В. И. БЕЛЬСКИЙ,
Б. В. СЕРГЕЕВ

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПЕЧИ И ТРУБЫ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
ИСПРАВЛЕННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

Допущено
Главным управлением кадров и учебных
заведений Минмонтажспецстроя СССР
в качестве учебного пособия для техникумов

МОСКВА
СТРОЙИЗДАТ
1974

УДК [624.9 : 66.041+697.8](075.3)

Бельский В. И., Сергеев Б. В. Промышленные печи и трубы. Учеб. пособие для техникумов. Изд. 2-е, испр. и доп. М., Стройиздат, 1974. 301 с.

В книге рассмотрены материалы, применяемые при кладке промышленных печей, описаны конструктивные элементы печей и оборудования, приведены основы печной теплотехники, даны классификация печей и основы расчета конструирования промышленных печей и дымовых труб.

Кроме того, в книге даны описания устройства, схем работы и конструктивных элементов нагревательных, термических, сушильных и плавильных печей, а также печей черной и цветной металлургии, промышленности строительных материалов, нефтеперерабатывающей и химической промышленности и фабрично-заводских труб.

Книга является учебным пособием для учащихся техникумов по специальности «Промышленные печи и трубы», а также может быть использована инженерно-техническими работниками, занятыми на строительстве и ремонте промышленных печей и труб.

Табл. 23, ил. 120, список лит.: 14 назв.

© Стройиздат, 1974.

Б $\frac{0327-277}{047(01)-74}$ 103—74

ВВЕДЕНИЕ

Печи находят широкое распространение почти во всех отраслях промышленности. В черной металлургии в доменных печах получают чугун, в конверторах — сталь, в прокатных цехах в печах нагревают металл перед прокаткой и термообработкой после прокатки; в цветной металлургии металл получают и перерабатывают также в печах. Печи применяются в кузнечных и термических цехах машиностроительных заводов для нагрева металла перед ковкой и штамповкой, для его термообработки, в литейных цехах — для плавки металла и сушки литейных форм и стержней; в керамической промышленности и промышленности строительных материалов — для обжига огнеупоров и керамики, обжига цементного клинкера и извести, получения заполнителей бетона (керамзита и аглопорита); для варки стекла; в нефтеперерабатывающей промышленности — для перегонки нефти; в химической промышленности — для получения соды, аммиака, фосфатных удобрений и т. п.

Строительством и ремонтом промышленных печей занимаются ряд специализированных организаций, а также цехи ремонта печей металлургических и машиностроительных заводов. Объем работ в денежном выражении по строительству и ремонту печей только специализированными организациями составил в 1970 г., по расчетам авторов, свыше 600 млн. руб.

Директивами XXIV съезда партии предусмотрено увеличить производство промышленной продукции за девятое пятилетие на 42—46%. Намечено довести выпуск стали в 1975 г. до 142—150 млн. *т*, производство готового проката до 101—105 млн. *т*, увеличить выпуск продукции машиностроительной промышленности в 1,7 раза, промышленности стройматериалов в 1,4 раза, химической и нефтехимической в 1,7 раза [1], что потребует строительства новых и реконструкции старых предприятий металлургической, машиностроительной, керамической, нефтеперерабатывающей, химической промышленности, а также промышленности строительных материалов. Это повлечет за собой резкое увеличение объема работ по сооружению новых и реконструкции существующих печей.

[1] Материалы XXIV съезда КПСС. Политиздат, 1971, стр. 246, 250, 258.

На 1975 г. объем работ печестроительных и печеремонтных организаций увеличится не менее чем на 40% по сравнению с 1970 г. и достигнет порядка 840 млн. руб в год.

Помимо увеличения объема меняется и характер работ. Существенно увеличивается мощность отдельных установок и агрегатов: повышается объем доменных печей до 5000 $м^3$ против строившихся до настоящего времени печей объемом 2700—3200 $м^3$, емкость конвертеров до 350 $т$ вместо 130—200 $т$ и т. д.

Директивами XXIV съезда КПСС предусмотрено развитие техники по линии максимальной интенсификации, механизации и автоматизации производственных процессов, что также относится и к строительству печей. В последние годы в печах все шире применяют кислородное дутье, механизированную загрузку, передвижение и выгрузку материалов, автоматическое регулирование работы печей. Это увеличивает сложность строительно-монтажных работ, повышает ответственность строителей, требует более высокой их квалификации, понимания процессов, происходящих в печах, и учета связанных с ними повышенных требований к качеству материалов и кладке печей.

В связи с этим для обеспечения специализированных печестроительных организаций, а также заводских цехов ремонта печей квалифицированными кадрами в ряде монтажных техникумов введена специальность «Промышленные печи и трубы». Учебное пособие «Промышленные печи и трубы» составлено в соответствии с программой предмета, изучаемого по этой специальности. Исходя из того что пособие предназначено для будущих печестроителей, в нем даются только основные понятия о процессах горения, топливе, механике газов, теплопередаче и расчете печей и дымовых труб, необходимые для понимания работы печей и дымовых труб. Особое внимание обращено на описание конструкции печей, их механизмов, гарнитуры и оборудования, процессов, происходящих в печах и влияющих на долговечность их, и дымовых труб, а также огнеупорных и изоляционных материалов, идущих на строительство печей. При этом дается описание общей принципиальной конструкции кладки и каркаса печей и конструкции дымовых труб.

При подготовке второго издания авторы учли все то новое, что появилось за период, истекший со времени первого издания, в конструкции печей и материалов, применяемых при их строительстве. Помещено описание доменной печи объемом 3200 $м^3$, глуходонного конвертора емкостью 300 $т$, нагревательных колодцев с верхней горелкой, методической печи с шагающим подом, печей безокислительного и скоростного нагрева, сушил для сушки сыпучих материалов в пневмопотоке и кипящем слое. Переработана глава I в соответствии с последними ГОСТами на огнеупорные и теплоизоляционные материалы. Дан пример расчета печи, работающей на природном газе, взамен печи, работавшей на неприменяющемся в настоящее время генераторном газе.

В соответствии с ГОСТ 9867—61 в учебном пособии принята международная система единиц (СИ). В качестве дублирующей приведена ранее применявшаяся система. При этом руководствовались следующими переводными коэффициентами между единицами этих двух систем:

1 $ккал \approx 4{,}187$ $кДж$;

1 $ккал/м^2 \approx 4{,}187$ $кДж/м^2$;

1 $ккал/(кг \cdot град) \approx 4{,}187$ $кДж/(кг \cdot град)$;

1 $ккал/(м^3 \cdot град) \approx 4{,}187$ $кДж/(м^3 \cdot град)$;

1 $ккал/(м \cdot ч \cdot град) \approx 1{,}163$ $Вт/(м \cdot град)$;

1 $ккал/(м^2 \cdot ч \cdot град) \approx 1{,}163$ $Вт(м^2 \cdot град)$;

1 $ккал/(м^2 \cdot ч \cdot град^4) \approx 1{,}163$ $Вт/(м^2 \cdot град^4)$.

Главы II—VIII, XIII и XIV написаны В. И. Бельским, а главы I, IX—XII — Б. В. Сергеевым.

МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ КЛАДКЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ И ДЫМОВЫХ ТРУБ

§ 1. ОГНЕУПОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Состав и свойства огнеупорных изделий

Огнеупорами называются материалы и изделия, способные противостоять высокой температуре (от 1580° С и выше), воздействию шлаков и нагрузке при высоких температурах. Основные свойства и качество огнеупоров оцениваются по огнеупорности, механической прочности при нормальной и высокой температурах, термической стойкости, точности размеров и формы, постоянству объема, газопроницаемости, химической устойчивости при действии шлаков и агрессивных газов, теплопроводности, теплоемкости и термическому расширению и др. Свойства огнеупорных изделий зависят от их химического состава, структуры, пористости, объемной массы, плотности и др.

По ГОСТ 4385—68 огнеупорные изделия подразделяются по следующим основным признакам: химико-минеральному составу, огнеупорности, пористости, способу формования, термической обработке, форме и размерам.

В зависимости от химико-минерального состава огнеупорные изделия делятся на типы и группы в соответствии с данными табл. 1.

Огнеупорные изделия в зависимости от их огнеупорности подразделяются на: огнеупорные, которые выдерживают температуру от 1580 до 1770° С включительно; высокоогнеупорные — выше 1770 до 2000° С включительно и высшей огнеупорности — выше 2000° С.

Огнеупорные изделия подразделяются в зависимости от пористости (табл. 2).

По способу формования огнеупорные изделия делятся на: пластично-формованные, изготовленные из пластичных масс машинным формованием или прессованием на механических или других прессах и различными способами ручного формования;

сухоформованные неармированные или армированные, изготовленные из полусухих или сухих порошкообразных малопластичных или непластичных масс (в том числе из бетонов, плавленых материалов и т. п.) методами механического, гидравлического или гидростатического прессования, вибропрессования, вибрирования, трамбования;

шликернолитые, изготовленные литьем из жидкого шликера (разжиженной огнеупорной глины), пеношликера, газошликера, термопластичного шликера и т. п.;

Таблица 1

Классификация огнеупорных изделий по химическому составу

Тип	Группа	Содержание определяющих химических компонентов (на прокаленное вещество) в %
1. Кремнеземистые	Кварцевое стекло	SiO_2 не менее 99
	Динасовые (тридимитокристобалитовые) на известковой связке	SiO_2 не менее 93
	Динасовые (тридимитокристобалитовые) на различных связках и с разными добавками	SiO_2 не менее 80
2. Алюмосиликатные (низко-, средне- и высокоглиноземистые)	Полукислые	Al_2O_3 менее 28 SiO_2 от 65 до 85
	Шамотные	Al_2O_3 от 28 до 45
	Муллито-кремнеземистые	Al_2O_3 свыше 45 до 62
	Муллитовые	Al_2O_3 свыше 62 до 72
	Муллито-корундовые	Al_2O_3 свыше 72 до 90
	Корундовые	Al_2O_3 свыше 90
3. Магнезиальные	Магнезитовые (периклазовые)	MgO не менее 90
	Магнезитовые (периклазовые) на различных связках	MgO свыше 80
4. Магнезиально-известковые	Магнезито-доломитовые (периклазоизвестковые)	MgO свыше 50 CaO не менее 10
	Доломитовые (известково-периклазовые)	MgO от 35 до 50 CaO от 45 до 70

Продолжение табл. 1

Тип	Группа	Содержание определяющих химических компонентов (на прокаленное вещество) в %
	Доломитовые стабилизированные (периклазоалитовые)	MgO от 35 до 65 SiO_2 от 6 до 15 CaO от 15 до 40 $CaO : SiO_2$ в пределах 2,7—2,9
	Известковые	CaO свыше 70
5. Магнезиально-шпинелидные	Магнезито-хромитовые (периклазохромитовые)	MgO свыше 60 Cr_2O_3 от 5 до 18
	Хромомагнезитовые (хромитопериклазовые)	MgO от 40 до 60 Cr_2O_3 от 15 до 30
	Хромитовые	MgO менее 40 Cr_2O_3 свыше 25
	Периклазошпинельные	MgO свыше 40 до 80 Al_2O_3 от 15 до 55
	Шпинельные	MgO от 25 до 40 Al_2O_3 свыше 55 до 70
6. Магнезиально-силикатные	Периклазофорстеритовые	MgO от 65 до 80 SiO_2 не менее 10
	Форстеритовые	MgO от 50 до 65 SiO_2 от 25 до 35
	Форстерито-хромитовые	MgO от 45 до 60 SiO_2 от 20 до 30 Cr_2O_3 от 5 до 15
7. Углеродистые	Углеродистые графитированные	C свыше 98
	Углеродистые неграфитированные (угольные)	C свыше 85

Продолжение табл. 1

Тип	Группа	Содержание определяющих химических компонентов (на прокаленное вещество) в %
	Углеродсодержащие	C от 5 до 70
8. Карбидокремниевые	Карбидокремниевые рекристаллизованные	SiC свыше 90
	Карбидокремниевые на различных связках	SiC свыше 70
	Карбидокремнийсодержащие	SiC от 20 до 70
9. Цирконистые	Циркониевые (баддeлеитовые)	ZrO_2 свыше 90
	Баддeлеито-корундовые	ZrO_2 свыше 30 Al_2O_3 до 65
	Циркониевые на различных связках с разными добавками	ZrO_2 свыше 35 SiO_2 свыше 18
10. Окисные	Изделия из окислов (BeO, MgO, CaO, Al_2O_3, ZrO_2, TiO_2, UO_2 и др.)	Максимально высокое содержание определяющего окисла
11. Некислородные	Изделия из нитридов, боридов, карбидов (кроме SiC), силицидов и других некислородных соединений	Максимально высокое содержание некислородных соединений

термопластичнопрессованные, изготовленные методом прессования из масс с применением термопластичных добавок (парафина, воска и др.);

горячепрессованные, изготовленные горячим прессованием из нагретых до термопластичного состояния огнеупорных масс;

плавленолитые, изготовленные путем электроплавки (или плавки другими способами) с последующей отливкой из расплава;

пиленые из естественных горных пород или плавленых бло-

Таблица 2

Классификация огнеупорных изделий по пористости

Изделия	Пористость открытая в %	Изделия	Пористость открытая в %
Особоплотные	До 3	Обычные:	
Высокоплотные	Свыше 3 до 10	I подгруппы	Свыше 20 до 24
Плотные	» 10 » 16	II подгруппы	» 24 » 30
Уплотненные	» 10 » 20	Легковесные	» 45 » 85
		Ультралегковесные	» 85

ков, изготовленные способом механической обработки (резанием, шлифованием и т. п.).

В зависимости от термической обработки изделия делятся на: обожженные; безобжиговые (включая армированные), подвергнутые сушке, а в ряде случаев нагреву до 250—400° С; горячепрессованные, подвергнутые отжигу после отливки.

По форме и размерам огнеупорные изделия делятся на прямые и клиновые нормальных размеров: кирпич малого формата — прямой 230×113×65 *мм*, клиновой 230×113×65×55 и 230×113×65×45 *мм*; кирпич большого формата — прямой 250×123×65 *мм*, клиновой 250×123×65×55 и 250×123×65×45 *мм*;

фасонные: простые, сложные и особо сложные;

фасонные крупноблочные массой свыше 60 *кг*; простые, сложные, особо сложные;

специальные промышленного и лабораторного назначения (тигли, трубки, лодочки, мелкоштучные изделия).

Химический состав огнеупорных изделий. По химическому составу огнеупорные изделия делятся на кислые, основные и нейтральные. Чтобы определить, к какому из указанных выше подразделений относится тот или иной вид огнеупорных изделий, нужно знать состав их огнеупорной основы.

Динас относится к кислым огнеупорам потому, что его огнеупорной основой является кремнезем (SiO_2).

Магнезит относится к основным огнеупорам, так как его огнеупорной основой является окись магния MgO.

К нейтральным огнеупорам относятся хромитовые изделия, огнеупорной основой которых является окись хрома Cr_2O_3. С некоторой условностью к нейтральным огнеупорам относят шамотные изделия, огнеупорной основой которых являются амфотерные (нейтральные) окислы Al_2O_3.

Углеродистые и карбидные изделия находятся вне указанных трех групп. Огнеупорной основой их являются углерод и его соединения, ввиду чего они выделяются в особую группу специальных углеродсодержащих огнеупорных изделий.

Зная химический состав огнеупорных изделий, можно не только решать вопросы о целесообразности их применения в конструктивных элементах промышленных печей, но и иметь представление о их рабочих свойствах. Так, динасовые кислые изделия при прочих равных условиях в среде жидких кислых шлаков служат дольше, чем магнезитовые, причем последние более продолжительное время используются в среде основных шлаков.

В некоторых случаях при одном и том же химическом составе огнеупорные изделия в зависимости от технологии производства могут иметь различные свойства.

Огнеупорность — это свойство материалов противостоять действию высоких температур. Она соответствует температуре размягчения материала под действием собственной массы.

Однако определять возможность применения тех или иных видов огнеупорных изделий только по их огнеупорности нельзя, так как они начинают деформироваться под нагрузкой раньше, чем под действием собственной массы. Поэтому возможность применения их при высоких температурах принято определять температурой начала деформации под нагрузкой 2 *кгс/см²*, т. е. под нагрузкой, не превышающей фактические нагрузки, имеющие место в промышленных печах. Только поэтому шамотные изделия, имеющие огнеупорность 1770° С и температуру деформации под нагрузкой 2 *кгс/см²* 1400° С, применяют в тепловых агрегатах, где максимальная температура не превышает 1350—1400° С; в то же время динасовые изделия, имеющие более низкую огнеупорность (1760° С), чем шамотные, но значительно более высокую температуру деформации под нагрузкой 2 *кгс/см²* (1630—1690° С), применяют в тепловых агрегатах с рабочей температурой 1600—1650° С.

Огнеупорность различных изделий зависит главным образом от химико-минерального состава и определяется в основном огнеупорностью исходного сырья.

Механическая прочность огнеупорных изделий характеризуется пределом прочности в *кгс/см²*, которую выдерживает образец при сжатии в обычных температурных условиях.

Предел прочности на сжатие огнеупоров определяется их структурой. Чем плотнее, мелкозернистее и однороднее структура огнеупорных изделий, тем меньше в них трещин и тем выше их механическая прочность.

В связи с тем что механическая прочность огнеупоров связана с их структурой, обусловливающей пористость, шлакоустойчивость, термическую устойчивость и другие качества, предел прочности на сжатие при нормальных условиях является важным показателем. Чем выше предел прочности при сжатии, тем лучше качество огнеупоров. При обычной температуре предел прочности на сжатие находится в пределах от 80 до 1000 *кгс/см²*.

Огнеупорные изделия в тепловых агрегатах в большинстве случаев подвергаются сжатию, в некоторых случаях — истиранию и очень редко — изгибу. Усилия сжатия весьма незначительны, так как возникают под действием собственной массы огнеупорной кладки и обычно не превышают 1 *кгс/см²* и только в редких случаях достигают 3—4 *кгс/см²*.

Истирающему действию твердыми и жидкими материалами огнеупорные изделия подвергаются в шахтных (доменных, известеобжигательных вагранках) и вращающихся печах, где твердая шихта, загружаемая в печь, непрерывно перемещается, соприкасаясь при этом с кладкой, и разрушает (истирает) ее. Чем выше газопроницаемость и ниже температура деформации огнеупорных изделий под нагрузкой при высоких температурах, тем быстрее происходит ее истирание.

Сопротивление огнеупорных изделий изгибу примерно в 3—5 раз меньше сопротивления сжатию.

Термическая стойкость — это способность огнеупорных изделий выдерживать резкие колебания температур, не растрескиваясь и не разрушаясь.

Растрескивание или разрушение огнеупорных изделий при резких изменениях температуры объясняется возникновением в них напряжений при уменьшении или увеличении объема.

При нагревании температура наружных слоев огнеупорных изделий (до наступления теплового равновесия) значительно выше, чем внутренних, причем эта разница тем больше, чем меньше их теплопроводность и чем выше скорость повышения температуры при нагревании.

Под влиянием термического расширения при нагревании, т. е. увеличения объема, наружные слои огнеупорных изделий расширяются значительно больше, чем более холодные внутренние слои, при этом в определенных слоях огнеупорных изделий появляются скалывающие напряжения; если по своей величине они превосходят силы сцепления частиц между собой, то в них появляются трещины и отколы.

При охлаждении наружные слои огнеупорных изделий остывают быстрее, чем внутренние, причем уменьшение объема наружных слоев всегда происходит с опережением изменения объема внутренних, более нагретых слоев. Возникающие при этом растягивающие напряжения, так же как и при нагревании огнеупоров, приводят к их растрескиванию и разрушению.

Термическая стойкость кирпича определяется количеством теплосмен, т. е. количеством попеременных нагревов до 1300° С и охлаждений в проточной воде до потери 20% массы первоначально взятого образца вследствие его растрескивания.

Наибольшей термостойкостью обладают многошамотные, корундовые, углеродистые и карборундовые огнеупорные изделия, а наименьшей термостойкостью — динасовые, обладающие большими изменениями объема при превращении одной кристаллической формы в другую в определенных интервалах температур, и магнезитовые, составляющие которых имеют различные коэффициенты расширения.

Термическая стойкость огнеупорных изделий в основном зависит от их структуры и природы исходного сырья, причем чем меньше температурное изменение объема огнеупорных изделий при резком их нагревании и охлаждении, тем выше термическая стойкость.

Постоянство объема. При нагревании огнеупорные изделия, как и все тела, изменяются в объеме вследствие термического расширения и, кроме того, под влиянием дополнительной усадки или роста.

Дополнительной линейной усадкой или ростом огнеупорных изделий называются необратимые изменения их линейных размеров в результате повторного нагревания при высоких температурах. Это является характерной особенностью только огнеупорных изделий.

Увеличение объема огнеупорных изделий (термическое расширение) при нагревании принято выражать коэффициентом линейного температурного расширения, т. е. приростом их линейных размеров по отношению к первоначальным размерам при нагревании на 1°. Коэффициент линейного температурного расширения большинства огнеупорных изделий в пределах температур до 1000° С не превышает десятых долей процента от их первоначальных линейных размеров при комнатной температуре. Наибольший коэффициент линейного температурного расширения имеют магнезитовые изделия — 0,000013—0,000014 *град*$^{-1}$, а наименьший карборундовые — 0,0000047 *град*$^{-1}$. У шамотных изделий коэффициент линейного температурного расширения находится в пределах 0,0000052—0,0000058 *град*$^{-1}$.

Дополнительный рост, или увеличение объема при нагревании, помимо термического расширения, наиболее ярко выражен у динасовых огнеупорных изделий, у которых он происходит в период перерождения кварца из одной кристаллической формы в другую. Дополнительная усадка шамотных полукислых, доломитовых и магнезитовых изделий объясняется изменением структуры этих изделий при нагревании в тепловых агрегатах выше температуры их первичного обжига. Поэтому во избежание дополнительной усадки огнеупорные изделия рекомендуется обжигать до максимальной рабочей температуры теплового агрегата, для кладки которого они предназначены.

Для определения величины температурных швов в огнеупорной кладке в практике печестроения принимают во внимание только термическое расширение огнеупоров и дополнительный линейный рост динасовых изделий.

Шлакоустойчивостью огнеупорных изделий называют способность их противостоять разъедающему действию за-

гружаемой в печи шихты и получаемым из нее расплаву и шлаку.

Шлакоустойчивость огнеупоров обусловливается способностью их противостоять шлакоразъедаемости и шлакопроницаемости и зависит от: температуры, при которой происходит воздействие шлаков; химического состава огнеупора и химического состава твердых тел, шлаков и газов, воздействующих на них; вязкости шлаков; величины и характера пор огнеупорных изделий и характера среды в рабочем пространстве тепловых агрегатов, обусловливаемой технологией производственных процессов, в них протекающих.

Чем выше температура, тем более интенсивно происходит шлакоразъедание огнеупорных изделий, так как скорость химических реакций с повышением температуры заметно увеличивается. Чем ближе химический состав шлаков и расплавов шихты к химическому составу огнеупорных изделий, тем меньше их шлакоразъедание. Чем больше вязкость шлаков и чем меньше пор в огнеупорных изделиях, тем выше их шлакоустойчивость.

Разрушение огнеупорных изделий шлаками происходит за счет протекания химических реакций между шлаками и огнеупорными изделиями, в результате которых часть изделий переходит в жидкий шлак, а также за счет вымывания движущимися струями шлака или расплава из массы огнеупорных изделий некоторой части твердых ее зерен. Это явление особенно хорошо наблюдается в стекловаренных печах, где движущиеся в одном направлении (от загрузочной части печи к выработочной ее части) жидкие шлаки и стекломасса интенсивно разрушают самые плотные и высокоогнеупорные муллитовые, каолиновые и глиноземистые изделия.

Теплопроводностью называется способность материалов передавать тепло от более теплых частей к более холодным без заметного движения частиц. С физической точки зрения — это передача кинетической энергии одних молекул другим. Теплопроводность измеряется коэффициентом теплопроводности, т. е. количеством тепла, которое проходит за один час через каждый квадратный метр стенки при разности температур в 1° на 1 *м* толщины и выражается в *Вт/м·град* [*ккал/м·ч·град*].

В условиях службы тепловых агрегатов огнеупорные изделия в большинстве случаев должны иметь возможно меньшую теплопроводность, так как они являются изоляцией, препятствующей передаче тепла из рабочего пространства печей в окружающую атмосферу в целях экономии топлива и уменьшения его расхода на единицу выпускаемой продукции.

Однако в ряде случаев необходимо иметь огнеупорные изделия с возможно более высокой теплопроводностью. Это относится к огнеупорам, из которых готовят и сооружают муфели, тигли, реторты, элементы рекуператоров, т. е. когда возможно больше тепла должно передаваться через огнеупорные стенки,

например при нагревании и расплавлении стекломассы и металлов в тиглях, нагревании воздуха в рекуператорах и т. п.

В большинстве случаев огнеупорные изделия обладают небольшой теплопроводностью, т. е. являются плохими проводниками тепла, за исключением карборундовых и углеродистых изделий, которые поэтому и являются основным материалом для изготовления тигелей, реторт, элементов рекуператоров и т. п. Теплопроводность огнеупорных изделий зависит главным образом от химико-минерального состава и в несколько меньшей степени от пористости и гранулометрического состава.

Коэффициенты теплопроводности огнеупорных материалов приведены на рис. 1, легковесных огнеупоров — на рис. 2 и изоляционных материалов — на рис. 3.

Теплоемкостью материала называется то количество тепла, которое требуется для нагревания 1 *кг* материала на 1°. Теплоемкость измеряется в *кДж/кг*××*град*[*ккал/кг·град*].

Теплоемкость огнеупорных изделий находится в пределах 0,80—1,6 *кДж/(кг·град)* [0,2—0,4 *ккал/(кг·град)*] и зависит в основном от природы исходного сырья.

Величина теплоемкости огнеупорных изделий имеет большое практическое значение при расчетах насадок регенераторов, определении количества аккумулированного кладкой тепла и т. п. Не-

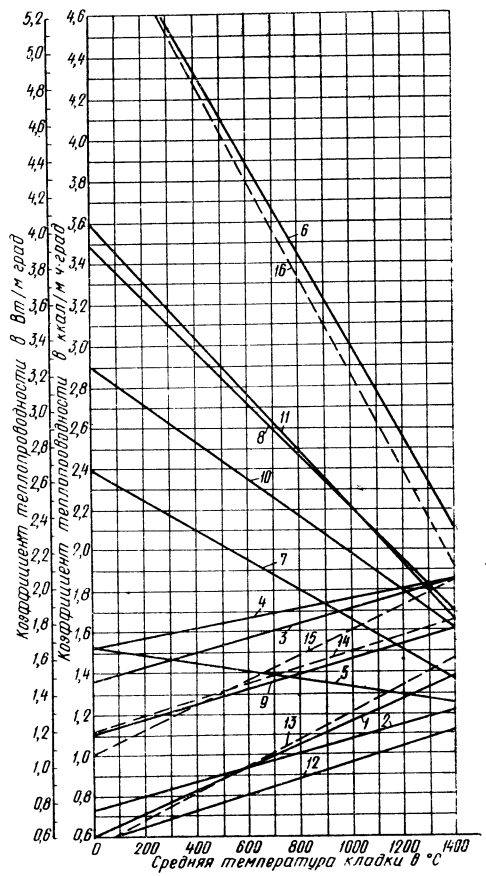


Рис. 1. Коэффициенты теплопроводности огнеупорных материалов и жаростойких бетонов

1 — шамотные; *2* — полукислые; *3* — динасовые; *4* — каолиновые; *5* — высокоглиноземистые; *6* — магнезитовые; *7* — хромомагнезитовые; *8* — магнезито-хромитовые; *9* — хромитовые; *10* — форстеритовые, 25% MgO; *11* — форстеритовые, 50% MgO; *12* — жаростойкий бетон с заполнителями из боя глиняного кирпича; *13* — то же, из шамота; *14*—то же, из хромита; *15* — то же, из базальта, диабаза, доменного шлака; *16* — то же, из магнезита

обходимо отметить, что при повышении температуры теплоемкость огнеупорных изделий заметно увеличивается. Так, для шамотных изделий при температуре 200° С теплоемкость составляет 0,942 *кДж/кг* [0,225 *ккал(кг·град)*], а при 1200° С — 1,28 *кДж/кг* [0,305 *ккал/(кг·град)*].

Электропроводность. Огнеупорные изделия при нормальной температуре, как правило, являются плохими проводниками электрического тока. При высоких температурах, когда в огнеупорах образуются жидкие фазы, они становятся в большей или меньшей степени проводниками электричества. Так, при температуре 1200° С электросопротивление динасовых и шамотных изделий настолько уменьшается, что они практически становятся проводниками электрического тока. Эти свойства огнеупорных изделий имеют практическое значение при конструировании и строительстве различного вида электроплавильных и электронагревательных печей.

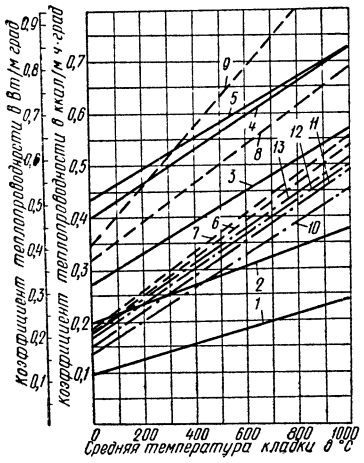


Рис. 2. Коэффициенты теплопроводности легковесных огнеупоров и легких жаростойких бетонов

1 — шамотные ШБЛ-0,4; *2* — шамотные ШБЛ-0,8; *3* — шамотные ШБЛ-1; *4* — шамотные ШБЛ-1,3; *5* — динасовые ДЛ-1,2; *6* — жаростойкий бетон, γ =850 *кг/м³* на жидком стекле с керамзитовым заполнителем; *7* — то же, γ =900 *кг/м³* на портландцементе с керамзитовым заполнителем; *8* — то же, γ =1200 *кг/м³*; *9* — то же, γ =1400 *кг/м³*; *10* — жаростойкий перлитобетон на глиноземистом цементе, γ =900 *кг/м³*; *11* — то же, γ =800 *кг/м³*; *12* — то же, γ =700 *кг/м³*; *13* — то же, γ =600 *кг/м³*

Пористость, объемная масса и плотность огнеупорных изделий определяются при обычной температуре. Эти свойства оказывают влияние на качественные показатели огнеупоров при высоких температурах. Это обусловливается тем, что шлакоустойчивость и начало деформации под нагрузкой некоторых видов огнеупоров зависят от пористости, а качество динаса и магнезита связано с их плотностью.

В огнеупорных изделиях различают кажущуюся пористость, под которой понимают отношение объема пор, сообщающихся между собой и с внешней атмосферой, к общему объему изделий, и истинную пористость — отношение объема всех открытых и закрытых пор к общему объему изделий. Как кажущаяся, так и истинная пористость выражается в процентах. Чем выше пористость огнеупорных изделий, тем, как правило, меньше их шлакоустойчивость. Чем больше открытых и крупных пор в огнеупорных изделиях, тем больше их газопроницаемость, которая в ряде случаев оказывает большое влияние на срок службы в тепловых агрегатах. Так, проникновение окиси углерода в толщу кирпича и отложение в его порах сажистого углерода приводит к преждевременному разрушению футеровок шахт доменных печей. Пористость огнеупорных изделий зависит главным образом от состава исходного сырья, технологии формовки сырца и температуры обжига.

Плотность, т. е. масса единицы объема материала изделий без пустот и пор, и объемная масса, т. е. масса единицы объема изделий вместе с заключенными в них порами, являются важнейшими качественными показателями огнеупорных изделий.

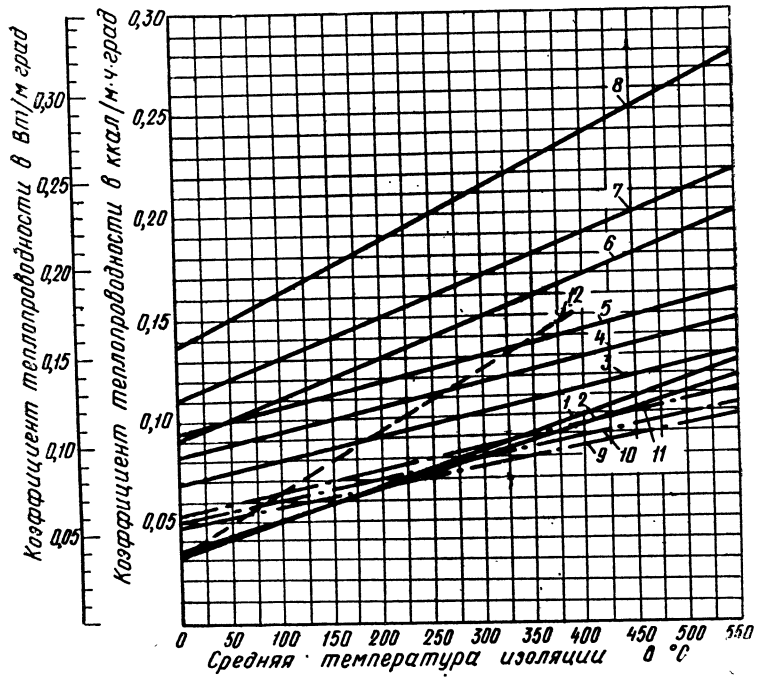


Рис. 3. Коэффициенты теплопроводности изоляционных материалов

1 и *2* — вата минеральная, γ =100 и 150 *кг/м³*; *3*, *4* и *5* — пенодиатомитовые изделия, γ=350, 400 и 450 *кг/м³*; *6*, *7* и *8* — диатомитовые изделия, γ=500, 600 и 700 *кг/м³*; *9*, *10* и *11* — перлитовый песок, γ =150, 200 и 250 *кг/м³*; *12* — вата стеклянная

Точность формы, размеров, внешний вид и структура огнеупорных изделий. Физико-химические свойства не всегда являются показателями качества огнеупорных изделий. Отклонение от установленных линейных размеров, кривизна, отбитость углов и ребер, наличие посечек, трещин, выплавок и ошлакованности даже при удовлетворительных физико-химических показателях огнеупорных изделий могут по-

служить основанием для отказа от применения их при сооружении тепловых агрегатов. Чем меньше отклонения от установленных линейных размеров имеют огнеупорные изделия, тем выше их сортность и строительные качества.

