с помощью установленного под ним гидравлического цилиндра.

2. Кристаллизатор выполняют отъемным от рабочей камеры и он опускается, а затем отводится в сторону поворотом или откатыванием. При таком варианте обычно используются два кристаллизатора: в одном ведется плавка, другой подготавливается к работе и тем самым сокращается время на осуществление вспомогательных операций. Хотя при такой схеме и осложняется подвод воды к кристаллизатору, она наиболее широко применяется благодаря своей простоте и удобству в эксплуатации.

Вакуумные дуговые печи характеризуются сравнительно высоким удельным расходом электроэнергии, что обусловлено высокими потерями тепла с охлаждающей водой в кристаллизаторе, штоке электрододержателя, кожухе и других элементах, а также затратами энергии на привод насосов вакуумной системы. Удельный расход тепла составляет 5500 кДж/кг (1, 5 кВт·ч/кг).

Основные характеристики вакуумных дуговых печей серии ДСВ с глухим кристаллизатором для рафинирующего переплава стали и сплавов на основе никеля приведены в табл. 22.

Эти печи питаются постоянным током от выпрямительных агрегатов типа ВАКП, обеспечивающих ток от 12,5 до 37,5 кА при напряжении 75 В.

Сравнительно высокий расход электроэнергии, большие капитальные затраты, обусловленные необходимостью установки дорогого и сложного вакуумного оборудования и вы-

Таблица 22. Основные характеристики вакуумных дуговых печей

Параметр	ДСВ-3,2-Г1	ДСВ-6,3-Г6	ДСВ-8-Г16	ДСВ-11,2-Г37
Диаметр кристаллизатора, мм . .	160; 200 250; 320	320; 400 500; 630	560; 630 710; 820	630; 800 1000; 1120
Скорость плавления, кг/мин . . .	2—5,4	3,3—11	6—14	6,3—19,2
Время плавки, ч	7,5—3,5	10,5—5,5	15—6	82—20
Давление (в холодной печи), Па	0,06	0,06	0,06	0,06

прямителей, а также потери дорогого металла со стружкой (до 20 %) при неизбежной обдирке слитков, имеющих невысокое качество поверхности, — все это делает дуговой вакуумный переплав очень дорогостоящей операцией, оправдываемой только при производстве слитков качественной стали, к которым предъявляют высокие требования.

Плазменные дуговые печи

Плазменные дуговые печи (ПДП) применяют для выплавки и рафинирующего переплава высококачественных сталей. При этом, так же как в ВДП, исключается загрязнение металла материалом электродов и снижается загрязнение газами из атмосферы печи, так как поток плазмы может состоять в принципе из любой, необходимой для проведения технологического процесса смеси газов. Благодаря тому, что рабочее пространство ПДП заполнено газом при давлениях, близких к атмосферному, потери металла за счет испарения гораздо меньше, чем в вакуумных плавильных печах.

Высокая концентрация энергии и чрезвычайно интенсивная теплопередача к металлу при сравнительно небольших потерях тепла в окружающую среду позволяют достичь в ПДП очень высоких скоростей плавления, а простота конструкции этих печей способствует осуществлению в них таких технологических операций (наводка и скачивание шлака и т. д.), которые невозможно провести в вакуумных печах.

Возможно выполнение ПДП либо с огнеупорной футеровкой (подобно дуговым сталеплавильным печам), либо с водоохлаждаемым кристаллизатором (подобно ДВП). На рис. 151 схематически показана ПДП с футерованной огнеупорными материалами рабочей камерой. Форма ванны этой печи очень похожа на форму рабочей камеры дуговой сталеплавильной печи. Огнеупорные материалы, применяемые для ее футеровки, те же самые, что и в дуговых сталеплавильных печах. Вместо электродов в своде печи установлен плазматрон постоянного тока, а водоохлаждаемый медный анод смонтирован в поду печи так, чтобы он находился в контакте с металлом. В ПДП такого типа возможно использование и плазматронов переменного тока. Свод печи установлен с уплотнением, в качестве которого может быть использован лабиринтный песочный или гидравлический затвор, обеспечивающий газоплотность рабочего пространства.

Работа такой печи почти не отличается от работы ду-

говой сталеплавильной печи, за исключением того, что после загрузки шихты из рабочей камеры откачивают воздух, заполняют ее тем газом, который используется в плазматроне, до давления, близкого к атмосферному, а потом начинают процесс расплавления шихты. Так же, как дуги в дуговой печи, плазменная струя в этой печи проплавляет сначала колодец в шихте и расплав постепенно накапливается на поду. После завершения расплавления осуществляют необходимые по технологии плавки процессы рафинирования металла и производят его выпуск.

Возможна установка плазматронов не в своде печи, а в ее боковых стенках с наклоном внутрь рабочего простран-

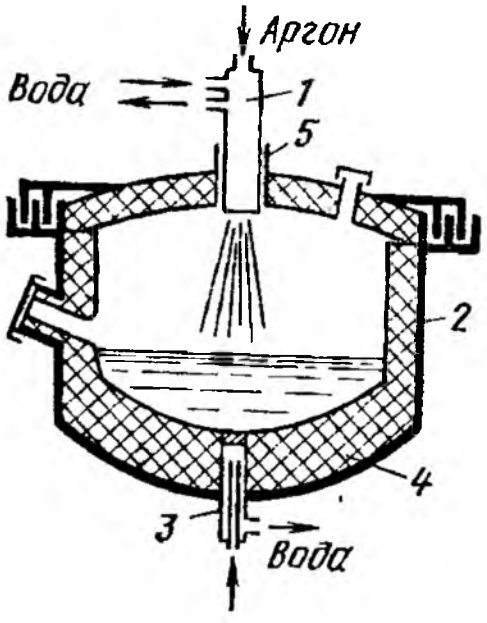


Рис. 151. Схема плазменно-дуговой печи с футерованной рабочей камерой:

1 — плазматрон; *2* — кожух рабочей камеры; *3* — подовый электрод; *4* — футеровка; *5* — уплотняющий затвор свода

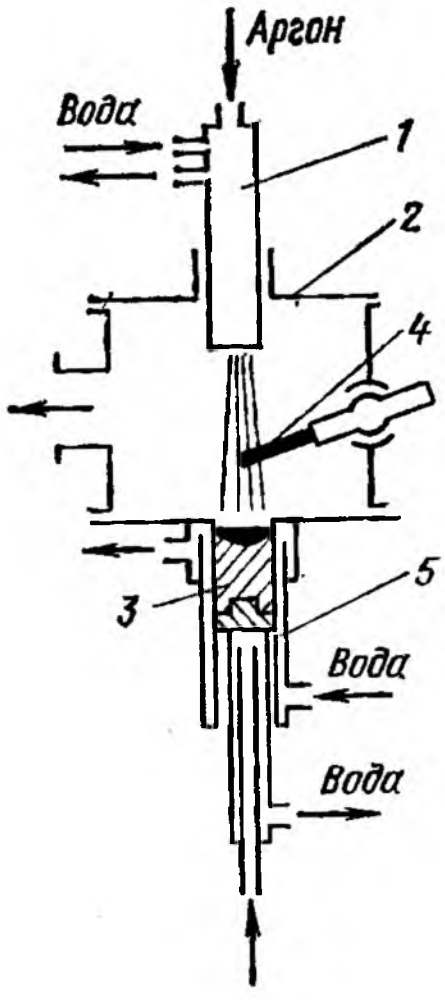


Рис. 152. Схема плазменно-дуговой печи с водоохлаждаемым кристаллизатором:

1 — плазматрон; *2* — камера печи; *3* — выплавляемый слиток; *4* — переплавляемая заготовка; *5* — водоохлаждаемый кристаллизатор

ства. Это позволяет сократить тепловые потери с водой, охлаждающей корпусы плазматронов, и тем самым повысить тепловой к. п. д. печи.

К настоящему времени созданы промышленные варианты подобных печей емкостью до 30 т и можно в будущем ожидать их внедрения в практику сталеплавильного производства.

Устройство ПДП для переплава слитка в кристаллизаторе показано схематически на рис. 152. Подвергаемую пе-

реплаву заготовку в виде стержня подают в рабочую камеру, в верхней крышке или стенках которой установлены один или несколько плазматронов так, чтобы создаваемые ими потоки плазмы попадали на конец стержня. Стержень в результате оплавляется и стекающий в кристаллизатор расплав затвердевает, формируя слиток. Выплавляемый слиток служит здесь анодом, и на его верхней части образуется лунка жидкого металла. Плазматроны располагают в рабочей камере так, чтобы обеспечить как можно более равномерный нагрев ванны по всей ее поверхности, а заготовку подают по оси печи сверху. Рафинирование и удаление газовых включений происходят как в процессе оплавления стержня-заготовки, так и в лунке расплава.

Процесс плазменно-дуговой плавки позволяет легко регулировать подводимую мощность и, следовательно, температуру поверхности расплава и скорость плавки. Это делает его более гибким по сравнению с процессом плавки в ВДП, а качество металла получается высоким, причем возможна плавка в вакууме и в среде инертного газа.

Возможны варианты таких печей с глухим кристаллизатором (с неподвижным поддоном) и вытягиванием слитка (с движущимся поддоном). ПДП выгодно отличается от ВДП простотой устройства и безопасностью эксплуатации.

Институтом электросварки им. Е. О. Патона АН УССР разработана серия промышленных ПДП с медным водоохлаждаемым кристаллизатором для выплавки слитков прецизионных и жаропрочных сплавов массой до 150 кг, слитков шарикоподшипниковых сталей массой 0,5—1,0 т и слитков специальных конструкционных и нержавеющих сталей массой 3—5 т. В небольших печах установлено по четыре плазматрона мощностью 160 кВт, а в крупных — по шесть плазматронов мощностью до 2800 кВт.

§ 3. Индукционные печи

Индукционные плавильные печи

Плавка черных металлов в индукционных печах имеет ряд преимуществ перед плавкой в дуговых печах, поскольку исключается такой источник загрязнения, как электроды. В индукционных печах тепло выделяется внутри металла, а расплав интенсивно перемешивается за счет возникающих в нем электродинамических усилий. Поэтому во всей массе расплава поддерживается требуемая температура при наименьшем угаре по сравнению со всеми другими типами электрических плавильных печей. Индукционные плавиль-

ные печи легче выполнить в вакуумном варианте, чем дуговые.

Однако важнейшее достоинство индукционных печей, обусловленное генерацией тепла внутри расплавленного металла, становится недостатком при использовании их для рафинирующей плавки. Шлаки, имеющие очень малую электропроводность, нагреваются в индукционных печах от металла и получаются со сравнительно низкой температурой, что затрудняет проведение процессов рафинирования металла. Это обусловливает использование индукционных плавильных печей преимущественно в литейных цехах. Кроме того, высокая стоимость высокочастотных питающих преобразователей сдерживает применение высокочастотных плавильных печей.

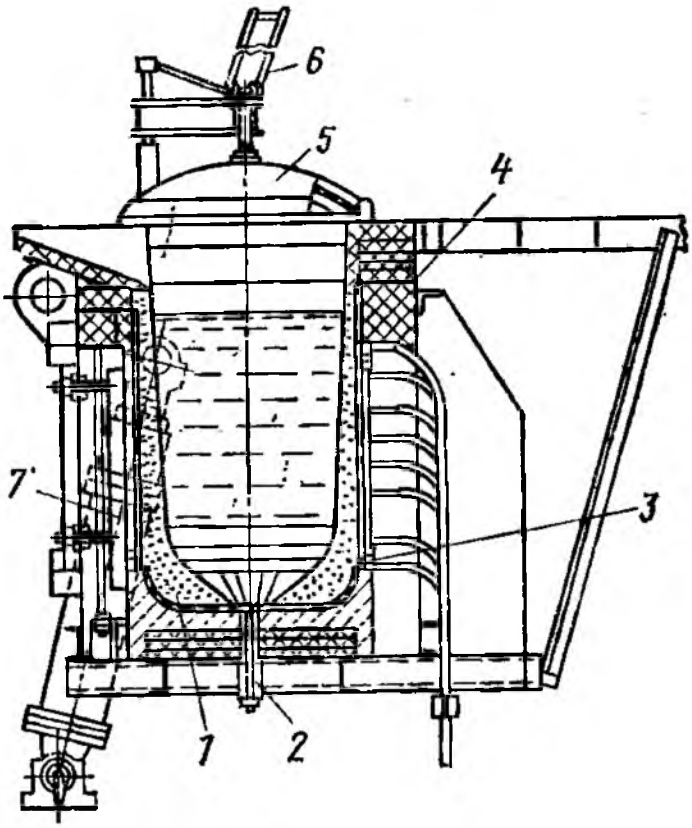


Рис. 153. Индукционная сталеплавильная печь серии ИСТ:

1 — футеровка; *2* — датчики сигнализации проедания футеровки; *3* — индуктор; *4* — каркас и кожух; *5* — крышка; *6* — механизм подъема крышки; *7* — механизм наклона печи

Конструкция и схема питания индукционной печи существенно зависят от наличия или отсутствия железного сердечника. Поэтому индукционные печи рассматриваются далее в соответствии с этим признаком.

Печи без железного сердечника

В индукционной плавильной печи без железного сердечника (рис. 153) главной частью является индуктор, выполняемый обычно из медной трубки и охлаждаемый протекающей по ней водой. Витки индуктора располагают в один ряд. Медная трубка может быть круглого, овального или прямоугольного сечения. Зазор между витками составляет 2—4 мм. Число витков индуктора зависит от напряжения, частоты тока и емкости печи. Витки закрепляют на изоляционных стойках, с помощью которых индуктор устанавливают в каркасе печи. Каркас печи должен обеспечивать достаточную жесткость конструкции; чтобы не нагре-

вались его металлические части, они не должны образовывать электрически замкнутого контура вокруг индуктора.

Для выпуска металла из печи предусматривается возможность наклона печи, что осуществляется с помощью тельфера на малых печах или при помощи гидравлических цилиндров на крупных.

Футеровка (тигель) индукционной печи работает в очень тяжелых условиях, так как интенсивное движение металла и большие скорости изменения температуры вызывают ее размывание и разрушение, поэтому чем толще стенки тигля, тем больше срок его службы. Стенки тигля должны быть возможно более тонкими, чтобы обеспечить хорошую электромагнитную связь между индуктором и металлом.

Тигель изготовляют обычно набивным с применением металлического шаблона. После набивки тигель подвергают обжигу и спеканию непосредственно в печи, шаблон при этом расплавляется. Возможно изготовление футеровки вне печи формовкой под давлением в специальных разборных прессформах с последующей установкой тигля на место. Иногда на крупных печах футеровку тигля выкладывают из готовых фасонных огнеупоров. В крупных печах тигель опирается на подовую подстилку, выложенную из огнеупорных кирпичей на толстом стальном листе, образующем днище каркаса вместе с необходимыми поперечными балками.

Футеровку выполняют кислой или основной. Основой набивочной массы для кислой футеровки служит кварцит с высоким (не менее 95 %) содержанием кремнезема. В качестве связующей добавки используют сульфитно-целлюлозный экстракт и борную кислоту (1,0—2,0 %). Набивочная масса для основной футеровки состоит из молотого обожженного или плавленого магнезита со связующей добавкой (патока или водный раствор стекла и огнеупорная глина) в количестве 3 %. Стойкость кислой футеровки составляет 100—150 плавок для стали и 200—250 для чугуна, а основной футеровки 30—80 плавок для стали и 150 плавок для чугуна [1].

Поскольку чрезмерный износ футеровки может привести к «проеданию» стенок или днища тигля расплавленным металлом, что является очень серьезной аварией, то на индукционных печах обязательно предусматривается установка датчиков (для замера активного сопротивления футеровки), сигнализирующих о появлении в ней опасных трещин в начале просачивания жидкого металла.

[1] Меньшие значения относятся к печам большой емкости.

На средних и крупных индукционных плавильных печах тигель закрывается крышкой (сводом), выполняемой обычно набивной из того же огнеупорного материала, что и тигель. Для подъема и отвода крышки в сторону применяют простые рычажные механизмы или гидравлические цилиндры.