Допускаемые отклонения по линейным размерам предусматриваются в пределах ±2—4 *мм* для обычных и ±2% для крупных изделий. Чем меньше кривизна огнеупорных изделий, тем меньше толщина швов в огнеупорной кладке, являющихся наиболее слабым местом против воздействия жидких шлаков, расплавов и агрессивных газов.

Для укладки огнеупоров, имеющих большую кривизну, со швами требуемых размеров изделия необходимо дополнительно обрабатывать на станках или вручную кирочками, что приводит не только к ухудшению качества изделий, но и требует больших трудозатрат.

Кривизна у обычных огнеупорных изделий допускается в пределах от 1,5 до 3 *мм* и у крупных изделий — не более 1%.

Наличие отбитых углов и ребер понижает срок службы огнеупорных изделий в тепловых агрегатах, так как эти места являются наиболее уязвимыми при высоких температурах и наличии жидких расплавов и шлаков. В зависимости от марки огнеупорных изделий отбитость углов допускается в пределах 5—12 *мм*, отбитость ребер — 3—10 *мм*.

Выплавки — местные оплавления поверхности огнеупорных изделий, вызванные попаданием в них посторонних включений, плавящихся при температуре ниже температуры обжига изделий, способствуют началу их разрушения шлаками при температурах даже ниже температуры плавления этих включений. В шамотных изделиях выплавки допускаются до 5 *мм* (диаметр) для марок ША и ШБ, 8—10 *мм* для марок ШВ и ШУС, а в динасовых изделиях — 5 *мм* на рабочей стороне и 8 *мм* на нерабочей стороне. В магнезитовых изделиях выплавки вообще не допускаются.

Посечки и трещины в огнеупорных изделиях снижают их механическую прочность при резких изменениях температуры, ударах и т. п. и уменьшают их устойчивость против разъедающего действия шлаков и расплавов.

Структура качественных огнеупорных изделий должна быть однородной, без пустот и расслоений, а зерна различных фракций должны равномерно распределяться по всей поверхности излома. Отдельные зерна не должны выпадать и легко выкрашиваться.

Шамотные огнеупорные изделия (ГОСТ 390—69)

Шамотными называют огнеупорные изделия, изготовляемые путем обжига сырца, сформированного из молотой и просушенной огнеупорной глины, служащей связкой, и шамотного порошка как отощителя, с содержанием $Al_2O_3+TiO_2$ не менее 28%.

Содержание в шамотных изделиях кремнезема SiO_2 колеблется в пределах от 50 до 60%.

Основным сырьем для производства шамотных изделий являются огнеупорные глины. Глинами называют осадочные или разрушенные породы, способные образовывать с водой пластичное тесто, сохраняющее после высыхания приданную ему форму, а после обжига приобретающее твердость камня. Основным материалом, составляющим огнеупорные глины и каолины, является каолинит ($Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot 2H_2O$) следующего состава: Al_2O_3—46,6%; SiO_2 — 39,48% и H_2O — 13,92%.

Сырьем для производства шамотных огнеупоров служат глины основных месторождений: Часов-Ярского и Дружковского (в Донбассе), Латненского (около Воронежа), Боровичского (около Ленинграда), Белкинского, Богдановичского и Бускульского (на Урале), Мойского (в Казахстане) и др.

Состав глин наиболее крупного месторождения — Часов-Ярского следующий: $Al_2O_3+TiO_2$ — 30—35%; Fe_2O_3 — 1,3—3%, огнеупорность 1630—1710° С.

Шихта для изготовления шамотных огнеупорных изделий состоит из 40—50% просушенной глины и 50—60% шамота. Для приготовления связующей глины кусковую глину с влажностью 15—20% подвергают дроблению или стружке и затем просушивают в сушильных барабанах в течение 20—30 *мин* при температуре 600—800° С. Просушенная глина с влажностью не более 12% измельчается на бегунах или дезинтеграторах (машинах для размельчения материалов) до зерен размером не более 3 *мм*, просеивается на грохотах и подается в бункера, оборудованные дозировочными устройствами.

Шамотом называется глина, обожженная до температуры, при которой она теряет пластические свойства. Шамот готовится путем обжига кусковой глины или приготовленных из нее на пресс-вальцах с влажностью до 25% брикетов во вращающихся или шахтных печах при максимальной температуре 1320—1340° С. Обожженный шамот дробят в щековых дробилках. Тонкий помол осуществляется в шаровых мельницах или помольных бегунах до зерен следующих размеров: 1—3 *мм* — 25—35%, 0,52 — 1 *мм* — 20—30% и менее 0,52 *мм* — 35—45%. Рассеянный на грохотах до указанных выше размеров зерен шамот поступает в раздельные бункера с дозировочными устройствами.

Приготовление массы, из которой готовят шамотный сырец, производится в смесительных бегунах, куда поступают в необходимых количествах, и определенных фракций: шамотный порошок, полученный путем обжига глины, огнеупорная глина, а также дробленый шамотный бой, получающийся при ремонте промышленных печей. Влажность массы при полусухом прессовании колеблется в пределах от 8,5 до 10% и при прессовании из пластических масс — от 15 до 18%.

Таблица 3

Физико-химические показатели и показатели внешнего вида шамотных изделий

Показатели	Нормы для изделий марок ША	ШБ	ШВ	ШУС
Содержание Al_2O_3 в %, не менее	28	28	28	28
Дополнительная усадка в %, не более	0,7	0,7	0,7	0,7
при температуре в °С	1400	1350	1250	1250
Пористость открытая в %, не более:				
для обычных изделий I подгруппы	24	24	—	—
для обычных изделий II подгруппы	30	30	30	Не нормируется
Предел прочности при сжатии в *кгс/см²*, не менее:				
для обычных изделий I подгруппы	200	200	—	—
для обычных изделий II подгруппы	150	130	125	125
Температура начала деформации под нагрузкой 2 *кгс/см²* в °С, не ниже	1300	Не нормируется		
Кривизна (стрела прогиба) для изделий в *мм*:				
до 250 *мм*	1,5	1,5	2	3
выше 250 до 400 *мм*	2	2	3	—
Отбитость углов и ребер глубиной в *мм*, не более:				
на рабочей стороне	6	6	7	8
» нерабочей »	10	10	10	15
Выплавки отдельные диаметром в *мм*, не более	5	5	8	10
Посечки отдельные на поверхности изделия:				
шириной до 0,25 *мм*	Не нормируется			
» выше 0,25 до 0,5 *мм*	Допускаются длиной до 40 *мм*		Допускаются длиной до 60 *мм*	Не нормируются
На поверхности излома изделия шириной не более 0,5 *мм*	Допускаются длиной до 10 *мм*			То же
Трещины отдельные:				
на поверхности изделия шириной свыше 0,5 до 1,0 *мм*	Не допускаются			Допускаются длиной до 60 *мм*
на поверхности излома изделия шириной свыше 0,5 до 2 *мм*	Не допускаются			Допускаются длиной до 50 *мм* в количестве не более трех

Изделия из пластических масс прессуются на ленточных прессах при удельном давлении 15—20 *кгс/см²* и затем на допрессовочных (фрикционных или эксцентриковых) прессах при давлении 30—40 *кгс/см²*. При прессовании сырца из полусухих масс применяют механические прессы с удельным давлением 100—600 *кгс/см²*.

Сушка сырца для уменьшения его влажности и увеличения механической прочности перед обжигом ведется в туннельных и конвейерных сушилках при температуре 100—120° С для изделий, изготовленных из пластических масс, и 120—200° С для изделий, изготовленных из полусухих масс. Влажность сырца после сушки составляет 2—4%.

Обжиг шамотных изделий производят в периодических, газокамерных и туннельных печах при максимальной температуре обжига 1250—1380° С, в зависимости от природы исходного сырья, в течение 60—100 *ч* (в туннельных печах). После охлаждения шамотные изделия сортируют и отправляют потребителю.

Огнеупорные шамотные изделия общего назначения в зависимости от огнеупорности делятся на марки:

ША — с огнеупорностью не ниже 1730° С;
ШБ — с огнеупорностью не ниже 1670° С;
ШВ — с огнеупорностью не ниже 1580° С;
ШУС — с огнеупорностью не ниже 1580° С

(для тепловых агрегатов с умеренными температурными условиями эксплуатации).

По физико-химическим показателям и показателям внешнего вида огнеупорные шамотные изделия должны соответствовать требованиям, указанным в табл. 3.

Изделия по всей поверхности излома должны иметь однородное строение, без пустот и расслоений. Зерна шамота не должны выкрашиваться.

Предельные отклонения по размерам изделий должны соответствовать требованиям, указанным в табл. 4.

Таблица 4

Предельные отклонения по размерам шамотных изделий

Вид изделия	Предельные отклонения для изделий марок в *мм* ША, ШБ	ШВ	ШУС
Прямые и клиновые изделия нормальных размеров:			
длина	±4	±5	±6
ширина	±2	±3	±4
толщина	±2	±2	±3
Фасонные изделия:			
до 100 *мм*	±2	±2	—
свыше 100 до 400 *мм*	±2%	±2,5%	—

Шамотные огнеупорные изделия являются наиболее распространенными материалами для кладки промышленных печей и их вспомогательных устройств до температуры 1350—1400° С, т. е. температур, при которых шамотные изделия начинают деформироваться под нагрузкой 2 *кгс/см²*.

Многошамотные огнеупорные изделия

Многошамотные огнеупорные изделия состоят из 80—90% шамота и 4—20% связующей огнеупорной глины. Шамот с крупностью зерен от 5 до 10 *мм* (45—55%) и менее 0,54 *мм* (35—40%) поступает в смесительные бегуны, куда подают разжиженную в воде огнеупорную глину (шликер) и 0,5—2% сульфитно-спиртовой барды. После смешивания масса поступает на формовку, которая осуществляется пневматическими трамбовками в металлических формах (крупные изделия) или на прессах при давлении 300—400 *кгс/см²* (мелкие изделия). Отформованный сырец с влажностью 3—5% сушат в туннельных сушилах или на специальных стеллажах (крупноразмерные блоки) и затем обжигают в туннельных печах при тех же температурах, что и шамотные изделия.

Характерными особенностями многошамотных огнеупорных изделий является их высокая термостойкость, механическая прочность (500—1000 *кгс/см²*) и малая пористость (9—13%). Эти свойства многошамотных изделий, а также точность форм и размеров обусловили широкое применение их при сооружении стекловаренных печей. В этих агрегатах из многошамотных изделий выкладывают дно ванны и машинных каналов, стены ванны (окружка) и машинного канала, мосты машинных каналов и т. п. Срок службы многошамотных изделий в стекловаренных печах колеблется от полутора до двух лет.

Многошамотные изделия применяются при кладке доменных печей, где из них выполняют наиболее ответственные элементы самой печи и воздухонагревателей, а также футеровки вращающихся печей для обжига цементного клинкера.

Каолиновые огнеупорные изделия

Основным исходным сырьем для каолиновых огнеупорных изделий являются чистые каолиновые глины следующего химического состава: SiO_2—46—48%; $Al_2O_3+TiO_2$—36—39%; Fe_2O_3 — 0,5—0,9%; потери при прокаливании 13—14% (огнеупорность 1700—1790° С). При производстве каолиновых огнеупорных изделий из полусухих масс (наиболее распространенный метод их изготовления) шихта составляется из 70% шамота из каолинового брикета (каолин, обожженный до температуры 1300—1350° С), 15% сырого каолина и 15% пластичной огнеупорной глины.

Формовку изделий выполняют на прессах с давлением 400—600 *кгс/см²* или пневматическим трамбованием в металлических формах (крупные изделия). Сушку сырца производят аналогично шамотным изделиям. Обжиг просушенного сырца ведут при максимальной температуре 1450—1500° С. Огнеупорность каолиновых изделий 1740—1750° С; предел прочности при сжатии 120—700 *кгс/см²*; температура начала деформации под нагрузкой 2 *кгс/см²* — 1440—1480° С; кажущаяся пористость не более 30% (обычно 13—17%); объемная масса 2—2,3 *г/см³*.

Высокоглиноземистые огнеупорные изделия

Высокоглиноземистыми называются изделия, содержащие глинозема Al_2O_3 более 45%. Для их изготовления используют главным образом технический глинозем с добавлением огнеупорной глины. Непосредственно из технического глинозема изготовляют высокоглиноземистые корундовые изделия, из глинозема и огнеупорной глины в соответствующих пропорциях — силлиманитовые, муллитовые и муллитокорундовые изделия.

Корундовые изделия изготовляют из корундового шамота (обожженного глинозема) на глиноземистой связке. Для получения глиноземистого шамота глинозем подвергают мокрому помолу в течение 20—40 *ч* в шаровых мельницах. Полученный шлам обезвоживается до состояния пластичной массы, из которой формуют брикеты, обжигаемые после сушки при температуре 1700—1750° С.

Полученный в виде брикетов корундовый шамот измельчается до зерен размером от 3 до 0,2 *мм* в специальных шаровых мельницах. Смешение шихты производят в смесителях, куда кроме корундового шамота загружают до 45% мокромолотого глинозема и 1—1,5% сульфитно-спиртовой барды. Формовку сырца влажностью 7—8% производят на прессах под давлением 750 *кгс/см²*, а крупных изделий — пневматическим трамбованием в металлических формах. После сушки сырец обжигается в туннельных печах или периодических горнах при температуре 1700—1750° С.

Корундовые изделия готовят и сухим способом (без мокрого помола). В этом случае при изготовлении брикетов к глинозему добавляют 1—2% TiO_2. Изготовление различных изделий из глинозема и огнеупорной глины (в качестве связки) практически одинаково, разница заключается только в количестве огнеупорной глины, вводимой в массу при изготовлении брикетов и в шихту для формовки сырца. Брикеты готовят путем обжига обезвоженного шликера, получаемого путем смешения технического глинозема в виде мокромолотого шликера с глиняным шликером.

Помол брикетов производят до крупности зерен от 1 до 0,02 *мм*. Полученный глинокорундовый шамот соответствующих

фракций поступает в смесительные бегуны, куда подается и связка в виде смеси из тонкомолотой огнеупорной глины и глинокорундового шамота. Увлажнение шихты до 7—8% производят глинистым шликером. Прессование изделий ведут на прессах под давлением 1000 *кгс/см²*.

Сушат сырец при температуре до 100° С и обжигают в туннельных печах при температуре 1550—1600° С. Химический состав высокоглиноземистых изделий (в %) следующий:

SiO_2 — 0,0—45; Al_2O_3 — 50—100; MgO — до 0,2; CaO — до 0,2; Fe_2O_3 — до 2. Свойства высокоглиноземистых изделий приведены в табл. 5.

Таблица 5

Свойства высокоглиноземистых изделий

Содержание $Al_2O_3+TiO_2$ в высокоглиноземистых изделиях	Огнеупорность в °С	Предел прочности при сжатии в *кгс/см²*	Температура начала деформации под нагрузкой 2 *кгс/см²* в °С	Кажущаяся пористость в %	Объемная масса в *г/см³*
Не менее 45%	1750	150	1400	32	2,3—2,6
» » 55%	1780	400	1400	22	—
» » 62%	1800	350	1510	24	2,5—2,8
» » 80%	1850	350	1550—1600	23	2,7—2,9
» » 75—80% (корундовые)	1840	Выше 1400	1840	18—23	2,96—3,1

Высокоглиноземистые огнеупорные изделия обладают высокими огнеупорностью и температурой начала деформации под нагрузкой, а также термостойкостью и большой плотностью. Поэтому они нашли широкое применение при кладке доменных печей, воздухонагревателей, мартеновских печей, стен бассейна стекловаренных печей и других элементов промышленных печей, где требуется применение огнеупоров высокого качества.

Полукислые огнеупорные изделия (ГОСТ 4873—71)

Полукислые огнеупорные изделия содержат $Al_2O_3+TiO_2$ не более 30% и SiO_2 не менее 65%. Полукислые изделия готовят из высокопластичных огнеупорных глин (в качестве связки), шамотного порошка и кварцитов (чистый кварцевый песок, молотые кварциты и т. п.) в качестве заполнителей.

Производство полукислых изделий не отличается по технологии от производства шамотных изделий, причем свойства их зависят в основном от природы и соотношения в них кварца и глины, а также от гранулометрического состава кварца.

Обжиг сырца осуществляют при температуре 1300—1380° С. Полукислые огнеупорные изделия содержат: SiO_2 — 68—73%; Al_2O_3 — 23—27%; Fe_2O_3 — 1,05—1,25%; CaO—0,4—0,8% и

MgO — 0,2 — 0,4%. Огнеупорность 1710, 1670, 1610° С. Температура начала деформации под нагрузкой в 2 *кгс/см²* 1400—1300° С. Предел прочности при сжатии 100—150 *кгс/см²*. Пористость не более 27—30%, дополнительная усадка и рост не более 0,5—1%. Полукислые изделия выпускают трех классов А, Б и В.

Обладая более высокой температурой начала деформации под нагрузкой, лучшей шлакоустойчивостью при воздействии кислых шлаков и постоянством объема по сравнению с шамотными изделиями, полукислые огнеупоры в определенных условиях являются лучшим материалом, чем шамотные, и находят широкое применение при строительстве боровов, кладки коксовых печей, футеровки вагранок, насадки регенераторов и других видов промышленных печей и их элементов.

Динасовые огнеупорные изделия (ГОСТ 4157—69)

Динасовыми называют огнеупорные изделия с содержанием кремнезема SiO_2 не менее 94,5%, изготовляемые путем обжига сырца, сформованного из размолотых кварцитов на известковой или других связках. Основным сырьем для производства динасовых изделий являются кварциты с содержанием кремнезема не менее 95—97%. Наиболее значительные месторождения кварцитов находятся на территории Украинской ССР: Кутейниковское, Овручанское, Анновское; на Урале — Первоуральское и в Сибири — Анжеро-Судженское. Химический состав кварцитов Первоуральского месторождения: SiO_2— 98,2—91,1%; Al_2O_3—0,15—0,17%; Fe_2O_3 — до 0,42%; CaO—0,06—0,05%.

Кварцит, отсортированный на местах его разработки (карьерах), поступает на завод и направляется в моечные барабаны, из которых по системе ленточных транспортеров подается в щековые дробилки, где происходит его первичное дробление. Вторичное, более мелкое, дробление кварцита производят на бегунах. Полученный мелкозернистый кварцит просеивается на ситах с отверстиями от 6 до 0,088 *мм* и в виде зерен различной крупности (фракции) транспортируется в отдельные бункера. Из бункеров кварцит различных фракций в соответствующих количествах, необходимых для производства того или иного вида динасовых изделий, после магнитной сепарации (очистки от стальных включений) поступает в смесительные бегуны. К смешанным в бегунах кварцитам различной крупности добавляют до 10% брака динасового сырца и от 10 до 30% тонкоразмолотого динасового боя. Процесс смешения шихты длится около 3 *мин*, после чего в смесительные бегуны из мерников поступает известковое молоко, сульфитно-спиртовая барда и минерализатор. Полученную массу перемешивают в течение 12—18 *мин* и из смесительных бегунов подают в распределительные бункера, откуда она поступает на формовку.

Известковое молоко, приготовляемое непосредственно на заводе после дробления и гашения извести в специальных гасильных барабанах, добавляют в динасовую массу для придания сырцу необходимой механической прочности в процессе его сушки и обжига из расчета 2,5% CaO в пересчете на сухую смесь.

Сульфитно-спиртовая барда, являющаяся отходом при производстве целлюлозы, добавляется в динасовую массу от 0,4 до 1% сухой смеси для повышения пластичности и прочности сырца после сушки.

Минерализатор — техническую окалину — добавляют в динасовую массу в количестве не более 0,7% сухой смеси для повышения термической стойкости сырца во время обжига. Формовку динасовых изделий производят на прессах под давлением 150—300 *кгс/см²*. Особо сложные фасонные изделия формуют с помощью пневматических молотков, полностью заменивших ручную формовку.

Сформованный динас-сырец, имеющий влажность до 8,5%, подвергают сушке в туннельных или камерных сушилах при температуре 150° С в течение 8—12 *ч* (крупные изделия в течение 25—30 *ч*) для удаления из сырца влаги и придания ему необходимой механической прочности перед обжигом. После сушки влажность сырца не превышает 1,5—2%.

Обжиг динасового сырца осуществляют в туннельных или в газокамерных печах и периодических горнах в течение 8—14 суток при максимальной температуре 1430—1450° С. В процессе обжига относительно быстро доводят температуру до 573° С, при которой делают выдержку. Аналогично ведут подъем температуры и в интервале 700—1250° С. Скорость подъема температуры в пределах 1250—1450° С, т. е. конечной температуры обжига динасовых изделий, производят в замедленном темпе и выдержку при максимальной температуре производят в течение 20—40 *ч* в зависимости от размера обжигаемых изделий и их плотности. Более продолжительную выдержку делают для изделий большей массы, а также в случае необходимости получения динаса с меньшей плотностью.

Необходимость указанного выше режима обжига динасовых изделий объясняется следующим. Кремнезем, являющийся основной составной частью этого вида изделий, известен в семи кристаллических формах: кварц (α, β), тридимит (α, β, γ) и кристобалит (α, β). Все эти формы кремнезема имеют один и тот же химический состав, но физические свойства их различны (плотность, коэффициент линейного температурного расширения и т. п.).

При повышении температуры во время обжига кремнезем перерождается из одной кристаллической формы в другую. При этом в процессе перекристаллизации, в связи с изменениями объемной массы, а следовательно, и плотности кристаллов, происходит нарушение его структуры. При быстром повышении температур происходит резкое увеличение объема кристаллов кремнезема, что приводит к трещинам и посечкам готовых динасовых изделий, в связи с чем уменьшается их механическая прочность, шлакоустойчивость.

Во избежание подобных явлений и для получения качественных динасовых изделий без трещин и посечек в интервале температур, при которых происходит переход кремнезема из одной формы в другую при значительном изменении объем кристаллов, процесс обжига ведут в замедленном темпе с соответствующими выдержками при определенных температурах. Так, до температуры 573° С наблюдается переход тридимита γ в тридимит β и α (117—163° С) и кристобалита β в кристобалит α (180—270° С). В связи с тем что объем кристаллов при переходе кварца из одной указанной формы в другую совершается с незначительным увеличением объемов, повышение температуры осуществляют относительно быстро.

При температуре около 573° С происходит превращение β-кварца в α-кварц со значительным увеличением объемов кристаллов. Во избежание резкого роста их и для предохранения изделий от трещин повышение температуры ведут в замедленном темпе. В пределах температур 1250—1450° С α-кварц переходит в α-кристобалит и α-тридимит, а α-кристобалит также в α-тридимит со значительным изменением объема кристаллов. Вследствие этого повышение температур в этих пределах ведут в замедленном темпе и делают продолжительную выдержку при максимальной температуре.

Наименьшее изменение объема происходит при переходе тридимита из одной кристаллической формы в другую, в связи с чем при обжиге динасовых изделий принимают меры к получению их с большим содержанием тридимита (60—80%) с плотностью не более 2,38.

По окончании обжига динасовые изделия сортируют и отгружают потребителям. По огнеупорности и физико-химическим свойствам динасовые огнеупорные изделия подразделяются на изделия динасовые уплотненные ДБУ, изделия динасовые I группы — ДО-1 и изделия динасовые II группы — ДО-2 (табл. 6).

Обладая высокой огнеупорностью, хорошей устойчивостью к разрушению кислыми шлаками и большой механической прочностью, динасовые изделия широко применяются на строительстве и ремонте мартеновских и электросталеплавильных печей, коксовых батарей и стекловаренных печей.

Необходимо отметить, что в настоящее время динасовые изделия в мартеновских (головки и своды ванны) и электросталеплавильных печах (своды) в значительной степени заменяются магнезитохромитовыми изделиями, обеспечивающими более продолжительную работу этих печей.

Таблица 6

Состав и свойства динасовых изделий

Физические показатели и химический состав	ДБУ	ДО-1	ДО-2	Динас для кладки стекловаренных печей
Содержание SiO_2 в %, не менее	94,5	94,5	93,5	93,0
Содержание Al_2O_3, не более	—	1,5	—	—
Огнеупорность в °С, не ниже	1710	1710	1690	1710
Температура начала деформации под нагрузкой 2 *кгс/см²* в °С, не менее	1660	1650	1640	1650
Плотность в *г/см³*, не более	2,44—2,52	2,38	2,4	2,38
Предел прочности при сжатии в *кгс/см²*, не менее	225	225	175	150
Пористость (открытая) в %, не более	20	23	25	22

Магнезитовые огнеупорные изделия (ГОСТ 4689—63)

Магнезитовые огнеупорные изделия изготовляют путем обжига сырца, сформованного из обожженного магнезита ($MgCO_3=MgO+CO_2$) с соответствующими добавками, и содержат окиси магния MgO не менее 90%. Огнеупорная промышленность выпускает два вида магнезитовой продукции: металлургические порошки, идущие для наварки подин мартеновских и электросталеплавильных печей, и магнезитовые изделия — кирпич и специальные стаканы и пробки, предназначенные для разливки стали из сталеразливочных ковшей.

Сырьем для изготовления магнезитовых порошков и изделий является магнезит Саткинского месторождения (Южный Урал), представляющий горную породу следующего химического состава: MgO—45,2—46,2%; CaO—0,28—0,85%; SiO_2—0,5—0,78%; Fe_2O_3—0,6—1,45%; Al_2O_3—0,58—0,7%. Потери при прокаливании составляют 50,8—51,6%.

Поступающее с рудников (карьеров) сырье очищают от пустой породы, дробят в щековых дробилках, просеивают на валковых грохотах и подают на обжиг, который производят в шахтных, пересыпных шахтных и вращающихся печах.

Обжиг магнезита в шахтных печах с мазутным отоплением производит в течение 12—15 *ч* при температуре 1600—1650° С. Выгруженный из печей обожженный магнезит охлаждается, при этом спекшиеся куски его разрушаются. Зерна крупнее 30—40 *мм* направляют для приготовления металлургического порошка, а основная масса, состоящая из зерен размером 15 *мм* и менее, идет для изготовления магнезитовых изделий.

Магнезит, обжигаемый в пересыпных шахтных печах, отапливаемых коксом, в связи с загрязнением его золой топлива

используют только для производства металлургического порошка. Обжиг магнезита, идущего в наибольших количествах для изготовления порошков и изделий, производят при температуре 1580—1600° С во вращающихся печах. Металлургический магнезит после обжига и дробления направляют потребителям.

В зависимости от зернового состава порошки бывают трех марок. Плотность хорошо обожженного металлургического порошка магнезита при температуре обжига не ниже 1550° С равна 3,56 *г/см³*.

При наварке подин мартеновских и электросталеплавильных печей для понижения температуры спекания магнезита добавляют окалину. В настоящее время для наварки подин применяют специальный состав — мартенсит, состоящий и мелкодробленого металлургического магнезита с добавлением доломита или известняка, железной руды и форстерита. Мартенит имеет следующий химический состав: MgO—66—72%; SiO_2—3,8—5%; Al_2O_3—1,5—3%; Fe_2O_3—9—12%; CaO—11—16%. Плотность 3,6 *г/см³*. Температура спекания 1200° С.

Металлургический магнезит, являющийся основным материалом для производства магнезитовых изделий, измельчается в мельницах до крупности зерен от 2 до 0,1 *мм*. Смешение различных фракций обожженного магнезита производится в смесителе, куда добавляют брак сушки (сырец) до 10—15% и воду. Увлажненная до 2,5—3,5% шихта вылеживается в ямах в течение 4 суток и затем поступает в смеситель, где дополнительно увлажняется раствором сульфитно-спиртовой барды (до влажности 3—4%) для повышения пластических свойств массы и увеличения механической прочности сырца.

Прессование магнезитового кирпича производится на гидравлических прессах с двухступенчатым давлением: первое — 150 *кгс/см²* и второе — до 900 *кгс/см²*. Сушка сырца производится в туннельных сушилах в течение 16—18 *ч* при температуре 100—120° С, а обжиг — в газокамерных или туннельных печах в течение 12—14 суток при максимальной температуре 1580—1600° С.

Состав и физико-химические свойства магнезитовых изделий следующие: содержание MgO—91—96%; CaO не более 3%; SiO_2—2—3%; Al_2O_3 до 2%. Огнеупорность не ниже 2000° С. Температура начала деформации под нагрузкой 2 *кгс/см²* выше 1500° С. Предел прочности при сжатии 400 *кгс/см²*. Пористость (кажущаяся) 17,5—20%. Объемная масса не менее 2,6 *г/см³*.

Специальные магнезитовые изделия

К специальным магнезитовым изделиям относятся: термостойкие — с высокой температурой деформации под нагрузкой, плотные и особо плотные.

Термостойкие магнезитовые изделия изготовляют из металлургического магнезита, имеющего крупность зерен от 0,5 до 2 *мм*, с добавлением 5 мас. ч. каустического магнезита (магнезит, обожженный при температуре 550—650° С) на 100 мас. ч. металлургического магнезита, 15 мас. ч. окиси алюминия и 5 мас. ч. хромита, измельченных до крупности зерен менее 0,088 *мм*.

Тонкоизмельченные составляющие шихты перемешивают на бегунах, где к ним добавляют раствор сульфитно-спиртовой барды до получения массы с влажностью 4,5—5,5%.

Прессование изделий выполняют на фрикционных прессах под давлением 800 *кгс/см²*. Сушка сырца не отличается от сушки обычного магнезитового кирпича. Обжиг термостойкого магнезита ведут в газокамерных печах при максимальной температуре во время выдержки не ниже 1650° С.

Термостойкие магнезитовые изделия имеют огнеупорность не ниже 1900° С. Предел прочности при сжатии от 500 до 1000 *кгс/см²*. Температура деформации под нагрузкой 2 *кгс/см²* 1520—1700° С, объемная масса 2,8—3 *г/см³*.

Плотные магнезитовые изделия, имеющие пористость в пределах 10—15% (обычные магнезитовые изделия имеют пористость 15—22%), изготовляют из обожженного магнезита с добавлением 3% окиси титана TiO_2 и 5% каустического магнезита.

Приготовление шихты, сушка и обжиг плотных магнезитовых изделий ничем не отличаются от производства обычных магнезитовых изделий. Объемная масса плотных магнезитовых изделий 3,04 *г/см³*, предел прочности при сжатии 1100 *кгс/см²*. Кажущаяся пористость 12,8%. Температура деформации под нагрузкой 2 *кгс/см²* 1550° С.

Высокопрочные магнезитовые изделия производят из обожженного магнезита с добавлением от 0,1 до 1% TiO_2, просеянного через сито, имеющее 10 000 отверстий на 1 *см²*.

Хорошо смешанная масса, увлажненная сульфитно-спиртовой бардой, прессуется под давлением 800 *кгс/см²* в брикеты, которые проходят сушку и затем обжиг при температуре 1250—1350° С. Обожженные брикеты размельчают до крупности зерен от 0 до 4 *мм* и полученный порошок увлажняют сульфитно-спиртовой бардой. Формовку сырца после сушки выполняют при температуре 1650—1720° С.

Высокоплотный магнезит имеет предел прочности при сжатии 1740—2800 *кгс/см²*. Объемная масса 3,2—3,3 *г/см³*, кажущаяся пористость 2,7—6,4%. Температура деформации под нагрузкой 2 *кгс/см²* 1580—1590° С.

Магнезитовые огнеупорные изделия обладают высокой огнеупорностью и механической прочностью на сжатие, незначительной пористостью, высокой температурой деформации под нагрузкой и хорошим сопротивлением разъеданию основными

шлаками. По признакам внешнего вида магнезитовые изделия бывают первого и второго сорта.

Хромитовые огнеупорные изделия

Сырьем для изготовления хромитовых огнеупорных изделий является хромитовая руда Сарановского месторождения (Урал) следующего химического состава: Cr_2O_3—42—38%; Al_2O_3—14—23%; FeO—16—22%; MgO—12—17% и SiO_2—2—8%.

Поступающую из карьеров хромитовую руду дробят на щековых дробилках до крупности зерен от 0,5 до 5 *мм* и подают в смесительные бегуны, где к ней добавляют предварительно обожженный тонкомолотый дунит — 6% и каустический магнезит — 9%. К хорошо промешанной смеси добавляют сульфитно-спиртовую барду (0,5%) и воду до получения массы с влажностью 4—5%.

Формование сырца производят на прессах под давлением 500—600 *кгс/см²*. После сушки сырец обжигают в туннельных печах в течение 100—120 *ч* при максимальной температуре 1650° С.