ВНИИЭТО разработаны индукционные печи без сердечника серии ИСТ для плавки стали, работающие на токе повышенной частоты. Емкость печей, работающих на токе частотой 2400 Гц (обеспечиваемой машинными генераторами), составляет 60, 160, 250 и 400 кг при потребляемой мощности соответственно 50, 100, 250 и 237 кВт. Печь емкостью 1 т, питаемая током частотой 1000 Гц, потребляет мощность 470 кВт. Крупные печи емкостью 2,5; 6 и 10 т потребляют мощность соответственно 1500, 1977 и 2730 кВт и питаются током частотой 500 Гц либо от машинных генераторов, либо от полупроводниковых (тиристорных) преобразователей. Продолжительность плавки в печах серии ИСТ колеблется от 50 мин (печь емкостью 60 кг) до 2 ч (печь емкостью 10 т).

Таким образом, диапазон производительностей всей этой серии печей весьма широк: от 70 кг/ч до 5 т/ч. Удельный расход электроэнергии на расплавление твердой завалки составляет в среднем 3600 кДж/кг (1,00 кВт·ч/кг) для малых печей и снижается до 2300 кДж/кг (0,64 кВт·ч/кг) для крупных печей.

Для плавки чугуна специально разработаны крупные индукционные печи без сердечника серии ИЧТ, работающие на токе промышленной частоты (50 Гц). Печь ИЧТ-2,5 имеет емкость 2,5 т при потребляемой мощности 718 кВт и производительности 11 т/ч; печь ИЧТ-6 имеет емкость 6 т при потребляемой мощности 1238 кВт и производительности 2,1 т/ч. Удельный расход электроэнергии составляет в обеих печах 2160 кДж/кг (0,6 кВт·ч/кг).

В схемы питания всех этих печей включены конденсаторные батареи с целью повышения $\cos\varphi$. Отсутствие дорогостоящих преобразователей значительно снижает стоимость печей, работающих на токе промышленной частоты.

Потери тепла за плавку составляют на индукционных печах такого типа примерно 20—25 %, а потери в токопроводах, конденсаторных батареях и преобразователях частоты достигают 30 %. Поэтому общий к. п. д. индукционных плавильных установок (особенно печей небольшой емкости), работающих на токе высокой частоты, невысок и составляет примерно 0,4, возрастая с увеличением емкости

печей до 0,6. Показатели работы крупных индукционных печей, работающих на токе промышленной частоты, выше и их общий к. п. д. достигает 0,8.

Улучшение показателей работы индукционных плавильных установок достигается правильной подготовкой шихты и ее рациональной загрузкой, снижением потерь тепла из печи и уменьшением времени простоев на ремонт футеровки, а также максимально возможным использованием мощности преобразователя частоты. Для этой цели обычно используют один общий преобразователь для питания двух печей.

Сравнительная легкость герметизации индукционных печей обусловила их широкое применение для вакуумной плавки качественных сталей и жаропрочных сплавов. Принципиально вакуумная индукционная печь (ВИП) не отличается от открытой. Она помещается в герметичный кожух с патрубком, через который осуществляется откачка камеры. Разливку проводят также в вакууме наклоном тигля внутри неподвижной камеры или наклоном всей камеры вместе с тиглем и изложницей. Изложницу в этом случае подвешивают внутри вакуумной камеры на цапфах и она сохраняет при повороте вертикальное положение. В кожухе ВИП индуктором неизбежно наводятся токи, повышающие электрические потери печи, поэтому для его изготовления следует использовать немагнитную сталь.

Сложной задачей при индукционной плавке в вакууме является также надежная изоляция витков индуктора, так как в вакууме возрастает опасность межвитковых пробоев. Футеровку ВИП выполняют теми же способами, что и футеровку открытых печей, но, учитывая особенности выплавляемых сплавов, для этой цели используют чистые материалы (корунд, плавленый магнезит, диоксид циркония).

Разработана серия индукционных сталеплавильных вакуумных печей (ИСВ) емкостью 0,16; 0,6; 1,0 и 2,5 и мощностью соответственно 200, 500, 1000 и 1500 кВт. Печи работают на токе повышенной частоты 1000 Гц (за исключением печи ИСВ—0,16, работающей на токе с частотой 2400 Гц). Удельный расход электроэнергии составляет за цикл в среднем 9600 кДж/кг (2,5 кВт·ч/кг), т. е. весьма высок за счет большого расхода электроэнергии вакуумной системой.

На рис. 154 показана серийная печь типа ИСВ-1,0-НИ, предназначенная для плавки высокачественных сталей и жаропрочных сплавов с отливкой слитка в вакууме. Рабочее давление в печи 0,13 Па. Загрузка шихты проводится

через шлюзовую загрузочную камеру, в которой помещается загрузочная корзина с шихтой, а введение необходимых легирующих добавок осуществляется с помощью дозатора. В верхней части камеры предусмотрена установка пирометра для измерения температуры металла, а также глядело к для наблюдения за операциями, проводимыми в камере. После завершения плавки печь наклоняют и разливают металл в изложницы, находящиеся на тележках внутри вакуумной камеры. Тележки имеют привод и могут пе-

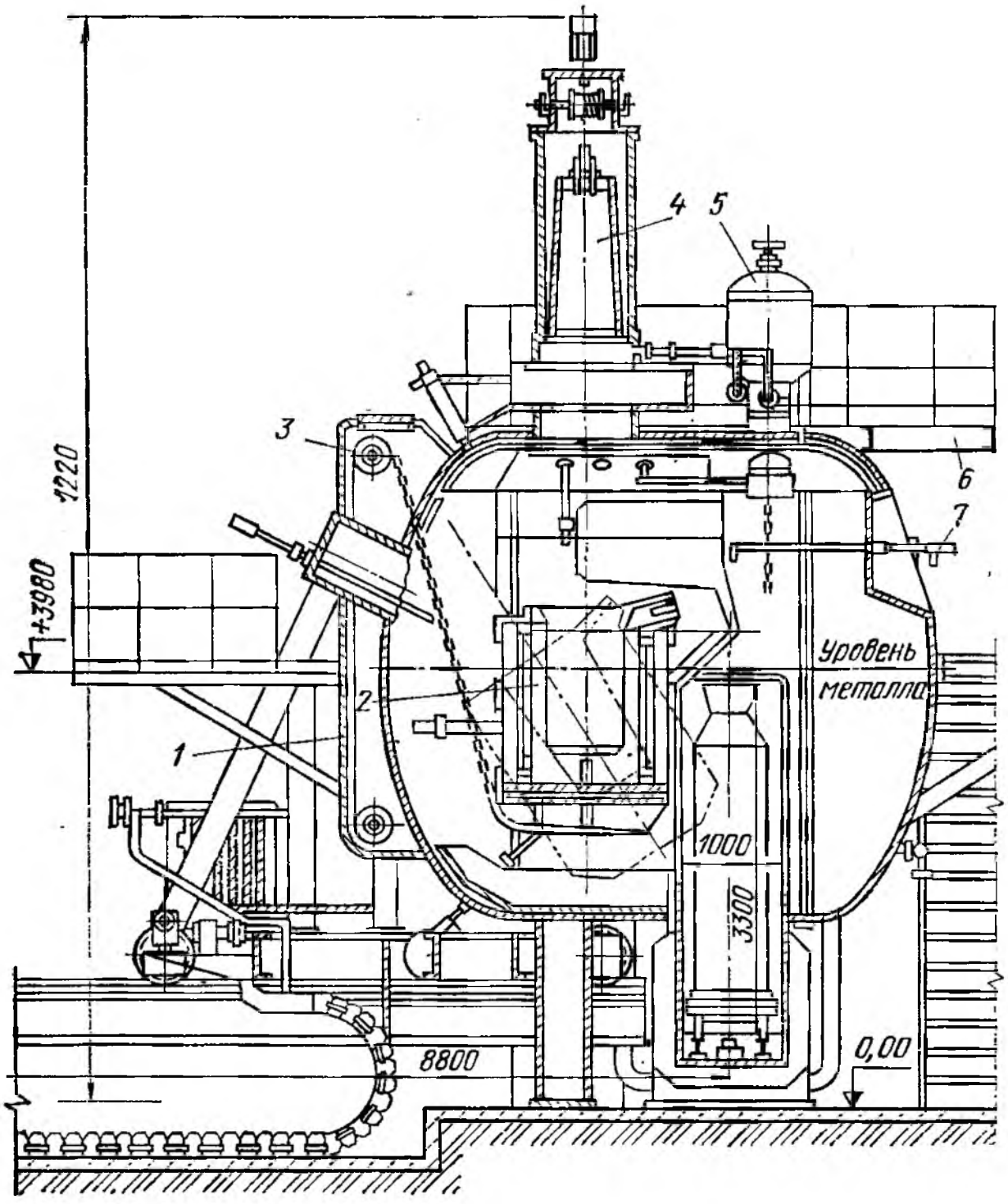


Рис. 154. Индукционная сталеплавильная вакуумная печь типа ИСВ-1,0-НИ:

1 — камера; *2* — тигель печи; *3* — механизм наклона печи; *4* — камера загрузки; *5* — дозатор; *6* — рабочая площадка; *7* — устройство для чистки сливного носка

ремещаться в камере. Изложницы извлекают из камеры после затвердевания в них металла.

Печи с железным сердечником

Плавильная индукционная печь с железным сердечником (рис. 155) состоит из футерованной рабочей емкости шахтного или барабанного типа, где сосредоточена основная масса металла, железного сердечника (магнитопровода) с индуктором и узкого канала, заполненного металлом. Если рассматривать эту печь как трансформатор с первичной обмоткой-индуктором, то канал играет роль одновитковой вторичной обмотки. Тепловыделение происходит в металле, находящемся в канале. Расплавленный металл вследствие разности плотностей, а также возникающих в нем электродинамических усилий циркулирует между каналом и шахтой печи, отдавая тепло находящемуся в ней металлу. Угар металла очень мал, так как нагрев до высокой температуры происходит в канале, изолированном от окружающей среды.

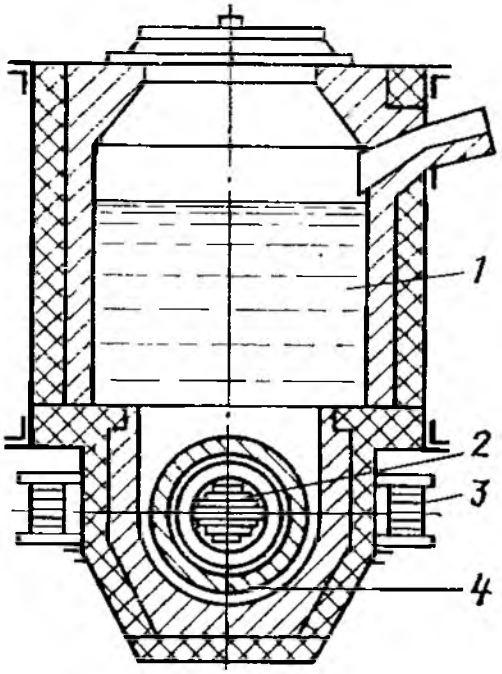


Рис. 155. Схема индукционной плавильной печи с сердечником:

1 — ванна с металлом; *2*—сердечник; *3* — индуктор; *4* — канал с металлом

Футеровка канала (подовый камень) работает в очень тяжелых условиях, поскольку интенсивное движение перегретого до высокой температуры металла приводит к ее разрушению. Футеровку подового камня выполняют обычно набивной по металлическому шаблону с последующим обжигом и спеканием непосредственно в печи; металлический шаблон при этом расплавляется. Для набивки используют массу на кварцитовой, магнезитовой и корундовой основах с применением в качестве связующих добавок огнеупорной глины, молотого стекла, борной кислоты и буры. Стойкость футеровки подового камня при плавке цветных металлов и сплавов составляет несколько тысяч плавок. При плавке чугуна, имеющего температуру разливки 1400—1450 °С, стойкость футеровки подового камня обычно не превышает 500 плавок.

Индуктор имеет обычно принудительное воздушное ох-

лаждение, осуществляемое при помощи вентилятора; иногда витки индуктора изготовляют из трубки и охлаждают водой.

Питание плавильных печей с железным наконечником проводится током промышленной частоты с напряжением 220—1000 В через автотрансформаторы, позволяющие регулировать подводимую к печи мощность. Для повышения $\cos\varphi$ в схему питания включают конденсаторы.

В индукционных печах с железным сердечником необходимо при сливе расплавленного металла часть его (20—30 % массы расплава) оставлять в печи с тем, чтобы канал был заполнен жидким металлом, т. е. чтобы была замкнута вторичная обмотка. Этот остаток называют «болото» и загрузку твердой шихты ведут порциями на поверхность расплава; постепенно весь металл, загруженный в рабочую емкость, расплавляется. Иначе нагреть шихту до плавления невозможно. Это обстоятельство очень затрудняет переход с плавки одного сплава на другой. Индукционные плавильные печи с сердечником имеют на 20—30 % более высокий к. п. д., чем индукционные тигельные, они значительно дешевле и занимают меньшую площадь. Однако низкая стойкость футеровки канала при высоких температурах также ограничивает область применения подобных печей, используемых в основном для плавки цветных металлов сплавов и чугуна и в качестве миксеров для чугуна, выплавленного в вагранках.

Разработан ряд серийных индукционных печей — миксеров с железным сердечником и каналом типа ИЧКМ, предназначенных для выдержки литейных чугунов, с емкостью 2,5—100 т, мощностью 400—2000 кВт, расчетной производительностью 6—50 т/ч.

Удельный расход электроэнергии невелик и составляет в среднем при выдержке чугуна в таких индукционных миксерах 240—140 кДж/кг.

Индукционные нагревательные печи

Индукционный нагрев металла для различных целей, начиная с нагрева перед обработкой давлением и кончая термической обработкой сортового проката и отливок является очень перспективным. Выделение тепла внутри самого нагреваемого металла позволяет обеспечить очень высокие скорости нагрева при минимальном образовании слоя оксидов на поверхности, без возникновения значительной разности температур по сечению и, следовательно, без термических напряжений. Возможность нагрева поверхностно-

го слоя металла создает предпосылки для поверхностной термической обработки, которая трудно осуществима при других способах нагрева.

В промышленной практике индукционные установки получили широкое распространение в кузнечном производстве для нагрева заготовок круглого или квадратного сечения диаметром (или стороной квадрата) от 15 до 150 мм до температуры 1200 °С. Выпускается серия кузнечных индукционных нагревателей типа ИН, работающих на токе повышенной частоты. Схема рабочего модуля, из которых собираются эти установки, показана на рис. 156 (без устройств для перемещения заготовок и роликов, устанавливаемых между индукторами для обеспечения транспортировки металла через нагреватель). Заготовки проходят через индукторы, которые представляют собой соленоиды. Сечение соленоидов в зависимости от сечения нагреваемых заготовок, круглое или прямоугольное. Соленоиды выполняются водоохлаждаемыми из медной трубки. Поверхность трубок защищается надежной электрической изоляцией и соленоиды заливаются в блоки из огнеупорного бетона. Внутри соленоидов устанавливаются водоохлаждаемые направляющие из немагнитной стали для перемещения заготовок с помощью толкателя. Нагревательные установки типа ИН собираются в секции из стандартных модулей, каждый из которых имеет длину индуктора 500 мм. Соединяя секции в группы последовательно и параллельно, получают необходимую производительность и мощность нагревательной установки. Производительность установок типа ИН составляет от 450 (1 модуль) до 10 000 кг/ч (20 модулей). При нагреве прутков диаметром 70—150 мм индукторы питаются током с частотой 1 кГц, диаметром 35—120 мм 2,4 кГц, диаметром 25—90 мм 4 кГц, диаметром 15—50 мм 10 кГц. Мощность одного модуля составляет 250 кВт.

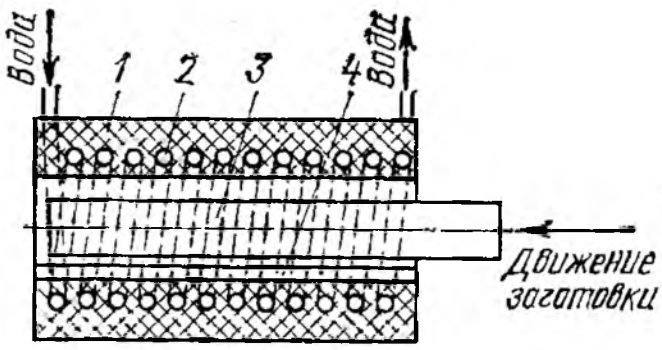


Рис. 156. Схема модуля индукционного нагревателя:

1 — огнеупорный бетон; *2* — трубка индуктора; *3* — заготовка; *4* — направляющие из немагнитной стали

Для подогрева трубных заготовок в станах теплой прокатки применяются индукционные нагревательные установки типа ОКБ-958, работающие на токе с частотой 8 кГц. В этих установках трубы диаметром от 32 до 108 мм с тол-

щиной стенок от 1,5 до 12 мм нагреваются до 400 °С. В зависимости от диаметра труб производительность составляет от 160 до 1200 кг/ч.

Для нагрева стальных слитков диаметром от 130 до 360 мм и длиной 420—700 мм перед ковкой (до температуры 1250 °С) предназначены установки серии ИНМ мощностью 1000—1300 кВт с производительностью 3—3,2 т. Эти установки питаются током промышленной частоты. Слитки перемещаются через три последовательно установленных индуктора с помощью толкателя. Между индукторами предусмотрены промежуточные рольганги с дополнительными толкателями.

Имеется опыт успешной эксплуатации установки индукционного нагрева слябов толщиной 300 мм перед их прокаткой на штрипсовом стане одного из зарубежных заводов.

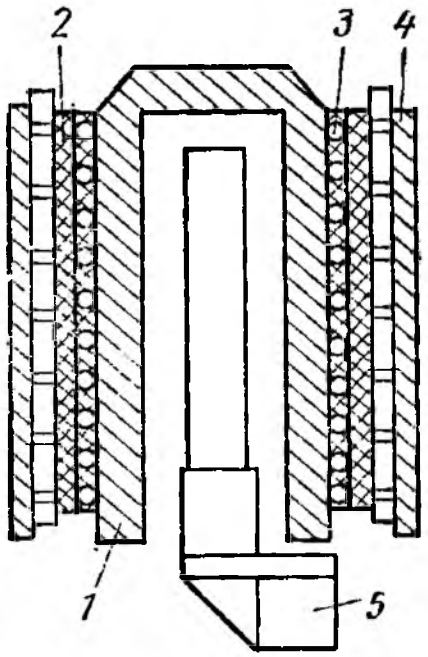


Рис. 157. Индукционная печь для нагрева слябов:

1 — огнеупорная футеровка; *2* — изоляционная прокладка; *3* — индуктор; *4* — рама; *5* — опорная балка

Нагрев осуществляется в трех последовательно расположенных индукционных камерах. Первая камера предназначена для передачи слябу максимального количества тепла в кратчайшее время и имеет наибольшую мощность. Во второй камере также происходит нагрев сляба, но она позволяет одновременно выдерживать его для получения равномерного прогрева по сечению и ее мощность в два раза меньше. Третья индукционная камера, мощность которой еще в два раза меньше, предназначена для выдержки металла.

В каждой из индукционных камер используется прямоугольная индукционная катушка, окружающая установленный на узкую грань сляб (рис. 157). Передача сляба из одной камеры в другую осуществляется при помощи тележек и индивидуальных подъемных механизмов, вводящих слябы через открытую нижнюю часть в каждую из нагревательных камер. Надежный контроль температуры в индукционной камере достигнут с помощью убирающейся контактной термопары.

Установка индукционного нагрева рассчитана на загрузку холодных, теплых и горячих слябов. Теплые слябы по-

ступают в нагревательные камеры с температурой 200—500 °С, горячие — с температурой 500—700 °С. Перед загрузкой слябов в индукционные камеры проверяют качество их поверхности и длину. Слябы поднимают затем на тележки и загружают на подъемный под, укладывая их на ребро. Выдача слябов для прокатки осуществляется из камеры выдержки. Весь комплекс операций от взятия из штабелей слябов, поступающих с машины непрерывного литья, и до выдачи их из установки на рольганг прокатного стана автоматизирован и находится под контролем одного оператора. Питание всех камер индукционного нагрева осуществляется током промышленной частоты через автотрансформаторы. В схеме питания предусмотрены конденсаторные батареи для коррекции $\cos\varphi$, который равен 0,85.

Установка такого типа для индукционного нагрева слябов, состоящая из шести параллельных линий (в каждой линии по три камеры), обеспечивает производительность до 600 т/ч. При количестве горячих слябов 20 %, теплых 60 % и холодных 20 % средний удельный расход электроэнергии составляет 1050 кДж/кг (0,29 кВт·ч/кг), а потери металла с окалиной не выше 0,5—0,8 % при практическом отсутствии обезуглероживания поверхности. Эти данные позволяют считать индукционный нагрев слябов вполне конкурентоспособным по отношению к нагреву в топливных печах, особенно в тех районах, где доступна дешевая электроэнергия и когда предъявляют повышенные требования к качеству нагрева и потери металла с окалиной жестко регламентируют.

Представляет несомненный интерес и комбинированный нагрев сравнительно тонких заготовок толщиной 70—100 мм, особенно из легированных сталей, для которых недопустимо образование окалины на поверхности. В этом случае нагрев до температур, при которых поверхность стали еще не взаимодействует активно с раскаленными продуктами сгорания (до 700—750 °С), осуществляется в обычных топливных методических печах, а окончательный нагрев до температуры прокатки (1250—1300 °С), когда поверхность стали подвергается интенсивному окислению и обезуглероживанию, проводится в индукционных нагревателях. Время достижения этой температуры меньше одной минуты. Такая технология нагрева позволяет резко снизить окалинообразование и поверхностное обезуглероживание стали и обеспечивает высокую степень гибкости работы всей системы. В случае снижения темпа работы стана

холодные заготовки пропускают только через индукционные нагревательные установки. В этом случае время их нагрева составляет около двух минут.

Индукционные нагреватели, используемые в этой установке, представляют собой простые соленоиды, сквозь которые (по оси) перемещают нагреваемые заготовки. Соленоиды выполняются из медной трубки и охлаждаются протекающей по ней водой. Питание индукторов осуществляется током частотой 3000 Гц от машинного генератора. Для уменьшения тепловых потерь от нагреваемых заготовок в окружающую среду предусматривается футеровка индукторов огнеупорными материалами.

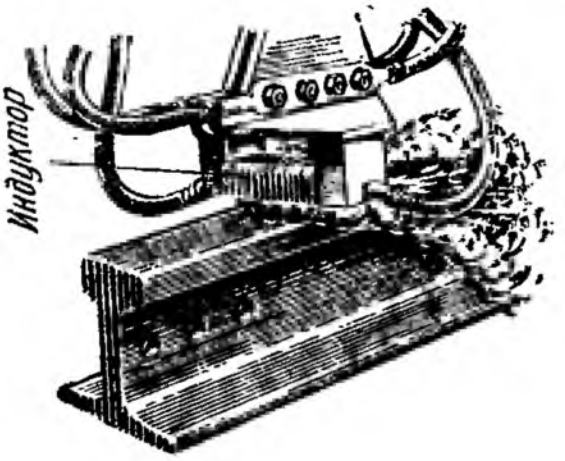


Рис. 158. Плоский индуктор для непрерывно-последовательного нагрева головки рельса

Индукционный нагрев в прокатном производстве находит также применение для промежуточного подогрева на сортовых многоклетьевых станах, где температура заготовки сильно снижается в процессе прокатки. Так, при начальном сечении заготовки 120×120 мм и конечном 36×36 мм установка между клетями стана индукционной нагревательной секции длиной 3 м и индукционной томильной секции длиной 2 м позволяет повысить в процессе прокатки температуру заготовки на 150—200 °С. Для этой цели требуется мощность индукционной установки около 600 кВт при частоте питающего тока 3000 Гц. Подаваемая мощность зависит от производительности стана. Включение индукционной установки производится автоматически по сигналу от фотоэлемента, установленного после 1-й клети стана. Конструкция индукторов аналогична описанной выше.

Индукционный нагрев получил очень широкое распространение для термической обработки различных деталей и проката, в частности, для поверхностной закалки, для которой он исключительно удобен и эффективен. Так, при производстве рельсов осуществляют поверхностную закалку их головок. Благодаря питанию индуктора током повышенной частоты возникает поверхностный эффект и плотность тока на поверхности металла оказывается выше, чем в середине. В результате нагрев головки рельса происходит неравномерно, и значительная часть мощности выделяется в поверхностном слое металла.

Для непрерывно-последовательной закалки головок рельсов применяют плоский индуктор, изготовляемый из медной трубки прямоугольного сечения и представляющий собой плоскую обмотку (рис. 158). Водоохлаждаемый индуктор, к которому подводится ток высокой частоты от генератора, равномерно перемещают вдоль рельса с помощью электромеханического привода. Ускоренное охлаждение нагретого участка поверхности закаливаемого рельса осуществляется обрызгиванием его водой, подаваемой через специальные отверстия в ребрах индуктора. Такая термообработка рельсов позволяет резко повысить их качество и увеличить срок службы.

§ 4. Печи сопротивления

Плавильные печи сопротивления

Плавильные печи сопротивления до недавнего времени не использовались при производстве черных металлов, поскольку сравнительно высокая температура плавления стали требует и высокотемпературных материалов для изготовления нагревательных элементов сопротивления, а самые жароупорные из них могут надежно работать до 1250—1350 °С. Только графитовые нагревательные элементы получили распространение в печах сопротивления косвенного действия (так называемых печах Таммана) для плавки черных металлов в лабораторных условиях.

Разработка Институтом электросварки им. Е. О. Патона АН УССР процесса электрошлакового переплава (ЭШП) стали и широкое внедрение этого процесса в промышленность создали основу для использования в черной металлургии плавильных печей типа сопротивления с жидким рабочим телом. Принцип действия ЭШП основан на расплавлении расходуемого электрода за счет тепла, выделяющегося при протекании электрического тока через электропроводную шлаковую ванну, в которую погружен электрод (рис. 159). При расплавлении электрода образуется лунка жидкого металла в верхней части слитка, затвердевающего в водоохлаждаемом медном кристаллизаторе. Для того, чтобы включить такую установку, либо заливают на дно кристаллизатора жидкий шлак, либо (реже) на поддон кристаллизатора помещают затравку (стальную пластину), и электрод, подлежащий переплаву, опускают и засыпают твердым шлаком. После этого подают напряжение, температура быстро возрастает и шлак плавится.

По мере расплавления шлака электрод приподнимают и режим стабилизируется. Тепло выделяется при протекании электрического тока через жидкий шлак, разогревая его до 1750—2000 °С. Происходят нагрев и оплавление электрода, погруженного нижним концом в шлаковый расплав. Оторвавшиеся капли металла, проходя через слой химически активного шлака, очищаются от серы, неметаллических и газовых включений.

Шлак также защищает образующийся слиток от контакта с атмосферой воздуха. Длина слитка постепенно растет по мере затвердевания расплава в кристаллизаторе. При этом на боковой поверхности слитка образуется тонкая шлаковая корочка, обеспечивающая изоляцию слитка от кристаллизатора и гладкую, не требующую затем обдирки его поверхность.

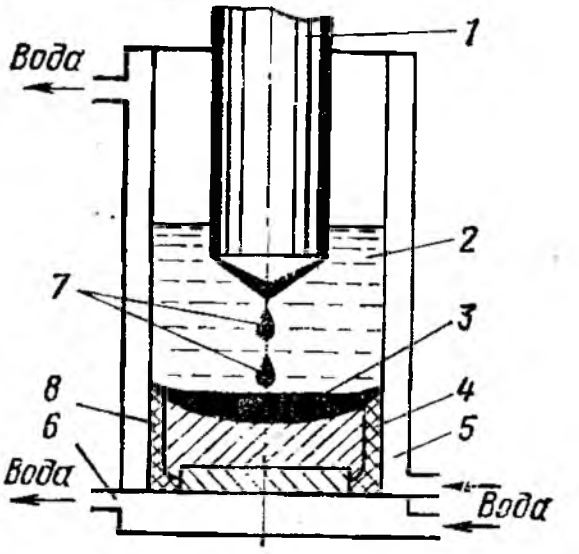


Рис. 159. Схема установки ЭШП:
1 — электрод; *2* — шлаковая ванна; *3* — лунка жидкого металла; *4* — слиток; *5* — кристаллизатор; *6* — поддон; *7* — капли металла, падающие с электрода; *8* — корка шлака на боковой поверхности слитка

Стабильное протекание процесса поддерживается с помощью автоматического регулятора, управляющего механизмом подачи расходуемого электрода в шлаковую ванну и изменяющего подводимое напряжение.

Таким образом, установка ЭШП в период стабилизированного режима работает как печь сопротивления, в которой рабочим телом служит слой шлакового расплава. В качестве шлака применяют смеси, состав которых зависит от технологии плавки. Основой этих смесей является CaF_2 с добавками Al_2O_3 и CaO.

Печи ЭШП питаются переменным током промышленной частоты через понижающие трансформаторы (преимущественно однофазные). При одноэлектродной однофазной схеме питания (рис. 160, *а*) ток подводится к электроду и поддону. Недостаток этой схемы проявляется по мере повышения мощности установки ЭШП, так как повышается индуктивность короткой сети, сопровождающаяся понижением коэффициента мощности (уменьшается $\cos\varphi$).

Для производства крупных слитков применяют двухэлектродные или бифилярные установки ЭШП (рис. 160, *б*), в которых ток подводится к двум расходуемым электродам.

При этом происходит одновременная плавка в одном кристаллизаторе двух изолированных один от другого электродов, которые присоединены к концам вторичной обмотки однофазного трансформатора. Цепь в этом случае также замыкается через расплавленный шлак, в котором выделяется тепло за счет протекания электрического тока. При этом $\cos\varphi$ повышается, а расход электроэнергии снижается.

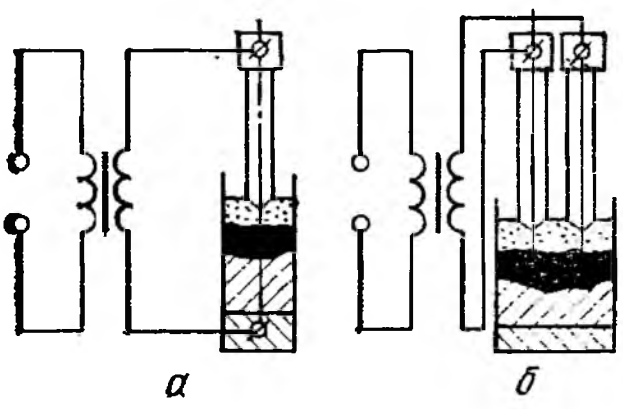


Рис. 160. Схема питания одноэлектродной (*а*) и двухэлектродной (*б*) установок ЭШП

Удельный расход электроэнергии в установках ЭШП весьма высок и составляет 4400—5850 кДж/кг (1,2—1,6 кВт·ч/кг), поскольку велики потери тепла с водой, охлаждающей кристаллизатор, и излучением от зеркала жидкого шлака, имеющего очень высокую температуру.

Таким образом, ЭШП как процесс плавки металла в водоохлаждаемом кристаллизаторе является несовершенным в теплотехническом отношении. Он оправдан в тех случаях, когда к слитку предъявляют очень высокие требования. Поэтому ЭШП используется для вторичного рафинирующего переплава высококачественных сталей. Посредством этого процесса получают слитки круглого (в том числе полые цилиндры), квадратного и прямоугольного сечений с массой до 160 т.

По сравнению с вакуумно-дуговым переплавом важным преимуществом ЭШП являются сравнительная простота его оборудования и значительно более низкая стоимость установки, а недостатком — меньшая степень очистки металла от газовых включений.

Нагревательные печи сопротивления

Нагревательные печи сопротивления уже получили широкое распространение в машиностроении, в основном для термической обработки деталей, где их применение оправдано возможностями точного обеспечения заданного температурного режима нагрева. Широкомасштабный характер производства в черной металлургии накладывает жесткие ограничения на величину затрат на нагрев металла. Поэтому большая часть металла подвергается нагреву пе-

ред обработкой давлением или с целью термообработки в топливных печах, где затраты на нагрев ниже, чем в электрических печах. Однако повышение требований, предъявляемых к качеству нагрева, стремление к снижению потерь металла за счет окисления, особенно дорогих легированных марок стали, необходимость осуществления некоторых видов термообработки в специальных атмосферах являются теми факторами, которые делают применение электронагрева в черной металлургии в ряде случаев целесообразным. Для этой цели используются различные печи прямого и косвенного действия.