Хромитовые огнеупорные изделия содержат: Cr_2O_3—38—48%; Al_2O_3—11—18%; MgO—11—24%; SiO_2—2—8%; Fe_2O_3—15—23% и CaO—1,5—2%. Огнеупорность свыше 1900° С. Предел прочности при сжатии 300—700 *кгс/см²*; температура деформации под нагрузкой 2 *кгс/см²* 1570—1690° С. Кажущаяся пористость 15—17%: объемная масса 3—3,1 *г/см²*.

Хромитовый кирпич устойчив против действия основных и кислых шлаков, является нейтральным и поэтому применяется как прослойка между соприкасающимися поверхностями кислых и основных огнеупорных изделий, например между магнезитовой и динасовой кладкой передних столбиков мартеновской печи.

Магнезитохромитовые и хромомагнезитовые огнеупорные изделия (ГОСТ 5381—50)

Магнезитохромитовые высокоогнеупорные изделия содержат не менее 60% MgO и 5—15% Cr_2O_3, хромомагнезитовые от 42 до 60% MgO и до 32% Cr_2O_3. Изделия, выпускаемые огнеупорной промышленностью, подразделяют на обжиговые и безобжиговые.

Обжиговые изделия бывают двух видов: общего назначения и термостойкие, предназначенные специально для кладки сводов мартеновских и электросталеплавильных печей. Магнезито-хромитовые и хромомагнезитовые изделия общего назначения изготовляют из хромита и магнезита. Измельченный до размеров зерен от 0,06 до 22 *мм* хромит и обожженный магне-

зит увлажняют до 2,5—3,5%. Полученную смесь выдерживают в специальных ямах в течение 2—3 суток, после чего к ней добавляют 20—30% предварительно измельченного, увлажненного до 2—3% и вылежавшегося в течение не менее суток хромомагнезитового боя, полученного от разборки кладки печей во время их ремонта. Полученную из этих составляющих массу (шихту) направляют на формовку. Формовка, сушка и обжиг этих изделий аналогичны подобным операциям для магнезитовых изделий.

Огнеупорность изделий общего назначения не ниже 2000° С. Предел прочности при сжатии 200—500 *кгс/см²*; температура начала деформации под нагрузкой 2 *кгс/см²* 1450—1600° С; кажущаяся пористость 11,5—26,5%; объемная масса 2,7—2,86 *г/см³*; термостойкость 3—5.

Шихта термостойкого хромомагнезита составляется из 30—35% хромита, 50—60% обожженного магнезита и 4—7% железной руды с содержанием Fe_2O_3 не менее 50%. Хромит измельчают до зерен размером от 3 до 0,8 *мм*, а обожженный магнезит и железную руду — до зерен менее 1 *мм*. Смешанная в необходимых пропорциях шихта увлажняется до 2,5—4% и в течение 4 суток вылеживается в специальных ямах, после чего поступает в смесительные бегуны, где к ней из мерников добавляют сульфитно-спиртовую барду в количестве 0,5% и затем готовую массу подают на формовку.

Прессование магнезитохромитовых и хромомагнезитовых изделий, их сушка и обжиг выполняются по тому же режиму, что и магнезитовых изделий. Огнеупорность термостойких хромомагнезитовых изделий до 2000° С; предел прочности при сжатии 300—500 *кгс/см²*; температура начала деформации под нагрузкой 2 *кгс/см²* 1470—1500° С; пористость кажущаяся не более 25%; объемная масса 2,78—2,87 *г/см³*; термостойкость 40—60.

Безобжиговые магнезитохромитовые и хромомагнезитовые изделия изготовляют из обожженного магнезита и хромита. В качестве связки служит силикат-глыба (в количестве до 3%). Тонкоизмельченные составляющие шихты подают в пропарочный барабан, где они смешиваются и в течение 40 *мин* подвергаются действию пара под давлением 0,6 *кгс/см²*. Влажность готовой массы достигает 2—3%.

Сырец прессуют на гидравлических прессах под давлением 150 *кгс/см²*, а затем дополнительно под давлением 900 *кгс/см²*. Температура массы, поступающей на прессование, не менее 50° С. Сушка сырца до влажности 0,2% происходит в течение 48 *ч* при температуре от 50 до 110° С. После сушки изделия поступают на склад для сортировки и отправки потребителю.

Магнезито-хромитовые и хромомагнезитовые безобжиговые изделия в зависимости от физико-химических свойств и наличия или отсутствия металлических кассет делятся на марки (табл. 7).

Таблица 7

Физико-химические показатели магнезито-хромитовых и хромомагнезитовых безобжиговых изделий

Марка изделий	Содержание Cr_2O_3 в %	Содержание MgO в %, не менее	Температура начала деформации под нагрузкой 2 *кгс/см²* в °С, не ниже	Плотность в *г/см³*, не ниже
БМХ — безобжиговые магнезито-хромитовые БМХК — безобжиговые магнезито-хромитовые в кассетах	5—18	Выше 60	1430	2,85
БХМ — безобжиговые хромомагнезитовые БХМК — безобжиговые хромомагнезитовые в кассетах	15—30	40 до 60	1400	2,95

Для изготовления кассет применяется мягкая листовая сталь марки 08КП толщиной 0,8—1 *мм*. Высота и длина кассеты меньше длины и толщины изделия на 5±1 *мм*.

Обладая высокой огнеупорностью, являясь высокоустойчивыми против основных и железистых шлаков, а также имея высокий предел прочности, магнезитохромитовые и хромомагнезитовые изделия нашли широкое применение на строительстве промышленных печей, особенно мартеновских и электросталеплавильных. Своды мартеновских печей, выполняемые из магнезитохромитовых и хромомагнезитовых изделий, имеющих большую объемную массу и пониженную температуру деформации под нагрузкой, в отличие от динасовых (распорных) делаются подвесными.

Следует отметить, что проведенные в последнее время производственные испытания безобжиговых изделий подтвердили целесообразность их широкого применения.

Доломитовые огнеупорные изделия

Доломитовые огнеупорные изделия содержат от 15 до 70% CaO и 35—60% MgO. Исходным сырьем для изготовления доломитовых огнеупорных изделий является сырой доломит следующего состава: MgO не менее 19%, $SiO_2+Fe_2O_3$ не более 9%, в том числе SiO_2 не более 7%.

Доломитовые изделия, так же как и магнезитовые, бывают двух видов: доломитовые металлургические порошки, получаемые путем обжига сырого доломита в шахтных или вращающихся печах при температуре 1550—1650° С, применяемые для заправки подин мартеновских печей в виде порошков с разме-

ром зерен от 4 до 20 *мм*, и доломитовые изделия в виде кирпича — обожженные или безобжиговые.

При изготовлении доломитовых изделий (кирпича) сырой доломит размалывают на шаровых мельницах и смешивают с водой. В полученную массу добавляют 10—15% тонкомолотого песка или трепела и после выдерживания в ямах обжигают во вращающихся печах на клинкер.

Из молотого клинкера, увлажненного водным раствором сульфитно-спиртовой барды, на прессах под давлением 500—600 *кгс/см²* приготовляют сырец, сушку которого выполняют в течение 10—15 *ч* при температуре 180° С. На этом изготовление безобжиговых изделий заканчивается, и они направляются потребителю. Для изготовления обжиговых доломитовых изделий высушенный сырец обжигают в туннельных или газокамерных печах при максимальной температуре 1550—1580° С.

Содержание CaO в доломитовых изделиях — 30—50%; SiO_2—9—12%; MgO—30—50%; Fe_2O_3 до 3% и Al_2O_3 до 1%. Огнеупорность 1770—1780° С, предел прочности при сжатии 1000—1300 *кгс/см²*, температура деформации под нагрузкой 2 *кгс/см²* 1550—1700° С, объемная масса 2,8—2,9 *г/см³*.

Форстеритовые огнеупорные изделия

Сырьем для изготовления форстеритовых огнеупорных изделий служат дунит, тальк, оливинит и серпентинит. В настоящее время форстеритовые огнеупорные изделия в основном изготовляют из предварительно обожженного во вращающихся печах при температуре 1450° С дунита. К обожженному и измельченному на бегунах или на шаровых мельницах до крупности зерен менее 3 *мм* дуниту добавляют 10—15% тонкомолотого каустического магнезита (сито 0,88 *мм*). Форстерито-хромитовые изделия изготовляются из тех же компонентов с добавкой хромитовой руды.

Смешение дунита и каустического магнезита производят в смесительных бегунах, а для увлажнения массы применяют водный раствор хлористого магния.

Прессовку сырца, сушку и обжиг производят аналогично этим операциям при изготовлении магнезитового кирпича, за исключением того, что максимальная температура обжига форстеритового кирпича выше и составляет 1650—1700° С.

В зависимости от химико-минерального состава и термической обработки форстеритовые изделия выпускаются следующих марок: Ф — форстеритовые безобжиговые и ФХ — форстерито-хромитовые.

Физико-химические показатели форстеритовых изделий приведены в табл. 8.

Объемная масса 2,4—2 *г/см³*. Форстеритовые изделия (кирпич) нашли применение для кладки верхних рядов насадок ре-

Таблица 8

Физико-химические показатели форстеритовых изделий

Показатели	Нормы для изделий марок		
	Ф	ФБ	ФХ
Содержание MgO в %, не менее .	54	54	46
Содержание SiO_2 в %, не более .	33	33	30
Содержание Cr_2O_3 в %, в пределах	—	—	8—12
Огнеупорность в °С, не ниже . . .	1750	1750	1750
Пористость открытая в %, не более	25	Не нормируется	25
Предел прочности при сжатии в *кгс/см²*, не менее	280	350	250
Температура начала деформации под нагрузкой 2 *кгс/см²* в °С, не ниже	1570	Не нормируется	1550

генераторов, где они служат значительно дольше, чем динасовые и шамотные изделия. Производство форстеритовых изделий и применение их с каждым годом увеличиваются.

Периклазошпинелидные огнеупорные изделия

Исходным сырьем для производства периклазошпинелидных огнеупоров, основой которых является шпинель — $MgO \cdot Al_2O_3$, служат глинозем и каустический магнезит. Для составления шихты берут 70% глинозема и 30% каустического магнезита. Эти компоненты тонко измельчают и подают в смесительные бегуны, где к смеси добавляют 2% тонкомолотого хромита, а затем увлажняют до 3—4% водным раствором сульфитно-спиртовой барды (0,5%).

Полученную массу прессуют в брикеты под давлением 150—200 *кгс/см²*. Брикеты обжигают при температуре 1650° С. Обожженные брикеты дробят в щековых дробилках и бегунах до зерен размером от 2—3 до 0,5 *мм*. К измельченным брикетам в смесительных бегунах добавляют до 20% всей шихты по массе указанных выше доз в тонкоизмельченном виде: глинозем, каустический магнезит и хромит, после чего полученная смесь увлажняется водным раствором хлористого магния.

Прессование ведется на гидравлических прессах под давлением 500—600 *кгс/см²*. Прессованный сырец проходит сушку и обжиг при температуре 1650° С.

В периклазошпинелидных изделиях содержится: Al_2O_3—25—65%; MgO—18—30%; SiO_2— до 3%; CaO—до 1%; Fe_2O_3—2—24% и Cr_2O_3—2—40%. Огнеупорность свыше 1900° С, предел прочности при сжатии 500—1200 *кгс/см²*, температура начала деформации под нагрузкой 2 *кгс/см²* 1600—1650° С; пористость кажущаяся 19—25%, объемная масса 2,6—2,8 *г/см³*.

Углеродсодержащие огнеупорные изделия

Углеродистые (коксовые) изделия изготовляют путем обжига в восстановительной среде измельченного металлургического кокса на связке из каменноугольной смолы. Сырьем для изготовления углеродистых изделий являются: термоантрацит (антрацит, подвергнутый термической обработке при температуре 1100° С), металлургический (доменный) кокс, графит и каменноугольная смола, изготовляемая путем варки (при температуре 90—100° С) сырой каменноугольной смолы.

Шихта, состоящая из 45—55% термоантрацита, 20—30% боя углеродистых изделий, 3—5% графита и 20% смолы (крупные углеродистые блоки) или 80% тонкоизмельченного кокса и 20% смолы (для изделий небольших размеров), смешивается в обогреваемых смесительных бегунах при температуре 90—100° С. Формовку мелких изделий производят на прессах под давлением 200—350 *кгс/см²*, крупных — путем трамбования в формах при температуре 60—80° С.

Изделия (блоки) обжигают в газокамерных печах под слоем углеродистой засыпки без доступа воздуха при температуре 1100—1450° С в течение 15—20 суток.

Углеродистые изделия с содержанием углерода 85—92% и золы не более 10% имеют объемную массу 1,4—1,65 *г/см³*. Предел прочности при сжатии порядка 250—800 *кгс/см²*. Они деформируются под нагрузкой 2 *кгс/см²* при температуре 1700—1800° С.

Обладая высокой температурой начала деформации под нагрузкой (начало горения), высокой термической стойкостью, низким коэффициентом линейного температурного расширения ($0{,}5 \cdot 10^{-5}$) и хорошей шлакоустойчивостью, углеродистые изделия применяются при кладке лещади и горна доменных печей и кладки подин в печах цветной металлургии. При кладке лещади доменных печей толстые швы между крупными углеродистыми блоками заполняются с помощью нагретых до температуры 400—500° С пневмотрамбовок массой, состоящей из 32% термоантрацита, 50% боя электродов и 18% каменноугольного пека. Для заполнения тонких швов применяется углеродистая паста, состоящая из 50% литейного кокса, 22,5% каменноугольного пека и 27,5% антраценового масла.

Карборундовые огнеупорные изделия

Карборунд — искусственный материал, получаемый путем нагрева в электрических печах шихты, состоящей из нефтяного кокса —34,4%, кварцевого песка —53,4%, поваренной соли— 8,5% и древесных опилок — 3,6%. Карборунд SiC не плавится, а при температуре 1900—2000° С разлагается на кремний и углерод (графит).

Карборундовые огнеупорные изделия готовят на глинистой, кремнеземистой, ферросилициевой связках или без связки (рекристаллизованные). Изделия на глинистой связке готовят из шихты, состоящей из 97% карборунда и 3% глины, увлажняемой до 7—8% сульфитно-спиртовой бардой. Иногда содержание глины доводят до 12% и более.

Формовку изделий осуществляют на прессах под давлением 500—1000 *кгс/см²* или трамбованием пневматическими трамбовками. Обжиг сырца производят в газокамерных или туннельных печах при температуре 1400° С открытым способом. При изготовлении карборундовых изделий на кремнеземистой или ферросилициевой связках шихту составляют из 90% карборунда и 10% чистого кварца (или ферросилиция).

При изготовлении карборундовых изделий без связки шихта составляется из 93—94% карборунда и 7—6% жидкого стекла. Обжиг этого вида изделий производят при температуре 2300° С. Карборундовые изделия, содержащие 82—87% SiC и 9—10% SiO_2, обладают большой механической прочностью —470 *кгс/см²* и выше, высокой температурой начала деформации под нагрузкой 2 *кгс/см²* — 1700° С и большой теплопроводностью.

Плавленые муллитовые изделия

Сырьем для плавленых муллитовых изделий служат бокситы, каолины и высокоглиноземистые алюмосиликаты. Процесс получения плавленого муллита из этого сырья основан на восстановлении при высоких температурах кремния и связывания его железом, содержащимся в сырье, с получением муллита — $3Al_2O_3 \cdot 2\ SiO_2$ ($2Al_2O_3 \cdot SiO_2$) и ферросилиция — FeSi.

Для повышения качества муллитовых изделий (стеклоустойчивости) в шихту в качестве добавки вводят цирконовый концентрат $ZrSiO_4$, обеспечивающий получение в муллитовых изделиях двуокиси циркония ZrO_2.

Составляющие шихты сушат, тонко измельчают и смешивают. К шихте добавляют 5—8% сульфитного щелока и из полученной массы на прессах под давлением 300 *кгс/см²* изготовляют брикеты.

Плавку брикетов производят в дуговых электропечах. Для удаления (восстановления) из расплава железа непосредственно в печь вводят графит, древесный уголь или антрацит.

Плавка муллита ведется при температуре 1900—2000° С. Полученный расплав разливают в формы из графита или из кварцевого песка. Охлаждают изделия в течение 4—10 суток.

Химический состав муллитоцирконовых изделий; SiO_2—23—24%; Al_2O_3—64—65%; ZrO_2—5—6%; Fe_2O_3—2—2,5%; TiO_2—1—2%; CaO—1,5—2%. Объемная масса 3,2 *г/см³*, огнеупорность 1850° С.

В настоящее время отечественными заводами выпускаются муллитовые изделия более высокого качества, к которым относят-

ся бакор и бакор-33. Основными компонентами шихты бакора являются глинозем, каолин и цирконовый концентрат.

Химический состав бакора: SiO_2 — 15—16%; Al_2O_3 — 62—63%; ZrO_2 — 20—21% и плавней: CaO, Fe_2O_3 и TiO_2 — порядка 3%. Основными компонентами шихты бакора-33 являются технический глинозем, обезжелезненный циркон и техническая двуокись циркония. Химический состав бакора-33: SiO_2 — 13,7%; Al_2O_3 — 49,8%; ZrO_2 — 32%; (Fe_2O_3+CaO+TiO_2) — 2,8%. Объемная масса 3,3—3 *г/см*³. Бакор-33 очень незначительно отличается от наиболее высокостойких зарубежных плавленых муллитовых изделий, например корхарта, содержащего SiO_2 — 12—14%; Al_2O_3 — 48—50% и ZrO_2 — 33—34%. Муллитовые плавленые изделия по сравнению со всеми другими видами огнеупорных изделий обладают наибольшей устойчивостью против разъедания стекломассой.

Жаростойкие бетоны и набивные массы

Жаростойкий бетон — безобжиговый искусственный материал, способный при длительном воздействии на него высоких температур сохранять в необходимых пределах свои физико-механические свойства.

В зависимости от степени огнеупорности жаростойкие бетоны делятся на: высокоогнеупорные с огнеупорностью выше 1770° С, огнеупорные с огнеупорностью от 1580 до 1770° С и жароупорные с огнеупорностью ниже 1580° С.

Жаростойкие бетоны состоят из вяжущего (гидравлического или воздушного) и заполнителя. В вяжущее иногда вводится минеральная тонкомолотая добавка.

В зависимости от применяемого вяжущего жаростойкие бетоны делятся на две группы: бетоны на гидравлических и воздушно-твердеющих вяжущих. К первой группе относятся бетоны на портландцементе, шлакопортландцементе, глиноземистом и высокоглиноземистом цементах, ко второй группе — бетоны на жидком стекле, периклазовом цементе и алюмофосфатной связке.

В зависимости от объемной массы жаростойкие бетоны делятся на обычные (тяжелые) и легкие. Бетоны с объемной массой в высушенном состоянии 1500 *кг/м*³ называются легкими.

Вяжущее — тонко измельченные вещества, которые при затворении водой или растворами каких-либо солей до тестообразного жидкого состояния со временем затвердевают, превращаясь в камневидное тело, связывая при этом в монолит отдельные зерна мелких и крупных заполнителей.

Воздушно-твердеющими называют такие вяжущие, которые твердеют и набирают прочность на воздухе; к ним относятся: периклазовый цемент, жидкое стекло и алюмофосфатные связки.

Периклазовый цемент — это тонкомолотый обожженный магнезитпериклаз, затворение которого производится хлористым магнием, сернокислым магнием или водным раствором гидрата сернокислого магния плотностью 1,218 *г/см*³.

Жидкое или растворимое стекло представляет собой коллоид, обладающий хорошими вяжущими свойствами.

При изготовлении жаростойких бетонов применяется натриевое жидкое стекло — силикат натрия $Na_2O \cdot n\,SiO_2$. Отношение количества молекул кремнезема к количеству молекул окиси натрия называется модулем жидкого стекла, который для жаростойкого бетона должен находиться в пределах 2,4—3,0. Чем меньше модуль, тем больше в стекле окиси натрия и, следовательно, тем ниже огнеупорные свойства бетона.

Плотность жидкого стекла находится в пределах 1,38—1,45 *г/см*³. Иногда жидкое стекло поставляется в виде силикат-глыбы, т. е. не растворенное в воде. Растворение силикат-глыбы производится в автоклавах паром под давлением 3—8 *кгс/см*² в течение 3—5 *ч*. Для обеспечения твердения бетона на жидком стекле в сухую смесь добавляют кремнефтористый натрий в количестве 12,4—13,2% массы жидкого стекла. При введении в состав жаростойкого бетона тонкомолотой добавки — шамотной, кремнефтористый натрий добавляется в количестве 11—12% массы жидкого стекла, а при введении магнезитовой — 5—6%. Для обеспечения твердения бетона на жидком стекле вместо кремнефтористого натрия можно применять нефелиновый шлак (отход алюминиевого производства) и саморассыпающиеся шлаки металлургических производств.

К гидравлическим вяжущим относится глиноземистый цемент, получаемый путем тонкого измельчения сплава или клинкера, изготовляемых путем расплавления или обжига до спекания сырьевой смеси надлежащего состава, обеспечивающего преобладание в готовом продукте низкоосновных алюминатов кальция. Основными составляющими глиноземистого цемента являются: глинозем Al_2O_3 — 39—47%, известь CaO — 32—44% и кремнезем SiO_2 — 8—13%.

В высокоглиноземистом цементе содержание глинозема находится в пределах 70—82%. В зависимости от прочности глиноземистый цемент выпускается трех марок: 300, 400, 500 (в трехсуточном возрасте при хранении на воздухе).

Прочность стандартных образцов в возрасте одних суток для марки цемента 300 должна быть не ниже 250 *кгс/см*², для марки 400 — не ниже 350 *кгс/см*² и марки 500 — не ниже 450 *кгс/см*².

Из приведенных данных следует, что глиноземистый цемент — быстротвердеющее вяжущее, и это является его характерной особенностью. Сроки схватывания глиноземистого цемента: начало схватывания не ранее 30 *мин*, конец схватывания не позднее 12 *ч* от начала затвердевания.

Портландцемент — гидравлическое вяжущее — продукт тонкоизмельченного клинкера, получаемого обжигом до спекания сырьевой смеси надлежащего состава, обеспечивающего преоб-

ладание в полученном клинкере силикатов кальция. Содержание отдельных окислов в портландцементе колеблется в сравнительно ограниченных пределах, а именно (в %): CaO — 64—67; SiO_2 — 19—24; Al_2O_3—2—6; MgO не более 4, 5 и SO_3 не более 3. При помоле клинкера к нему добавляется не более 15% активной минеральной добавки.

Прочность образцов портландцемента в трехсуточном возрасте составляет примерно 50% и семисуточном 60—75% 28-суточной прочности. Портландцемент выпускается следующих марок: 200, 250, 300, 400, 450 и 500.

Пуццолановый портландцемент — гидравлическое вяжущее, получаемое совместным помолом клинкера портландцемента с активными минеральными добавками (обожженной глины, топливной золы и др.) не менее 25 и не более 40% массы цемента. Для регулирования сроков схватывания при помоле добавляется глина в количестве 2—3%. Пуццолановый цемент не имеет постоянного химического состава, так как последний зависит от количества прибавляемых к клинкеру активных добавок. Прочность в семисуточном возрасте пуццоланового цемента по отношению к 28-суточному возрасту составляет 50—60% в зависимости от марки цемента. Промышленностью выпускается пуццолановый цемент пяти марок: 200, 250, 300, 400, 500.

Шлакопортландцемент — гидравлическое вяжущее, получаемое совместным помолом клинкера портландцемента с доменными гранулированными шлаками (от 20 до 80%); для регулирования сроков схватывания при помоле добавляется глина в количестве 2—5% массы всей смеси. Прочность образца в семисуточном возрасте составляет 50—60% 28-суточного возраста. Промышленностью шлакопортландцемент выпускается шести марок: 150, 200, 250, 300, 400 и 500.

Тонкомолотые добавки (микрозаполнители) применяются при изготовлении жаростойких бетонов, за исключением бетонов на глиноземистом и высокоглиноземистом цементах. Для бетонов на портландцементах применяется шамотная и полукислая тонкомолотая добавка с содержанием свободного кремнезема в аморфном состоянии, для высокоогнеупорных бетонов — хромитовая добавка. Тонкомолотая добавка всех видов должна полностью проходить через сито с отверстиями 0,15 *мм*.

Шамотные и полукислые тонкомолотые добавки с содержанием глинозема соответственно не менее 30 и 20% массы прокаленной навески с огнеупорностью 1710° С для класса А и 1670° С для класса Б изготовляются они путем тонкомолотого помола обожженных до спекания шамотных и полукислых глин, а также лома шамотного кирпича, получаемого при разборке кладки промышленных печей.

Хромитовая тонкомолотая добавка готовится из хромитовой руды Кимперсайского месторождения с содержанием окиси хрома в руде не менее 45%, кремнезема — не более 8%, окиси и закиси железа — не более 16% и окиси кальция — не более 1,5%.

Магнезитовая тонкомолотая добавка готовится из боя магнезитового кирпича или металлургического магнезита.

При изготовлении жаростойких кислотоупорных бетонов на жидком стекле в качестве тонкомолотой добавки используются базальт, андезит, диабаз и др., не содержащие свободного кристаллического кремнезема и некарбонатные.

При изготовлении бетонов на гидравлических вяжущих, кроме перечисленных выше, в качестве добавок применяются: лёсс (содержащий не менее 70% кремнезема, не более 5% окиси железа и не более 8% окиси кальция), лёссовидный суглинок (содержащий не менее 65% кремнезема, не более 8% окиси железа и 8% окиси кальция), получаемые из боя обыкновенного обожженного глиняного кирпича, топливных и гранулированных отвальных доменных шлаков.

Перечень материалов, из которых приготовляют заполнители, являющиеся основой каркаса или скелета жаростойких бетонов, велик. Заполнители в зависимости от величины зерен делятся на крупные, зерна которых имеют размер от 5 до 20 *мм* (щебень), и мелкие с размерами зерен от 0,15 до 5 *мм* (песок).

При подборе состава заполнителей необходимо стремиться к тому, чтобы их гранулометрический состав обеспечивал наиболее плотную укладку зерен, т. е. чтобы объем межзернового пространства был минимальным.

Требования к физико-химическим свойствам и другим характеристикам заполнителей предъявляются те же, что и к соответствующим видам тонкомолотых добавок.

В качестве заполнителей для изготовления легких жаростойких бетонов применяются керамзит, перлит и вермикулит.

Керамзит (гравий и песок) представляет собой искусственный пористый материал ячеистого строения, по форме напоминающий гравий, получаемый путем быстрого нагрева обычных красных глин до температуры их вспучивания (1100—1300° С). Размеры зерен керамзита от 5 до 20 *мм* (гравий) и от 0,15 до 5 *мм* (песок). Объемная масса насыпного керамзита 600 *кг/м*^{3} (гравий) и от 400 до 1000 *кг/м*^{3} (песок). Содержание в керамзите, применяемом для изготовления жаростойких бетонов, свободной окиси кальция и окиси магния не допускается.

Перлит — вулканическое стекло, содержит до 72—76% кремнезема. Для изготовления жаростойких легких бетонов применяется вспученный перлит, т. е. обожженный при температуре 1000—1200° С. Объемная масса перлитового песка колеблется в пределах 100—400 *кг/м*^{3}, щебня 450—500 *кг/м*^{3}.

Вермикулит — минерал из группы гидрослюд. При мгновенном (5—10 *сек*) нагревании до температуры 800—900° С он увеличивается в объеме в 15—20 раз. Насыпная объемная масса вспученного вермикулита составляет 70—200 *кг/м*^{3}.

Составы жаростойких бетонов устанавливаются проектом и окончательно подбираются лабораторией в зависимости от свойств имеющихся составляющих. Приведем несколько составов жаростойких бетонов на различных вяжущих.

Бетон на глиноземистом цементе (на 1 $м^3$ бетона): глиноземистый цемент — 300 *кг*, хромитовый щебень — 1200 *кг*, хромитовый песок — 1200 *кг*, глиноземистый цемент — 300 *кг*, шамотный щебень — 750 *кг*, шамотный песок — 750 *кг*.

Бетон на портландцементе (на 1 $м^3$ бетона): портландцемент — 300 *кг*, шамотный щебень — 700 *кг*, шамотный песок — 700—500 *кг*, шамот тонкомолотый — 100—300 *кг*, портландцемент — 250 *кг*, хромитовый щебень — 1200 *кг*, хромитовый песок — 850 *кг*, хромит тонкомолотый — 750 *кг*.

Бетон на жидком стекле (на 1 $м^3$ бетона): жидкое стекло — 300—350 *кг*, хромитовый щебень — 1300 *кг*, хромитовый песок — 800 *кг*, хромит тонкомолотый — 650 *кг*, жидкое стекло — 300—350 *кг*, шамотный щебень — 750 *кг*, шамотный песок — 500 *кг*, тонкомолотый шамот — 500 *кг*, жидкое стекло — 360 *кг*, керамзит — 640 *кг*, шамот тонкомолотый — 640 *кг*, жидкое стекло — 500 *кг*, вермикулит вспученный — 300 *кг*, шамот тонкомолотый — 100 *кг*.

Бетон на периклазовом цементе — 70% (по массе) измельченного хромита с размером зерен до 7 *мм*, 30% тонкомолотого обожженного магнезита, 1,6—2,4% сернокислого магния в виде водного раствора плотности 1,21 $г/см^3$ (сверх 100%).

В последние годы большое распространение получают жаростойкие бетоны на фосфатных связках. В качестве связки в них используют ортофосфорную кислоту или фосфаты, образующие окислы с высокой температурой плавления. Наиболее распространены алюмофосфатные, алюмосиликофосфатные и алюмохромофосфатные связки, имеющие огнеупорность 1700—1800° С; их применяют при изготовлении бетонов с алюмосиликатными, высокоглиноземистыми, кремнеземистыми, магнезиальными и другими заполнителями. Достаточную для распалубливания прочность бетоны на алюмофосфатных и алюмосиликофосфатных связках приобретают при температуре 150—200° С, а монтажную прочность — после нагревания до 300—400° С; бетоны на алюмохромофосфатных связках набирают достаточную прочность при нагревании до температуры 100° С. В связи с этим изделия из бетонов на фосфатных связках требуют соответствующей предварительной термообработки. Бетоны на фосфатных связках отличаются высокими огнеупорностью и температурой начала деформации под нагрузкой, большой механической прочностью и хорошей термостойкостью. Так, бетон с заполнителем из 40% шамота и 60% глинозема имеет огнеупорность свыше 1790° С, температуру начала деформации под нагрузкой 1370° С, предел прочности 480 $кгс/см^2$ и объемную массу 2,37 $г/см^3$; с заполнителем из 10% шамота и 90% глинозема — огнеупорность

1800° С, температуру начала деформации под нагрузкой 1500° С, предел прочности 570 $кгс/см^2$ и объемную массу 2,67 $г/см^3$. Термостойкость бетонов на фосфатных связках свыше 15 теплосмен. Расход связки по массе (в пересчете на сухое вещество) порядка 5—7% общей массы.

Максимальная температура элементов конструкций, выполненных из жаростойких бетонов на глиноземистом цементе с хромитовым заполнителем, допускается 1400° С, с шамотным заполнителем — 1300° С, на портландцементе с шамотным заполнителем — 1100—1200° С, хромитовым — 1500—1600° С; на жидком стекле с хромитовым заполнителем — 1000° С и шамотным — 900° С. При максимальных температурах до 1200° С предпочтительнее применять жаростойкие бетоны на портландцементе как более дешевые.

Марки жаростойких бетонов, определяемые величиной предела прочности при сжатии образцов-кубиков размером 100×$\times$100×100 *мм*, выдержанных в течение трех суток для бетонов, изготовленных на глиноземистом цементе и жидком стекле, и семь суток для бетонов, изготовленных на портландцементе и периклазовом цементе, а затем высушенных при температуре 100—110° С в течение 32 *ч*, находятся в пределах 100—300 в зависимости от расчетных данных.

Коэффициент линейного температурного расширения для жаростойких бетонов на глиноземистом цементе и заполнителе из хромита в интервале температур от 20 до 900° С равен $6{,}5 \cdot 10^{-6}$ $град^{-1}$, для бетонов на глиноземистом цементе, портландцементе и жидком стекле с шамотным заполнителем — $7{,}5 \cdot 10^{-6}$ $град^{-1}$ и для бетонов на портландцементе с хромитовым заполнителем — $6 \cdot 10^{-6}$ $град^{-1}$.

Коэффициент линейного температурного расширения бетона на периклазовом цементе при нагревании до 1450° С равен 1,47%. Термостойкость жаростойких бетонов на шамотном заполнителе — 15—25 водяных теплосмен, а на хромитовом — порядка 5. Объемная масса бетонов с хромитовым заполнителем 3200 $кг/м^3$, а с шамотным — 1800—2000 $кг/м^3$.

Приготовление жаростойких бетонов производят в бетоносмесителе. При приготовлении бетона на глиноземистом цементе шамотный заполнитель перед загрузкой в бетоносмеситель обильно смачивают водой. При изготовлении жаростойких бетонов на портландцементе с тонкомолотой добавкой в бетоносмеситель вначале загружают портландцемент, тонкомолотую добавку, крупный заполнитель и подают $^3/_4$ количества воды, необходимой на замес.

После перемешивания загруженных компонентов в течение 2 *мин* в бетоносмеситель загружают мелкий заполнитель и добавляют остальную часть воды, после чего смесь перемешивают не менее 3 *мин* до полной ее однородности.