Печи сопротивления прямого действия

Эти устройства применяют для нагрева сравнительно длинных и тонких заготовок перед прокаткой и ковкой. Они имеют следующие достоинства: исключительно малое время нагрева заготовки, в результате чего практически не происходит обезуглероживание и рост зерна; потери металла с окалиной ничтожны; низкий удельный расход электроэнергии; электроэнергия не требуется при остановках стана; нагревательная установка безынерционна и может быть включена в любое время; высокая производительность и хорошее соответствие требованиям автоматического управления; снижение трудоемкости и улучшение условий труда.

Поскольку в печах сопротивления прямого действия нагреваемое изделие включают непосредственно в питающую цепь через понижающий трансформатор и тепло выделяется в самом нагреваемом металле, этот метод нагрева может быть применен только для относительно длинных изделий, имеющих однородный состав и одинаковое сечение по всей длине. Только при этих условиях осуществим равномерный прогрев. Установлено, что применение прямого нагрева сопротивлением целесообразно, если длина заготовки превышает ее толщину (или диаметр) в 10 раз и более.

Так как тепло не подводится к нагреваемому телу извне, а выделяется в нем, разность температур по сечению в процессе нагрева очень мала и опасность термических напряжений не возникает. Поэтому скорость нагрева может быть выбрана большой, что позволяет достичь высокой производительности установок прямого нагрева. При высокой скорости нагрева тепловые потери малы, поэтому во многих случаях установки прямого нагрева могут быть выполнены без футеровки с сохранением достаточно высоких значений к. п. д.

Основной проблемой при осуществлении прямого нагрева является трудность создания надежных конструкций контактов, удовлетворительно работающих при больших значениях силы тока. При прямом нагреве возникают также трудности с измерением и регулированием температуры нагреваемых заготовок. Схематическое устройство печи сопротивления прямого действия показано на рис. 161.

Имеется опыт длительной успешной эксплуатации печи сопротивления прямого действия для нагрева заготовок сечением до 100×100 мм и длиной до 4 м перед прокаткой на проволочном стане. На этой установке нагревают в основном быстрорежущую сталь и сплавы с высоким содержанием никеля и хрома. Питание установки производится током промышленной частоты через понижающий трансформатор мощностью 4 МВА. Трансформатор и сменные контакты, в которых зажимается заготовка, охлаждаются водой. Зажим нагреваемой детали в контактах осуществляется при помощи пневматических или гидравлических цилиндров. Контроль за температурой нагрева заготовок ведут при помощи оптического пирометра, причем ток автоматически выключается по достижении заготовкой заданной температуры. Удельный расход электроэнергии составляет 900—1100 кДж/кг при производительности 6 т/ч. Производительность таких установок может достигать 50 т/ч.

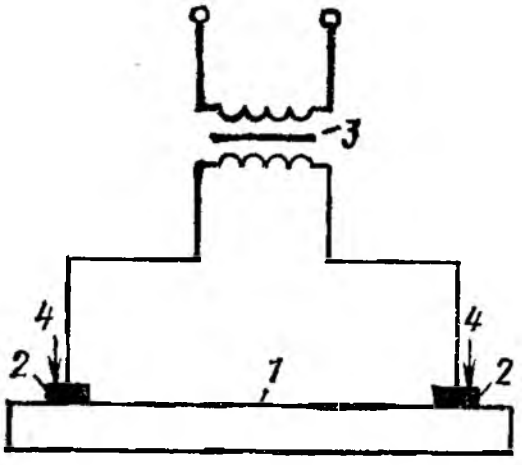


Рис. 161. Схема нагревательной печи сопротивления прямого действия:

1 — нагреваемая заготовка; *2* — контакты; *3* — питающий трансформатор; *4* — зажимы контактов

Печи подобного типа широко используются также в кузнечных цехах для нагрева перед ковкой заготовок удлиненной формы.

Печи сопротивления косвенного действия

Конструкции нагревательных печей сопротивления косвенного действия очень разнообразны. Их особенности обусловлены многими обстоятельствами, в первую очередь уровнем температуры в рабочей камере и характером работы печи — периодическим или непрерывным. Уровень рабочей температуры печи обусловливает выбор материала для нагревательных элементов, их выполнение и размещение в печной камере, а также наличие в низко- и средне-

температурных печах или отсутствие (в высокотемпературных) вентиляторов для интенсификации конвективного теплообмена.

В печах с температурой до 1250—1350 °С используются металлические нагревательные элементы сопротивления, выполняемые из специальной ленты или проволоки[1]. Из ленты делают зигзагообразные нагреватели, предназначенные для крепления на стенках, поду и своде. Проволочные нагреватели могут быть также изготовлены в виде зигзагов, укрепляемых на стенках, поду и своде печи. Эти нагреватели более надежны, чем часто изготовляемые из проволоки спирали. Обычно в промышленных печах для нагревателей применяют проволоку диаметром 3—7 мм. Спирали и зигзаги укрепляют на стенках и своде с помощью крючков или размещают на керамических полочках (на стенках), а на поду печи укладывают в специально предусмотренные пазы.

В печах с температурой до 1450 °С применяют карборундовые стержни (силитовые нагреватели), а при температуре до 1650 °С — U-образные элементы из дисилицида молибдена. Нагревательные элементы из карборунда и дисилицида молибдена сравнительно дороги и поэтому в высокотемпературных печах (с температурой 1300—1600 °С) находят также применение криптоловые нагреватели, представляющие собой молотый графит или кокс, засыпанный в желоб из карборунда.

Чем компактнее нагреватели, тем легче их разместить в печи, но тем больше их взаимное облучение и меньше степень эффективного использования поверхности. Поэтому устанавливают практически рациональные размеры проволочных ленточных нагревателей. Эти размеры выбирают так, чтобы обеспечить размещение нагревателей в печи и их достаточную жесткость, а также создать хорошие условия для передачи тепла от них к металлу. Исходя из этих же соображений (с учетом выбора размеров) принимают и условия размещения в печах силитовых нагревателей, элементов из дисилицида молибдена и криптоловых нагревателей. Расчет нагревательных элементов сопротивления рассмотрен во 2 томе этого учебника.

Как отмечено выше, конструкция печи во многом также обусловлена режимом ее работы, поскольку загрузка металла в рабочую камеру печи периодического действия

---

[1] Материалы для выполнения нагревательных элементов сопротивления описаны в главе V этого тома.

или его транспортировка через камеру печи непрерывного действия требуют совершенно различных устройств.

Ниже рассмотрены некоторые типы нагревательных печей сопротивления косвенного действия, применяемые в черной металлургии.

Печи периодического действия

Электрические нагревательные колодцы применяют для нагрева слитков качественной стали перед прокаткой. Колодцы выполняют как печи сопротивления косвенного действия с криптоловыми нагревательными элементами, в качестве которых используют карборундовые желоба, засыпанные прокаленным нефтяным коксом с размером кусков 15—50 мм. Удельная мощность такого нагревателя, отнесенная к единице его теплоотдающей поверхности, достигает 100 кВт/м^2, а максимальная рабочая температура равна 1500 °С. Поскольку электрическое сопротивление кокса зависит от температуры, то питание электрических колодцев осуществляется через трансформаторы с регулированием вторичного напряжения.

На рис. 162 показано устройство рабочей камеры электрического нагревательного колодца. Главное преимущество электрических нагревательных колодцев перед топливными — это небольшой угар металла, не превышающий 0,3 %, благодаря отсутствию окислительной атмосферы в рабочей камере. Кислород воздуха, просачивающегося в колодцы через неизбежные неплотности крышки, взаимодействует с раскаленным коксом, образуя оксид углерода и создавая тем самым газовую среду, защищающую сталь от окисления. Вследствие этого кокс в желобах постепенно выгорает и над желобами предусматриваются специальные отверстия для периодической подсыпки кокса. Расход кокса составляет 0,25—0,5 кг/т слитков.

Отсутствие потерь тепла с уходящими газами резко повышает тепловой к. п. д. электрических нагревательных колодцев по сравнению с топливными. Поэтому футеровку и тепловую изоляцию их рабочих камер выполняют гораздо более толстой, чем у топливных колодцев, с тем, чтобы сократить потери тепла через стенки.

В электрических нагревательных колодцах осуществляют нагрев слитков массой 3—18 т при общей садке 20—160 т в зависимости от размеров рабочей камеры. Удельный расход электроэнергии на нагрев металла зависит от температуры загружаемых слитков. Так, при подогреве слитков 5,5 т с начальной температурой 650 °С до темпе-

ратуры прокатки удельный расход тепла составляет около 300 кДж/кг (0,08 кВт·ч/кг), а с температурой 750 °С — около 75 кДж/кг (0,02 кВт·ч/кг). Потребление энергии при нагреве холодных слитков возрастает до 1300 кДж/кг (0,36 кВт·ч/кг). Поэтому электрические нагревательные

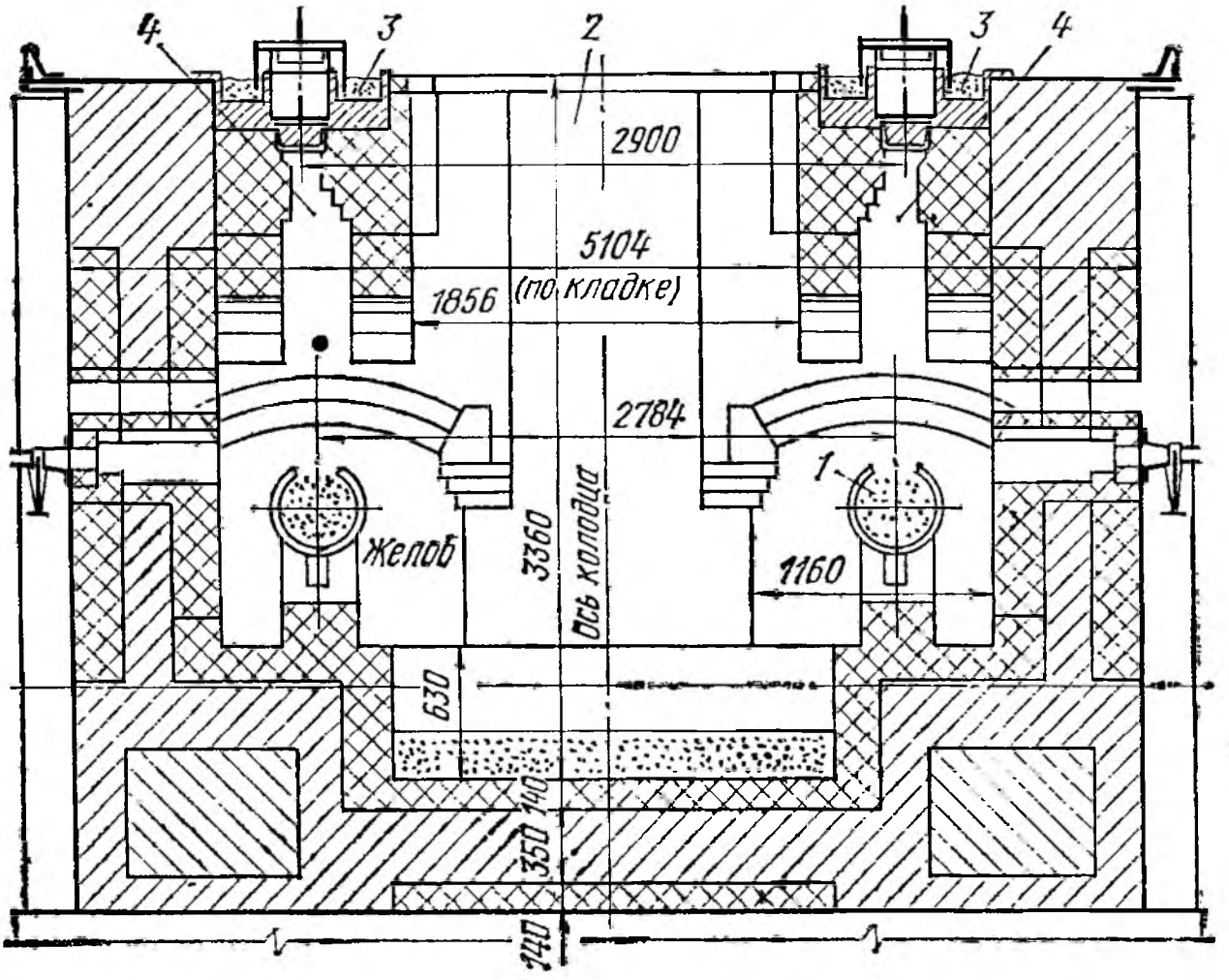


Рис. 162. Электрический нагревательный колодец:

1 — желоб-нагреватель; *2* — рабочее пространство; *3* — песочные затворы крышки; *4* — каналы для подсыпки кокса в желоба

колодцы наиболее эффективны для подогрева слитков горячего посада, поскольку в этом случае резко снижается расход электроэнергии — главный фактор, ограничивающий применение этих колодцев.

Сравнительный анализ стоимости нагрева слитков горячего посада в электрических колодцах и топливных колодцах с одной и двумя верхними горелками показал, что расходы на нагрев получаются сопоставимыми. Если учесть экономию металла, получаемую при снижении окалинообразования, то электронагрев слитков горячего посада оказывается экономически целесообразным и для рядовой стали. Однако, поскольку расход электроэнергии резко возрастает при снижении температуры посада слитков,

применение электрических нагревательных колодцев неэкономично по сравнению с топливными для рядовых слитков холодного посада и может быть оправдано только в случае нагрева очень дорогого металла, потери которого с окалиной и брак по нагреву должны быть сведены к минимуму.

Печи с выдвижным подом, используемые обычно для нагрева слитков и крупных изделий под термическую обработку, состоят из стационарной камеры нагрева, выдвижного пода и механизма перемещения пода. Нагреваемые слитки загружают на выдвинутый из печи под, представляющий собой футерованную платформу, с помощью крана. После загрузки под вдвигают внутрь рабочей камеры на время очередного цикла нагрева. Конструктивно эти печи мало отличаются от топливных печей с выдвижным подом, описанных в § 5, гл. VIII. Различие заключается лишь в том, что вместо горелок или форсунок на стенках и на своде стационарной камеры нагрева установлены металлические нагревательные элементы сопротивления. Нагреватели устанавливаются также и в выдвижном поду, что способствует боле высокой равномерности нагрева металла. Температура нагрева металла в этих печах составляет от 500 до 900 °С, садка достигает 60 т при мощности до 3600 кВт. В печах с рабочей температурой 700—800 °С предусматриваются сводовые циркуляционные вентиляторы, обеспечивающие интенсификацию конвективного теплообмена в рабочей камере и повышение равномерности нагрева всей садки. В печах с рабочей температурой 1000—1200 °С такие вентиляторы не устанавливают, а равномерность нагрева металла обеспечивается за счет правильного распределения мощности отдельных групп нагревателей, тепло от которых передается к поверхности металла преимущественно излучением.

Существенной особенностью электрических печей с выдвижным подом является более толстый слой тепловой изоляции на стенках и своде рабочей камеры, чем у топливных. Это обусловлено стремлением снизить потери тепла исходя из того, что затраты на генерацию того же количества тепла в электрических печах значительно выше, чем в топливных.