При изготовлении бетона на жидком стекле тонкомолотую

добавку тщательно смешивают с кремнефтористым натрием. В бетоносмеситель загружают $^2/_3$ необходимого на замес жидкого стекла, смесь тонкомолотой добавки с кремнефтористым натрием, крупный и мелкий заполнитель и перемешивают в течение 2 *мин*, а затем в бетоносмеситель загружают остальную часть жидкого стекла и перемешивают смесь до полной однородности в течение 3 *мин*.

При изготовлении бетона на периклазовом цементе в бетоносмесителе предварительно перемешивают тонкомолотый магнезит и хромитовый порошок, а затем добавляют раствор сернокислого магния.

Набивными называют массы из огнеупорных материалов, плотность которых достигается уплотнением при укладке, а прочность — путем обжига во время работы печей.

Набивные массы применяют для футеровки печей, набивных подин и сводов, забивки зазоров между кладкой. В качестве вяжущих в набивных массах применяется огнеупорная глина, обезвоженная каменноугольная смола и др.

Рецептура некоторых огнеупорных масс следующая. Масса для забивки зазоров между кладкой лещади, горна и холодильниками доменных печей — 80—85% коксика с крупностью зерен 0—4 *мм* и 15—20% каменноугольной обезвоженной смолы. Масса для набивки подин основных электросталеплавильных печей — 75% магнезитового порошка с крупностью зерен 2—6 *мм* и 25% каменноугольной смолы, смешанной с песком (1 : 10); масса для набивки кислых электросталеплавильных печей — 91% кварцевого песка с крупностью зерен 0—5 *мм*, 5% измельченной железной руды с крупностью зерен 0—5 *мм* и 4% огнеупорной глины; масса для набивки днищ вагранок — 97% шамотного порошка и 3% обезвоженной каменноугольной смолы; масса для набивки стен и откосов электросталеплавильных печей — 95% магнезитового порошка с крупностью зерен 0—10 *мм* и 5% тонкомолотого титаномагнезитового концентрата, причем шихта увлажняется раствором железного купороса плотностью 1,24 *г/см*^{3} до влажности 4,5—6%; масса для набивки сводов электросталеплавильных печей — 50% хромомагнезитового порошка с крупностью зерен 4—10 *мм*, 15—20% с крупностью зерен 1—0,088 *мм* и 30—35% с крупностью зерен менее 0,088 *мм*. Кроме того, в качестве связки добавляют 10% жидкого стекла, 1% кремнефтористого натрия и 6% огнеупорной глины.

Торкрет-массы применяются для футеровки поверхностей тепловых агрегатов сложной конфигурации или агрегатов отдельных конструктивных элементов промышленных печей, где к футеровкам предъявляются особые требования в части их газонепроницаемости, что практически невозможно обеспечить при выполнении футеровки из штучных огнеупорных материалов.

Наиболее широкое распространение в настоящее время получили легковесные торкрет-массы следующих составов: глиноземистый цемент марки 400 (в мас. частях) — 1, вермикулит — 0,75, керамзит — 0,47, глиноземистый цемент — 1, вермикулит — 0,54, керамзит или шамот легковесные — 0,31. Объемная масса футеровки (после обжига) 640—970 *кг/м*^{3}, предел прочности при сжатии 1020 *кгс/см*^{2}, коэффициент теплопроводности при 30° С 0,17—0,21 *ккал/м·ч·град*.

Торкрет-массы наносятся, как правило, на металлический каркас (кожух) тепловых агрегатов, к которому приваривают металлическую сетку или штыри с помощью торкрет-пушек.

§ 2. ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ОГНЕУПОРНЫЕ ИЗДЕЛИЯ (ГОСТ 5040—68)

К легковесным относятся шамотные, полукислые, каолиновые, высокоглиноземистые и динасовые изделия, объемная масса которых не превышает 1,4 *г/см*^{3}. Производство легковесных огнеупоров осуществляется тремя способами: использованием выгорающих добавок, применением пенообразующих веществ и химическим введением в массу из смеси глины с шамотом добавок, взаимодействующих между собой с выделением газообразных продуктов.

Производство легковесных огнеупоров способом выгорающих добавок является наиболее простым и распространенным. В качестве выгорающих добавок в шихту вводят древесные опилки, лигнин, антрацит или другие малозольные горячие вещества. Состав шихты для изготовления легковесных шамотных огнеупоров по методу выгорающих добавок следующий: древесных опилок 30—45%, шамота 20—30% и пластичной связующей глины 35—40%. Шихту тщательно обрабатывают на бегунах и увлажняют до 25—30%.

Переработанную и увлажненную на бегунах массу пропускают через ленточный пресс и укладывают в хранилище для вылеживания, которое продолжается не менее двух дней. После этого масса подвергается вторичной переработке в ленточном прессе с мундштуком, обеспечивающим получение сырца необходимой формы, который затем допрессовывают на специальных допрессовочных прессах. Сушка сырца в туннельных сушилах продолжается около 30—40 *ч* при температуре 100—120° С. Обжиг сырца производят в периодических или туннельных печах при температуре 1430—1450° С.

Ввиду большой усадки сырца во время обжига, колеблющейся в пределах 9—12%, получаемые изделия имеют значительные отклонения от предусмотренных техническими условиями размеров. В связи с этим их, как правило, подвергают обработке на шлифовальных станках.

Изготовление легковесных шамотных огнеупоров по пенометоду заключается в приготовлении шликера из шамота (90—95%) и огнеупорной глины (10—5%) с влагосодержанием до

30%, приготовлении пены, смешении шликера с пеной, разливки массы в формы и обжига.

Для получения пены применяют канифольное мыло (смесь 10%-ного раствора едкого натра с канифолью); в качестве стабилизатора пены применяют столярный клей. Канифоль расплавляют и обрабатывают при нагревании 10%-ным раствором едкого натра, а потом охлаждают и промывают вначале раствором поваренной соли, а затем чистой водой.

Шликер (одна часть по объему) и пену (от 0,75 до 1,5 частей) смешивают в смесителе, лопасти которого изготовляют из проволочной сетки.

Для сгущения к пеномассе добавляют 3—4% древесных опилок. Объемная масса пеномассы регулируется соотношением шликера и пены и не превышает 1,05 *г/см*^{3}, а влажность находится в пределах 35—40%.

Формовку изделий из пеномассы выполняют с помощью разливочной машины, из которой масса поступает в формы, изготовленные из листовой стали и покрытые бумагой.

Сырец в формах сушится на стеллажах в камерных или тунельных сушилах до конечной влажности 2—4% и обжигается при температуре 1430—1450° С. Ввиду большой усадки изделия из пеношамота в процессе сушки и обжига коробятся, теряют форму и размеры. Для получения легковесных изделий правильной формы и размеров с минимальными отклонениями их после обжига подвергают шлифовке. Легковесные изделия, изготовленные пенометодом, имеют более низкую теплопроводность и газопроницаемость, чем легковесные изделия, изготовленные способом выгорающих добавок. Пенометодом можно изготовлять легковесные изделия с объемной массой 0,6 *г/см*^{3} и ниже. Химический метод производства легковесных изделий мало распространен.

Динасовые легковесные изделия изготовляют пенокерамическим способом и способом выгорающих добавок. Основным сырьем для производства легковесного динаса, получаемого способом выгорающих добавок, является кварцитовый порошок, антрацит или коксик. Соотношение в шихте кварцита и выгорающих добавок следующее (в %):

Состав шихты	Кварцит	Антрацит	Коксик
С антрацитом	65	35	—
С коксиком	70	—	30

Заготовку масс для изготовления легковесных изделий производят, как и для обычного динаса, на смесительных бегунах.

Таблица 9

Температура применения легковесных огнеупорных изделий

Изделия	Марка	Характеристика марок изделий	Температура эксплуатации в °С, не выше
Шамотные и полукислые	ШЛА-1,3	Шамотные легковесные с огнеупорностью не ниже 1730° С и кажущейся плотностью 1,3 *г/см*^{3}	1400
	ШЛБ-1,3	Шамотные легковесные изделия с огнеупорностью не ниже 1670° С и кажущейся плотностью 1,3 *г/см*^{3}	1300
	ШЛБ-1,0	Шамотные легковесные изделия с огнеупорностью не ниже 1670° С и кажущейся плотностью 1,0 *г/см*^{3}	1300
	ШЛБ-0,9	Шамотные легковесные изделия с огнеупорностью не ниже 1670° С и кажущейся плотностью 0,9 *г/см*^{3}	1270
	ШЛБ-0,8	Шамотные легковесные изделия с огнеупорностью не ниже 1670° С и кажущейся плотностью 0,8 *г/см*^{3}	1250
	ШЛБ-0,6	Шамотные легковесные изделия с огнеупорностью не ниже 1670° С и кажущейся плотностью 0,6 *г/см*^{3}	1200
	ШЛБ-0,4	Шамотные легковесные изделия с огнеупорностью не ниже 1670° С и кажущейся плотностью 0,4 *г/см*^{3}	1150
Каолиновые	КЛ-1,3	Каолиновые легковесные изделия с кажущейся плотностью 1,3 *г/см*^{3}	1400
	КЛ-0,9	Каолиновые легковесные изделия с кажущейся плотностью 0,9 *г/см*^{3}	1400
Высокоглиноземистые	ВГЛ-1,4	Высокоглиноземистые легковесные изделия с кажущейся плотностью 1,4 *г/см*^{3}	1600
	ВГЛ-1,3	Высокоглиноземистые легковесные изделия с кажущейся плотностью 1,3 *г/см*^{3}	1550
	ВГЛ-1,0	Высокоглиноземистые легковесные изделия с кажущейся плотностью 1,0 *г/см*^{3}	1400
Динасовые	ДЛ-1,4	Динасовые легковесные изделия с кажущейся плотностью 1,4 *г/см*^{3}	1550
	ДЛ-1,2	Динасовые легковесные изделия с кажущейся плотностью 1,2 *г/см*^{3}	1550

Таблица 10

Физико-химические показатели легковесных огнеупорных изделий

Показатели	Нормы для шамотных, полукислых, каолиновых, высокоглиноземистых и динасовых изделий марок													
	ШЛА-1,3	ШЛБ-1,3	ШЛБ-1,0	ШЛБ-0,9	ШЛБ-0,8	ШЛБ-0,6	ШЛБ-0,4	КЛ-1,3	КЛ-0,9	БЛ-1,4	БЛ-1,3	БЛ-1,0	ДЛ-1,4	ДЛ-1,2
Содержание Al_2O_3 в %, не менее	—	—	—	—	—	—	—	—	—	78	62	53	—	—
Содержание Fe_2O_3 в %, не более	—	—	—	—	—	1,6	—	—	—	—	1,6	1,2	—	—
Содержание SiO_2 в %, не менее	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	92	91
Огнеупорность в °С, не менее	1730	1670	1670	1670	1670	1670	1670	1730	1750	1830	1750	1750	1680	1670
Кажущаяся плотность в *г/см*³, не более	1,3	1,3	1,0	0,9	0,8	0,6	0,4	1,3	0,9	1,4	1,3	1,0	1,4	1,2
Дополнительная усадка при температуре в °С	1400	1350	1350	1300	1250	1200	1150	1400	1400	1600	1550	1400	—	—
в %, не более	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	—	—
Предел прочности при сжатии в *кгс/см*², не менее	45	35	30	25	25	20	10	30	30	35	30	25	55	45
Коэффициент теплопроводности при температуре 600° С на горячей стороне	0,60	0,60	0,50	0,40	0,40	0,25	0,20	0,50	0,40	0,60	0,50	0,50	0,60	0,60
Плотность в *г/см*³, не более	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,39	2,39

Для получения сырца необходимой прочности в массу добавляют сульфитно-спиртовую барду в количестве 1% массы сухого остатка. Длительность смешения масс для легковесного динаса колеблется в пределах 12—15 *мин*. Сушку сырца выполняют по обычному режиму в туннельных сушилах. Обжиг сырца производят совместно с обычным динасом.

Легковесный динас отличается от шамотных легковесных изделий высокой температурой деформации под нагрузкой и отсутствием усадки при высокой температуре, поэтому его применяют в участках печей с длительным воздействием на огнеупорные изделия высокой температуры (выше 1550° С).

Применение легковесных огнеупоров вызвано необходимостью экономии топлива и уменьшения потерь тепла через нагреваемые элементы промышленных печей.

Температура области применения легковесных огнеупорных изделий приведена в табл. 9, а их физико-химические показатели — в табл. 10.

§ 3. ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Теплоизоляционные материалы, применяемые в печестроении для снижения потерь тепла во внешнюю среду и получения в рабочем пространстве печи более высокой температуры, подразделяются на природные и искусственные.

К природным теплоизоляционным материалам, применяемым в печестроении, относят диатомит, трепел и асбест. Диатомит и трепел практически имеют один и тот же химический состав (80—95% SiO_2), но различны по своей структуре.

Диатомит является породой позднего отложения, поэтому он более рыхл и легок; трепел более плотный и тяжелый. Объемная масса высушенного и измельченного в порошок диатомита 400—700 *кг/м*³. Коэффициент теплопроводности 0,145—1,75 *Вт(м·град)* [0,09—0,15 *ккал/(м·ч·град)*]. Температура применения до 900° С. Употребляется для засыпки пазух в промышленных печах и теплоизоляционных обмазок наружных частей огнеупорной кладки.

Асбест (минерал группы серпентина) выпускается в виде: асбестового волокна V, VI, VII сортов с объемной массой соответственно 200, 200—300, 370—520 *кг/м*³, температурой применения до 600° С; асбестовой бумаги (асбест V сорта, каолин, крахмал) толщиной 0,2—1,5 *см* с объемной массой до 1250 *кг/м*³, температурой применения 500° С; асбестового картона (асбест V и VI сортов, каолин, крахмал) толщиной 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 5; 6; 8; 10 *мм* с объемной массой 1000—1300 *кг/м*³, температурой применения 600° С; асбошнура диаметром от 3 до 25 *мм*, объемной массой 600—800 *кг/м*³, температурой применения до 220° С.

Коэффициент теплопроводности асбеста и изделий из него колеблется в пределах 0,157—0,118 *Вт/(м·град)*.

Асбестовая засыпка применяется в промышленных печах для заполнения пазух и приготовления теплоизоляционных обмазок (с диатомитом), асбестовая бумага и картон — как изоляционные прослойки между металлическими частями каркасов печей, а также газовоздухопроводов и огнеупорной кладкой. Асбестовый шнур в основном применяют для заделки температурных швов в огнеупорной кладке.

Наиболее распространенным искусственным теплоизоляционным материалом при сооружении промышленных печей является диатомитовый кирпич, изготовляемый путем обжига при температуре 750—900° С сырца, состоящего из диатомита и древесных опилок, выгорающих при обжиге. Диатомитовый кирпич размерами 250×123×65 и 230×113×65 *мм* выпускается трех марок: 500, 600 и 700, соответствующих объемной массе кирпича в *кг/м*³. Коэффициент теплопроводности соответственно по маркам: 0,163—0,185 [0,1—0,16]; 0,14—0,21 [0,12—0,18]; 0,175—0,27 [0,15—0,23] *Вт/(м·град)* [*ккал/(м·ч·град)*]. Диатомитовый кирпич применяется в тех конструктивных элементах промышленных печей, где температура не превышает 900° С. Пенодиатомитовые изделия (кирпич) с объемной массой 450 *кг/см*³ и коэффициентом теплопроводности при средней температуре 50° С 0,093 *Вт/(м·град)* [0,08 *ккал/(м·ч·град)*] изготовляют из диатомита.

В качестве пенообразователя применяют мыльный корень, содержащий пенообразующее вещество — сапонин. Смесь диатомита с пеной разливают в формы и после сушки обжигают в туннельных печах при температуре 850—900° С. Пенодиатомитовые изделия, имеющие более высокие показатели, чем изделия с выгорающими добавками, находят широкое применение при строительстве промышленных печей.

Минеральная вата получается из расплава металлургических и топливных шлаков или горных пород (доломита, известняка, мергеля и др.) путем распыления жидкой струи его, вытекающей из вагранки, паром или воздухом при давлении 6—9 *кгс/см*². Подразделяется на марки 150 и 200, соответствующие разной объемной массе ваты в *кг/м*³ под предельной нагрузкой 0,02 *кгс/см*². Коэффициент теплопроводности 0,046—0,052 *Вт/(м·град)* [0,04—0,045 *ккал/(м·ч·град)*] при температуре +30° С.

Минеральная вата применяется при температуре не выше 600° С, чаще всего при строительстве сушил, электропечей и для заполнения зазоров между кладкой из глиняного обыкновенного кирпича и огнеупорной футеровкой при сооружении фабрично-заводских труб.

Совелит — теплоизоляционный материал, изготовляемый из обожженного доломита (85%) и распушенного асбеста V (5%) и VI (10%) сортов. Обожженный доломит гасится и полученное молоко насыщается углекислым газом. После пропарки

и смешения доломитового молока с асбестом производят формовку изделий на прессах и сушку в сушильных камерах. Объемная масса совелита (плит 500×170 *мм* толщиной 30, 40, 50 *мм*) составляет не более 400 *кг/м*³, коэффициент теплопроводности при средней температуре 100° С — 0,093 *Вт/(м·град)* [0,08*ккал/(м·ч·град)*]. Максимальная температура применения 500° С. В промышленных печах совелит используют как теплоизоляционную прослойку между металлическим кожухом и огнеупорной кладкой.

Перлитовый песок и щебень применяют как для приготовления легких огнеупорных бетонов, так и в качестве засыпной изоляции. Изделия из вспушенного перлита (плиты и кирпич) на глиняной связке, обожженные при температуре 900—950° С, употребляют для изоляции промышленных печей в местах, где температура не превышает 1000—1100° С.

В зависимости от величины объемной массы изделия изготовляют четырех марок: 250, 300, 350, 400. Коэффициент теплопроводности изделий при температуре 350° С соответственно 0,13; 0,14; 0,15; 0,16 *Вт/(м·град)* [0,11, 0,12, 0,13, 0,14 *ккал/(м·ч·град)*]. Предел прочности при сжатии 3, 5, 7 и 9 *кгс/см*².

В настоящее время за рубежом (у нас только в опытном порядке) в печестроении в широких масштабах находят применение высокоогнеупорная керамическая вата и изделия из нее. Химический состав ваты: Al_2O_3 — 45%; SiO_2 — 52%; Fe_2O_3 — 1,3%; CaO — 0,1%. Объемная масса ваты 30—100 *кг/см*³, изделий — 100—300 *кг/м*³. Коэффициент теплопроводности 0,035—0,30 *Вт/(м·град)* [0,03—0,17 *ккал/(м·ч·град)*]. Изделия из керамической ваты на высокоогнеупорных связках имеют максимальную температуру применения до 1260° С при непрерывной эксплуатации.

§ 4. РАСТВОРЫ

При кладке промышленных печей и фабрично-заводских труб в зависимости от их назначения и применяемых материалов используются различные по своим свойствам и составам растворы. Для кладки из обыкновенного глиняного и диатомитового кирпича используются так называемые строительные растворы, состоящие из смеси вяжущих и заполнителей. В качестве вяжущего в основном применяют цемент и обыкновенную глину, а заполнителя — кварцевый песок. Для придания раствору большей пластичности, что облегчает укладку на растворе кирпича, в цементные растворы добавляют пластифицированные добавки — известь, глину и т. п.

Строительные растворы подразделяются на: цементно-известковые, цементно-глиняные и песчано-глиняные. Как правило, строительные растворы с добавками цемента применяются преимущественно в местах, подверженных действию влаги, — подзем-

ные части печей и боровов, печей, расположенных под открытым небом, а также отдельных элементов печей и боровов, где необходима механическая строительная прочность. Растворы без добавок цемента применяются для кладки из обыкновенного глиняного и диатомитового кирпича там, где к кладке не предъявляются требования и отсутствуют условия, перечисленные выше.

В зависимости от предела прочности при сжатии после схватывания (для цементных растворов в возрасте 28 дней) или высыхания (глиняные растворы) растворы разделяются на марки, соответствующие пределу прочности раствора. Для кладки печей, как правило, применяются песчано-глиняные растворы, состоящие из 1 части глины и 1—3 частей песка (в зависимости от жирности гливы), или цементно-глиняные, имеющие марку от 2 до 25. Для кладки труб применяются цементно-известковые или цементно-глиняные растворы марок от 25 до 100.

Марки растворов и их состав определяются проектом.

Для кладки огнеупорных изделий используются огнеупорные растворы, близкие по своему химическому составу к тем видам огнеупорных изделий, из которых выполняется огнеупорная кладка. Обычные огнеупорные растворы, в отличие от строительных (цементных) растворов и воздушнотвердеющих огнеупорных растворов, не обладают механической прочностью при обычных температурах и только в процессе разогрева кладки происходит их спекание на глубину (от огневой поверхности кладки), зависящую от температуры и толщины огнеупорной кладки. Механическая прочность спекшегося раствора зависит от температуры, при которой оно происходило, и химического состава раствора. Необходимо отметить, что чем выше механическая прочность спекшегося раствора (черепка), тем выше качество огнеупорной кладки и продолжительность ее службы, так как возможность разрушения кладки в наиболее слабых ее узлах (швах, заполненных раствором) от воздействия проникновения в швы жидких металлов, шлаков и агрессивных газообразных продуктов при более высокой прочности черепка значительно уменьшается.

Основной частью огнеупорных растворов являются мертели — огнеупорные порошки, состоящие из измельченных алюмосиликатных или кремнеземистых материалов и огнеупорной глины с добавками пластификаторов.

В зависимости от сырьевого, химического и зернового состава, а также огнеупорности по ГОСТ 6137—61 выпускаются следующие алюмосиликатные мертели: ВТ-1, ВТ-2 — высокоглиноземистые ($Al_2O_3+TiO_2$ не ниже соответственно 60 и 40%) огнеупорностью не ниже 2800—1750° С; ШТ1, ШТ2 — шамотные тонкого помола; ШК1, ШК2 и ШК3 — шамотные крупного помола с содержанием $Al_2O_3+TiO_2$ не менее 32% для ШТ1 и ШК1; 33% для ШТ2 и ШК2 и 30% для ШК3, огнеупорностью соответственно 1730, 1690 и 1650° С; полукислые — ПТ1 (тонкого помола) и ПК1 и ПК2 (крупного помола) с содержанием Al_2O_3 не менее 20%, огнеупорностью 1650—1610° С. Все указанные выше мертели, кроме ПК2, выпускаются с пластификатором — раствором концентрата сульфитно-спиртовой барды и кальцинированной соды (сверх 100% сухого мертеля сульфитно-спиртовой барды 0,07—0,13% и Na_2CO_3 — 0,12—0,18%). Сырьевой состав мертелей (в % по массе) составляет: отощитель 78—85; пластичная огнеупорная глина 15—22. Нормы тонкости помола составляющих предусмотрены ГОСТом для каждого из указанных мертелей, причем для мертеля крупного помола (К) проход через сетку № 2 должен составлять 100% и сетку № 05 не более 94% и тонкого помола (Т) через сетку № 009 не менее 60%.

Мертель динасовый (ГОСТ 5338—60) состоит из смеси кремнеземистых материалов (кварцит, динасовый бой), огнеупорной глины 15—10% и пластификатора. Мертель подразделяется на марки МД-1 для кладки динасовых изделий в печах с рабочей температурой свыше 1500° С и МД-2 для кладки динасовых изделий с температурой ниже 1500° С.

Содержание SiO_2 в мертеле марки МД-1 — 94—96% и марки МД-2 — до 90—93%. Мертель динасовый пластифицированный выпускается двух марок: МДТ-1 и МДТ-2. Приведенные выше мертели являются наиболее распространенными составляющими растворов при кладке теплотехнических агрегатов из огнеупорных изделий.

При приготовлении огнеупорных растворов из этих мертелей к ним добавляют воду и тщательно смешивают в растворомешалках в течение не менее 5 *мин.* В зависимости от количества воды, подающейся на замес, получаемые растворы по своей консистенции подразделяются на жидкие (500—600 *л* воды), полугустые (400—450 *л* воды) и густые (350—400 *л* воды на 1 $м^3$ сухой смеси). Консистенция раствора, так же как и тонкость помола мертеля, зависит от толщины шва в кладке отдельного элемента теплотехнического агрегата. Чем тоньше шов, тем более жидкой консистенции должен быть раствор и более тонким помол составляющих мертеля. Кроме описанных выше шамотных и динасовых растворов применяются также растворы: хромисто-глиняные — 90% хромистого порошка, 10% огнеупорной глины и 400 *л* воды; магнезитовые или хромомагнезитовые на смоле — 90% магнезитового или хромистого порошка и 10% каменноугольной обезвоженной смолы; углеродистые — коксовая пыль 80%, огнеупорная глина 20% и 600 *л* воды и др.

В настоящее время большое распространение получают воздушнотвердеющие растворы с добавкой в них жидкого стекла или портландцемента, обеспечивающие получение менее газопроницаемых швов в огнеупорной кладке.

Для приготовления воздушнотвердеющих растворов заготовляется заблаговременно глиняное молоко с объемной массой в пределах 1,2—1,3 *кг/м*^{3}. В воду для приготовления глиняного

молока вводится 0,15% кальцинированной соды или 0,3% жидкого стекла от массы глины. Перемешивание глиняного молока в растворомешалке следует производить до полного распускания глины (5—10 *мин*). Полученное глиняное молоко необходимо до введения в раствор выдержать не менее 10—12 *ч* и хранить в ящиках с плотно закрывающимися крышками. Для приготовления воздушнотвердеющего раствора в растворомешалку вводят глиняное молоко в количестве, необходимом для одного замеса, и жидкое стекло (для раствора на цементе — воду затворения). В полученный раствор глиняного молока с жидким стеклом (или с водой затворения) всыпается необходимое на один замес количество шамотного порошка и глинозема (цемента) и добавляется вода для получения раствора требуемой консистенции. Перемешивание следует вести не менее 5—10 *мин*.

С применением жидкого стекла готовятся растворы: шамотно-глиноземистые — 70—72% шамотного порошка, 8% огнеупорной глины, 8% глинозема технического, 13% жидкого стекла при γ—1,35—1,4 и воды от массы смеси в % 33—35; шамотный — шамотный порошок 78—80%, огнеупорная глина 8%, жидкое стекло 13%, вода 26—29%; шамотно-бокситовые — шамотный порошок 90%, боксит 10%, жидкое стекло 15%, вода 15—20%. Для кладки магнезиальных изделий применяются растворы на жидком стекле в качестве наполнителей, в которые входят магнезитовый порошок, каустический магнезит, хромомагнезит, чугунные опилки, колчеданные огарки и др. в соотношениях, предусмотренных проектом.

ГЛАВА II

ТОПЛИВО И ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ

§ 5. ТОПЛИВО

Общая классификация и состав топлива

Промышленные печи служат для нагрева, обжига или плавки различных материалов. Тепло, необходимое для проведения этих процессов, получают путем сжигания в печах горючих материалов, называемых топливом, или превращения электрической энергии в тепловую. Топливо представляет собой углеродистые соединения различных сочетаний и является главнейшим источником получения энергии. Топливо классифицируется по двум признакам (табл. 11): происхождению (естественное или искусственное) и состоянию (твердое, жидкое или газообразное).

В печах применяют преимущественно природный, доменный и коксовальный газы и мазут. Сравнительно небольшое количество печей работает на генераторном газе и угле. Дрова, торф

Таблица 11

Общая классификация топлива

Агрегатное состояние	Происхождение	
	естественное	искусственное
Твердое	Уголь, дрова, торф, горючие сланцы	Кокс, древесный уголь, брикеты, угольная пыль и др.
Жидкое	Нефть	Мазут и другие продукты переработки нефти
Газообразное	Природный газ	Газы: доменный, коксовальный, генераторный, нефтяной, светильный и др.

и горючие сланцы используют главным образом только для получения искусственного газа.

Топливо состоит из: органической массы, в которую входят углерод С, водород Н, кислород О и азот N, а также из серы S, воды и минеральных веществ (золы). Вода обычно обозначается символом W, зола — A. Горючими составляющими топлива являются только углерод, водород и часть серы (так называемая летучая горючая сера), однако к горючей части топлива относят также кислород и азот. Нелетучая сера, входящая в состав негорючих примесей топлива, переходит вместе с ними в золу. Химический состав твердого и жидкого топлива принято выражать в процентах по массе, а газообразного — в процентах по объему, за исключением содержания влаги, которое выражается массой воды в единице объема сухого газа и имеет размерность в $г/м^3$. Таким образом, на основе элементарного химического анализа схему топлива можно представить следующим образом:

Индексы	Состав							
	С	Н	О	N	$S_{гор}$	$S_{негор}$	A	W
о	Органическая масса							
г	Горючая масса							
с	Сухая масса							
р	Рабочее топливо							

При указании состава топлива пользуются приведенными в схеме индексами: C^o обозначает содержание углерода в органической массе топлива, H^r — содержание водорода в горючей массе; A^c — содержание золы в сухой массе и W^p — содержание влаги в рабочем топливе.

Для пересчета топлива из одного состава в другой применяют формулы, приведенные ниже:

$$x^o = x^r \frac{100}{100 - S^r}; \quad (1)$$

$$x^o = x^c \frac{100}{100 - (S^c + A^c)}; \quad (2)$$

$$x^o = x^p \frac{100}{100 - (S^c + A^p + W^p)}; \quad (3)$$

$$x^r = x^o \frac{100 - S^r}{100}; \quad (4)$$

$$x^r = x^c \frac{100}{100 - A^c}; \quad (5)$$

$$x^r = x^p \frac{100}{100 - (A^p + W^p)}; \quad (6)$$

$$x^c = x^o \frac{100 - (S^c + A^c)}{100}; \quad (7)$$

$$x^c = x^r \frac{100 - A^c}{100}; \quad (8)$$

$$x^c = x^p \frac{100}{100 - W^p}; \quad (9)$$

$$x^p = x^o \frac{100 - (S^p + A^p + W^p)}{100}; \quad (10)$$

$$x^p = x^r \frac{100 - (A^p + W^p)}{100}; \quad (11)$$

$$x^p = x^c \frac{100 - W^p}{100}. \quad (12)$$

Пример. Состав рабочего топлива (угля): $W^p = 4{,}5\%$; $A^p = 9\%$; $S^p = 4{,}1\%$; $O^p = 5{,}5\%$; $N^p = 1{,}6\%$; $H^p = 4{,}2\%$; $C^p = 71{,}1\%$, всего $\Sigma^p = 100\%$. **Тогда** содержание углерода в органической массе будет

$$C^o = C^p \frac{100}{100 - (S^o + A^p + W^p)} = 71{,}1 \frac{100}{100 - (4{,}1 + 9 + 4{,}5)} = 86{,}3\%.$$

В горючей массе топлива

$$C^r = C^p \frac{100}{100 - (A^p + W^p)} = 71{,}1 \frac{100}{100 - (9 + 4{,}5)} = 82{,}3\%.$$

В сухой массе

$$C^c = C^p \frac{100}{100 - W^p} = 71{,}1 \frac{100}{100 - 4{,}5} = 74{,}5\% \text{ и т. д.}$$

Химический состав газообразных горючих дают в процентах по объему содержания составных частей в сухой газовой смеси: CO_2^c, CO^c, CH_4^c, H_2^c, O_2^c, $C_n\,H_m^c$ (C_nH_m соответствует общему содержанию тяжелых углеводородов). Если взять содержание влаги на 1 $м^3$ сухого газа W $г/м^3$, то пересчет состава сухого газа в состав влажного газа производят исходя из того, что объем 1 $кг$ водяного пара при 0° С и 760 $мм$ $рт.$ $ст.$ $V = \frac{22{,}4}{18} = 1{,}24$ $м^3/кг$, откуда объем W^r составит $\frac{1{,}24W}{1000}$ $м^3$, а объем влаги на 100 $м^3$ сухого газа:

$$\frac{100 \cdot 1{,}24W}{1000} = 0{,}124W\ м^3. \quad (13)$$

Тогда состав влажного газа выразится следующими формулами:

$$CO_2^{вл} = CO_2^c \frac{100}{100 + 0{,}124W}\ \%\ [13],$$

$$CO^{вл} = CO^c \frac{100}{100 + 0{,}124W}\ \%\ (14) \text{ и т. д.}$$

Углерод и водород являются наиболее важными составляющими топлива, основными носителями тепловой энергии. Азот, находящийся в топливе, в горении не участвует и является балластом органической части топлива, полностью переходя в продукты горения. Кислород также является балластом органической части топлива. В отличие от азота он не только понижает процентное содержание других элементов, но и образует с ними ряд соединений (H_2O, CO_2, SO_2 и др.), тем самым исключая их в дальнейшем из процесса горения. Зола и влага являются соответственно балластом сухой и рабочей массы топлива.

Теплота сгорания топлива. При сгорании происходит соединение горючих элементов топлива с кислородом по реакциям: $C + O_2 = CO_2$; $H_2 + 0{,}5O_2 = H_2O$; $S_л + O_2 = SO_2$, с выделением тепла. Чем больше тепла выделяет топливо, тем выше его ценность. Количество тепла в килоджоулях (*кДж*) [больших калориях (*ккал*)], выделяемое при полном сгорании 1 *кг* твердого или жидкого топлива или 1 $м^3$ газообразного топлива, называют теплотой сгорания топлива. Ее размерность *кДж/кг* [*ккал/кг*], *кДж/м³* [*ккал/м³*] или *кДж/кмоль* [*ккал/кмоль*].