Колпаковые печи (аналогичные по принципу работы колпаковым топливным печам, описанным в гл. VIII, § 5), получили распространение для высокотемпературного отжига электротехнической стали, осуществляемого обычно в водородной атмосфере. Металл в этих печах нагревается в виде либо стоп, либо рулонов. Печь для отжига листовой

электротехнической стали в стопах показана на рис. 163. Она имеет следующие конструктивные элементы: стенд, на который загружаются стопы нагреваемого листового металла, закрываемый затем муфелем из жароупорной стали (под который вводится специальная атмосфера), и футерованный колпак прямоугольной формы с установленными на его внутренних стенках электрическими нагревателями сопротивления. После завершения нагрева и выдержки по заданному режиму колпак поднимают и переносят на другой стенд с подготовленной на нем садкой, а нагретый металл на первом стенде остывает под муфелем в атмосфере, предотвращающей его окисление и обезуглероживание. С учетом соотношения времени нагрева и выдерж-

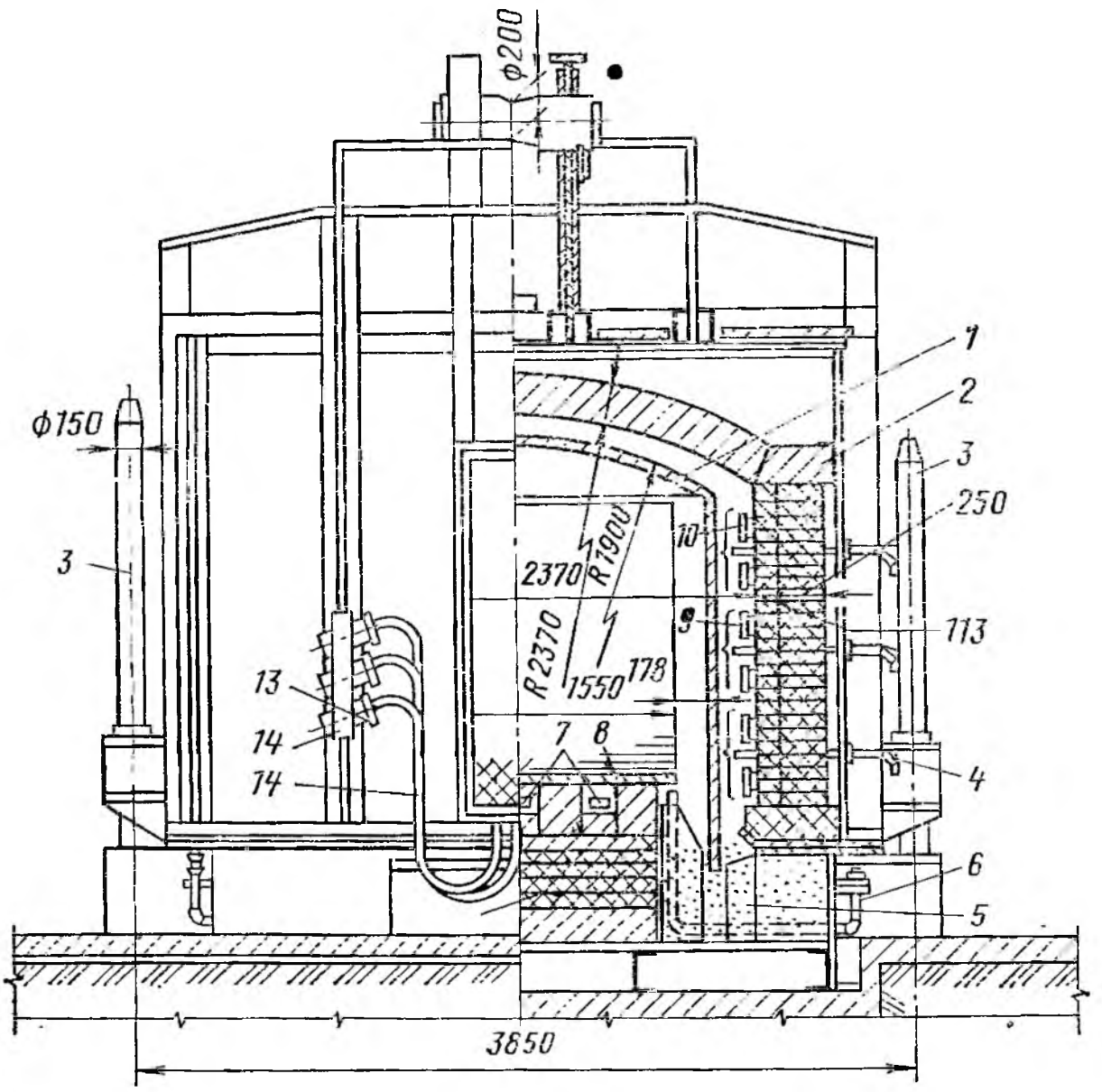


Рис. 163. Колпаковая электрическая печь для отжига листов электротехнической стали в стопах:

1 — муфель; *2* — колпак; *3* — фиксаторы колпака; *4* — термопара; *5* — песочный затвор; *6* — подвод защитного газа; *7* — нагревательные элементы в стенде; *8* — плита, закрывающая подовые нагреватели; *9*, *10* — нагревательные элементы на стенках колпака; *11* — футеровка стенда; *12* — токоподводы; *13*, *14* — контакты

ки ко времени остывания на один колпак приходится обычно два или три стенда. При этом (как во всех колпаковых печах) в каждом цикле отжига теряется лишь тепло, аккумулированное кладкой стенда, а тепло, поглощенное футеровкой колпака, сохраняется почти без потерь, так как при переносе колпака со стенда на стенд средняя по массе кладки температура не успевает существенно снизиться. Благодаря этому обеспечивается экономия энергии и снижается ее удельный расход, составляющий 1220—1400 кДж/кг (0,34—0,39 кВт·ч/кг).

В отличие от топливных колпаковых печей для отжига автолиста, в печи, показанной на рис. 163, не осуществляется принудительная циркуляция газа, так как пока не разработана конструкция вентилятора, надежно работающего при температурах порядка 1160 °С. Поэтому отжиг металла, загружаемого на стенд в виде стоп, протекает значительно дольше. Поскольку между листами, сложенными в стопу, находятся газовые прослойки, которые снижают теплопроводность садки в поперечном направлении в 30—40 раз по сравнению с теплопроводностью стали, то тепло к стопе следует подводить с боков. Исходя из этого, главные нагревательные элементы сопротивления расположены на стенках колпака, а вспомогательные — в поду стенда для предотвращения отвода тепла через кладку стенда и недогрева низа садки. Так же, как и в колпаковых печах для отжига автолиста, здесь для герметизации подмуфельного пространства используется песочный затвор.

При габаритах садки 1,5×2×6 м и ее массе до 100 т мощность печи составляет 570 кВт, а рабочая температура достигает 1200 °С.

Для отжига электротехнической стали в рулонах используются колпаковые электрические печи типа СГВ 16.20 и СГВ 20.12,5. Эти печи отличаются тем, что нагревательные элементы сопротивления установлены только на стенках колпака, а стенд выполнен с массивной футеровкой, но не обогреваемым. Муфель в этих печах не предусмотрен. В печи СГВ 16.20 на стенде размещают 6 рулонов массой до 7,5 т каждый в два ряда. Рулоны верхнего ряда устанавливаются на специальных подставках из хромоникелевой жаропрочной стали. В печи СГВ 10.12,5 на стенде устанавливают 4 рулона массой 11 т каждый в один ряд.

Печи СГВ 16.20 и СГВ 20.12,5 могут работать под вакуумом, с азотной и водородной атмосферой. Для уплотнения рабочего пространства предусмотрен двойной песочный затвор и вакуумное уплотнение из резиновой полосы,

размещенной в водоохлаждаемой канавке по периферии стенда. Кожух колпака выполняется сварным, что обеспечивает его газоплотность.

Нагревательные колпаки имеют прямоугольную форму. Футеровка стенда и колпаков выполняется из легковесного высокоглиноземистого кирпича. На стенках колпака установлены зигзагообразные нагревательные элементы из проволоки, разделенные на три зоны по высоте стен. Нижние зоны имеют мощность по 250—275 кВт, верхняя — 150 кВт.

Производительность печей СГВ 16.20 и СГВ 20.12,5 (по стенду) составляет 200—250 кг/ч, а удельный расход электроэнергии 2750 кДж/кг (0,75 кВт·ч/кг).

Печи непрерывного действия

Из большого числа разновидностей печей сопротивления непрерывного действия в черной металлургии нашли применение печи с роликовым подом (используемые для термической обработки толстого листа, прутков, труб и сортового проката, а также бунтов проволоки и рулонов) протяжные печи (используемые для термической обработки жести, полосы из углеродистой стали, электротехнической стали и др.).

Печи сопротивления с роликовым подом отличаются от рассмотренных в гл. VIII, § 5 топливных печей с роликовым подом (см. рис. 140, 141) в основном тем, что вместо горелок на их стенах и на своде устанавливаются электрические нагреватели сопротивления. При нагреве металла в защитной атмосфере (например при светлом отжиге шарикоподшипниковых заготовок в виде труб, бунтов проволоки и т. п.), печи с роликовым подом оборудуются загрузочной и разгрузочной шлюзовыми камерами. После загрузки изделий в загрузочную камеру из нее откачивается воздух, а после этого камера заполняется инертным газом или специальной атмосферой. Затем производится передача металла в камеры нагрева и выдержки. Шлюзование металла в загрузочной и разгрузочной камерах нарушает непрерывность движения изделий в печи. В связи с этим время цикла термообработки и, соответственно размеры печи при ее заданной производительности определяются не только требуемой длительностью нагрева, выдержки и охлаждения металла в рабочей камере печи, но и временем пребывания металла в шлюзовых камерах.

Ролики, работающие в тяжелых условиях, выполняют обычно из хромоникелевых жаропрочных сталей. Расстo-

яние между роликами обусловлено видом нагреваемых изделий; при нагреве коротких изделий оно составляет 1—2 диаметра ролика, а в печах для нагрева длинных изделий может быть доведено до 3—4 диаметров ролика, за исключением нагрева тонких листов или труб, когда возможно западание переднего торца нагреваемых изделий между роликами. Привод печного рольганга чаще всего выполняется групповым с помощью приводной цепи, звездочек, редуктора и электродвигателя. Подшипниковые узлы роликов (обычно охлаждаемые) оборудуются газоплотными коробками, в которые подается та же атмосфера, что и в рабочую камеру печи с тем, чтобы исключить образование в них газовоздушной смеси.

Удельный расход электроэнергии в роликовых нагревательных печах сопротивления колеблется в зависимости от вида термообработки и от производительности печи в пределах от 2750 до 4400 кДж/кг (0,75—1,2 кВт·ч/кг).

Протяжные печи сопротивления. Протяжные печи сопротивления косвенного действия, применяемые, как отмечалось выше, для термической обработки стальной полосы различного назначения и разной толщины, выполняются либо горизонтальными, либо вертикальными — башенного типа. В тех и других печах поддерживается неизменный во времени температурный режим, и лента, проходя последовательно через зоны нагрева, выдержки и регулируемого охлаждения, подвергается термической обработке по заданной технологии.

Протяжные горизонтальные печи представляют собой футерованные камеры, длина которых достигает нескольких десятков метров. Эти камеры снабжены роликовыми опорами для протягиваемой через них ленты, затворами в местах входа и выхода металла и электрическими нагревателями сопротивления, устанавливаемыми обычно на своде и на поду. Поперечное сечение камеры нагрева горизонтальной протяжной печи показано на рис. 164. Поддерживающие ленту ролики имеют водоохлаждаемые подшипниковые узлы и приводятся во вращение с помощью цепного привода. В случае работы такой печи с защитной атмосферой повышенные требования предъявляются к кожуху, который должен обеспечивать газоплотность и поэтому выполняется цельносварным.

Расстояние между опорными роликами в протяжных печах составляет 0,5—1,4 м в разных камерах. В зоне охлаждения устанавливаются трубы, охлаждаемые продува-

емым через них воздухом или водой. Скорость движения ленты достигает в этих печах 4 м/с, производительность до 30 т/ч, удельный расход электроэнергии при отжиге электротехнической стали (не учитывая ее расход на приводы) около 915 кДж/кг (0,25 кВт·ч/кг).

Повышение производительности горизонтальных протяжных печей ограничено возможностями увеличения их длины. Поэтому высокопроизводительные протяжные печи

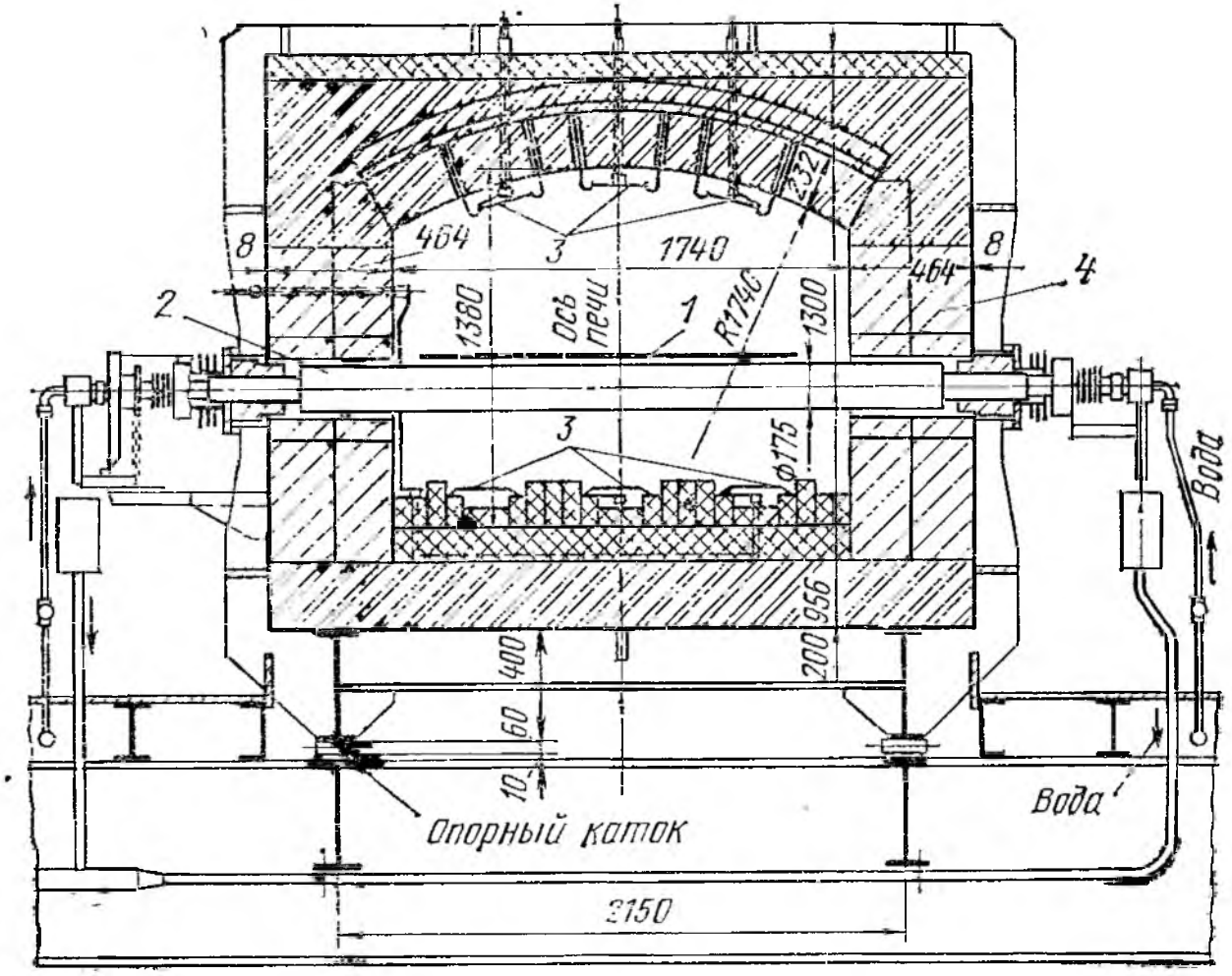


Рис. 164. Камера нагрева горизонтальной протяжной печи сопротивления:

1 — нагреваемая лента; *2* — поддерживающий ролик; *3* — нагревательные элементы; *4* — футеровка

выполняют с вертикальным ходом ленты, которая в процессе нагрева многократно меняет направление своего движения, обегая ряд роликов. Такие печи получили название башенных.

Башенные печи состоят обычно из трех секций: входной, печной и выходной. В печной секции полоса движется непрерывно с постоянной скоростью, достигающей 10 м/с. Входная и выходная секции отделены от печной петлевыми башнями, в которых накапливается запас полосы на те моменты ее остановки, когда осуществляется

сварка полосы (во входной секции) или ее разрезание и смотка в рулоны (в выходной) с тем, чтобы обеспечить непрерывное движение металла в печной секции.

Печная секция состоит из четырех камер: нагрева, выдержки, замедленного и быстрого охлаждения (рис. 165). В камере нагрева металл нагревается до 670—820 °С (в зависимости от марки стали и режима обработки).

Эта камера обогревается с помощью зигзагообразных элементов сопротивления, размещенных на ее стенках. Температура в камере нагрева составляет около 900 °С и время нагрева ленты толщиной 0,2—0,3 мм при этом около 15—20 с. Лента движется в этой камере последовательно через 6—12 проходов, вмещающих 100—200 м полосы.