В зависимости от того, в каком состоянии — парообразном или жидком — будет влага, находящаяся в продуктах горения, установлены два понятия теплоты сгорания топлива: низшая $Q_н$, если влага находится в парообразном состоянии, и высшая $Q_в$, если водяные пары сконденсированы до жидкости. Превращение 1 *кг* воды из жидкого состояния в парообразное при температуре 20° С требует затраты 2515 *кДж* [~600 *ккал*]. Так как в продуктах горения содержится влага топлива W_1 и вода, полученная от сгорания водорода $\left(W_2 = \frac{H_2O}{H_2} = \frac{18}{2} = 9\right)$, то разница между высшей и низшей теплотой сгорания топлива составит $Q_в^р - Q_н^р = 2515\ (W_1 + W_2) = 2515\ (W_1 + 9H)$ *кДж/кг* [600 (W_1 + +9H) *ккал/кг*] или если W_1 и H выражают содержание воды и водорода в топливе в %, $Q_в - Q_н = 25{,}15\ (W_1 + 9H)$ *кДж/кг* [$6(W_1 + 9H)$ *ккал/кг*]. Как видно из уравнения, увеличение содержания влаги в топливе отрицательно сказывается на теплоте сгорания топлива: чем больше W_1, тем больше разность между $Q_в^р$ и $Q_н^р$. В зависимости от того, к рабочему или сухому составу топлива относится теплота сгорания, ее обозначают с соответствующим индексом: $Q_в^р$, $Q_н^р$, $Q_в^г$, $Q_н^г$ и т. д.

В лабораторных условиях теплоту сгорания топлива определяют сжиганием навески топлива в калориметрической бомбе, заполненной кислородом. Учитывая повышение температуры воды, находящейся в калориметре, получают количество тепла, выделившегося при сгорании навески топлива. Теплоту сгорания топлива можно подсчитать и по элементарному составу топлива.

Для подсчета теплоты сгорания твердого и жидкого топлива пользуются формулами русского ученого Д. И. Менделеева:

$$Q_в^р = 4{,}187\left[81C^р + 300H^р - 26\left(O^р - S^р\right)\right] кДж/кг$$
$$\left[81C^р + 300H^р - 26\left(O^р - S^р\right) ккал/кг\right] \quad (15)$$

$$\text{или } Q_н^р = 4{,}187\left[81C^р + 246H^р - 26\left(O^р - S^р\right) - 6W^р\right] кДж/кг$$
$$\left[81C^р + 246H^р - 26\left(O^р - S^р\right) - 6W^р\ ккал/кг\right]. \quad (16)$$

Для подсчета теплоты сгорания газообразного топлива применяют формулы:

$$Q_в = 4{,}187\,(30{,}5CO + 30{,}5H_2 + 95{,}3CH_4 + 152{,}5C_2H_4 + 60H_2S)\ кДж/м^3$$
$$[Q_в = 30{,}5CO + 30{,}5H_2 + 95{,}3CH_4 + 152{,}5C_2H_4 + 60H_2S\ ккал/м^3]; \quad (17)$$
$$Q_н = 4{,}187\,(30{,}5CO + 25{,}8H_2 + 85{,}9CH_4 + 143C_2H_4 + 55{,}2H_2S)\ кДж/м^3$$
$$[Q_н = 30{,}5CO + 25{,}8H_2 + 85{,}9CH_4 + 143C_2H_4 + 55{,}2H_2S\ ккал/м^3]. \quad (18)$$

Пример 1. Определить теплоту сгорания угля состава

$W^р = 4{,}5\%$; $A^р = 9\%$; $S^р = 4{,}1\%$; $O^р = 5{,}5\%$;
$N^р = 1{,}6\%$; $H^р = 4{,}2\%$; $C^р = 71{,}1\%$;

$Q_в^р = 4{,}187\,[81C^р + 300H^р - 26\,(O^р - S^р)] = 4{,}187\,[81 \cdot 71{,}1 + 300 \cdot 4{,}2 - 26\,(5{,}5 - 4{,}1)] = 29\,100$ *кДж/кг* [6984 *ккал/кг*];

$Q_н^р = 4{,}187\left[81C^р + 246H^р - 26\left(O^р - S^р\right) - 6W^р\right] =$
$= 4{,}187\,[81 \cdot 71{,}1 + 246 \cdot 4{,}2 - 26\,(5{,}5 - 4{,}1) - 6 \cdot 4{,}5] =$
$= 28\,200$ *кДж/кг* [6732 *ккал/кг*].

Пример 2. Определить теплоту сгорания коксовального газа состава

$H_2S = 0{,}4\%$; $CO_2 = 2{,}3\%$; $C_2H_4 = 1{,}9\%$; $O_2 = 0{,}8\%$;
$CO = 6{,}8\%$; $H_2 = 57{,}5\%$; $CH_4 = 22{,}5\%$; $\mathbf{N_2 = 7{,}8\%}$;

$Q_в = 4{,}187\,[30{,}5 \cdot 6{,}8 + 30{,}5 \cdot 57{,}5 + 95{,}3 \cdot 22{,}5 + 152{,}5 \cdot 1{,}9 + 60 \cdot 0{,}4] = 18\,500$ *кДж/м³* [4422 *ккал/м³*];

$Q_н = 4{,}187\,(30{,}5 \cdot 6{,}8 + 25{,}8 \cdot 57{,}5 + 85{,}9 \cdot 22{,}5 + 143 \cdot 1{,}9 + 55{,}2 \cdot 0{,}4 = 16\,450)$ *кДж/м³* [3925 *ккал/м³*].

Для сравнительной оценки тепловой ценности различных видов топлива введено понятие тепловой эквивалент топлива, которым называют отношение теплоты сгорания данного топлива к теплоте сгорания условного топлива, принятой равной $Q_н^р = 29\,310$ *кДж/кг* [7000 *ккал/кг*], $Э_т = \frac{Q_н^р}{29\,310}\left[\frac{Q_н^р}{7000}\right]$.

Таблица 12

Тепловые эквиваленты топлива

Наименование топлива и марка	Тепловой эквивалент
Мазут малосернистый марки 10	1,425
Донецкий каменный уголь «К», рядовой	0,969
Донецкий антрацит (среднее значение для всех марок)	0,934
Кузнецкий каменный уголь (среднее значение для всех марок)	1
Карагандинский каменный уголь, рядовой	0,855
Челябинский бурый уголь «БК»	0,605
Доменный газ $Q_н^с = 3820$ *кДж/м³* [910 *ккал/м³*]	0,13
Коксовальный газ $Q_н^с = 16\,400$ *кДж/м³* [3925 *ккал/м³*]	0,56
Природный газ Саратовского месторождения $Q_н^с = 35\,500$ *кДж/м³* [8510 *ккал/м³*]	1,217
Природный газ Дашавского месторождения $Q_н^с = 34\,700$ *кДж/м* [8467 *ккал/м³*]	1,21

Для газообразного топлива значение теплового эквивалента относится не к единице массы, а к объемной единице топлива — 1 $м^3$. В табл. 12 приведены тепловые эквиваленты ряда видов топлива.

Твердое топливо

Все ископаемое твердое топливо имеет растительное происхождение. В зависимости от геологического возраста оно разделяется на торфы, бурые угли и каменные угли.

Бурый уголь содержит до 50% золы и 20% влаги, в связи с чем является топливом невысокого качества. Теплота сгорания его колеблется в пределах 10 500—21 000 *кДж/кг* [2500—5000 *ккал/кг*]. Он применяется главным образом для получения искусственного газообразного топлива, а также для отопления котлов.

Каменный уголь — топливо более ценное, чем бурый уголь. Содержание золы в нем колеблется от 5,5 до 20% и влаги от 2 до 25%. Теплота сгорания каменного угля 17 200—30 800 *кДж/кг* [4100—7350 *ккал/кг*]. Характеристика ряда каменных углей приведена в табл. 13. Каменные угли применяются как для непосредственного отопления печей, так и для получения из них искусственного газообразного и твердого топлива. В нагревательных печах наиболее удобен для сжигания уголь с большим содержанием летучих составляющих, т. е. длиннопламенный, так как длинное пламя создает возможность более равномерного нагрева материала в печи.

Антрацит — каменный уголь с небольшим количеством летучих, в промышленных печах применяется редко. Содержание золы и влаги в антраците меньше, чем в каменном угле (см. табл. 13); средняя теплота сгорания его $Q^р_н$=27 400 *кДж/кг* [6540 *ккал/кг*].

Торф является продуктом разложения различных растений. По времени образования он подразделяется на волокнистый — самый молодой, землистый — средний по возрасту и смолистый — самый старый, приближающийся к бурому углю. Теплота сгорания торфа $Q^р_н$=10 700÷12 400 *кДж/кг* [2650—2950 *ккал/кг*]. Торф в печах применяется исключительно для получения искусственного газообразного топлива.

Кокс образуется из каменного угля в результате сухой перегонки (нагрева без доступа воздуха) в камерах коксовальных печей. При этом из угля удаляются летучие вещества и сухой остаток — кокс содержит только углерод и золу. В рабочем составе кокса содержится около 83—86% С, 9—10% золы и 4—5% влаги. Средняя теплота сгорания кокса 28 000 *кДж/кг* [6650 *ккал/кг*].

Таблица 13

Характеристика каменных углей

Месторождение	Классы углей	Состав рабочей массы топлива в %							$Q^р_н$	
		$C^р$	$H^р$	$N^р$	$O^р$	$S^р$	$A^р$	$W^р$	в *кДж/кг*	в *ккал/кг*
Донецкий бассейн	Длиннопламенный	50,6	3,7	1,1	8	4	19,6	13	20 300	4840
	Газовый	62,1	4,2	1,2	6,4	3,3	15,8	7	24 700	5900
	Паровичный:									
	жирный	62,4	3,8	1,1	4,3	3,6	18,8	6	25 100	5980
	тощий	70,6	3,4	1,2	1,9	2,7	15,2	5	27 450	6550
	Антрацит	76,4	1,5	0,8	1,3	1,7	13,3	4	27 200	6500
Карагандинский бассейн	Паровичный жирный	57	3,4	0,9	5,4	0,8	25	7	22 000	5320
	Бурый	42,9	2,7	0,9	11,3	0,6	17	26	15 200	3620
Кузнецкий бассейн (Ленинское месторождение)	Длиннопламенный	67,2	4,7	2,6	10,7	0,4	5	10	26 380	6300
	Газовый	66,1	4,6	2,2	6,6	0,6	10	9	26 200	6240

Жидкое топливо

В Советском Союзе в качестве жидкого топлива применяют обычно мазут, являющийся остаточным продуктом переработки нефти. Качество мазута как топлива определяется его плотностью, вязкостью и температурой застывания. Вязкость — это свойство жидкости противостоять перемещению ее частиц под влиянием действующей на нее силы. Температурой застывания называется температура, при которой ряд жидкостей теряет свою подвижность и переходит в твердое состояние. Мазут классифицируется по маркам; с увеличением марки возрастают плотность и температура застывания мазута. Характеристика мазутов приведена в табл. 14.

Содержание влаги в мазуте находится в пределах 1—5%, а золы — до 0,3%.

Таблица 14

Характеристика мазутов

Марка	Плотность	$C^г$ в %	$H^г$ в %	$O^г+N^г$ в %	$S^г$ в %	$Q^р_н$	
						в *кДж/кг*	в *ккал/кг*
Мазут 20, 40, 60, 100 и 200 малосернистый и сернистый	0,91—0,99	86,5—87,6	12,5—10,7	0,6—1	0,4—1	40 800—40 000	9750—9530
То же, высокосернистый	0,925—0,99	85	11,8	0,9	2,3—2,5	40 000	9520

Газообразное топливо

Природный газ — наиболее дешевое топливо. С каждым годом доля природного газа в топливном балансе страны повышается. В 1970 г. она составила почти 60% против 51% в 1965 г., а к концу девятой пятилетки возрастет до 67% [1]. Главной составной частью природного газа является метан.

Коксовальный газ, как указывалось выше, является побочным продуктом производства кокса. В качестве топлива газ применяется после извлечения из него на химическом заводе ряда ценных химических продуктов.

Доменный газ получается при производстве чугуна в доменных печах. Так как теплота сгорания доменного газа низка — 3770—4190 *кДж/м³* (900—1000 *ккал/м³*), то в чистом виде он в печах почти не используется (за исключением коксовых батарей); обычно его применяют на металлургических заводах в смеси с коксовальым газом.

[1] Материалы XXIV съезда КПСС. Политиздат, 1971.

Таблица 15

Характеристика газообразного топлива

Газ	Состав газа в % по объему								Теплота сгорания газа $Q^с_н$	
	H_2	CO_2	C_mH_n	O_2	CO	H_2	CH_4	N_2	в *кДж/м³*	в *ккал/м³*
Природный:										
дашавский . . .	Следы	0,1	0,8	—	—	—	97,9	1,2	35 500	8467
саратовский . . .	»	0,2	2,5	—	—	—	94	3,3	36 300	8560
шебелинский . . .	»	0,1	6	—	—	—	93,5	0,4	38 255	9130
Доменный	0,3	10,2	—	—	28	2,7	0,3	58,3	3 980	950
Коксовальный . . .	0,4	2,3	1,9	0,8	6,8	57,5	22,7	7,8	16 600	3960
Генераторный:										
из торфа	0,1	8	0,4	0,2	28	15	3	45,3	6 500	1550
из газового угля .	0,3	5	0,3	0,2	26,5	13,5	2,3	51,9	5 900	1400
из антрацита . . .	0,2	5,5	—	0,2	27,5	13,5	0,5	52,6	5 150	1230

Генераторный газ образуется в результате газификации твердого топлива в специальных установках — газогенераторах. Процесс превращения твердого топлива в генераторный газ сводится к сухой перегонке, при которой выделяются летучие, содержащиеся в топливе, и неполному горению. Газогенераторы представляют собой шахтную печь, в которую сверху загружается твердое топливо, а снизу подается воздух в количестве, недостаточном для полного сгорания топлива. Кислород воздуха, поступающего через колосниковую решетку, встречает слой раскаленного кокса и вступает с углеродом в реакцию. В связи с недостаточным для полного сгорания количеством подаваемого воздуха продуктами реакции являются CO_2 и CO. Проходя дальше через раскаленный кокс, CO_2 частично восстанавливается углеродом в CO по реакции $CO_2+C=2CO$. Обычно в дутье добавляют пар, обогащающий генераторный газ водородом и окисью углерода по реакции $H_2O+C=H_2+CO$, а также предотвращающий спекание золы. При движении вверх горячие газы производят сухую перегонку топлива, выделяя из него летучие и влагу. В Советском Союзе в связи с наличием природного газа генераторный газ в настоящее время практически не применяется. Характеристики природного газа и ряда искусственных газообразных топлив приведены в табл. 15.

§ 6. РАСЧЕТЫ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

Расход воздуха, состав и количество продуктов горения

Горение соответствует процессу окисления — соединению кислорода с горючими элементами топлива, происходящему с большой скоростью с выделением тепла и света. Для возникновения горения необходимо, чтобы реагирующие вещества — горючее и кислород — были доведены до температуры воспламенения, т. е. до температуры, при которой может происходить реакция горения (табл. 16).

При расчете горения топлива определяют количество расходуемого при сжигании воздуха, количество и состав образующихся продуктов горения. Эти расчеты могут быть выполнены

Таблица 16

Температура воспламенения топлива

Топливо	Температура воспламенения в °С	Топливо	Температура воспламенения в °С
Каменный уголь	400—500	Генераторный газ	700—800
Антрацит	700—800	Доменный газ	700—800
Бурый уголь	250—450	Коксовальный газ	550—650
Кокс	700	Природный газ	700—850
Мазут	580		

по данным элементарного состава топлива на основе уравнений горения. При этом, по предложению французского ученого Дюлонга, считают, что весь кислород, находящийся в топливе, соединен с водородом. Поэтому количество водорода, находящегося в топливе, при определении потребного количества кислорода уменьшают на величину $\frac{O}{8}$. Процесс горения твердого или жидкого топлива можно представить в молекулярных соотношениях следующими уравнениями[1]:

$$C + O_2 = CO_2; \quad H_2 + \frac{1}{2}O_2 = H_2O; \quad S + O_2 = SO_2$$

$$1 + 1 = 1; \qquad 1 + \frac{1}{2} = 1; \qquad 1 + 1 = 1,$$

т. е. 1 *кмоль* углерода, соединяясь с 1 *кмолем* кислорода, дает 1 *кмоль* углекислоты; 1 *кмоль* водорода, соединяясь с 0,5 кмоля кислорода, дает 1 *кмоль* водяного пара; 1 *кмоль* серы, соединяясь с 1 *кмолем* кислорода, дает 1 *кмоль* сернистого ангидрида. Так как на горение 1 *кмоля* углерода расходуется 1 *кмоль* кислорода, 1 *кмоля* водорода —0,5 *кмоля* кислорода и 1 *кмоль* серы — 1 *кмоль* кислорода, то на горение 1 *кг* углерода потребуется $\frac{1}{12}$ *кмоля,* 1 *кг* водорода —0,5 $\frac{1}{2} = \frac{1}{4}$ *кмоля* и серы — $\frac{1}{32}$ *кмоля* кислорода, где 12, 2 и 32 соответственно молекулярные массы углерода, водорода и серы. Следовательно, исходя из элементарного состава топлива, количество кислорода, необходимое для сгорания топлива в теоретических условиях, можно получить из уравнения

$$O_2 = \frac{1}{12} \cdot \frac{C}{100} + \frac{1}{4} \cdot \frac{H - \frac{O}{8}}{100} + \frac{1}{32} \cdot \frac{S}{100} \text{ кмоль/кг},$$

или

$$O_2 = \left(\frac{1}{12} \cdot \frac{C}{100} + \frac{1}{4} \cdot \frac{H - \frac{O}{8}}{100} + \frac{1}{32} \cdot \frac{S}{100} \right) 22{,}4 =$$

$$= \frac{\frac{1}{12}C + \frac{1}{4}\left(H_2 - \frac{O}{8}\right) + \frac{1}{32}S}{100} 22{,}4 \text{ м}^3/\text{кг},$$

[1] Килограмм-молекула (сокращенно кмоль) — это количество вещества в килограммах, соответствующее молекулярной массе вещества: т. е. кмоль углерода соответствует 12 *кг*, кмоль кислорода — 32 *кг*. Молекулярным объемом называется объем, занимаемый 1 кмолем вещества. В газообразном состоянии молекулярный объем любого вещества при нормальных условиях (760 *мм рт. ст.* и 0° С) занимается 22,4 $м^3$.

где C, H, O и S — процентное содержание в топливе углерода, водорода, кислорода и серы;

22,4 — объем 1 *кмоля* кислорода в 1 $м^3$ в нормальных условиях.

Количество азота воздуха, введенного с этим количеством кислорода, будет $N_2 = \frac{\frac{1}{12}C + \frac{1}{4}\left(H - \frac{O}{8}\right) + \frac{1}{32}S}{100} 22{,}4\frac{79}{21}$ $м^3/кг$,

где $\frac{79}{21}$ — объемное отношение содержания азота и кислорода в воздухе.

Количество воздуха будет

$$L_0 = \frac{\frac{1}{12}C + \frac{1}{4}\left(H - \frac{O}{8}\right) + \frac{1}{32}S}{100} 22{,}4 + \frac{\frac{1}{12}C + \frac{1}{4}\left(H - \frac{O}{8}\right) + \frac{1}{32}S}{100} 22{,}4\frac{79}{21} =$$

$$= \frac{1{,}87C + 5{,}6\left(H - \frac{O}{8}\right) + 0{,}7S}{21} = 0{,}089C + 0{,}267H + 0{,}033(S - O)\ м^3/кг. \quad (19)$$

При расчете горения газообразного топлива процент каждого газа, входящего в состав топлива, принимают за 1 *кмоль* его в 100 *кмолях* смеси. Исходя из уравнений горения газов:

$$CO_2 + 0{,}5O_2 = CO_2; \quad CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O;$$
$$1 \quad + 0{,}5 \quad = 1 \qquad 1 \quad + 2 \quad = 1 \quad + 2$$
$$C_2H_4 + 3O_2 = 2CO_2 + 2H_2O;$$
$$1 \quad + 3 \quad = 2 \quad + 2$$
$$H_2S + 1{,}5O_2 = H_2O + SO_2;$$
$$1 \quad + 1{,}5 = 1 + 1$$
$$H_2 + 0{,}5O_2 = H_2O; \quad C_2H_2 + 2{,}5O_2 = 2CO_2 + H_2O;$$
$$1 \quad + 0{,}5 \quad = 1 \qquad 1 \quad + 2{,}5 \quad = 2 \quad + 1$$

получают потребное количество кислорода и азота:

$$O_2 = 0{,}01(0{,}5CO + 2CH_4 + 3C_2H_4 + 1{,}5H_2S + 0{,}5H_2 + 2{,}5C_2H_2 - O_2)\ м^3/м^3;$$

$$N_2 = 0{,}01\frac{79}{21}(0{,}5CO + 2CH_4 + 3C_2H_4 + 1{,}5H_2S + 0{,}5H_2 + 2{,}5C_2H_2 - O_2)\ м^3/м^3. \quad (20)$$

Количество воздуха будет

$$S_0 = O_2 + N_2 = 0{,}04762(0{,}5CO + 2CH_4 + 3C_2H_4 + 1{,}5H_2S + 0{,}5H_2 + 2{,}5C_2H_2 - O_2)\ м^3/м^3.$$

В приведенных расчетах определялось теоретическое количество воздуха, необходимого для полного сгорания 1 *кг*, или 1 $м^3$ топлива, при условии полного отсутствия в продуктах горения кислорода. Практически для полного сгорания топлива требуется подвод воздуха в количестве, превышающем теоретически необходимое, так как трудно добиться идеального смешения воздуха с топливом. Отношение практически введенного воздуха к теоретически необходимому носит название коэффициента избытка воздуха и обозначается n:

$$n = \frac{L_п}{L_0}, \quad (21)$$

где $L_п$ — практически введенное количество воздуха в $м^3$ (на 1 *кг*, или 1 $м^3$ топлива);

L_0 — теоретически необходимое количество воздуха в $м^3$ (на 1 *кг* или, 1 $м^3$ топлива).

Чем хуже смешение воздуха с топливом, тем больший коэффициент избытка воздуха приходится принимать для полного его сжигания. Наиболее трудно добиться хорошего смешения при сжигании твердого топлива и легче при сжигании газообразного. Исходя из этого, коэффициент избытка воздуха при сжигании твердого топлива принимают $n = 1{,}3 \div 1{,}5$, жидкого $n = 1{,}1 \div 1{,}15$ и газообразного $n = 1{,}05 \div 1{,}1$.

Количество и состав продуктов горения топлива определяют аналогично расчету расхода воздуха, исходя из приведенных выше уравнений горения. При сгорании твердого или жидкого топлива 1 *кг* C дает $\frac{1}{12}$ *кмоля*, или $\frac{1}{12}$ 22,4 $м^3$ CO_2; 1 *кг* H_2 дает $\frac{1}{2}$ *кмоля*, или $\frac{1}{2}$ 22,4 $м^3$ H_2O; 1 *кг* S дает $\frac{1}{32}$ *кмоля*, или $\frac{1}{32}$ 22,4 $м^3$ SO_2. К полученным от соединения с кислородом C, H и S продуктам горения следует добавить влагу — $H_2O = \frac{W}{18}$ 22,4 $м^3$ и азот — $N_2 = \frac{N}{28} \cdot 22{,}4$ $м^3$, содержащиеся в топливе и переходящие в продукты горения, а также азот воздуха, идущего на горение. Количество продуктов сгорания 1 *кг* жидкого или твердого топлива будет равно:

$$V_0 = 0{,}224\left[\frac{C}{12} + \frac{H}{2} + \frac{W}{18} + \frac{S}{32} + \frac{N}{28} + \right.$$

$$+\left(\frac{C}{12}+\frac{H-\frac{O}{8}}{4}+\frac{S}{32}\right)\frac{79}{21}\Bigg]=0{,}224\left[\frac{W}{18}+\frac{H+\frac{O}{8}}{4}+\right.$$

$$\left.+\frac{N}{28}+\left(\frac{C}{12}+\frac{H-\frac{O}{8}}{4}+\frac{S}{32}\right)\frac{1}{0{,}21}\right]\ м^3/кг, \qquad (22)$$

где C, H, S, O, W и N — соответственно содержание в процентах по массе элементарного состава топлива, а член 0,224 $\left(\frac{C}{12}+\frac{H-\frac{O}{8}}{4}+\frac{S}{32}\right)\frac{79}{21}$ — количество азота воздуха. При горении 100 $м^3$ газообразного топлива количество CO_2, H_2O и SO_2 в продуктах сгорания составит:
$CO_2=CO_2+CO+CH_4+2C_2H_4+2C_2H_2\ м^3$; $H_2O=H_2+2CH_4+2C_2H_4+C_2H_2+H_2S\ м^3$; $SO_2=H_2S\ м^3$. Откуда количество продуктов сгорания 1 $м^3$ газообразного топлива будет равно:

$$V_0=\Big[CO_2+CO+3CH_4+4C_2H_4+3C_2H_2+H_2+2H_2S+$$

$$+N_2+W+\frac{79}{21}\left(\frac{CO}{2}+2CH_4+3C_2H_4+\frac{3}{2}H_2S+\right.$$

$$\left.+\frac{H_2}{2}+\frac{5}{2}C_2H_2-O_2\right)\Big]0{,}01\ м^3/м^3, \qquad (23)$$

где CO_2, CO, CH_4 C_2H_4, C_2H_2, H_2, H_2S, N_2 и W соответствуют элементарному составу газа в объемных процентах, а $\frac{79}{21}\left(\frac{CO}{2}+2CH_4+3C_2H_4+\frac{3}{2}H_2S+\frac{H_2}{2}+\frac{5}{2}C_2H_2-O_2\right)0{,}01$ — количество азота воздуха.

Выше определяли количество продуктов горения при теоретическом количестве воздуха. При коэффициенте избытка воздуха больше 1 в продукты сгорания перейдет избыточный воздух $L_п-L_0=L_0(n-1)$ и количество их будет равно:

$$V_п=V_0+L_0(n-1)\ м^3/м^3. \qquad (24)$$

В связи с тем что расчет горения топлива по элементарному составу трудоемок и зачастую при производстве теплотехнических расчетов отсутствует полный анализ его, для технических расчетов обычно пользуются формулами приближенного расчета горения, приведенными в табл. 17.

Таблица 17

Формулы для приближенных расчетов по сжиганию топлива

Определяемая величина	Размерность	Формула при $Q_н^р$ в *кДж*	Формула при $Q_н^р$ в *ккал*
Теоретическое количество воздуха, потребное для сгорания 1 *кг*, или 1 $м^3$ топлива L_0:			
твердого	$м^3/кг$	$\frac{1{,}01}{4187}Q_н^р+0{,}5$	$\frac{1{,}01}{1000}Q_н^р+0{,}5$
жидкого	$м^3/кг$	$\frac{0{,}85}{4187}Q_н^р+2$	$\frac{0{,}85}{1000}Q_н^р+2$
газообразного с $Q_н^р<16\,750$ *кДж*/$м^3$ [4000 *ккал*/$м^3$]	$м^3/м^3$	$\frac{0{,}875}{4187}Q_н^р$	$\frac{0{,}875}{1000}Q_н^р$
то же, с $Q_н^р>16\,750$ *кДж*/*кг* [4000 *ккал*/$м^3$]	$м^3/м^3$	$\frac{1{,}09}{4187}Q_н^н-0{,}25$	$\frac{1{,}09}{1000}Q_н^р-0{,}25$
Теоретическое количество продуктов сгорания от 1 *кг*, или 1 $м^3$ топлива V_0:			
твердого	$м^3/кг$	$\frac{0{,}89}{4187}Q_н^р+1{,}65$	$\frac{0{,}89}{1000}Q_н^р+1{,}65$
жидкого	$м^3/кг$	$\frac{1{,}11}{4187}Q_н^р$	$\frac{1{,}11}{1000}Q_н^р$
газообразного с $Q_н^р<16\,750$ *кДж*/$м^3$ [4000 *ккал*/$м^3$]	$м^3/м^3$	$\frac{0{,}725}{4187}Q_н^р+1$	$\frac{0{,}725}{1000}Q_н^р+1$
то же, с $Q_н^р>16\,750$ *кДж*/$м^3$ [4000 *ккал*/$м^3$]	$м^3/м^3$	$\frac{1{,}14}{4187}Q_н^р+0{,}25$	$\frac{1{,}14}{1000}Q_н^р+0{,}25$

Пример. Определить количество воздуха, необходимое для сгорания природного газа с $Q_н^р=35\,600$ *кДж*/$м^3$ [8510 *ккал*/$м^3$], и объем продуктов горения при коэффициенте избытка воздуха $n=1{,}05$.

$$L_0=\frac{1{,}09}{4187}Q_н^р-0{,}25=\frac{1{,}09}{4187}35\,600-0{,}25=9{,}05\ м^3/м^3;$$

$$L_п=L_0n=9{,}05\cdot1{,}05=9{,}5\ м^3/м^3;$$

$$V_0=\frac{1{,}14}{4187}Q_н^р+0{,}25=\frac{1{,}14}{4187}35\,600+0{,}25=9{,}95\ м^3/м^3;$$

$$V_п=V_0+L_0(n-1)=9{,}95+9{,}05(1{,}05-1)=10{,}4\ м^3/м^3.$$

Температура горения топлива

В расчет горения топлива входит также определение температуры его горения. Различают калориметрическую и действительную температуру горения топлива. Калориметрической температурой горения называется та температура, которую приобрели бы образующиеся продукты горения при полном сгорании топлива и при условии, что тепло не уходит в окружающее пространство, т. е. остается в продуктах горения [1]. В этом случае теплосодержание продуктов горения от 1 *кг*, или 1 *м*³ топлива будет равно:

$$Q_{н}^{р} = c^{в.д}\, t_{к}\, V_{п}^{в.д}$$

$$\text{или } t_{к} = \frac{Q_{н}^{р}}{c^{в.д}\, V_{п}^{в.д}}, \qquad (25)$$

где $c^{в.д}$ — средняя теплоемкость влажных продуктов горения при давлении 760 *мм рт. ст.* в пределах температур от 0° С до $t_к$ в *кДж/(м³·град)* [*ккал/(м³·град)*];

$t_к$ — калориметрическая температура горения в° С;

$V_{п}^{в.д}$ — объем влажных продуктов горения на 1 *кг*, или 1 *м*³ топлива в *м*³.

Формулу (25) можно представить в виде

$$Q_{н}^{р} = t_{к}\,(c_{CO_2} V_{CO_2} + c_{CO} V_{CO} + c_{H_2O} V_{H_2O} + \cdots), \qquad (26)$$

где c_{CO_2}, c_{CO}, c_{H_2O} — теплоемкости CO_2, CO, H_2O и т. д. в *кДж/(м³·град)* [*ккал/(м³·град)*];

V_{CO_2}, V_{CO}, V_{H_2O} — объем CO_2, CO, H_2O и т. д. в *м*³ на 1 *кг*), или 1 *м*³ топлива.

Так как теплоемкость зависит от температуры, то в обоих случаях получают одно уравнение с двумя неизвестными. Решение этих уравнений выполняют методом интерполяции. Для практических целей можно пользоваться более простой формулой (25), дающей достаточно точный результат. Средние теплоемкости составляющих продуктов горения и приближенные темплоемкости продуктов горения в целом приведены в приложении 4.

Пример. Определить калориметрическую температуру горения природного газа $Q_{н}^{р} = 35\,600$ *кДж/м³* [8510 *ккал/м³*] при коэффициенте избытка воздуха $n = 1{,}05$. Как подсчитано выше, объем продуктов горения $V_{п}^{в.д} = 10{,}4$ *м³/м³*, откуда $i^{в.д} = \frac{35\,600}{10{,}4} = 3420$ *кДж/м³* [818 *ккал/м³*]. Задаемся температурой 2200° С; при этом теплоемкость продуктов горения (по приложению 1) равна 1,69 *кДж/(м³·град)* [0,404 *ккал/(м³·град)*], а $i^{в.д} = 1{,}69 \cdot 2200 = 3720$ *кДж/м³* [886 *ккал/м³*], что больше 3420 *кДж/м³*. Задаемся температурой 2000° С, при этой температуре $i^{в.д} = 1{,}67 \cdot 2000 = 3340$ *кДж/м³* [796 *ккал/м³*], что меньше 3420 *кДж/м³*.

Очевидно, калориметрическая температура горения лежит между 2200 и 2000° С. Интерполируя, находим

200° . . . . (3720—3340) = 380 *кДж/м³*;

$\Delta t°$ . . . . (3420—3340) = 80 *кДж/м³*;

$$\Delta t° = \frac{200 \cdot 80}{380} \approx 43°; \quad t_к = 2000 + 43 = 2043° \text{ С}.$$

Калориметрическую температуру горения можно повысить путем подогрева воздуха или воздуха и газа (при работе на газообразном топливе). В этом случае теплосодержание продуктов горения повышается за счет физического тепла, вносимого подогретым воздухом или воздухом и газом, а следовательно, повышается и температура горения.

$$t_{к} = \frac{Q_{н}^{р} + c_г\, t_г + c_в\, t_в\, L_п}{i^{в.д}\, V_{п}^{в.д}}\ °\text{С}, \qquad (27)$$

где $c_г$ и $c_в$ — теплоемкости газа и воздуха в *кДж/(м³·град)* [*ккал/(м³·град)*] [1];

$t_г$ и $t_в$ — температура подогрева газа и воздуха в °С;

$L_п$ — практическое количество воздуха в *м³/м³* или *м³/кг*;

$i^{в.д}$ — теплосодержание отходящих газов при $t_к$ °С в *Дж/м³* [*ккал/м³*].