Следующая по ходу металла — камера выдержки, температура в которой поддерживается около 700 °С с помощью таких же нагревателей. Металл находится в ней в течение 10—20 с (камера вмещает 120—170 м полосы), а затем попадает в зону замедленного охлаждения, где остывает до 450—500 °С в течение 15—25 с. Эта камера, вмещающая около 100—130 м полосы, снабжена как нагревательными элементами сопротивления (включаемыми при ее разогреве и остановках печи), так и воздухоохлаждаемыми трубами, отводящими тепло от металла при работе печи. Последняя по ходу ленты — камера ускоренного охлаждения, где металл остывает до температуры выдачи его из печи (около 50 °С). Ускоренное охлаждение осуществляется либо путем установки в этой камере водоохлаждаемых труб и вентиляторов для более интенсивного перемешивания защитного газа, либо посредством обдува поверхности ленты струями защитного газа, охлаждаемого в отдельных водяных холодильниках.

В качестве защитного газа используется азотно-водородная смесь. Скорость движения полосы в печной секции башенного агрегата составляет от 2 до 10 м/с, а его производительность от 25 до 60 т/ч. Общая длина полосы, находящейся единовременно в печи, 600—1200 м.

Кроме светлого отжига жести и полосы из электротехнической стали, башенные печи с защитной атмосферой применяют для термической обработки (в основном светлой закалки) полосы из нержавеющей стали толщиной 0,08—0,3 мм. Полосу нагревают до 1100—1150 °С, поддерживая в камере нагрева температуру 1300—1350 °С. Скорость движения полосы в этих печах достигает 20—30 м/с, произво-

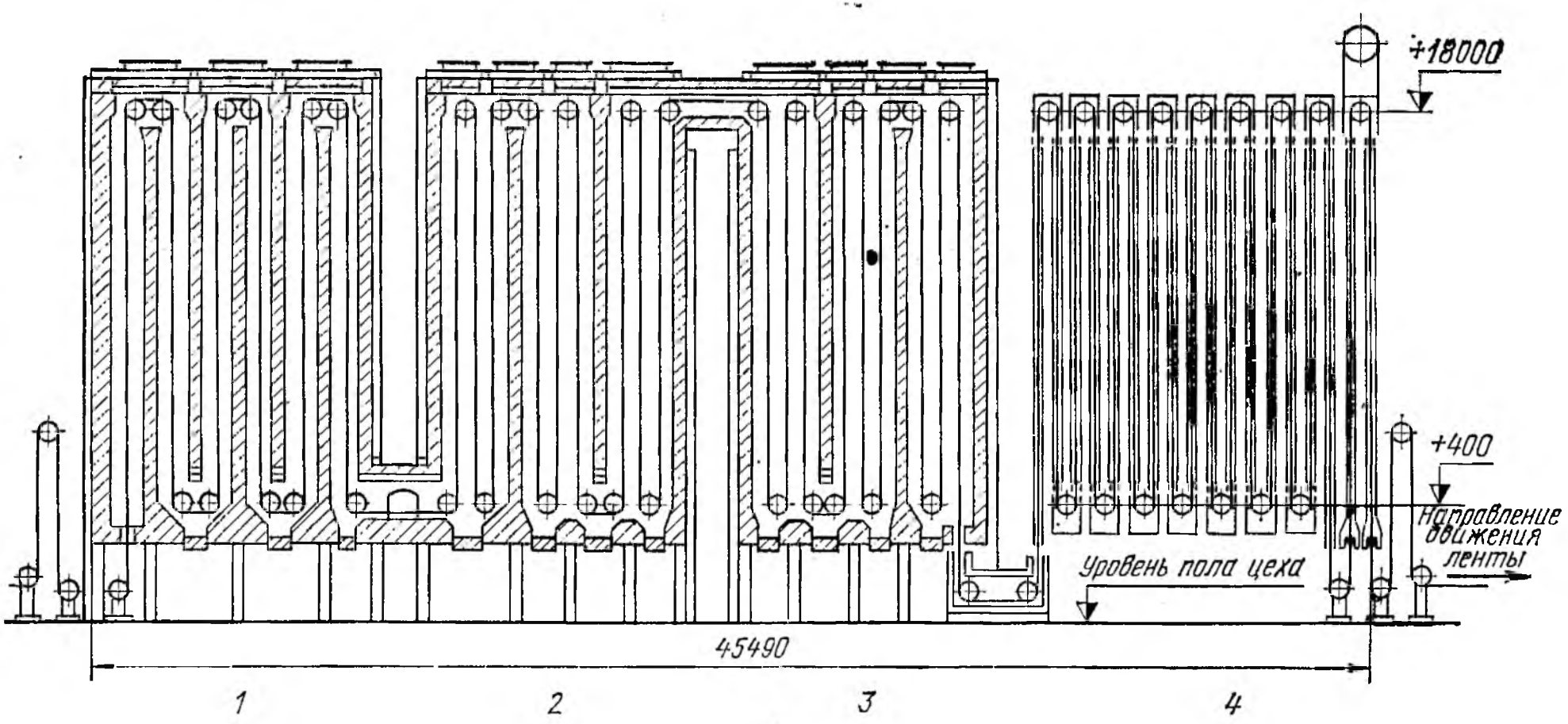


Рис. 165. Секция башенной печи для непрерывного отжига ленты:

1 — камера нагрева; *2* — камера выдержки; *3* — камера замедленного охлаждения; *4* — камера ускоренного охлаждения

дительность до 10 т/ч. В качестве защитной атмосферы применяют диссоциированный аммиак или чистый водород, которые подвергаются сушке.

§ 5. Электронно-лучевые печи

Электронно-лучевые печи (ЭЛП) находят применение тогда, когда требуется получить особо чистые тугоплавкие металлы и сплавы на их основе, а также специальные высоколегированные стали. В ЭЛП этому способствуют полное отсутствие каких-либо источников загрязнения металла и возможность почти неограниченного перегрева жидкого металла.

ЭЛП (рис. 166) состоит из вакуумной водоохлаждаемой рабочей камеры, внутри которой расположен водоохлаждаемый кристаллизатор. В кристаллизаторе формируется слиток, получаемый при расплавлении штанги переплавляемого металла, на конец которой направлен электронный луч. Электронный луч создается с помощью устройства, называемого электронной пушкой (см. гл. IX, § 1), она обеспечивает не только эмиссию электронов из катода, но и придает им ускорение, образует при помощи электромагнитных линз направленный луч и заставляет луч обегать (при помощи системы развертки луча) поверхность лунки жидкого расплава в верхней части кристаллизатора с целью обеспечения равномерности ее прогрева. Конструкцию электронной пушки, ее размещение в рабочей камере и взаимное расположение штанги переплавляемого металла и кристаллизатора выбирают так, чтобы электронный луч воздействовал на эту штангу и на поверхность лунки. При этом металл под дей-

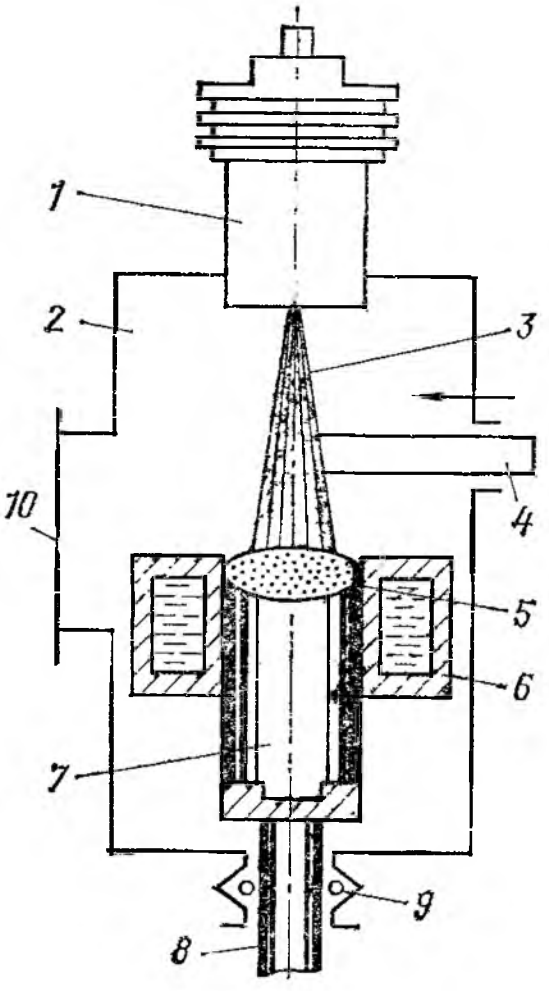


Рис. 166. Схема электронно-лучевой печи:

1 — электронная пушка; *2* — водоохлаждаемая рабочая камера; *3* — электронный луч; *4* — штанга переплавляемого металла; *5* — лунка жидкого металла; *6* — кристаллизатор; *7* — слиток; *8* — шток вытягивающего устройства; *9* — вакуумное уплотнение штока; *10* — люк для извлечения слитка

ствием нагрева за счет электронной бомбардировки расплавляется и стекает в кристаллизатор, где, застывая, образует слиток. Поверхность образующейся лунки также подвергается бомбардировке электронами и за счет этого может быть перегрета. Важно, чтобы катод электронной пушки не подвергался воздействию паров и брызг расплавленного металла, иначе срок его службы резко сокращается. Конструкция пушки предусматривает систему диафрагм, обеспечивающих защиту катода.

Рабочая камера имеет патрубок для присоединения к системе вакуумных насосов, создающих в рабочей камере разрежение 10^{-3}—10^{-1} Па. Электронная пушка также подвергается независимой откачке. По мере наплавления слиток специальным механизмом вытягивается из кристаллизатора. Шток механизма вытягивания проходит через уплотнение в рабочей камере. В стенках рабочей камеры предусматриваются смотровые устройства, защищенные толстыми стеклами.

В качестве источников питания ЭЛП применяют выпрямители различных конструкций.

Удельный расход электроэнергии в ЭЛП очень высок и достигает 1—2 кВт·ч/кг, поскольку здесь, так же как в установках ЭШП и ВДП, велики потери тепла с водой, охлаждающей кристаллизатор и рабочую камеру печи. Общий к. п. д. ЭЛП составляет 8—12 %. Созданы ЭЛП, позволяющие получить слиток до 100 т.

Экономичность ЭЛП резко возрастает с увеличением их размера и мощности, что позволяет проводить в них не только переплав тугоплавких и высокореакционных металлов, но и качественных сталей. При этом стоимость переплава в ЭЛП может быть сравнимой со стоимостью переплава в ВДП, а металл получается более высокого качества. Однако дороговизна и сложность установки ЭЛП являются фактором, сдерживающим широкое применение этих печей.

Глава X ПУСК, ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ ПЕЧЕЙ

§ 1. Пуск и разогрев печей

Последовательность операций при пуске и разогреве печей определяется техникой безопасности и необходимостью повышать рабочую температуру в печи с такой скоростью, которая диктуется назначением печи и видом огнеупорных материалов, из которых печь выполнена. Эти

операции следующие: подготовка к зажиганию печи, зажигание печи и разогрев печи.

Подготовка к зажиганию печи начинается с тщательного осмотра печи и очистки печи от строительного мусора. Вслед за этим выполняется сушка печи. Различные виды растворов, которые применяют для выполнения огнеупорной кладки, содержат влагу. Если не выполнить предварительную сушку печи, то при резком подъеме температуры вода начнет интенсивно испаряться, что приведет к растрескиванию кладки.

Сушку выполняют воздухом и дымовыми газами. Начинают с сушки воздухом, для чего открывают все заслонки печей и поднимают шибер в крайнее положение, обеспечивая тем самым движение воздуха в рабочем пространстве и других элементах печи. Сушка воздухом продолжается несколько дней, после чего переходят к сушке печи дымовыми газами. Сушке необходимо подвергать не только рабочее пространство печи, но и такие ее элементы, как борова, дымовая труба и др. Поэтому нужно, чтобы было обеспечено движение дымовых газов во всех этих элементах, т. е. труба должна создавать определенную тягу. Для создания такой тяги в дымовой трубе или в борове перед трубой разводят костер, который поддерживают до тех пор, пока не будет обеспечена достаточно устойчивая тяга. Через некоторое время после того, как появится тяга, разводят костер в рабочем пространстве печи, стараясь заполнить все рабочее пространство дымовыми газами. Сушка дровами продолжается до тех пор, пока температура в печи не превысит 973 К. При использовании газообразного топлива печь можно протопить газом, сжигая его без принудительной подачи воздуха. При этом необходимо следить за тем, чтобы горелки не погасли, так как при этом может возникнуть взрывоопасная гремучая смесь.

После того, как температура в печи превысит 973 К и необходимая тяга будет обеспечена, переходят к зажиганию печи, т. е. на отопление печи проектным топливом.

Зажигание печи должно проводиться с соблюдением определенных правил с целью избежания возможных взрывов. В настоящее время практически все печи работают на жидком или газообразном топливе. Перед зажиганием таких печей необходимо:

1) проверить печь, чтобы исключить всякую возможность непредвиденного скопления газа в каких-либо элементах объема печи или скопления мазута на поду или в других местах печи;

2) проверить состояние устройства для сжигания топлива, трубопроводов и задвижек (кранов), установленных на трубопроводах;

3) обеспечить установку форсунок и горелок точно по оси горелочного отверстия;

4) плотно закрыть все задвижки и вентили на мазутопроводах, газопроводах и воздухопроводах, так как в дальнейшем их следует открывать в строго установленном порядке.

Разогрев печи до рабочей температуры постепенным увеличением расхода топлива проводится по определенному графику, зависящему от конструкции печи, вида и объема огнеупорного материала, из которого выполнена печь.

Так, печь с кладкой из динасового кирпича разогревают по следующему графику:

Температура печи, °С . .	<150	150—300	300—650	>650
Скорость нагрева кладки, °С/ч	5—10	10—20	20—40	40—50

Этот график разогрева связан с полиморфными превращениями, происходящими в SiO_2 с изменением его температуры. Поэтому мар-

теновские печи с хромомагнезитовым сводом разогревают быстрее, чем печи с динасовым сводом. При сушке и разогреве печи должна быть обеспечена необходимая равномерность прогрева всего объема кладки. Скорость сушки и разогрева зависит от общего объема кладки печи, что может быть проиллюстрировано данными, приведенными в табл. 23.

Таблица 23. Допустимая скорость сушки и разогрева нагревательных печей с разным объемом футеровки из шамота

Объем футеровки, м³	Допустимая скорость сушки °С/ч, при температуре печи	
	<300°С	>300°С
<20	25	60
<50	20	50
<100	15	35

Устойчивая работа форсунок и горелок в первую очередь зависит от температуры в непосредственной близости от их выходного отверстия. Горение устойчиво лишь тогда, когда эта температура превышает температуру воспламенения топлива. Для обеспечения воспламенения топлива вначале, при еще недостаточно прогретой поверхности горелочного кирпича (туннеля), необходимо использовать запальники. Обычно в качестве таких запальников используют пруток, обмотанный на конце ветошью, смоченной в мазуте, или свечку газообразного топлива.

Форсунки вводят в действие поочередно. До ввода форсунки в действие перед ее устьем помещают зажженный факел. После этого в форсунку подают небольшое количество воздуха, затем небольшое количество мазута. Создав таким образом небольшое, устойчивое пламя, постепенно его увеличивают. Затем поочередно зажигают другие форсунки.

При пуске горелок на горящий запальник сначала пускают газ и обеспечивают небольшое устойчивое пламя, а после этого начинают понемногу подавать воздух. Увеличивая расход газа и воздуха, обеспечивают желаемый размер пламени. Горелки также разжигают поочередно.

При зажигании форсунок и горелок не следует стоять близко к отверстию для поджигания и тем более нельзя смотреть в него.

Если нужно выключить форсунки или горелки, то все операции, естественно, выполняют в обратном порядке. При выключении форсунки сначала отключают мазут, а потом воздух, при выключении горелки сначала отключают воздух, а потом газ. После того, как введены в действие форсунки и горелки, начинается разогрев печи.