Действительная температура горения всегда ниже калориметрической, так как, во-первых, при высокой температуре происходит разложение углекислоты и водяного пара, сопровождающееся поглощением тепла, и, во-вторых, во время горения часть тепла теряется через кладку в окружающую среду и передается материалу, помещенному в печи (садке). Отношение действительной температуры к калориметрической немецкий ученый Г. Банзен предложил называть пирометрическим коэффициентом печи. Пирометрический коэффициент для печей лежит в пределах от 0,5 до 0,85, в частности для:

туннельных печей	0,75—0,82;	кузнечной щелевой печи	0,66—0,7;
воздухонагревателя доменной печи	0,77—0,8;	мартеновской печи	0,7—0,74;
проходной печи	0,72—0,76;	вращающейся печи для обжига цемента	0,65—0,75;
методической печи	0,7—0,75;	стекловаренной ванной печи	0,58—0,62.
садочной камерной печи	0,65—0,7;		

Пример. До какой минимальной температуры необходимо подогревать воздух для получения в рабочем пространстве мартеновской печи, отапливаемой рассчитанным выше природным газом температуры $t = 2750°$ С.

При пирометрическом коэффициенте, равном 0,72, калориметрическая температура горения должна составить $t_к = \frac{1750}{0{,}72} = 2430°$ С. При этой темпера-

[1] Если сжигание топлива происходит с коэффициентом избытка воздуха $n = 1$ и без подогрева воздуха и топлива, то калориметрическую температуру горения называют жаропроизводительной способностью топлива.

[1] Теплоемкости газов и воздуха приведены в приложении 4.

туре теплосодержание продуктов горения 1 $м^3$ газа должно быть $Q_{пр.гор} = 1{,}715 \cdot 2430 \cdot 10{,}4 = 43\,200$ *кДж/м³* [10 350 *ккал/м³*], где 1,715 — теплоемкость продуктов горения при $t = 2430°$ С в *кДж/(м³·град)*; 10,4 — количество продуктов горения 1 $м^3$ природного газа в $м^3$. Следовательно, за счет подогрева воздуха необходимо добавить $Q_{пр.гор} - Q_н^р = 43\,200 - 35\,600 = 7600$ *кДж/м³* [1830 *ккал/м³*] газа. На горение 1 $м^3$ газа, как подсчитано на стр. 69, воздуха идет $L_п = 9{,}5$ *м³/м³*. Следовательно, теплосодержание воздуха должно быть $i_в = 7600 : 9{,}5 = 800$ *кДж/м³* [191 *ккал/м³*]. Задаемся температурой подогрева воздуха $t_в = 600°$ С. При этом теплосодержание воздуха будет равно $i_в = 1{,}362 \cdot 600 = 817$ *кДж/м³* [195 *ккал/м³*], что больше 800 *кДж/м³* [191 *ккал/м³*].

Задаемся температурой 500° С. При этой температуре $t_в = 1{,}345 \cdot 500 = 670$ *кДж/м³* [161 *ккал/м³*], что меньше 800 *кДж/м³* [191 *ккал/м³*]. Интерполируя, получаем необходимую температуру подогрева воздуха, равную 590° С (практически воздух в регенераторах мартеновских печей подогревают до 1200—900° С).

Если печь работает на низкокалорийном газе, который подогревается, то учитывается также физическое тепло, вносимое им.

Подогрев газа и воздуха часто осуществляют и при достаточной температуре горения с целью экономии топлива и улучшения условий горения.

ГЛАВА III

ОСНОВЫ ПЕЧНОЙ ТЕПЛОТЕХНИКИ

§ 7. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ МЕХАНИКИ ГАЗОВ

Газообразные продукты, образующиеся в процессе горения топлива, поступают в рабочее пространство печи, оставляют в нем часть своего тепла и через боров и дымовую трубу удаляются в атмосферу (рис. 4). В правильно сконструированной печи, во избежание подсоса воздуха, на всем протяжении рабочего пространства от топки до пролета в боров должно быть сохранено положительное давление. Чтобы грамотно проектировать и строить печи, надо знать законы движения печных газов. Наука о движении газов называется механикой газов.

Вспомним основные законы о плотности и удельном объеме газов.

Плотностью газа γ называется масса единицы объема в натуральных условиях (760 *мм рт. ст.*, 0° С)

$$\gamma = \frac{G}{V}\ кг/м^3, \tag{28}$$

где G — масса газа в *кг*;

V — объем газа в $м^3$ в нормальных условиях.

Удельным объемом газа v называется объем единицы массы газа в нормальных условиях

$$v = \frac{V}{G} = \frac{1}{\gamma}\ м^3/кг. \tag{29}$$

По закону Гей-Люссака объем и объемная масса газов изменяются с изменением температуры

$$V_t = V_0(1 + \beta t)\ м^3/кг, \tag{30}$$

$$\gamma_t = \frac{\gamma_0}{1 + \beta t}\ кг/м^3, \tag{31}$$

где V_t и γ_t — объем и плотность газа при температуре $t°$ С и давлении 760 *мм рт. ст.*;

V_0 и γ_0 — то же, при 0° С и 760 *мм рт. ст.*;

$\beta = \frac{1}{273} \cdot \frac{1}{град}$ — коэффициент объемного расширения газа.

По закону Бойля — Мариотта

$$V_1 p_1 = V_2 p_2 = Vp = \text{const}, \tag{32}$$

где V и V_1 — объемы газа при давлениях p_1 и p_2 при постоянной температуре.

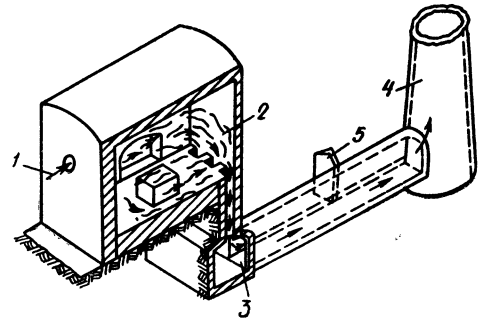


Рис. 4. Схема движения газов в печи

1 — горелка; *2* — рабочее пространство; *3* — боров; *4* — дымовая труба; *5* — шибер

На основе законов Гей-Люссака и Бойля — Мариотта выводится уравнение для определения объема газа V_1 и плотности газа γ_1 при температуре t_1 и давлении p_1

$$V_1 = V_0(1 + \beta t_1)\frac{p_0}{p_1};$$

$$\gamma_1 = \frac{\gamma_0}{1 + \beta t} \cdot \frac{p_1}{p_0}, \tag{33}$$

где V_0 и γ_0 — объем и плотность газа при температуре 0° С и давлении 760 *мм рт. ст.*;

p_0 — атмосферное давление, выраженное в тех же единицах, что и p_1.

Статический, геометрический и динамический напоры

Потенциальная и кинетическая энергия газов выражается напором.

В механике газов напор газа выражается высотой его столба, а

давление — величиной, равной 1/10 000 технической атмосферы (10 000 *мм вод. ст.*), т. е. в *мм вод. ст.*, или *кгс/м²*.

Статическим или манометрическим напором называется разность давлений газа, заключенного в сосуде, и окружающей атмосферы

$$h = p - p_{ат} \text{ в } кгс/м^2, \text{ или в } мм\ вод.\ ст., \qquad (34)$$

где p — давление газа в сосуде в *кгс/м²* или *мм вод. ст.*;
$p_{ат}$ — давление атмосферного воздуха в *кгс/м²* или *мм вод. ст.*

Если газ находится под давлением выше атмосферного, статический напор имеет знак плюс, а ниже атмосферного — знак минус. Геометрический напор — это напор положения газа относительно некоторого уровня. Он появляется в том случае, когда объемная масса газа отличается от объемной массы окружающего атмосферного воздуха, что вызывает стремление газа подниматься вверх или опускаться вниз в зависимости от того, тяжелее он или легче окружающей атмосферы. Геометрический напор в полостях, заполненных горячим газом, на уровне H от верхней границы газов равен разности массы 1 *м³* наружного воздуха $\gamma_в$ и 1 *м³* газов $\gamma_г$, умноженной на эту высоту H:

$$h_{геом} = H(\gamma_в - \gamma_г^t) = H\left(\frac{1{,}293}{1-\beta t_в} - \frac{\gamma_г^0}{1-\beta t_г}\right) кгс/м^2, \text{ или } мм\ вод.\ ст., \qquad (35)$$

где 1,293 — масса 1 *м³* воздуха при 0° С и 760 *мм рт. ст.* в *кг/м³*;
$\gamma_г^t$ — масса 1 *м³* газа при $t°$ в *кг/м³*;
$\gamma_г^0$ — масса 1 *м³* газа при 0° С в *кг/м³*;
$\beta = \frac{1}{273}$ — коэффициент объемного расширения газа.

Масса 1 *м³* газа определяется по формуле

$$\gamma_г^0 = 0{,}01\left(CO_2\frac{44}{22{,}4} + CO\frac{28}{22{,}4} + H_2\frac{2}{22{,}4} + N_2\frac{28}{22{,}4} + \cdots\right) кг/м^3 \text{ в нормальных условиях}, \qquad (36)$$

где CO_2, CO, H_2, N_2... — соответственно содержание в объемных процентах составляющих в газе, числители — их молекулярные массы; 22,4 — молекулярный объем.

Если геометрический напор имеет одинаковое направление с движением газа, то ему придают знак плюс, если противоположное — знак минус. Движение газов по каналам происходит аналогично движению жидкости под влиянием разности давлений, которая называется скоростным, или **динамическим** напором. Между скоростью движения газа w и динамическим напором $h_{дин}$ существует зависимость, выражаемая формулой:

$$h_{дин} = \frac{w_t^2}{2g}\gamma_г^t = \frac{w_0^2}{2g}\gamma_г^0(1+\beta t)\ кгс/м^2, \text{ или } мм\ вод.\ ст., \qquad (37)$$

где g — ускорение силы тяжести (9,81 *м/сек²*).

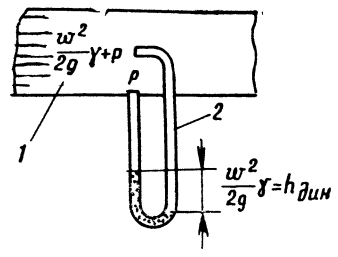


Рис. 5. Замер динамического напора дифференциальным манометром

1 — трубопровод, по которому движется газ;
2 — дифференциальный манометр

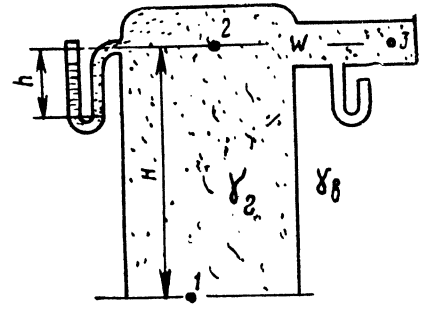


Рис. 6. Схема движения нагретого газа

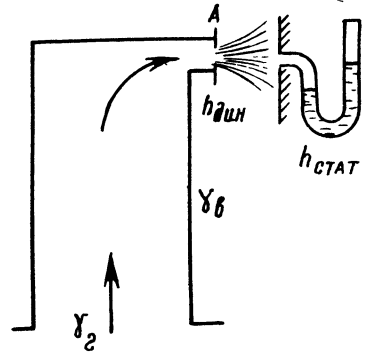


Рис. 7. Схема, иллюстрирующая превращение динамического напора в статический

Статический напор измеряется обычным манометром, одно колено которого соединено с атмосферой, а другое с трубкой, вставленной в поток перпендикулярно последнему. Динамический напор измеряется дифференциальным манометром, один конец трубки которого поставлен перпендикулярно течению потока, а второй — навстречу потоку (рис. 5). Первый конец трубки при этом испытывает только статический напор, а второй — напор, равный сумме динамического и статического напоров. Разность уровней в манометре покажет $h_{дин} + h_{стат} - h_{стат} - h_{дин}$.

Геометрический напор не может быть непосредственно измерен, он определяется по расчету.

Для решения вопросов, связанных с движением газов, используется закон сохранения энергии, сформулированный итальянским ученым Д. Бернулли. Применительно к реальному газу, встречающему по пути сопротивление движению, уравнение Бернулли можно сформулировать следующим образом: при установившемся движении реального газа для каждой частицы сохраняется неизменной сумма напоров статического, геометрического, динамического и напора, потерянного на сопротивления ($h_{пот}$). При движении газов происходит превращение напоров: геометрического в статический, статического в динамический, динамического в статический или потерянный. Статический напор перейти обратно в геометрический не может. В сосуде, показанном на рис. 6, геометрический напор в точке *1* равен $h_{геом} = H\left(\gamma_в^0 - \gamma_г^t\right)$ *кгс/м²*, а статический напор $h_{стат}=0$, так как в этом месте газ соприкасается с атмосферой и напоры их равны. В точке *2* геометрический напор равен 0, зато газ в этом положении обладает (если пренебречь потерями напора на сопротивление движению газа) статическим напором, равным $h_{стат} = H|\gamma_в^0 - \gamma_г^t|$ *кгс/м²*, указываемым манометром, т. е. геометрический напор полностью перешел в статический. В точке *3*, если также пренебречь сопротивлением движению газа, газ имеет динамический напор $h_{дин} = \frac{w_t^2}{2g}\gamma_г^t$ *кгс/м²*, а статический напор равен 0. В точке *A* (рис. 7) $h_{геом} + h_{стат} + h_{дин} = 0$— напоры затрачены на удар о неподвижный атмосферный воздух при вытекании газа из трубки. Если на пути струйки газа, вытекающего из сосуда, поставить стенку, то в непосредственной близости у стенки динамический напор вновь частично превратится в статический, который может быть измерен манометром.

Потери напора

При движении газов по трубам и каналам возникает сопротивление, вызывающее потерю напора. Напор теряется на преодоление сопротивления трения газов о стенки каналов и местных сопротивлений от изменения направления газового потока и изменения сечений каналов по пути движения газов. Сопротивление от трения при движении газов по трубам или каналам определяется по формуле

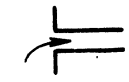
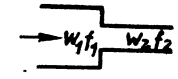
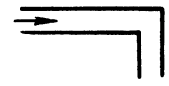
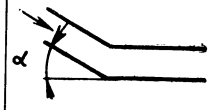
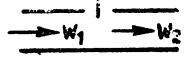
$$h_{тр} = \mu \frac{w_0^2}{2g} \gamma_0 (1 + \beta t) \frac{L}{d} \text{ мм вод. ст.}, \qquad (38)$$

где μ — коэффициент трения;

w_0 — средняя скорость движения газов в нормальных условиях в *м/сек*;

Таблица 18

Коэффициенты местных сопротивлений

Тип местного сопротивления: наименование	эскиз	Значение коэффициента ξ
Вход в отверстия из среды с $w=0$		$\xi = 0{,}5$
Внезапное сужение		$\xi = 0{,}5\left(1 - \frac{f_2}{f_1}\right)^2$
Внезапное расширение		$\xi = \left(1 - \frac{f_1}{f_2}\right)^2$
Резкий поворот		$\xi = 1{,}5$
Плавный поворот		r/d: 1 — ξ: 0,35; 1,5 — 0,15; 2,5 — 0,1; 5 — 0
Поворот на угол		$\xi = \sin^2\frac{\alpha}{2} + 2{,}5\sin^3\frac{\alpha}{2}$
Шибер		$\xi = \left(\frac{f_1}{0{,}65 f_2} - 1\right)^2$

γ_0 — плотность газа в нормальных условиях в *кг/м*³;
g — ускорение силы тяжести в *м/сек*²;
L — длина канала в *м*;
d — диаметр канала в *м*.

В случае если канал не круглый, то в качестве d принимают так называемый гидравлический диаметр $d = \frac{4F}{S}$,

где F — площадь поперечного сечения канала в *м*²;
S — периметр канала в *м*.

Коэффициент трения μ зависит от характера движения газа — ламинарного или турбулентного, его скорости и шероховатости стенок канала. При ламинарном или слоистом потоке газов все частицы движутся параллельно оси канала; при увеличении скорости движение частиц потока переходит в вихревое — турбулентное. В печах движение газов обычно бывает вихревое. Для приближенных расчетов коэффициент трения можно принимать: для гладких металлических поверхностей $\mu = 0{,}03 \div 0{,}04$; для кирпичных стенок $\mu = 0{,}05 \div 0{,}055$. Потеря напора от местных сопротивлений определяется по формуле

$$h_м = \xi \frac{\omega_0^2}{2g} \gamma_0 (1 + \beta t) \text{ мм вод. ст.}, \qquad (39)$$

где ξ — коэффициент местного сопротивления, принимаемый по табл. 18.

Движение газов в печах, естественная и искусственная тяга

Движение газов в печах может быть естественное или принудительное. Естественное движение газов происходит за счет разности плотностей (т. е. разности температур) отдельных частей объемов газов в печи. При этом более горячие газы, как более легкие, стремятся подняться вверх, а более холодные — опуститься вниз. В печах чаще имеет место принудительное движение газов, возбуждаемое внешними причинами: воздействием факела горелки или форсунки или разностью давлений в различных сечениях дымового тракта.

Продукты горения отводят из печи при помощи дымовой трубы или путем искусственной тяги. При отводе продуктов горения дымовой трубой используется геометрический напор, создаваемый столбом горячих газов в трубе. Теоретическая величина разрежения, создаваемого дымовой трубой (рис. 8, *а*), равна:

$$h_{геом} = H \left(\frac{\gamma_в^0}{1 + \beta t_в} - \frac{\gamma_г^0}{1 + \beta t_г} \right) \text{ мм вод. ст.} \qquad (40)$$

Величину разрежения регулируют заслонкой-шибером, устанавливаемым у дымовой трубы в борове.

Искусственная тяга бывает прямого действия, когда газы отсасываются через специальный вентилятор-дымосос (рис. 8, *б*), и косвенного, при которой струя воздуха или отходящих газов эжектирует (подсасывает) отходящие газы. Смесь газов отводится через расширяющуюся трубу — диффузор (рис. 8, *в*).

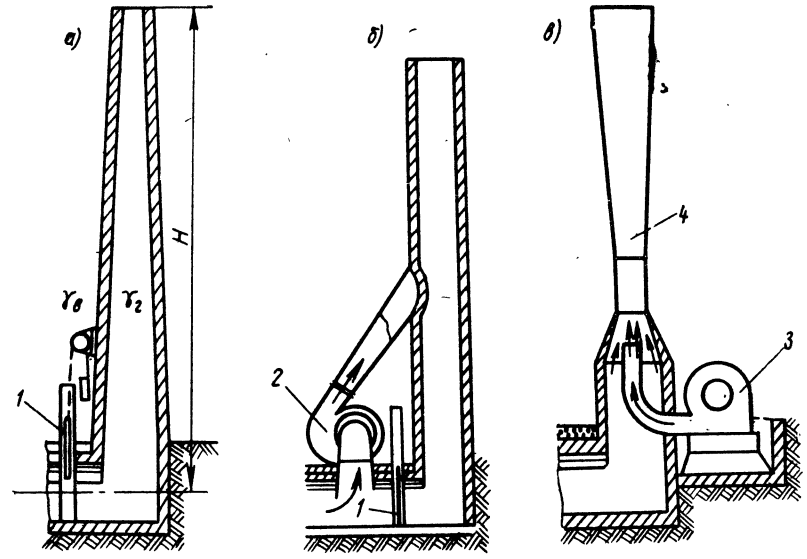


Рис. 8. Схема дымовой трубы и искусственной тяги

а — дымовая труба; *б* — искусственная тяга прямого действия; *в* — искусственная тяга косвенного действия; *1* — шибер; *2* — дымосос; *3* — вентилятор; *4* — диффузор

§ 8. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Тепло, выделяемое в процессе горения топлива, переносится с помощью продуктов горения в рабочее пространство печи, где за счет него происходит нагрев материалов. Передача тепла всегда происходит от тела более нагретого к телу менее нагретому. Передача тепла может происходить тремя различными путями: теплопроводностью, конвекцией и излучением.

Передача тепла теплопроводностью

Теплопроводность — это передача тепла от одной частицы тела к другой, находящейся в непосредственной близости от нее. Теплопередача путем теплопроводности в чистом виде возможна только в твердых телах. В жидкой и газообразной средах передача тепла происходит смешанным путем. Если температура всех точек рассматриваемого тела остается постоянной во

времени, т. е. температурное поле является функцией только координат, то теплопередача называется установившейся и поток — стационарным. Если температура в каждой точке тела изменяется во времени, то такое тепловое состояние называется нестационарным. Количество тепла, протекающее в продолжение 1 *ч* при стационарном потоке через сечение F *м*², составляет

$$Q = \lambda F \frac{t_1 - t_2}{S} = F \frac{t_1 - t_2}{S/\lambda} \; Вт \; [ккал/ч], \qquad (41)$$

где λ — коэффициент теплопроводности тела в *Вт/ (м·град)* [*ккал/м·ч·град*];

t_1 и t_2 — температуры на ограничивающих стену поверхностях в ° С;

S — толщина стенки в *м*.

Отношение S/λ называется термическим сопротивлением. Тепловой поток через стену численно равен разности температур поверхностей стены, деленной на термическое сопротивление этой стены.

Пример. Определить количество тепла, проходящего в 1 *ч* через 1 *м*² плоской стенки толщиной $S = 345$ *мм*, выложенной из шамотного кирпича. Температура внутренней поверхности стенки $t_1 = 1250°$ С, наружной $t_2 = 150°$ С. Коэффициент теплопроводности шамота при средней температуре $t_{ср} = \frac{1250+150}{2} = 700°$ С по рис. 1 $\lambda_{ср} = 1{,}14$ *Вт/м·ч* [0,98 *ккал/(м·ч·град)*].

По формуле (41) $Q = 1{,}14 \cdot 1 \frac{1250-150}{0{,}345} = 3640$ *Вт/м²* $\left[0{,}98 \cdot 1 \frac{1250-150}{0.345} = 3130 \right.$ *ккал/м²·ч*$\left.\right]$.

Если плоская стенка состоит из нескольких слоев толщиной S_1, S_2, S_3, ..., S_n с коэффициентами теплопроводности λ_1, λ_2 ..., λ_n и температурами на границе стенок t_1, t_2, ... t_{n-1}, то формула (41) принимает вид

$$Q = \frac{F(t_1 - t_{n-1})}{S_1/\lambda_1 + S_2/\lambda_2 + \cdots + S_n/\lambda_n} \; Вт \; [ккал/ч], \qquad (42)$$

где знаменатель — суммарное термическое сопротивление стены.

Температура между отдельными слоями стенки определяется по формуле, получаемой из формулы (42):

$$t_n = t_1 - \frac{Q}{F}\left(\frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \cdots + \frac{S_{n-1}}{\lambda_{n-1}}\right) \; град, \qquad (43)$$

где $\frac{Q}{F}$ — количество тепла, проходящего в течение 1 *ч* через 1 *м²* поверхности.

Определение количества тепла, передаваемого теплопроводностью при нестационарном потоке, очень сложно и в данном пособии не рассматривается.

Передача тепла конвекцией

Передача тепла конвекцией заключается в переносе тепла путем перемещения самих частиц газа или жидкости, что сопровождается также теплопроводностью, т. е. передачей тепла от одной частицы к другой — соседней. Тепло передается конвекцией от жидкостей и газов к твердым телам, и наоборот. При этом частицы газа или жидкости, соприкасающиеся с твердой поверхностью, отдают ей свое тепло (или нагреваются от нее). После теплообмена подвижные частицы удаляются, а на их место приходят новые. Количество тепла, передаваемое путем конвекции за единицу времени, определяется по формуле

$$Q = F\alpha(t_1 - t_2) \; Вт \; [ккал/ч], \qquad (44)$$

где F — поверхность нагрева в *м²*;

α — коэффициент теплоотдачи конвекцией в *Вт/ (м²·град)* [*ккал/ (м²·ч·град)*];

t_1 и t_2 — температура газа или жидкости и поверхности, около которой протекает газ (или жидкость), в ° С.

Коэффициент теплоотдачи соответствует количеству тепла, которое передается на 1 *м²* поверхности нагрева за 1 *ч* при разности температур в 1° и зависит от характера потока газа (ламинарного или турбулентного), скорости его движения, расположения и формы поверхности нагрева и физических свойств среды. Коэффициент теплоотдачи конвекцией больше при турбулентном движении и больших скоростях потока газа, так как при этом в единицу времени большее количество частиц газа будет соприкасаться с нагреваемой поверхностью. Коэффициент теплоотдачи увеличивается также при шероховатой поверхности и форме, способствующей завихрению потока газа.

Значения коэффициента теплоотдачи конвекцией определяются для различных случаев экспериментальным путем. Для газов при естественной конвекции коэффициент теплоотдачи лежит в пределах 6—35 *Вт/ (м²·град)* [5—30 *ккал/ (м²·ч·град)*], а при турбулентном движении в трубах или между ними — 12—115 *Вт/(м²·град)* [10—100 *ккал/(м²·ч·град)*].

Передача тепла излучением

Излучением тепло передается одним телом другому путем лучистой энергии без посредства материальной среды. Количество энергии, излучаемой телом, зависит от его температуры: чем выше температура тела, тем большее количество лучистой энергии оно выделяет. По закону Стефана — Больцмана количество тепла, передаваемого излучением от одного тела другому, пропорционально разности четвертых степеней температур тел:

$$Q = CF\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] \; Вт \; [ккал/ч], \qquad (45)$$

где C — коэффициент излучения в $Вт/(м^2 \cdot °К^4)$ $[ккал/(м^2 \cdot ч \cdot °К^4]$;

F — лучеиспускающая или лучевоспринимающая поверхность в $м^2$;

T_1 и T_2 — абсолютные температуры лучеиспускающей или лучевоспринимающей поверхностей в °К.

Тело, которое поглощает все падающие на его поверхность лучи, не отражая и не пропуская их сквозь себя, называется абсолютно черным. Коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела $C_s = 5{,}7 \cdot 10^{-8}$ $Вт/(м^2 \cdot °К^4)$ $[4{,}9 \cdot 10^{-8}$ $ккал/(м^2 \cdot ч \cdot °К^4)]$. Если 10^{-8} отнести к температуре, разделив ее на 100 $\left[\left(\frac{1}{100}\right)^4 = 10^{-8}\right]$, как это сделано в формуле (45), то коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела будет равен $C_s = 5{,}7$ $Вт/(м^2 \cdot °К^4)$ $[4{,}9$ $ккал/(м^2 \cdot ч \cdot °К^4)]$.

Коэффициент лучеиспускания всех тел C меньше коэффициента лучеиспускания абсолютно черного тела C_s. Отношение лучеиспускания данного тела к лучеиспусканию абсолютно черного тела называется относительной лучеиспускательной способностью, или степенью черноты Σ

$$\Sigma = \frac{C}{C_s}.$$

Коэффициент излучения C для большинства твердых тел лежит в пределах 3,5—5,3 $Вт/(м^2 \cdot °К^4)$ $[3$—$4{,}6$ $ккал/(м^2 \cdot ч \cdot °К^4)]$. Коэффициент излучения газов зависит от их состава, толщины слоя и температуры. Практически в дымовых газах лучеиспускательной способностью обладают только CO_2 и H_2O; чем больше содержание их в газе и чем больше толщина газового слоя и его температура, тем больше коэффициент излучения. Значительно увеличивает лучеиспускание слоя наличие в нем светящихся раскаленных частиц сажи (светящееся углеводородное пламя).

Тепловая работа печи

Теплопередача в печах происходит одновременно конвекцией и лучеиспусканием. Продукты горения топлива, проходя рабочее пространство печи, отдают свое тепло конвекцией и лучеиспусканием как нагреваемому материалу, так и кладке рабочего пространства. Нагретая кладка в свою очередь излучает тепло на нагреваемый материал. Из формул (44) и (45) видно, что теплопередача конвекцией зависит от разности температур в первой степени, а теплопередача лучеиспусканием — от разности температур в четвертой степени. Следовательно, при высоких температурах основное значение при передаче тепла имеет теплопередача излучением. При температуре в печи ниже 800—900° С передача тепла происходит в основном за счет конвекции, а выше

этих температур — за счет излучения. Общий коэффициент теплопередачи металлу в нагревательных печах колеблется в зависимости от температуры от 58 до 520 $Вт/(м^2 \cdot град)$ [от 50 до 450 $(ккал/м^2 \cdot ч \cdot град)$]. Для определения общего коэффициента теплопередачи к металлу немецкий ученый Шак дает приближенную формулу

$$\alpha_{общ} = 58 + 0{,}52\,(t - 700)\ Вт/(м^2 \cdot град)[50 + 0{,}45\,(t - 700)]\ ккал/(м^2 \cdot ч \cdot град), \quad (46)$$

где t — температура печи в °С.

§ 9. НАГРЕВ МЕТАЛЛА

Металл нагревается в печах для улучшения его пластических свойств перед обработкой давлением — прокаткой, ковкой или штамповкой, а также при термической обработке. От правильного режима нагрева металла зависит качество получаемых из него изделий: их структура, внешний вид и механические свойства.

Тепло, воспринимаемое поверхностью нагреваемого металла, передается от наружных слоев к внутренним за счет теплопроводности. При очень быстром нагреве тепло не успевает распространиться с поверхности внутрь металла. В связи с этим возникает большая разность в температурах наружных и внутренних слоев, и температурное расширение внутренних слоев отстает от расширения наружных слоев. Поэтому между наружными и внутренними слоями создаются так называемые температурные напряжения. Они тем больше, чем больше разница температур в различных частях нагреваемого металла. При большой разности температур эти напряжения возрастают до такой величины, что в металле могут появиться трещины. Поэтому металл необходимо нагревать равномерно с определенной скоростью. Особенно это относится к интервалу температур до 750—800° С. По достижении температур порядка 800° С сталь приобретает достаточные пластические свойства и ее можно нагревать с любой скоростью, не опасаясь образования трещин. Скорость нагрева задается обычно технологами в минутах на 1 *см* толщины заготовки или слитка. Для обычных сталей она лежит в пределах 5—9 *м/сек*. С большей скоростью можно нагревать сталь толщиной до 50—80 *мм* и заготовки из малоуглеродистой стали, в которых при быстром нагреве больших напряжений не возникает, во-первых, в связи с небольшой толщиной, и, во-вторых, благодаря большой теплопроводности.

Для качественного нагрева стали имеет значение также и температура нагрева. При нагреве больше определенной температуры зерна стали начинают быстро расти, что может понизить ее качество. Помимо этого при сильном перегреве сталь становится не только крупнозернистой, но и значительно обезуглероживается. При обработке такая крупнозернистая обезуглерожен-

ная сталь дает трещины, а при сильном перегреве (пережоге) может даже развалиться на куски. Поэтому каждый сорт стали следует нагревать не только с определенной скоростью, но и до определенной температуры.

В продуктах горения содержится свободный кислород, водяные пары и углекислота, которые при высокой температуре, соединяясь с железом, окисляют его и на поверхности нагреваемого металла появляется слой окисленного железа — окалина, которая при дальнейшей обработке заготовки отпадает, что ведет к потере металла — угару. Толщина слоя окалины зависит от продолжительности пребывания металла в зонах печи с высокими температурами. Окисление начинается при температуре 600—700° С, однако значительных величин достигает при более высоких температурах порядка 900—1000° С. Поэтому чем дольше металл находится при температурах выше 900—1000° С, тем больше будет его угар, а следовательно, и потеря. Помимо потери металла окалина ухудшает вид наружной поверхности изделий — после удаления окалины поверхность получается не гладкой, а шероховатой.

При нагреве стали происходит также обезуглероживание поверхностного слоя слитков или заготовок, так как углерод, содержащийся в стали, соединяется с кислородом продуктов горения и выгорает. Обезуглероживание снижает качество металла. Как на окисление, так и на обезуглероживание металла оказывает большое влияние состав продуктов горения — атмосфера в печи. Для уменьшения потерь металла с угаром и получения изделий с гладкой, неокисленной поверхностью применяют специальные печи, в которых создается нейтральная атмосфера, или печи безокислительного нагрева. Конструкция печей описана в главе VI.

ГЛАВА IV

КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПЕЧЕЙ И ОБОРУДОВАНИЕ

Промышленные печи имеют устройства для сжигания топлива, рабочее пространство, где происходит нагрев, сушка, обжиг или плавление материалов, дутьевые и тяговые устройства, обеспечивающие подачу воздуха и эвакуацию продуктов горения из рабочего пространства. Многие печи оборудуют устройствами для подогрева воздуха и газообразного топлива, а также механизмами для загрузки и выгрузки материалов из печи и продвижения материалов по рабочему пространству печи.

§ 10. ТОПЛИВОСЖИГАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

В качестве топлива в промышленных печах применяется преимущественно газообразное и жидкое топливо. Твердое топливо используется главным образом в шахтных печах и в печах для

обжига обыкновенного глиняного кирпича. В других типах печей оно применяется сравнительно редко.

Сжигание твердого топлива

Топка для твердого топлива представляет собой камеру, футерованную огнеупорным кирпичом и отделенную порогом от рабочего пространства печи (рис. 9). Топливо забрасывается в топку через загрузочное окно на колосниковую решетку, а воз-

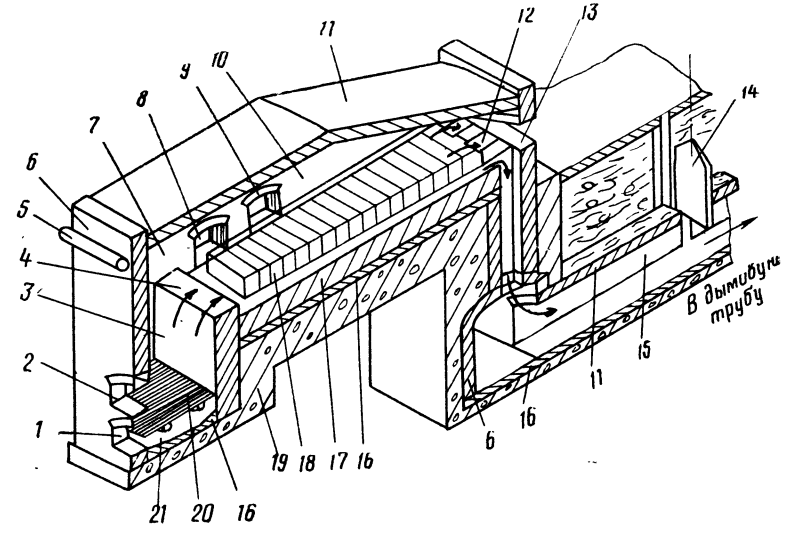


Рис. 9. Схема методической нагревательной печи

1 — зольниковая дверка; *2* — загрузочное топочное окно; *3* — топка; *4* — порог; *5* — вторичный воздух; *6* — стена; *7* — пламенное окно; *8* — рабочее окно; *9* — арки; *10* — рабочее пространство; *11* — свод; *12* — дымовые пролеты; *13* — загрузочное окно печи; *14* — шибер; *15* — боров; *16* — выстилка; *17* — под; *18* — нагреваемый металл; *19* — фундамент; *20* — колосниковая решетка; *21* — зольник

дух для горения подается снизу под колосниковую решетку в зольник. В промышленных печах для сжигания угля применяют чаще всего топки с горизонтальной колосниковой решеткой, выкладываемой из стальных брусков сечением 25×25÷50×50 *мм* с зазором между ними, как показано на рис. 9. Иногда вместо стальных брусков применяют чугунные колосники или чугунные плиты с продольными или круглыми отверстиями. Колосниковая решетка служит для поддержания слоя топлива при горении и равномерного распределения воздуха по всему слою топлива. Зола сгоревшего топлива проваливается в зольник и выгребается оттуда через зольниковое окно. Загрузочное и зольниковое окна закрываются во время работы печи дверками (на рисунке не показаны). Продукты горения из топки идут в рабочее про-

странство печи. Очень часто в зольник подается только часть воздуха, необходимого для горения топлива. При этом процесс горения завершается на решетке не полностью. В связи с недостатком воздуха углерод превращается в окись углерода и продукты горения содержат много окиси углерода и водорода, которые дожигаются в рабочем пространстве печи при поступлении дополнительного (вторичного) воздуха, подводимого в верхнюю часть топки (как показано на рис. 9). Это делается для того, чтобы по возможности перенести горение топлива в рабочее пространство печи с целью получить в нем более высокую температуру при одновременном снижении температуры в топке. Такие топки называются полугазовыми.

Сжигание газообразного топлива

Процесс сжигания газообразного топлива протекает в две стадии: смешение горючего с воздухом и собственно горение.

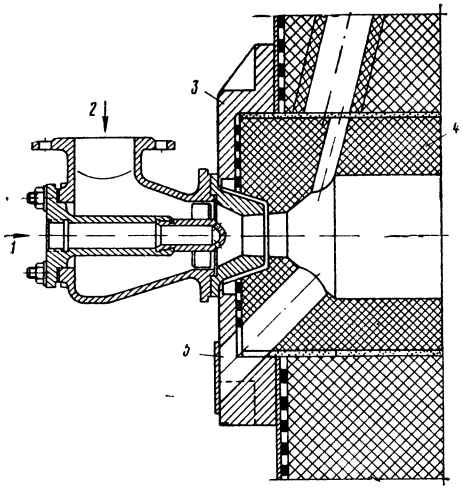


Рис. 10. Горелка низкого давления для природного газа ГНП-3

1 — газ; *2* — воздух; *3* — плита горелочная; *4* — горелочный камень; *5* — отверстие для зажигания горелки

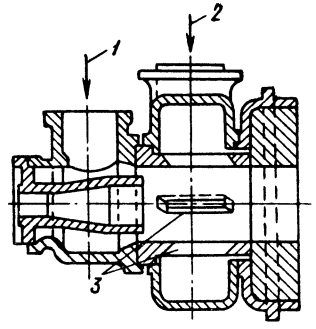


Рис. 11. Турбулентная горелка

1 — газ; *2* — воздух; *3* — щелевидные отверстия для прохода воздуха

При сжигании газообразного топлива основное внимание обращают на смешение горючего и воздуха, что осуществляют с помощью газовых горелок.

Газовые горелки можно разбить на две основные группы: горелки с принудительной подачей газа и воздуха и инжекционные, куда газ (реже воздух) подается под большим давлением и, выходя из сопла с большой скоростью, подсасывает (инжектирует) требуемое для горения количество воздуха (или соответственно газа). В горелках с принудительной подачей газ и воздух подаются под давлением 75—250 *мм вод. ст.*, при этом воздух обычно под несколько бóльшим давлением. В горелке низкого давления конструкции института Теплопроект (рис. 10) газ и воздух, выходя со значительной скоростью (порядка 15—30 *м/сек*), переме-

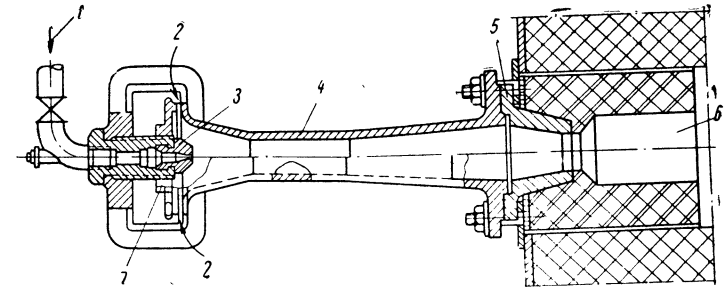


Рис. 12. Инжекционная горелка

1 — газ; *2* — воздух; *3* — сопло; *4* — смеситель; *5*—горелка; *6* — туннель; *7* — фланец для регулирования количества засасываемого воздуха

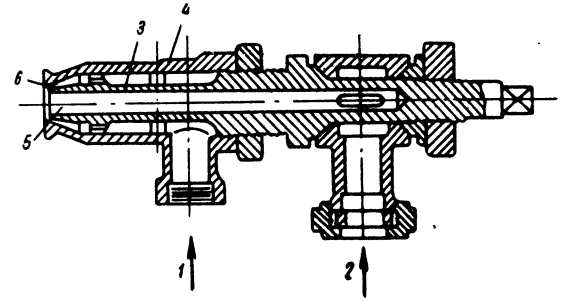


Рис. 13. Форсунка высокого давления Шухова

1 — пар; *2* — мазут; *3* — внутренняя трубка; *4* — наружная трубка; *5* — отверстие для выхода мазута; *6* — кольцевая щель для выхода пара (сжатого воздуха)

шиваются. Для лучшего перемешивания газ выходит из сопла под углом к движению воздуха. Окончательное смешение газа и воздуха и частичное сгорание смеси происходит в туннеле горелочного камня. Горелка крепится к горелочной плите. В плите и горелочном камне предусмотрено закрываемое поворотной заслонкой отверстие для зажигания горелки.

В турбулентных (завихряющих) горелках (рис. 11) газ и воздух смешиваются в самой горелке. Для лучшего перемешивания воздух входит в камеру смешения через ряд продолговатых отверстий перпендикулярно движению газа, чем создается хорошее завихрение его. К горелкам с принудительной подачей газа и воздуха относятся и керамические горелки, например головки мартеновских печей и горелки стекловаренных печей, опи-

санные в § 20 и 28 (см. рис. 73—75). В инжекционных горелках газ, подаваемый под давлением 1500—10 000 *мм вод. ст.* (в зависимости от теплотворной способности газа — чем выше теплотворность, тем большее количество воздуха должно быть инжектировано на 1 $м^3$ газа и тем большее необходимо давление последнего), инжектирует воздух (рис. 12). Смешение газа и воздуха происходит в смесителе и горелке. При сжигании газа, хорошо смешанного с воздухом в горелке, получается очень короткий факел, размещающийся в канале горелочного камня и не выходящий в рабочее пространство печи, в связи с чем такое сжигание газа получило название б е с п л а м е н н о г о горения. Количество засасываемого воздуха регулируется размером щели между смесителем и фланцем, навинченным на сопло. При низких давлениях газ может инжектироваться воздухом, подаваемым под давлением 400—600 *мм вод. ст.* Горелки крепят к специальным плитам, установленным на каркасе.

Сжигание жидкого топлива

В качестве жидкого топлива применяют главным образом мазут. Жидкое топливо сжигается в распыленном состоянии. Чем лучше распыляется мазут, т. е. чем меньше капли, тем лучше он перемешивается с воздухом и быстрее происходит его сгорание. В связи с этим при хорошем распылении сжигание жидкого топлива в высокотемпературных печах часто производят непосредственно в рабочем пространстве без топки. В низкотемпературных печах и печах, где требуется равномерное распределение температуры в рабочем пространстве (например, термических), устраивают для полного сгорания топлива небольшие форкамеры или подподовые топки. Распыление мазута производят посредством форсунок.

Ф о р с у н к и можно разбить на три типа: высокого давления, в которых распыление мазута осуществляется паром или сжатым (компрессорным) воздухом; низкого давления, распыление в которых выполняют воздухом, подаваемым от вентилятора, и механические. Примером первого вида форсунок служит форсунка В. Г. Шухова (рис. 13), состоящая из двух трубок: внутренней мазутной и наружной паровой (воздушной). Выходное отверстие для мазута остается постоянным, а величина кольцевой щели для пара (сжатого воздуха) в зависимости от производительности форсунки меняется вдвиганием или выдвиганием внутренней трубки. Распыление мазута производится паром под давлением 4—10 *кгс/см²* или компрессорным воздухом под давлением 2—6 *кгс/см²*. Количество распылителя составляет 0,4—0,6 *кг* пара на 1 *кг* мазута или 0,5—0,8 *кг* воздуха на 1 *кг* мазута. В форсунках низкого давления распыление мазута производится подаваемым от вентилятора воздухом под давлением от 300 до 1000 *мм вод. ст.* в зависимости от конструкции и производительности форсунок. Мазут подается из расходного бака самотеком или под давлением до 2 *кгс/см²*. На рис. 14 показана форсунка низкого давления конструкции института Стальпроект. Мазут подается по внутренней трубе, а воздух — по наружной. Так как тонкость распыления мазута зависит от скорости истечения воздуха, то для сохранения его необходимой скорости при изменении производительности форсунки сечение кольцевой

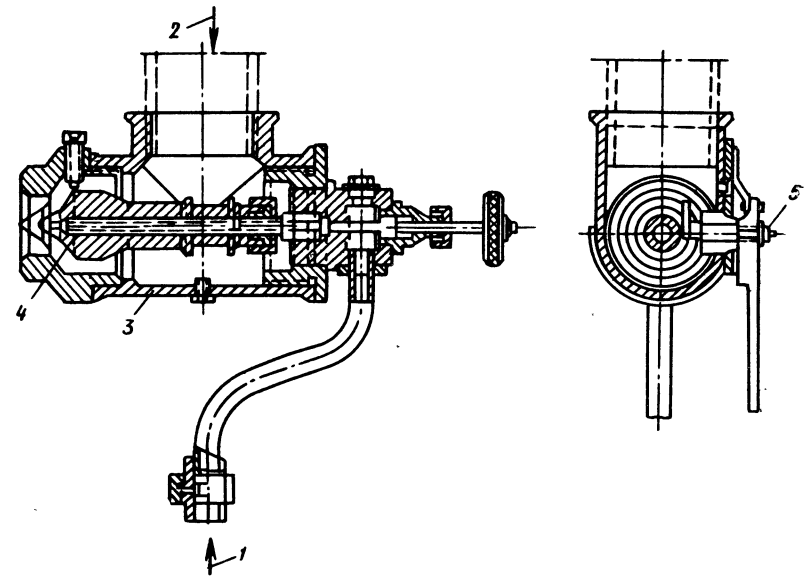


Рис. 14. Форсунка низкого давления конструкции Стальпроекта
1 — мазут; *2* — воздух; *3* — корпус; *4* — мазутная трубка; *5* — вал с эксцентриком

щели, через которую выходит воздух, может изменяться путем перемещения вдоль оси форсунки внутренней мазутной трубки, осуществляемого поворотом вала с эксцентриком.

Для обеспечения более тонкого распыления мазута и лучшего перемешивания с воздухом разработано большое количество всевозможных конструкций форсунок: имеются форсунки, в которых распыление мазута производится дважды; форсунки, в которых устроены направляющие, придающие воздуху завихряющее движение.

В форсунках низкого давления воздух для распыления подают в размере 60—100% количества, необходимого для сжигания распыленного топлива. В механических форсунках распыление происходит вследствие удара тонкой струи жидкого топлива, выходящего с большой скоростью из отверстия форсунки, об атмосферу, находящуюся перед отверстием форсунки. В наконечниках

форсунок предусматривают специальные завихряющие направляющие. Давление жидкого топлива в механических форсунках составляет 8—10 *кгс/см²* и выше. Воздух для горения жидкого топлива в форсунках высокого давления и механических частично засасывается струей распыленного мазута из окружающего форсунку пространства, остальной — подают вентилятором.

Некоторые виды форсунок, аналогично горелкам, снабжают установочными плитами, укрепленными на каркасе печи. В этом случае форсунки крепят к установочным плитам болтами. Форсунки, не имеющие установочных плит, крепят только к воздухо- и мазутопроводам. Часто в установочных плитах устраивают заслонку для отделения форсунки от полости печи при ее выключении. Форсунки высокого давления и механические имеют длинный факел и применяются обычно в больших плавильных и обжиговых печах. У форсунок низкого давления производительность меньше и факел значительно короче, чем у форсунок высокого давления. Они применяются для нагревательных печей среднего и малого размера, термических печей и сушил.

Воздухопроводы, мазутопроводы и газопроводы

Воздухопроводы диаметром до 150 *мм*, газопроводы и мазутопроводы монтируют из водогазопроводных труб путем сварки или с помощью муфт и фланцев. Газопроводы соединяют преимущественно сваркой, а фланцы применяют только в местах присоединения газопроводов к горелкам, задвижкам и контрольно-измерительным приборам. Воздухопроводы диаметром больше 150 *мм* и газопроводы диаметром больше 800 *мм* сваривают из листовой стали. На мазутопроводах последовательно (по движению мазута) устанавливают запорный вентиль для выключения мазута, фильтр для очистки мазута и предохранения форсунок от засорения, регулятор давления (чаще общий на цех) и вентиль для регулирования количества подаваемого в форсунку мазута, а также патрубок для присоединения контрольно-измерительных приборов. Для выключения фильтра и регулятора давления при их смотре и чистке устраивают обводную линию. Газопроводы снабжают предохранительными взрывными клапанами на случай взрыва газа и устройствами для продувки газопровода перед пуском газа.

§ 11. КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПЕЧЕЙ

Печь возводится на фундаменте, служащем для равномерного распределения давления на грунт от массы печи (см. рис. 9). Размеры подошвы фундамента определяются допустимым давлением на грунт. Оно колеблется от 6 *кгс/см²* для слежавшихся щебенистых (галечных) грунтов до 1,5 *кгс/см²* для песчаных насыщенных водой грунтов. У большинства печей, за исключением

шахтных, вращающихся барабанных и некоторых других, давление на грунт не превышает 1 *кгс/см²*, в связи с чем размеры фундаментов под них часто проектируют без расчета. Фундаменты под печи и связанные с ними механизмы, а также под борова и дымовые трубы во избежание неравномерной осадки проектируют самостоятельно и не связывают с фундаментами зданий и сооружений. Фундаменты печей и труб выполняют бетонными и железобетонными. Небольшие печи часто устанавливают без фундаментов, непосредственно на полу цеха. Поверх фундамента выкладывается выстилка, которая является основанием для дальнейшей кладки печи или служит подом в тех местах, где с ним не соприкасается нагреваемый материал, например в боровах. Так как при нагреве выше 300—350° С бетон теряет свою прочность, то слой выстилки и пода должен быть такой толщины, чтобы в бетонном фундаменте температура не поднималась выше указанной. Если по каким-либо причинам этого сделать нельзя, то часть фундамента, которая нагревается до температуры выше 300—350° С, выполняют из жаростойкого бетона.

Толщину кладки пода чаще всего делают в 2—3 кирпича. Рабочее пространство печи, топка и борова с боков ограничиваются стенами (боковыми и торцовыми), а сверху перекрываются сводом. Нагреваемый материал располагается обычно на поду, топка отделяется от рабочего пространства порогом. Газы из топки попадают в рабочее пространство через пламенное окно.

Материал загружается в печь через загрузочные (завалочные) окна, а выдается через рабочие. В камерных печах загрузку и выдачу материала производят в одни и те же окна, при этом загрузочные окна одновременно являются и рабочими. Иногда в стенах печи устраивают смотровые окна (гляделки) для наблюдения за работой печи, окна для передвижения и перемещения нагреваемого материала и других целей. Окна перекрывают арками.

Продукты горения (дымовые газы) уходят из печи через дымовые пролеты (иногда называемые каналами) в боров, который отводит их в дымовую трубу. В борове устанавливают шибер, служащий для регулирования тяги дымовой трубы, а также для отключения от дымовой трубы печи при прекращении работы последней.

Внутренние части топки, пода, стен, свода и других частей печи, нагревающиеся до высокой температуры, выкладывают из огнеупорного кирпича толщиной в один-полтора кирпича или из жаростойкого бетона. Наружную часть кладки выполняют чаще всего из теплоизоляционного или обыкновенного глиняного кирпича. Толщину стен выбирают из соображений их строительной прочности, а также в зависимости от температуры внутренней поверхности стены: теплопроводность стены должна быть такой, чтобы температура наружной поверхности ее не превосходила допустимую (по правилам Сантехнадзора 60° С). Размеры сте-

ны выбирают кратными размерам кирпича, чтобы избежать дополнительной резки или тески кирпича.

Своды подразделяются на арочные, набираемые из кирпича по дуге круга, и плоские — подвесные, подвешиваемые к металлическим конструкциям каркаса (рис. 15). Помимо указанных существуют еще купольные своды, выполняемые в виде купола.

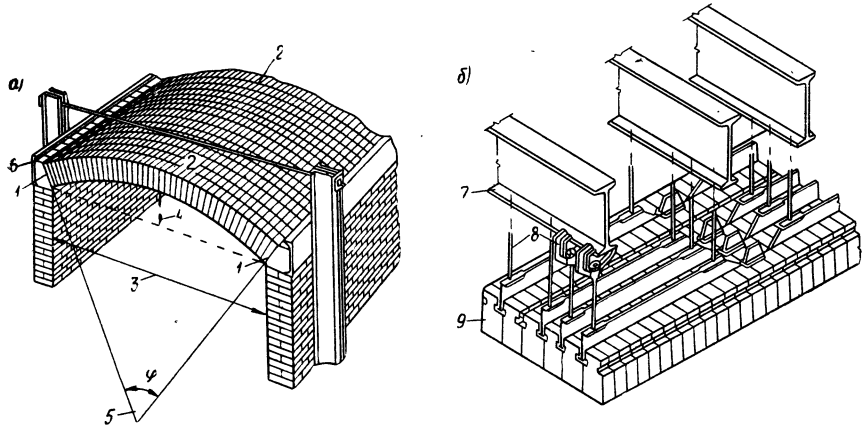


Рис. 15. Своды

а — арочный; *б* — плоский подвесной; *1* — пята; *2* — замок; *3* — пролет; *4* — стрела; *5*—центральный угол; *6* — подпятовая балка; *7* — балка для крепления подвесного свода; *8* — подвеска; *9* — подвесной кирпич

Их устраивают для перекрытия вертикально стоящих цилиндрических нагревательных устройств (например, воздухонагревателей доменных печей).

Площадки у арочных сводов, на которые опираются крайние кирпичи свода, называются пятами, а средняя самая высокая часть свода — замком. Расстояние от прямой линии, соединяющей нижние концы пят, до середины внутренней поверхности свода называется стрелой; отношение пролета свода (расстояния между перекрываемыми сводом стенами) к стреле — подъемом; угол, образуемый плоскостями пят, — центральным углом φ. Радиус кривизны свода r, пролет l, стрела h и центральный угол φ связаны между собой следующими зависимостями:

$$h = r\left(1 - \cos\frac{\varphi}{2}\right) \quad \frac{l}{2} \sin\frac{\varphi}{4}; \tag{47}$$

$$r = \frac{l}{2\sin\frac{\varphi}{2}}. \tag{48}$$

Толщина свода зависит от величины пролета. Пролеты до 3 *м* можно перекрывать кирпичом высотой (длиной) 230 *мм*; при

больших пролетах применяют сводовый кирпич высотой 300—500 *мм*. Плоские своды набирают из особых фасонных кирпичей.

При длинных подах, стенах и сводах для компенсации температурного расширения кладки устраивают температурные швы, которые по мере разогрева кладки закрываются. Величину температурного шва принимают в зависимости от коэффициента температурного расширения материала стены, средней температуры кладки и расстояния между температурными швами.

§ 12. КАРКАСЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Кладку промышленных печей во избежание разрушения в процессе службы скрепляют металлическим каркасом, который служит для восприятия давления кладки печи при ее тепловом расширении, противодействия горизонтальному распору, создаваемому арочным сводом, и для закрепления на нем металлической гарнитуры, арматуры, механизмов и другого печного оборудования. Листовая обшивка каркаса (кожух) предохраняет наружный слой кладки от механических повреждений и создает газонепроницаемость печи.

На рис. 16 показаны наиболее распространенные типы каркасов. В каркасах стоечного типа с гибкими (подвижными) связями противоположные боковые и торцовые стойки скреплены друг с другом болтовыми соединениями. Эта конструкция в настоящее время мало распространена и применяется главным образом в печах со сводом из динасового кирпича. При расширении кладки во время разогрева болты отпускают, а при охлаждении — затягивают.

В каркасах жесткой рамной конструкции стойки скрепляются между собой жесткими связями, приваренными к ним, и при работе печи остаются в постоянном положении. При этом расширение кладки компенсируется температурным швом и ростом свода.

Для установки стоек каркаса в фундаментах предусматривают гнезда. Для увеличения прочности фундамент с наружной стороны в этих местах армируют (рис. 16, *б*).

Чаще всего применяют стоечные каркасы со сплошной листовой обшивкой. У вертикальных шахтных и цилиндрических вращающихся печей и сушил каркасы выполняют в виде сплошного кожуха из листовой стали. У печей с арочным сводом для восприятия горизонтального распора вдоль пят сводов кладут подпятовые балки, которые обычно изготовляют из швеллеров (см. рис. 15, *а*), а в некоторых высокотемпературных печах их делают водоохлаждаемыми из литой стали или сваренными из листовой стали (см. рис. 76).

Каркасы прокатных, кузнечных и других печей, имеющих распорные своды, рассчитывают исходя из распорных усилий, создаваемых сводом. Расчет распора свода ведут исходя из са-

мого тяжелого случая, когда свод под воздействием температурных расширений внутренних слоев начинает раскрываться (рис. 17). В этом случае распор свода рассчитывают как гори-

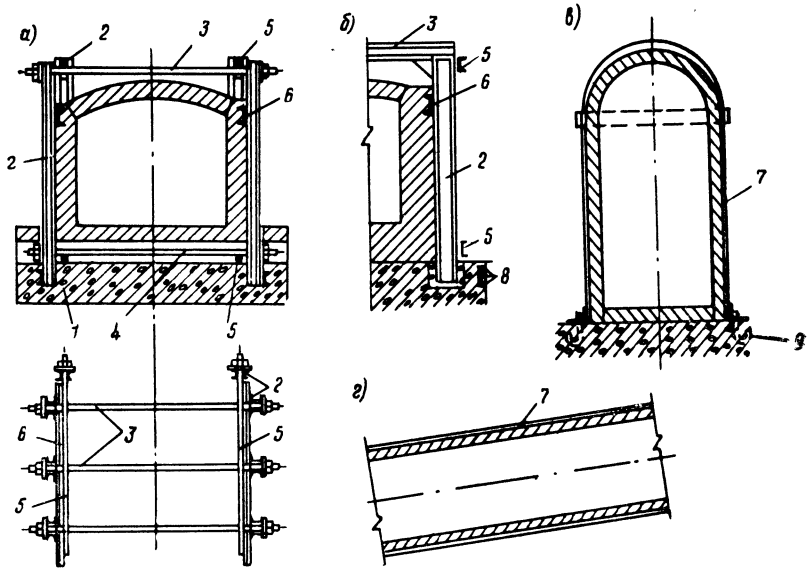


Рис. 16. Типы каркасов

а — стоечного типа с гибкими связями; *б* — стоечного типа жесткой конструкции; *в* — вертикально нагревательного устройства; *г* — цилиндрической вращающейся печи; *1* — фундамент; *2* — стойка; *3* и *4*—верхняя и нижняя поперечные связи; *5* — продольные связи; *6* — подпятовая балка; *7* — кожух; *8* — арматура; *9*—фундаментные болты

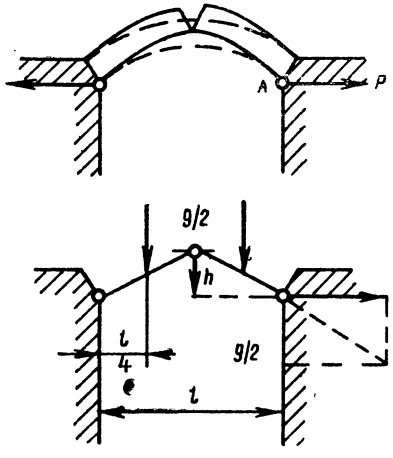


Рис. 17. Схема расчета распора свода

зонтальное усилие в шарнирной арке из двух стержней. При массе свода G на каждый стержень будет действовать нагрузка, равная половине массы свода $G/2$, приложенная к середине стержня. Тогда из равенства крутящих моментов относительно точки опоры A следует

$$\frac{G}{2} \cdot \frac{l}{4} = Ph,$$

откуда

$$P = \frac{Gl}{8h},$$

где h — стрела свода в *м*;
l — пролет свода в *м*;
G — масса свода между стойками в *т*.

Как видно из уравнения, распор свода тем больше, чем больше пролет и меньше стрела (меньше центральный угол φ). Свод при нагреве расширяется и создает дополнительное давление на пяты. Для учета этого давления полученную расчетом величину P при температуре печи до 900° С умножают на 2, до 1000° С — на 2,5 и до 1300 — на 3. В остальном каркас рассчитывается как обычные металлоконструкции, но расчетное сопротивление $\sigma_{расч}$ в элементах каркасов печей из стали марки Ст.3 принимают равным 1200 *кгс/см²*. Такая величина принимается исходя из возможности нагрева, воздействия агрессивных газов и других специфических условий службы каркасов.

§ 13. ГАРНИТУРА, МЕХАНИЗМЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ПЕЧЕЙ

Рамы, заслонки, шиберы и механизмы для их подъема

Для предотвращения потери тепла, а также подсоса в рабочее пространство холодного воздуха печные окна закрываются дверцами — заслонками.

Окна обычно обрамляются рамами, которые вместе с заслонками обеспечивают более плотное закрывание окна. Распространенный тип рамы и заслонки рабочего окна термических печей приведен на рис. 18. Рама чугунная. Края рамы предохраняются от разогрева выступающими внутрь нее кирпичами кладки, для чего в раме имеется специальное углубление. При больших размерах окна́ рама изготовляется сборная из нескольких частей. Заслонка футеруется огнеупорным материалом.

Для высокотемпературных печей рамы и заслонки делают с водяным охлаждением (рис. 19). Для лучшего прилегания заслонки к раме плоскость их соприкосновения выполняют, как правило, наклонной.

Для маневрирования заслонками применяют механизмы двух видов: секторные, или рычажные и цепные (рис. 20). Первые бывают только ручными, вторые — ручными и приводными. В цепных механизмах подъем заслонки осуществляется калиброванной цепью, переброшенной через цепное колесо. Заслонки под-

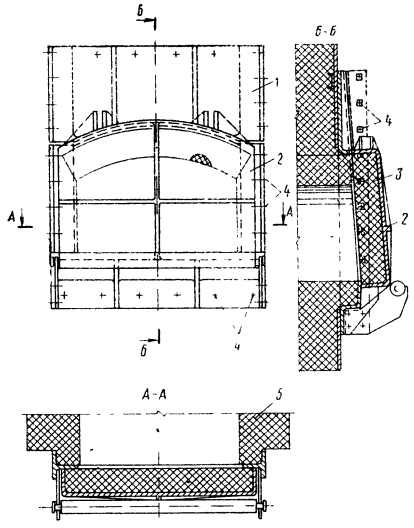


Рис. 18. Рама и заслонка рабочего окна

1 — рама; *2* — заслонка; *3* — футеровка заслонки; *4* — отверстия для крепления болтов; *5* — кладка печи

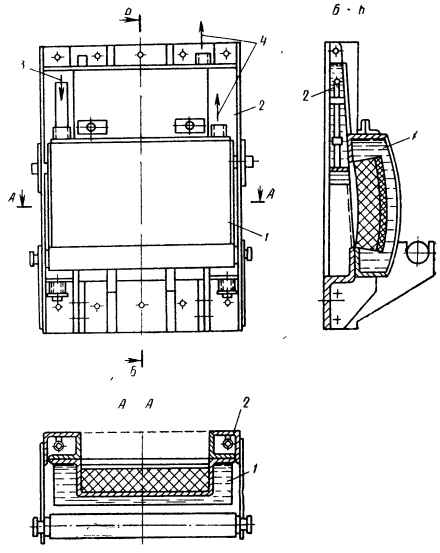
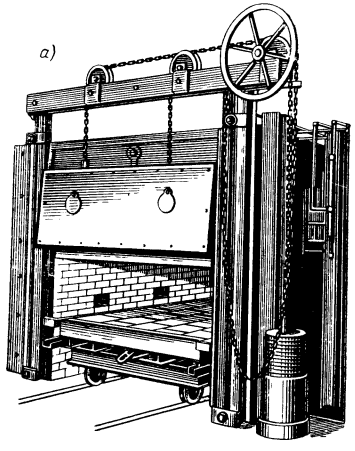


Рис. 19. Рама и заслонка, охлаждаемые водой

1 — заслонка; *2* — рама; *3* — подвод воды; *4* — отвод воды



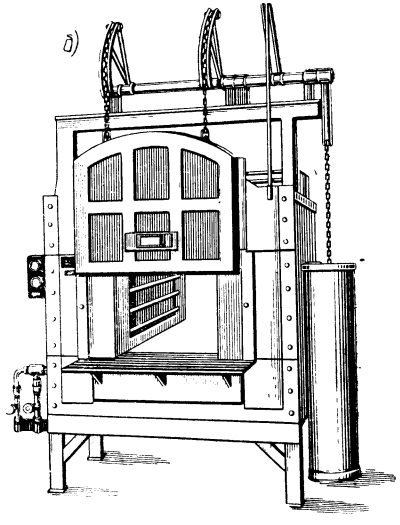
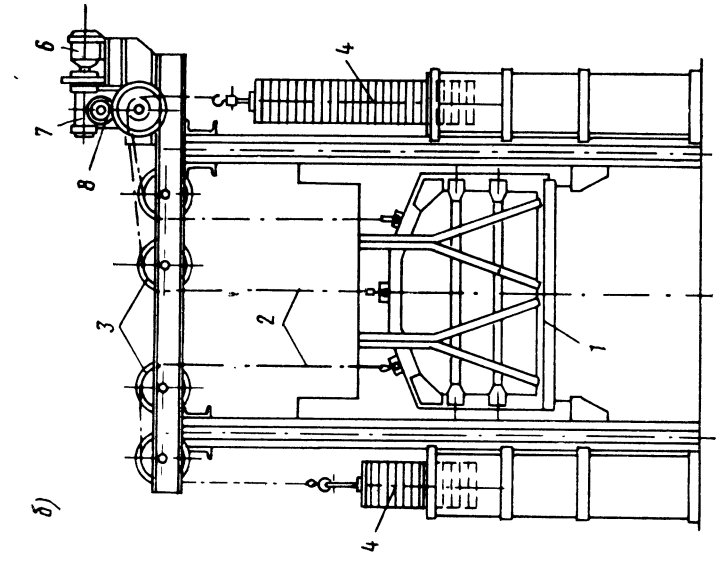


Рис. 20. Ручные механизмы для маневрирования заслонками

а — цепной; *б* — секторный



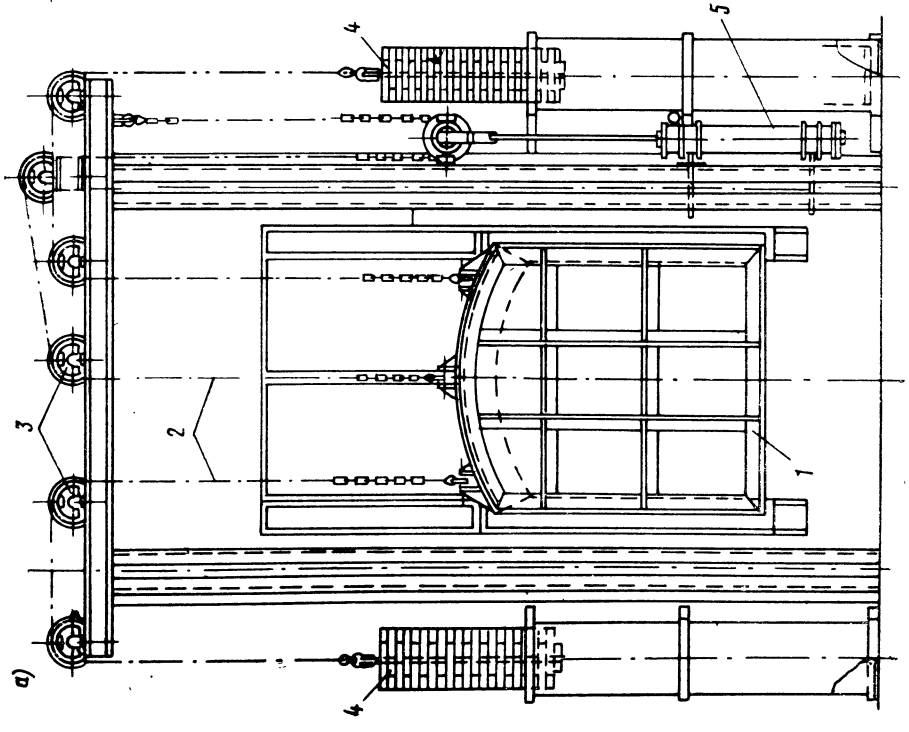
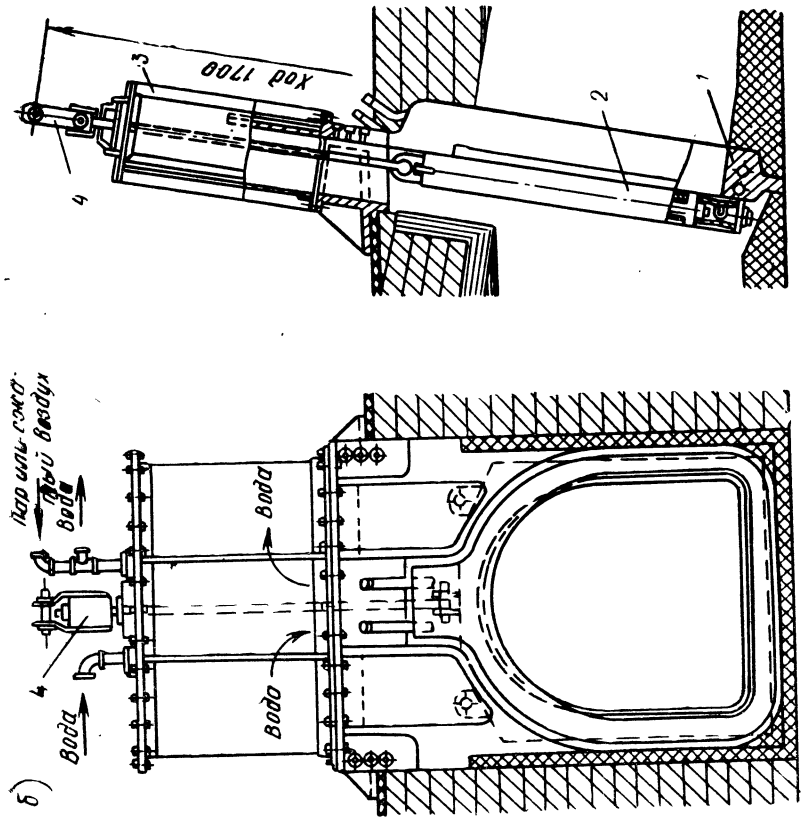


Рис. 21. Приводные механизмы для маневрирования заслонками

а — с пневматическим цилиндром; *б* — с электрическим приводом; *1* — заслонка; *2* — цепи; *3* — блоки; *4* — контргрузы; *5* — пневматический цилиндр; *6* — электродвигатель; *7* — редуктор; *8* — зубчатая передача


Вода
Вода
Вода
Вода
Вода
Пар или сжатый воздух
Вода
Вода
Вода
Вода

двигателем через редуктор, зубчатые колеса и шатуны, надетые на палец кривошипа.