При разогреве надо строго следить за расширением кладки, особенно свода печи. Поперечные связи каркаса печи должны быть хорошо затянуты еще до снятия опалубки свода. По мере нагрева кладки и роста свода поперечные связи постепенно отпускаются.

§ 2. Эксплуатация печей и уход за ними

В процессе эксплуатации за печами должен быть обеспечен необходимый уход с целью увеличения срока службы и повышения качества работы печей. Из изложенного выше следует, что основными частями печного агрегата являются: система отопления печи, рабочее пространство печи, устройство для утилизации тепла отходящих дымовых газов, арматура и механизмы печи.

За всеми этими частями в процессе эксплуатации печей должны осуществляться необходимые наблюдения и контроль. Своевременно принятые меры по устранению отдельных неполадок — залог длительной и эффективной эксплуатации печей.

Наблюдение за нормальной работой системы отопления печей включает следующее:

1) чтобы горелки и форсунки работали равномерно, топливо и воздух равномерно распределялись по горелкам и форсункам;

2) чтобы не было подтекания мазута в форсунках, проскока и отрыва пламени в горелках;

3) чтобы все отсечные устройства были в порядке и достаточно плотно перекрывали трубопроводы топлива и воздуха;

4) чтобы печь всегда была обеспечена достаточной тягой; для этого не допускать возможности подсоса холодного воздуха в борова и дымоотводящие каналы, в результате чего может снизиться температура дымовых газов у основания трубы и уменьшиться создаваемая ею тяга;

5) чтобы поддерживалось требуемое давление в печи, предотвращающее подсос холодного воздуха из атмосферы цеха и выбивание дымовых газов из окон печи; подсос холодного воздуха приведет к перерасходу топлива и ухудшит тягу, а выбивание дымовых газов отрицательно сказывается на работе механизмов и стойкости арматуры печи.

Рабочее пространство печи — ответственная часть печного агрегата, работающая в наиболее сложных температурных условиях.

В сталеплавильных печах наиболее ответственными частями кладки рабочего пространства являются под, часть стен печи, омываемых расплавленными металлом и шлаком, и свод. За всеми этими элеметами кладки сталеплавильных печей необходимо тщательное наблюдение. Подина и нижняя часть стен печи в небольших размерах изнашиваются в течение каждой проведенной плавки. Поэтому между плавками необходимо устранять эти неисправности, т. е. проводить заправку подины и откосов огнеупорным порошком во избежание преждевременного износа подины. Небрежность и недостаточная тщательность в уходе за подиной сталеплавильной печи могут служить причиной серьезной аварии — прорыва пода, «ухода» жидкого металла из печи.

Свод сталеплавильной печи выдерживает воздействие весьма высоких температур и подвержен воздействию брызг шлака и металла. Поэтому необходимо тщательно следить за его состоянием и степенью износа, так как известны случаи, когда, например, в мартеновских печах частично или даже полностью обрушивается свод на расплавленную ванну металла с шлаком. Когда толщина свода уменьшается до критического размера, тогда печь останавливается на холодный ремонт с полной заменой свода. Однако в процессе эксплуатации свода возможно возникновение отдельных неплотностей и прогаров, которые необходимо немедленно ликвидировать, поскольку они могут явиться очагами прогрессирующего разрушения свода. Подобный текущий ремонт свода, а часто и некоторых других элементов кладки выполняют без остановки печи в горячем состоянии.

В нагревательных печах наиболее уязвимой частью кладки печи являются ее подина, подверженная действию окалины и истирающему воздействию перемещающегося металла.

Обобщая вопросы, относящиеся к службе огнеупорной кладки во всех, без исключения, нагревательных печах, необходимо отметить, что в процессе эксплуатации печей надо непрерывно следить за плотностью огнеупорной кладки печи с тем, чтобы вовремя устранять возникшие неплотности и прогары, которые могут явиться причиной основательного разрушения кладки и выхода из строя элементов арматуры и механизмов печи.

Для устранения возникающих неплотностей и прогаров часто применяют метод торкретирования. Сущность торкретирования состоит в том, что на разрушенные места кладки наносится увлажненная зернистая

масса равномерными слоями с помощью специальных машин. Торкретмасса машиной обычно подается на поверхности кладки сжатым воздухом.

При горячем торкретировании обычно используют тонкозернистые материалы, при холодном — крупнозернистые. Торкретированием можно ремонтировать наружные и внутренние поверхности как в холодном состоянии, так и при высоких температурах. Толщина торкрет-слоя, который наносится за один прием, не должна превышать 10—30 мм во избежание обвала массы. С помощью торкретирования можно ликвидировать не только образовавшиеся прогары в кладке, но и восстановить полностью отдельные элементы печей.

§ 3. Ремонт печей

Для того чтобы не нарушалась работа предприятия, необходимо планировать ремонт всех видов оборудования, в том числе и печей. С этой целью осуществляется система планово-предупредительных ремонтов.

Сущность системы планово-предупредительных ремонтов состоит в том, что проведение ремонтов предусматривается не от случая к случаю, а в плановом порядке, чем предотвращается внезапный выход печи из строя, так как предупредительные ремонты проводятся до того, как те или иные элементы печи будут иметь предельно допустимый износ.

Промышленные печи по конструкции различны. В связи с этим схемы проведения ремонтов, порядок и способы выполнения работ, применяемые механизмы и приспособления отличаются друг от друга и оказывают влияние на трудовые затраты и общую продолжительность ремонта. При ремонте печей некоторые работы выполняют до начала ремонта или вообще вне зоны ремонта, например, сборка отдельных узлов и надвижка их целиком.

Ремонты печей проводятся в условиях высоких температур. Наличие высоких температур при производстве горячих ремонтов вызывает необходимость применения средств защиты от воздействия теплоизлучения (устройство экранов из металлических листов и каркасов, обшитых асбестом, кладка заградительных стен и пр.) и особых инструментов (длинных клещей, специальных лопаток и т. п.).

Печным ремонтным работам присущи технически неизбежные перерывы в работе, что обусловливается ведением ремонтных работ в несколько ярусов, а также применяемыми методами разрушения старой кладки. Такие перерывы неизбежны, когда необходимо выполнить два или несколько видов работ на одном участке или на смежных участках, в то время как фронт работ или условия техники безопасности не позволяют осуществить такое совмещение. Например, устройство опалубки главного свода в мартеновской печи и методических печах вызывает перерывы в производстве огнеупорных работ в рабочем пространстве.

Специфическим для ремонта металлургических печей является проведение взрывных работ для разрушения старой кладки, металлического козла или разработки шлаков в шлаковиках.

Для соблюдения правил техники безопасности взрывные работы проводятся при полном прекращении всех других ремонтных работ и удалении рабочих в безопасное место.

В действующем цехе неизбежно возникают периодические кратковременные перерывы в выполняемых основных и обслуживающих процессах: выпуск плавок, перемещение шлаковых и сталеразливочных ковшей, движение составов с мульдами и т. д.

С целью проведения ремонтов в наиболее короткие сроки необходимо предусматривать:

1) заблаговременную и тщательную подготовку к ремонту, максимальную механизацию операций по разработке и удалению старой кладки и подаче на рабочее место материалов для ремонта;

2) соответствующую подготовку поверхностей оставляемой старой кладки для сопряжения с новой;

3) максимальную многоярусность работ по кладке и максимальное совмещение одновременно выполняемых работ;

4) сосредоточение максимально возможного числа огнеупорщиков по всему фронту работ в соответствии с сетевыми графиками.

Ремонты металлургических печей подразделяют в соответствии с их назначением. Так, ремонты доменных печей подразделяют на текущие (профилактические) и капитальные; ремонты мартеновских печей — на горячие, холодные и капитальные; ремонты нагревательных печей (включая колодцы) — на текущие (профилактически), средние и капитальные.

Текущий ремонт доменных печей обычно проводят два раза в год с остановкой на 24 ч или один раз в год с остановкой на 36 ч. Во время этих остановок выполняют мелкий ремонт оборудования или заменяют отдельные узлы и детали, устраняют неплотности в кожухе печи, газопроводах, воздухопроводах и др.

Капитальный ремонт доменных печей может быть трех видов:

1. Капитальный ремонт, сопровождаемый заменой всей футеровки печи и полным удалением козла. Во время ремонта заменяют засыпное устройство, чугунную и шлаковую летки, фурменные приборы, отсечные и атмосферные клапаны, перекладывают футеровку камер горения, ремонтируют стены и купола воздухонагревателей, частично или полностью заменяют насадки, ремонтируют или заменяют электрооборудование и контрольно-измерительные приборы и выполняют другие работы.

2. Капитальный ремонт, сопровождаемый заменой только футеровки шахты и фурменной зоны. Одновременно заменяют отдельные конструктивные элементы кожуха шахты и площадок печи, полностью или частично заменяют холодильники шахты, защитные сегменты, засыпной аппарат, ремонтируют воздухонагреватели, пылеуловители и коммуникации печи, ремонтируют или заменяют механическое, электрическое оборудование и контрольно-измерительную аппаратуру.

3. Капитальный ремонт, сопровождаемый заменой засыпного аппарата и защитных сегментов, частичным ремонтом арматуры воздухонагревателей и пылеуловителей, ремонтом механического и электрического оборудования печи.

Горячие ремонты мартеновских печей, как правило, проводят один—два раза в кампанию. Во время ремонта проводят частичный ремонт свода рабочего пространства, восстанавливают кладку воздушных торцов, исправляют верхние ряды воздушных перевалов и выполняют мелкий ремонт оборудования печи.

Холодные ремонты мартеновских печей включают операции, при которых полностью сменяют свод печи, частично заменяют заднюю стену и перевалы, меняют столбики передней стены рабочего пространства, меняют стены головок до уровня рабочей площадки и кладку газовых пролетов, выбивают шлак из шлаковиков, ремонтируют наружную обмуровку кессона, кладку защитных стен и перегородок шлаковиков, меняют верхние ряды насадки регенераторов до уровня заводского пола, ремонтируют верх перевальной стены, чистят борова, проводят ревизию механизмов, обслуживающих печь.

При капитальном ремонте мартеновской печи выполняют следующие работы: заменяют всю огнеупорную кладку верха и низа печи (включая подину), футеровку газоходов и боровов, капитально ремонтируют дымовые трубы, металлоконструкции арматуры и крепления рабочего пространства, шлаковиков и регенераторов, перекидные устройства, механизмы, электрооборудование и контрольно-измерительную аппаратуру, капитально ремонтируют рабочую площадку и канаву, капитально ремонтируют или заменяют коммуникации (в том числе и подземные): газа, пара, воды и воздуха, дренажные устройства, фундаменты под устои шлаковиков и регенераторов и другие вспомогательные сооружения печи.

Ремонты нагревательных колодцев и нагревательных печей разделяют на текущие (профилактические), средние и капитальные. Капитальные ремонты колодцев выполняют через 5 лет, средний через 2,5 года и текущий ремонт стен ячеек колодцев через 6 мес. Капитальный ремонт методических печей выполняют через 1,5 года, в течение этого периода проводят один средний ремонт.

Все другие печи металлургических заводов ремонтируют также в соответствии с графиком планово-предупредительных и капитальных ремонтов, причем затраты на текущие ремонты относят на себестоимость продукции. Капитальные ремонты проводятся за счет амортизационных отчислений, а реконструкция печей — по смете капитального строительства.

§ 4. Техника безопасности при эксплуатации печей

Топливные печи

Техника безопасности на печах должна соблюдаться при пуске и эксплуатации печей. Во избежание хлопков и взрывов при розжиге печей необходимо придерживаться соответствующих правил и определенной последовательности операций. Начинать надо с проверки надежности отключения печи от цеховой газовой сети, т. е. с тщательного осмотра отсечных устройств. Если газопроводы длительное время были без газа или разбирались для ремонта, то их следует испытать на плотность, а затем продуть газом. После окончания продувки необходимо проветрить топки печей и приступить к зажиганию в том порядке, который описан выше.

При эксплуатации печей требования техники безопасности имеют конкретный характер и определяются конструкцией и назначением печи.

В мартеновских печах, например, возможны следующие основные виды опасности: ожоги при выбивании пламени, выброс шлака и металла из печи, ожоги и взрывы при прорыве металла через пороги завалочных окон, через подину и выпускное отверстие печи, взрывы крышек завалочных окон, ожоги брызгами при вскрытии выпускного отверстия.

Необходимо внимательно следить за состоянием свода с тем, чтобы исключить возможность обвала свода во время эксплуатации печи. Для осмотра и ремонта главного свода и головок печи необходимо пользоваться площадками с перилами. Становиться непосредственно на свод недопустимо.

Чтобы избежать прорыва металла через подину, надо тщательно следить за ее состоянием и своевременно проводить ее подварку и заправку.

При эксплуатации мартеновских печей, отапливаемых газообразным топливом, необходимо уделять внимание газоплотности перекидных

устройств. Низкая газоплотность перекидных устройств может явиться причиной просачивания газа, отравления и взрывов.

При эксплуатации мартеновских печей необходимо предусматривать максимально возможную защиту рабочих от теплового излучения, для чего со стороны задней стенки и головок применяют водные или щитовые экраны.

В конвертерах с продувкой кислородом сверху, которые находят наибольшее распространение, кислородную фурму необходимо надежно защищать от попадания на нее масла. Чистку кислородных фурм от настылей шлака проводят в перерывах между плавками, находясь на специальной площадке с перилами. Во избежание ожогов при продувке плавки пребывание рабочих вблизи конвертера и под рабочей площадкой недопустимо. Для защиты от теплового излучения при измерении температуры металла термопарами погружения нужно применять защитные экраны. При сливе шлака надо внимательно следить за тем, чтобы в шлаковые ковши не попала вода. Шлак следует сливать спокойной струей, избегая его разбрызгивания.

В связи с большими тепловыделениями необходимо уделять внимание аэрации цеха, для чего в первую очередь надо обеспечить доступ свежего воздуха на рабочую площадку. Наряду с аэрацией здания нагревательных колодцев необходимо также обеспечивать хорошее проветривание шлакового туннеля.

Обслуживающий персонал нагревательных печей прокатных станов должен остерегаться падения слитков и заготовок при транспортировке к печам, движущихся частей подъемных столов, толкателей и выталкивателей, отравления газом, а также ушибов и ожогов нагретым металлом при выдаче его из печей, ручной кантовке или подварке нагреваемого металла. Нагревательные печи выделяют большое количество тепла в помещение цеха, поэтому их расположение в печах должно обеспечивать достаточный приток свежего воздуха к каждой печи. Для устранения отравления газом следует неуклонно выполнять все требования по уплотнению газопроводов и соответствующей арматуры.

Электрические печи

Электрические печи при неправильной установке или эксплуатации могут служить источником опасности для обслуживающего персонала, поэтому следует тщательно соблюдать правила их монтажа, пуска и эксплуатации, предотвращая опасность своевременным осуществлением необходимых технических и организационных мероприятий.

Электрические печи являются в первую очередь устройствами, работающими под тем или иным напряжением, иногда очень высоким (ЭЛП). Поэтому во всех случаях при эксплуатации этих печей следует соблюдать общие правила работы с электрическими установками, а также систематически проверять исправность линий снабжения печей электроэнергией, особенно на участках между трансформаторами и печами, исправность электрической изоляции, заземление кожухов печей и наличие ограждений у неизолированных участков токоподводов. На ЭЛП, где используется ток высокого напряжения, необходимо следить за исправностью блокирующих устройств, исключающих доступ к частям печи, находящимся под напряжением.

Электрические печи являются также устройствами, работающими при повышенных температурах и служащими источниками теплового излучения. Следует поддерживать в порядке все предусмотренные защитные экраны, а также строго соблюдать правила работы с горячим жидким металлом и шлаками (при замере температур, отборе проб

и т. д.). Футеровка и тепловая изоляция печей должны подвергаться систематическому ремонту с тем, чтобы не только обеспечить проектные технико-экономические показатели их работы, поддерживать установленную температуру на поверхности кожуха, но и исключить возможность аварий, вызываемых износом огнеупорной кладки. На тех плавильных печах, где рабочий слой футеровки сравнительно тонок (например, тигли индукционных печей), должна быть предусмотрена сигнализация ее проедания жидким металлом и обеспечена тщательная проверка исправности этой сигнализации.

Во многих электрических печах в ходе технологического процесса образуются или вводятся газы, которые в смеси с воздухом создают взрывоопасные смеси (например, в дуговых ферросплавных печах образуется оксид углерода, а в некоторых термических печах вводится атмосфера водорода). Поэтому такие печи должны работать при небольшом избыточном давлении с тем, чтобы исключить подсос воздуха в их рабочие камеры. Печи должны быть оборудованы взрывными клапанами, исправность которых необходимо систематически проверять.

Причиной взрыва может быть также прожигание водоохлаждаемых кристаллизаторов вакуумных печей, поэтому следует осуществлять в них технологический процесс при таких режимах плавки металла и охлаждения кристаллизатора, которые исключают аварийную ситуацию. В некоторых случаях вакуумные дуговые печи заключают в броневые кожухи (стальные или железобетонные).

При эксплуатации многих электрических печей, работающих с токсичными атмосферами (например, CO в дуговых ферросплавных печах и во многих печах с защитной атмосферой), неизбежно выбивание газа из рабочих камер в связи с работой под повышенным давлением вследствие стремления исключить опасность подсосов воздуха и взрывов. В этих случаях должна быть обеспечена эффективная вентиляция рабочих площадок и помещений, где может находиться персонал, во избежание его отравления токсичными газами.

Наконец, некоторые печи являются источником излучения в коротковолновой части спектра. Так, ЭЛП служат источником рентгеновского излучения, причем, чем выше разгоняющее поток электронов напряжение, тем жестче (следовательно, опаснее) излучение. Поэтому ЭЛП заключают в стальные кожухи толщиной 10—15 мм, а стекла гляделок выполняют толщиной не менее 40 мм. Следует тщательно проверять уплотнения кожухов и гляделок с тем, чтобы исключить рентгеновское облучение персонала.

Интенсивным источником ультрафиолетового излучения являются плазменные печи. Это излучение может вызвать у персонала серьезные ожоги и поэтому все гляделки таких печей должны быть оборудованы фильтрами, задерживающими ультрафиолетовую часть спектра.

Следует отметить, что в конструкцию современных электрических печей заложены многочисленные элементы, правильная установка которых при монтаже печи и поддержание в исправном состоянии при ее последующей эксплуатации обеспечивают безопасные условия труда обслуживающего персонала. Необходимо систематически проверять исправность узлов конструкции и четко соблюдать технические инструкции по эксплуатации печей. В этом залог безопасной и высокопроизводительной работы.

РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Егоров А. В. Электроплавильные печи черной металлургии. М.: Металлургия, 1985. 280 с.

Кривандин В. А., Марков Б. Л. Металлургические печи, 2-е изд. М.: Металлургия, 1977. 460 с.

Свенчанский А. Д. Электрические промышленные печи. Ч. I. М.: Энергия, 1975. 380 с.

Свенчанский А. Д., Смелянский М. Я. Электрические промышленные печи. Ч. II. М.: Энергия, 1970. 262 с.

Справочник конструктора печей прокатного производства. Т. I и II. М.: Металлургия, 1970. 991 с.

Филимонов Ю. П., Старк С. Б, Морозов В. А. Металлургическая теплотехника. Т. II. М.: Металлургия, 1974. 519 с.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

a — коэффициент температуропроводности, м²/с
B — расход топлива, м³/с, кг/с; ширина, м
C_0 — константа излучения абсолютно черного тела, Вт/(м²·К)
d — диаметр, м
F — площадь, м²
g — ускорение свободного падения, м/с²
G — массовый расход, кг/с
H, h — высота, м
H — напор, м
i — энтальпия, Дж/м³, Дж/кг
K — суммарный коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К)
M — масса, кг
N — мощность, кВт
n — коэффициент расхода воздуха
$П$ — периметр, м
P — производительность печи, т/ч
p — удельная производительность (напряжение пода), кг/(м²·ч); давление, Па
R — тепловое сопротивление, (м²·К)/Вт
S — линейный размер, м
t — температура, °С
T — температура, К
Q — количество тепла, Дж
$Q_н^р$ — низшая теплота сгорания, Дж/м³, Дж/кг
q — плотность теплового потока, Вт/м²
V — объемный расход, м³/с
V — объем, м³
w — скорость потока, м/с
X — компонент топлива, %
c — теплоемкость Дж/К
ε — степень черноты; коэффициент сжатия струи
α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К)
$\beta = 1/T$ — коэффициент объемного расширения, $К^{-1}$
$\varkappa = c_p - c_v$ — показатель адиабаты
λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); коэффициент трения
δ — геометрический размер, м
ξ — коэффициент местного сопротивления
μ — коэффициент несимметричности нагрева
ν — кинетический коэффициент вязкости, м²/с
ρ — плотность, кг/м³
τ — время, с, ч
σ_0 — константа Стефана — Больцмана, Вт/(м²·К⁴)
φ — гидравлическое сопротивление отверстия

$Re = wl/\nu$ — критерий Рейнольдса
$Nu = dl/\lambda$ — критерий Нуссельта
$Pr = \nu/a$ — критерий Прандтля
$Gr = g\beta\Delta T l/\nu^2$ — критерий Грасгофа
$Bi = \alpha_\Sigma S/\lambda$ — критерий Био
$Fo = a\tau/S^2$ — критерий Фурье
$Pe = wl/a$ — критерий Пекле
$\theta = \dfrac{T_п - T}{T_п - T_{нач}}$ — температурный критерий

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Абрамовича формула 41
Автомодельность 13
Архимеда критерий 318
Асбест 189

Б

Баланс:
тепловой 299
— доменной плавки 311
— сталеплавильного агрегата 315
энергии 21
Балка подпятовая 200
Бернулли закон 25
— уравнение 24
Бетон 193
— огнеупорный 186
Био критерий 59, 101
Бугера — Бера закон 85

В

Вентилятор центробежный 45
Вентури скруббер 271, 275, 283
Вермикулит 189
Выдержка металла 97, 108
Вязкость газа 16

Г

Газ:
генераторный 115
доменный 115
идеальный 15
коксовый 115
природный 114, 128
Газоочистка 280, 283
— комбинированная 289
Гарнисаж 419
Глубина проникновения тока 410
Горелка:
беспламенная 133
газокислородная 427
газомазутная 148
инжекционная 134
керамическая 142
пламенная 137
плоскопламенная 143
с регулируемой длиной факела 140
«труба в трубе» 138
турбулентная 139
Горение:
детонационное 124
диффузионное 125
кинетическое 123
нормальное 123
топлива газообразного 123
— жидкого 126
— твердого 127
турбулентное 125
Грасгофа критерий 58
Гюгонио уравнение 35

Д

Давление:
абсолютное 19
геометрическое 19
динамическое 20
избыточное 19
статическое 19, 22
Дальнобойность струи 41
Движение ламинарное и турбулентное 17
Диатомит 189
Динамика газа 24
Диффузор 31, 35, 43
Дуга электрическая 407
Дымосос 39
— косвенного действия 46
— прямого действия 45
Дэвиса формула 264

З

Закон:
квадратов расстояний 76
сохранения энергии 43
теплопередачи 53
Зона нагрева печи:
методическая 359
сварочная 360
томильная 361
Зонолит 189

И

Изделия огнеупорные:
высокоглиноземистые 167
глинистографитовые 179
динасовые 162
доломитовые 170
карборундовые 181
карбошамотные 182
коксовые 180
магнезитовые 170
магнезитохромитовые 172
тальковые 174
форстеритовые 172

хромитомагнезитовые 173
циркониевые 178
цирконовые 178
шамотные 165
шпинельные 171
Излучение:
газов 86
в ослабляющей среде 85
интегральное 71
монохроматическое 71
тепловое 52
Инварианты подобия 10
Индуктор 435
Инжектор 42
Ионизация 407

К

Калориметр 113
Камень бутовый 192
Камера пылеосадительная 262
— шлюзовая 457
Каркас печи 199
Керосин 117
Кирпич строительный 192
Кирхгофа закон 75
Клапейрона уравнение 15
Кокс 118
Колодец нагревательный:
с верхним отоплением 352
с отоплением из центра пода 350
температурный режим 346
шлакоудаление 348
электрический 452
Конвекция:
вынужденная 56, 61
свободная 56, 59
— в ограниченном пространстве 60
Конвертер:
с боковой продувкой (ЛД) 325, 327
с верхней продувкой (Кал-До) 326, 330
с донной продувкой 332
Константа подобия 10
Конфузор 35, 43
Котел паровой 239
Котел-утилизатор:
конвертера 242
мартеновской печи 241
Коэффициент:
вязкости 16
избытка воздуха 130
использования топлива 297
конвекции 61
лучеиспускания 74
проникновения струи 318
температуропроводности 52
теплоотдачи 54, 91
— при свободной конвекции 56
трения 26
угловой 77
Кратность инжекции 43
— циркуляции 45
Кристаллизатор 430
Критерий подобия 11, 57—59

Л

Лаваля сопло 37
Ламберта закон 76
Лапласа формула 35
Лигроин 116
Луч электронный 462

М

Мазут 116
Масса набивочная огнеупорная 184
Материал печей:
гидроизоляционный 193
огнеупорный 153
— механическая прочность 158
— плотность 159
— пористость 159
— предельная температура 157
— теплопроводность 160
— термическая стойкость 158
— удельная теплоемкость 160
— шлакоустойчивость 159
— электропроводность 160
строительный 192
теплоизоляционный 187
— естественный 189
— искусственный 190
Маха число 35
Метод конечных разностей 69
Менделеева формула 113
Моделирование 13
Монтаж печей 207
Мультициклон 265
Муфелирование 150, 387
Муфель 95, 387

Н

Нагрев металла:
индукционный 409
комбинированный 444
продолжительность 97
расчет 101
режим 99
скоростной 109

скорость 91, 96
Нагреватель:
индукционный 442
металлический 196
неметаллический 197
Напор температурный 56
Насадок 31
Нуссельта критерий 57, 59
Ньютона формула 16, 54, 102

О

Обезуглероживание стали 94
Область автомодельная 13
Обмазка огнеупорная 185
Огнеупоры:
алюмосиликатные 164
карбидкремниевые 184
кремнеземистые 161
магнийсодержащие 169
углеродсодержащие 179
цирконистые 178
Окисление стали 92

П

Пекле критерий 57, 58
Печь:
доменная 303
мартеновская 334
— двухванная 341
нагревательная 344
— многозонная 366
— секционная 381
— с кольцевым подом 379
— с роликовым подом 356
— с торцевым отоплением 359
— с шагающим подом 356, 369
— толкательная 355
— — методическая 362
— трехзонная с нижним обогревом 363
термическая 383
— колпаковая 391, 395
— муфельная 387
— протяжная 399
— проходная 390
— садочная 388
— с муфелированием металла 396
— — пламени 398
— с роликовым подом 391
топливная 293
Плазма 407
Плазматрон 408, 432
Планка закон 73
Подобие гидродинамическое 11
— тепловое 12
Под печи 202
Поле температурное 50
Полоса поглощения 86
Портландцемент 193
Поток плазмы 408
— тепловой 50
Правило:
аддитивности 123
взаимности 78
замыкаемости 77
Прандтля критерий 57, 58
Процесс скрап-рудный 313, 334
Пушка поршневая электрическая 304
электронная 413, 462
Пылеуловитель:
радиальный 274
тангенциальный 275

Р

Разогрев печи 464
Разрежение 19, 22
Разряд газовый 407
— дуговой 411
Раствор огнеупорный 182
Регенератор 217, 335
— двухоборотный 218
— расчет 220
Режим:
нагрева двухступенчатый 99
— трехступенчатый 361
работы печи камерный 47
— — методический 47, 359
слоевой 293
температурный 296, 346
тепловой 297, 357
Рейнольдса критерий 11, 18, 58
Рекуператор:
игольчатый 228
керамический 227, 233
металлический 227
радиационный 231
— трубчатый 233
— щелевой 232
трубчатый 229
Ремонт печей 467

С

Садка печи 335
Сальдо-поток 80
Свод печи 205
Сеть короткая 422
Сименса насадка 217
Скорость газа критическая 35
— нагрева 96
Скрап-процесс 313, 334

Скруббер форсуночный 270, 291
Соленоид 442
Сопло простое 36
Сопротивление тепловое 55, 66
Среда ослабляющая 85
Статика газов 21
Стенка многослойная 65
— однослойная 64
Стены печи 203
Степень черноты:
газа 87
поверхности металла 98
Стефана — Больцмана закон 73, 74
Стокса критерий 272
Столб дуги 407
Струя:
ограниченная 44
— затопленная 39
частично ограниченная 41

Т

Таммана печь 446
Тело абсолютно белое и абсолютно черное 72
Температура:
воспламенения 126
горения 131
— калориметрическая 132
— теоретическая 131
кипения 126
Теория:
подобия 10
струи 39
эксперимента 12
Теплогенерация 406
Теплообмен:
излучением 52, 79, 88
конвективный 51, 55
сложный 90
— в доменной печи 306
теплопроводностью 51
Теплообменник регенеративный 225
— рекуперативный 221
Теплоотдача:
при движении газа в трубе 61
при обтекании труб 62
Теплопроводность 51, 64
Тигель 436
Тимофеева формула 90
Топливо:
газообразное 114
жидкое 116
искусственное 115
классификация 110
твердое 117
теплота сгорания 112
условное 113
химический состав 110
Торкретирование 466
Торкрет-масса 185
— -пушка 185
Трепел 182
Труба:
дымовая 32
глиссажная 362, 370
радиационная 150, 387
Трубка коаксиальная 332

У

Уравнение сплошности 27
Уровень нулевого избыточного давления 22
Условия граничные 53, 103
Установка:
газотурбинная 247
паротурбинная 245
электронно-лучевого нагрева 413
электрошлакового переплава 412

Ф

Факел 39, 122
Фика закон 92
Фильтр 266
— рукавный 267
Форсунка;
высокого давления 146
газомазутная 148
низкого давления 145
Фундамент 197
Фурма 319
— водоохлаждаемая 427
— газокислородная 322
Фурье закон 54
— критерий 57
— уравнение 61
Футеровка:
дуговой сталеплавильной печи 424
— ферросплавной печи 419
индукционной печи 436
конвертера 327
мартеновской печи 339
нагревательного колодца 349
нагревательной печи 357

Ц

Циклон 263

Ш

Шибер 49
Шины глиссажные 362, 371
Шлаковик 338
Шмидта метод 69
Штейнметца формула 409
Шухова форсунка 146

Э

Эжектор 42
Эйлора критерий 11
— теорема импульсов 28
— уравнение 21
— уравнение импульсов 27, 43
Эквивалент водяной 307
Экран тепловой 83
Эксплуатация печей 469
Электрод:
графитированный 425
расходуемый 429
самоспекающийся 420
Электрододержатель 425
Электропечь:
дуговая вакуумная 428
— плазменная 432
— сталеплавильная 421
— ферросплавная 416
индукционная нагревательная 441
— плавильная 434
— — вакуумная 438
— — без железного сердечника 435
— — с железным сердечником 440
сопротивления 411
— нагревательная 448
— — башенная 459
— — колпаковая 454
— — косвенного действия 450
— — непрерывного действия 457
— — периодического действия 452
— — протяжная 458
— — прямого действия 449
— — с выдвижным подом 454
— — с роликовым подом 457
— плавильная 446
электронно-лучевая 462
электрошлакового переплава 446
— — бифилярная 447
Электрофильтр 257
Элемент нагревательный 195, 451
Эмиссия термоэлектронная 407
Энтальпия 52
Эффект поверхностный 409

Владимир Алексеевич Кривандин,
Юлий Петрович Филимонов

ТЕОРИЯ, КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Том 1

ТЕОРИЯ И КОНСТРУКЦИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Редактор издательства *Г. А. Лебедева*
Художественный редактор *Ю. И. Смурыгин*
Технический редактор *С. В. Жуковина*
Корректоры *Ю. И. Королева, Т. В. Морозова*

ИБ № 2945

Сдано в набор 18.11.85. Подписано в печать 30.01.86. Т-03627. Формат бумаги 84×108$^{1}/_{32}$. Бумага типографская № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 25,2. Усл. кр.-отт. 25,2. Уч.-изд. л. 28,53. Тираж 12 560 экз. Заказ № 350. Цена 1 р. 30 к. Изд. № 1273

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Металлургия»
119857, ГСП, Москва, Г-34, 2-й Обыденский пер., д. 14.

Владимирская типография Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7