В винтовых толкателях (рис. 24) траверса установлена на штоках с поперечиной, в которой укреплена гайка, надетая на

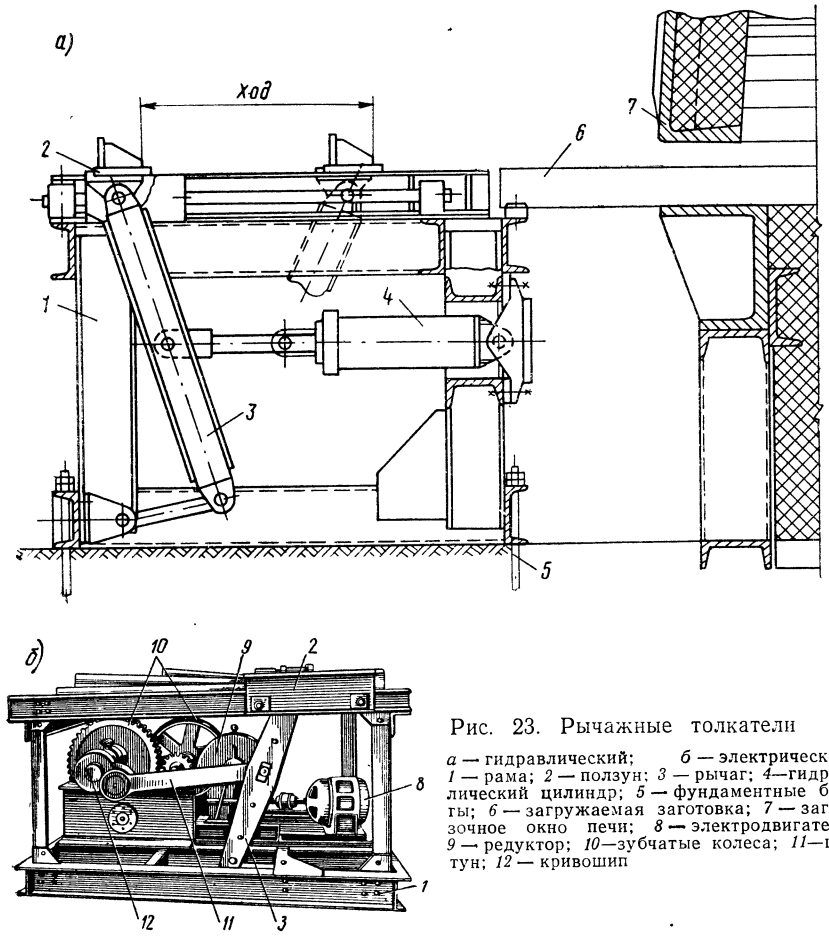


Рис. 23. Рычажные толкатели

а — гидравлический; *б* — электрический; *1* — рама; *2* — ползун; *3* — рычаг; *4*—гидравлический цилиндр; *5* — фундаментные болты; *6* — загружаемая заготовка; *7* — загрузочное окно печи; *8* — электродвигатель; *9* — редуктор; *10*—зубчатые колеса; *11*—шатун; *12* — кривошип

винт с ленточной нарезкой. Винт приводится во вращение от электродвигателя через редуктор. При этом гайка навинчивается на винт, и поперечина с прикрепленными к ней штоками и траверсой передвигается вперед или назад в зависимости от направления вращения винта. В реечных толкателях (рис. 25) шток выполняют в виде рейки с зубцами. Рейка выдвигается и вдвигается при помощи сопряженной с ней шестерни, приводимой во

вращение от электродвигателя через редуктор и зубчатые колеса.

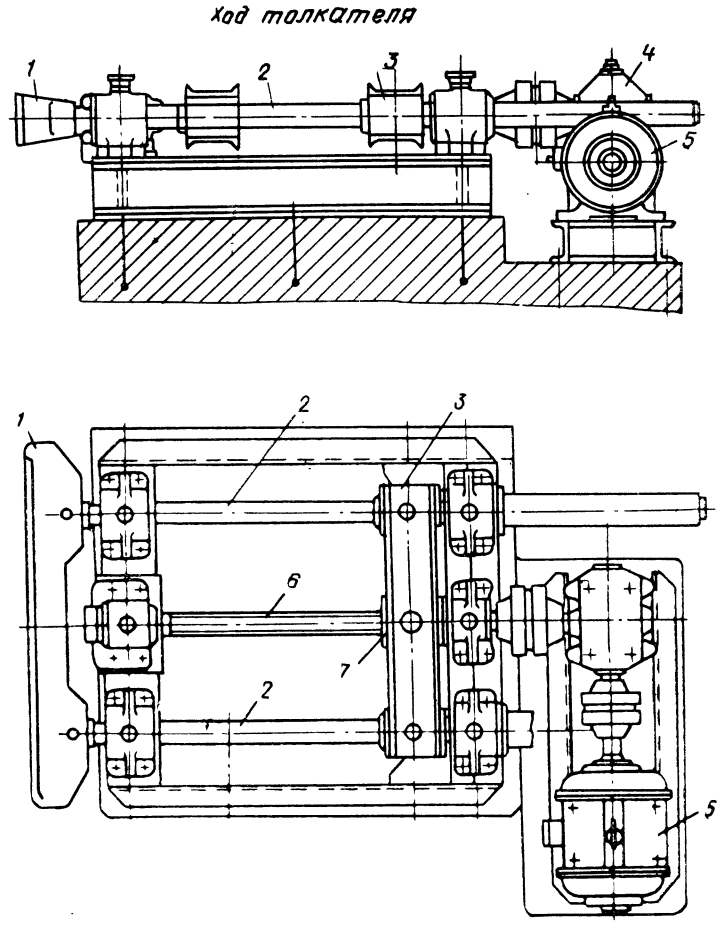


Рис. 24. Винтовой толкатель

1 — траверса; *2* — шток; *3* — поперечина; *4* — редуктор; *5* — электродвигатель; *6* — винт; *7* — гайка

Во всех электрических толкателях имеются конечные выключатели или командоаппараты, ограничивающие ход толкателя и регулирующие его движение.

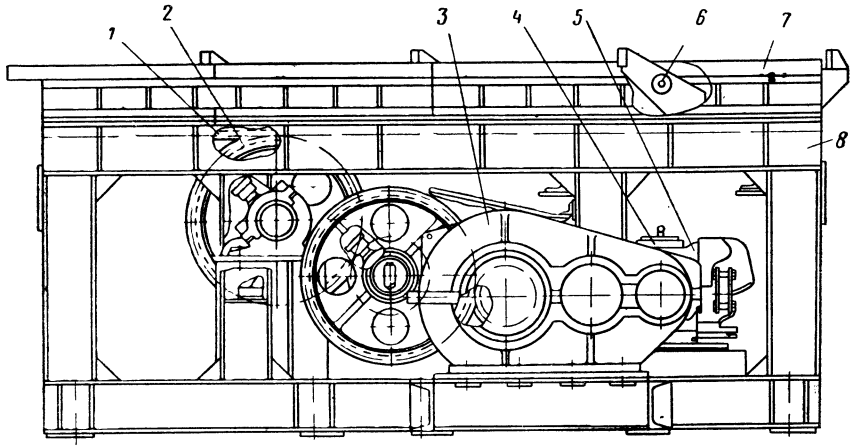


Рис. 25. Реечный толкатель

1 — рейка; *2* — зубчатая передача; *3* — редуктор; *4* — электродвигатель; *5* — тормоз; *6* — кулачок; *7* — направляющие каретки; *8* — рама

Подовые направляющие пути

В полуметодических, методических и проходных печах с толкателями на поду (см. главу V) обычно укладывают параллельно продольной оси печи специальные направляющие пути для передвижения нагреваемых заготовок или изделий. Это облегчает передвижение нагреваемых материалов по печи и предохраняет кладку пода от разрушения передвигаемым материалом. Одновременно наличие направляющих путей позволяет осуществлять нижний обогрев материала, что ускоряет и обеспечивает более равномерный нагрев металла.

В полуметодических печах и в томильной зоне методических печей в качестве направляющих в подину закладывают стелюги из стальных заготовок сечением от 100×100 до 250×250 *мм* (рис. 26, *в*).

В методической и сварочной зонах методических печей направляющие выполняют в виде охлаждаемых проточной водой толстостенных труб, называемых глиссажными трубами, которые опираются на кирпичные стенки (столбики) или на трубы, расположенные поперек печи (см. рис. 26, *а*, *б*). При больших пролетах печи поперечные трубы подпираются стояками из труб. Поперечные трубы и стояки также охлаждаются водой.

Для предохранения от истирания на глиссажные трубы сверху наваривают стальные стержни круглого или прямоугольного сечения. С целью уменьшения потерь тепла охлаждающиеся водой глиссажные трубы снизу, а поперечные трубы по всему периметру изолируют слоем жаростойкого бетона; стояки обкладывают кирпичом. Во избежание выпадения из воды осадков и образования в трубах накипи температура выходящей из труб воды не должна превышать 60° С. В последние годы на крупных печах для уменьшения расхода воды предусматривают испарительное охлаждение — когда охлаждающая вода нагревается до температуры получения пара, который используется для нужд

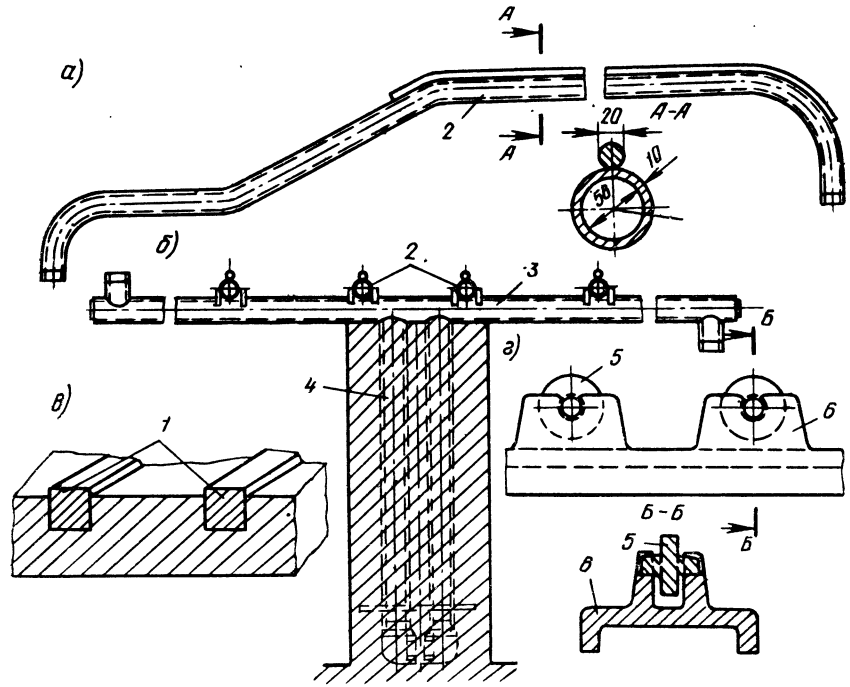


Рис. 26. Подовые направляющие

а — глиссажная труба; *б* — поперечная опорная труба глиссажных труб; *в*—стелюги; *г*—роликовые направляющие; *1* — стелюги; *2* — глиссажная труба; *3* — поперечная опорная труба; *4* — стояки; *5* — ролики; *6* — направляющие

завода. Вода в этих случаях проходит предварительную очистку для предохранения от образования накипи.

В проходных термических печах с передвижением нагреваемого материала на поддонах направляющие выполняют в виде холостых роликов, по которым передвигаются поддоны (см. рис. 26, *г*).

Конвейеры

В печах для нагрева изделий до 900—1100° С широко распространено передвижение нагреваемого материала при помощи конвейеров. Конвейерная установка состоит из приводной и на-

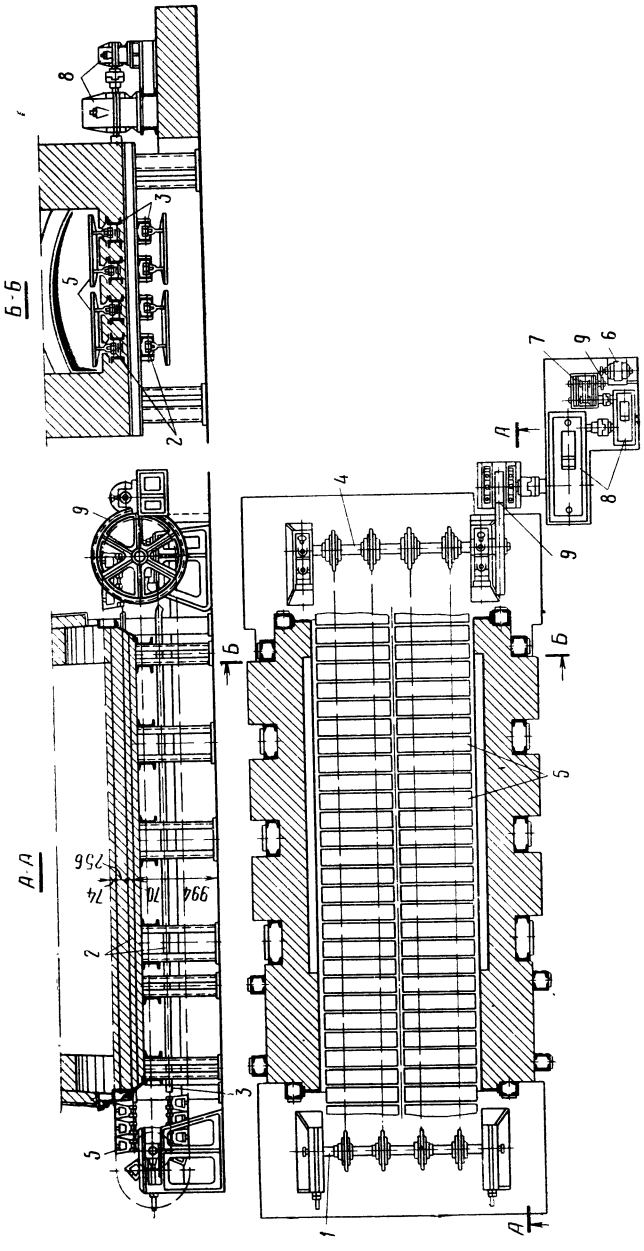


Рис. 27. Цепной конвейер с подовыми цепями

1 — натяжная станция; *2* — цепи конвейера; *3* — направляющие цепей; *4* — приводной вал со звездочками; *5* — башмаки; *6* — электродвигатель; *7* — вариатор; *8* — редуктор; *9* — шестеренные передачи

тяжной станций, рамы с направляющими и бесконечной конвейерной ленты, проходящей через печь и огибающей барабаны приводного и натяжного валов (рис. 27).

Приводной вал приводится во вращение от электродвигателя. Натяжение ленты осуществляется при помощи винтов или цепей с контргрузом, переброшенных через блоки. Существуют разнообразные конструкции конвейерных лент. В основном они могут быть разбиты на три вида:

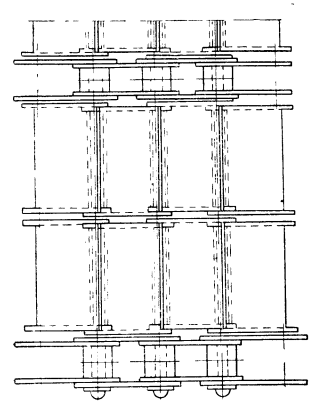


Рис. 28. Пластинчатый конвейер

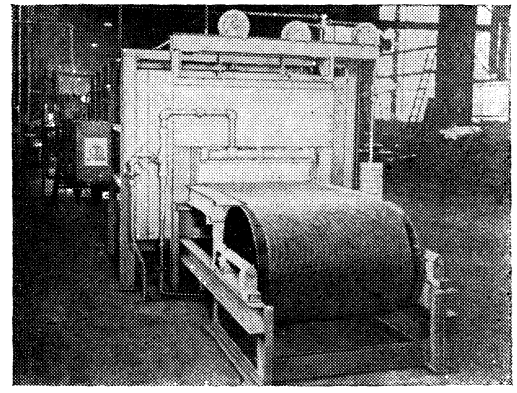


Рис. 29. Сетчатый конвейер

1) цепные конвейеры, выполненные в виде ряда отдельных цепей. Такого типа конвейер показан на рис. 27. Для предохранения от нагрева до высоких температур цепи проходят по направляющим, расположенным под подом. В рабочее пространство выходят только башмаки, на которые укладывают нагреваемые изделия. Такая конструкция применяется обычно для печей с температурой нагрева изделий выше 900° С;

2) пластинчатые конвейеры, звенья которых собраны из отдельных пластин (рис. 28);

3) сетчатые конвейеры с лентой, выполненной в виде сетки (рис. 29).

Цепные конвейеры применяют главным образом для передвижения крупных изделий (листов, валов и т. п.), а пластинчатые и сетчатые — для передвижения мелких изделий.

Шагающие поды

Принцип работы шагающего пода заключается в том, что в нем находятся шагающие балки, имеющие поступательно-возвратное движение с одновременным подъемом и опусканием. При опущенных шагающих балках нагреваемый металл лежит

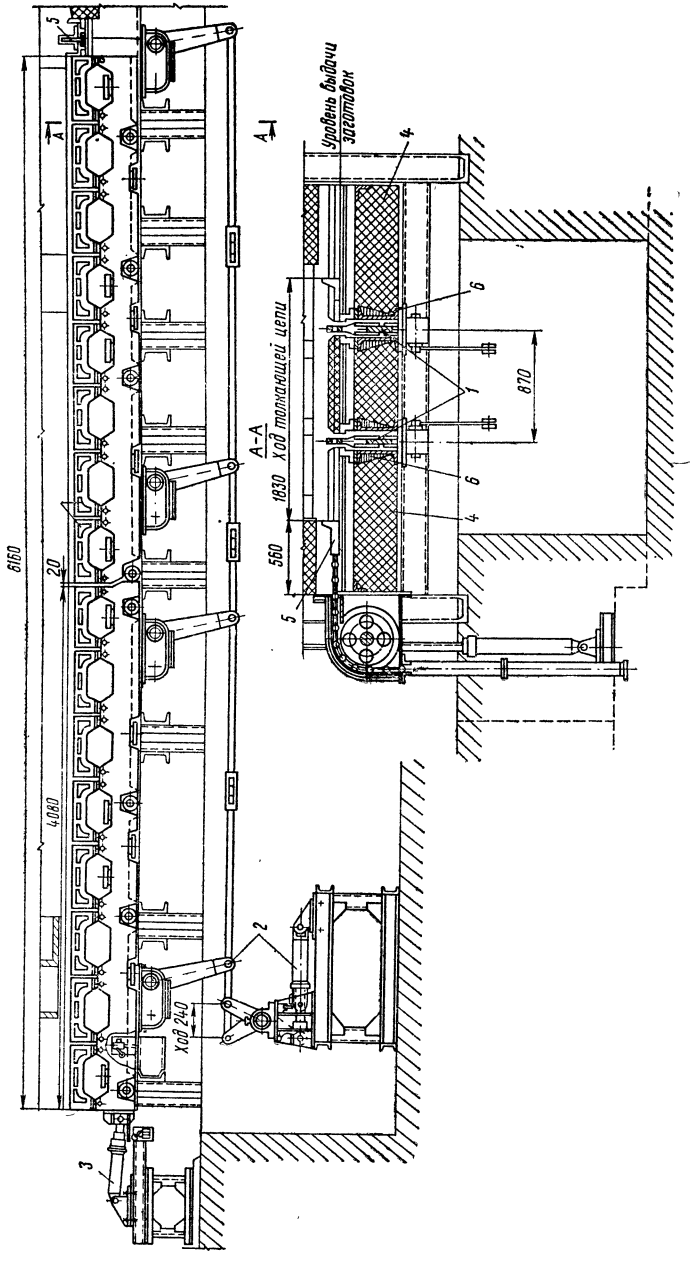


Рис. 30. Шагающий под

1 — шагающие балки; *2* — механизм подъема балок; *3* — гидроцилиндр с ходом 330 *мм*; *4* — неподвижный под; *5* — механизм выдачи заготовок; *6* — охлаждаемые водой короба рамы печи

на поду. Затем балки приподнимаются, металл ложится на них, балки совершают движение вперед и опускаются, снова укладывая металл на под. После опускания шагающие балки возвращаются в исходное положение. Далее цикл повторяется, в результате чего металл постепенно передвигается по печи.

Конструкции шагающих подов можно условно разбить на два основных типа: поды с шагающими балками и шагающие поды (рис. 30). Под первого типа сплошной, неподвижный, в нем имеются пазы, где размещаются в опущенном положении шагающие балки. Под второго типа состоит из шагающих и неподвижных балок (см. рис. 47). Под первого типа применяется в основном в низкотемпературных термических печах, под с шагающими и неподвижными балками — в нагревательных печах.

Балки приводятся в движение или эксцентриковыми дисками, создающими круговое движение балок, или кривошипным приводом, или комбинацией эксцентрикового привода для подъема и опускания балок и кулачковых дисков с системой рычагов для движения вперед и назад. Для крупных печей применяют систему из двух автономных приводов, как это показано на рис. 30 и 47. В большинстве случаев пользуются гидравлическими приводами как более простыми в управлении. Наиболее рациональной является схема движения балок по квадратной траектории — точно вертикальное направление подъема и опускания нагреваемого материала, так как при этом не возникает трения о неподвижные балки (под) и, как следствие, не образуются повреждения на поверхности нагреваемого металла. Помимо этого при опускании металла на стационарный под не существует опасности сдвига, благодаря чему обеспечивается прямолинейное движение материала.

Механизм передвижения балок пода, показанного на рис. 30, состоит из гидравлического цилиндра с ходом 330 *мм*, двух составных по длине шагающих балок длиной 8160 *мм* каждая, соединенных с гидроцилиндром с помощью траверсы. Нижние части балок выполнены из обычной стали, так как в этой части они охлаждаются водой, проходящей через примыкающие короба рамы пода печи. Верхняя часть балок, работающая в зоне высоких температур, выполнена из жаропрочных плит длиной по 500 *мм*. Для перемещения балок, а также для направления их при движении предусмотрены вертикальные и горизонтальные ролики. Механизм подъема балок состоит из сварной рамы, гидроцилиндра с ходом 250 *мм*, закрепленного на раме, и системы рычагов. Каждая часть балки опирается на два ролика.

Вентиляторы и дымососы

Воздух для горения топлива в печах подают преимущественно при помощи центробежных вентиляторов. Центробежный вентилятор состоит из лопастного колеса (ротора), спирального

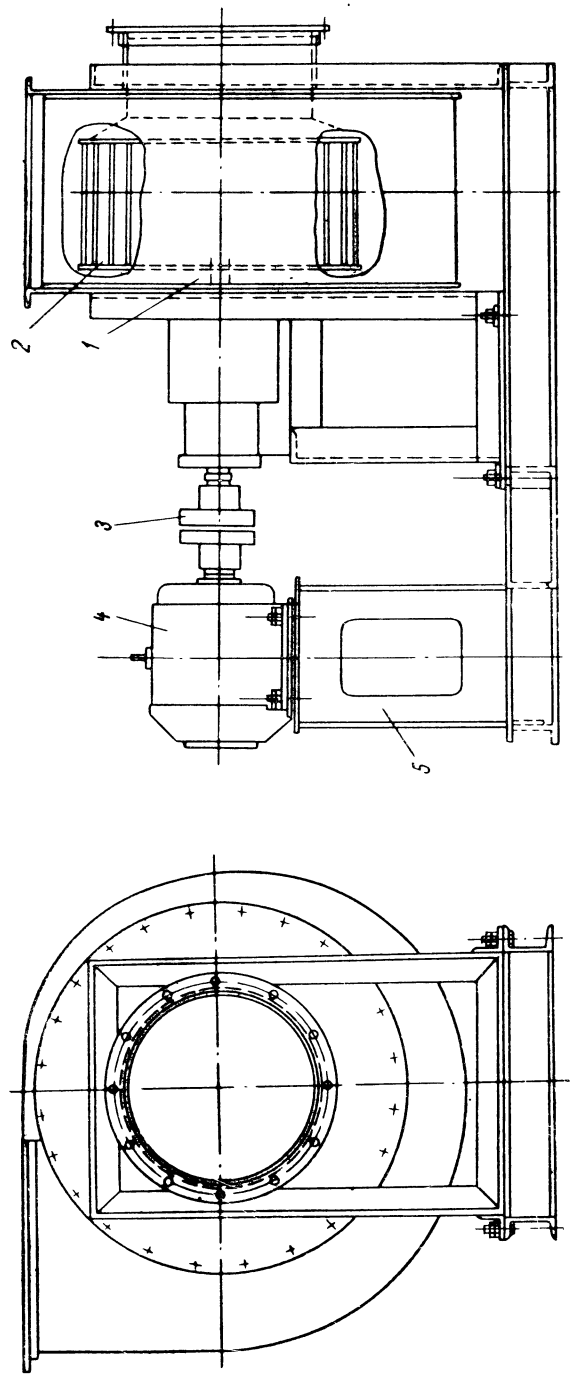


Рис. 31. Центробежный вентилятор
1 — корпус; *2* — ротор; *3* — соединительная муфта; *4* — электродвигатель; *5* — станина двигателя

кожуха и привода (рис. 31). При работе вентилятора воздух входит в него по оси, захватывается лопастями вращающегося колеса и под действием центробежной силы отбрасывается в радиальном направлении, попадая в спиральную часть кожуха, откуда через выходное отверстие направляется в воздухопроводы.

В зависимости от разности полных давлений вентиляторы делятся на вентиляторы низкого давления (до 100 *мм вод. ст.*), среднего давления (до 300 *мм вод. ст.*) и высокого давления (более 300 *мм вод. ст.*). Номер вентилятора соответствует диаметру колеса, выраженному в дециметрах. Привод вентилятора осуществляется через ременную передачу или непосредственно от двигателя.

При использовании вентилятора как дымососа или для подачи подогретого в рекуператоре воздуха всасывающий патрубок вводят при помощи трубопровода в пространство, откуда отсасываются газы или воздух. Если температура отсасываемого газа или воздуха превышает 120—200° С, то на вентиляторах устанавливают охлаждаемые водой подшипники.

В качестве дымососов применяют вентиляторы низкого или среднего давления или специально изготовленные, отличающиеся от обычных более прочной конструкцией лопастного колеса и кожуха, а также охлаждением подшипников водой.

Для отсоса газа или воздуха, нагретых до температуры выше 400° С, применяют вентиляторы, изготовленные из жаропрочной стали. Центробежные вентиляторы устанавливают на фундаментах и постаментах или непосредственно на металлических конструкциях печных установок.

§ 14. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЭКОНОМИИ ТОПЛИВА

Потери тепла с отходящими от печи дымовыми газами, имеющими температуру 600—1000° С и выше, достигают 50—65% количества тепла, подведенного в печь.

Для экономии тепла и повышения термического к. п. д. печей тепло отходящих газов используется для подогрева воздуха, горючего газа или получения пара. Подогрев воздуха или газа, помимо экономии топлива, повышает температуру горения, что особенно важно в высокотемпературных печах, и позволяет применять низкокалорийное топливо.

Подогрев воздуха (газа) осуществляют в рекуператорах или регенераторах. В рекуператорах продукты горения и нагреваемый воздух (газ) проходят одновременно по отдельным каналам, разделенным стенками, через которые и передается тепло от продуктов горения к воздуху (газу). В регенераторах продукты горения и воздух (газ) попеременно проходят одну и ту же камеру с насадкой из огнеупорных (или металлических) изделий. Тепло сначала аккумулируется насадкой, а затем оно передается воз-

духу (газу). При использовании тепла отходящих дымовых газов в котлах-утилизаторах получают пар.

Рекуператоры

В промышленных печах применяют керамические и металлические рекуператоры. Металлические рекуператоры компактны, газоплотны и хорошо размещаются в любом месте. В них можно подогревать как воздух, так и газ.

Металлические рекуператоры из жаропрочной стали применяют для подогрева воздуха (газа) до температуры не выше 750—800° С, из обычного серого чугуна — не выше 300° С. Керамические рекуператоры громоздки и негазоплотны. Утечка воздуха достигает 30—40%, в связи с чем в них нельзя подогревать горючий газ. Зато подогревать воздух можно до 800—1000° С.

В промышленных печах наиболее распространены металлические рекуператоры двух типов: из гладких труб и игольчатые.

На рис. 32 показан рекуператор, выполненный из гладких стальных труб и состоящий из двух основных секций и третьей маленькой дополнительной, служащей для предохранения второй секции труб (по воздуху) от излучения предрекуператорного пространства. Третью секцию включают (по воздуху) параллельно основным секциям. Она не связана с ними конструктивно и при выходе из строя может быть легко заменена.

Дымовые газы после защитной секции входят в шахту второй секции, поднимаются вверх, омывая снаружи рекуператорные трубы, переходят вверху в шахту первой секции, опускаются по ней вниз и уходят в дымовую трубу.

Нагреваемый воздух входит в нижнюю часть первой секции, поднимается вверх по трубам, переходит в трубы второй секции, опускается по ним вниз и далее по воздухопроводу поступает к месту потребления.

Рекуператорные трубы и коллекторы первой секции изготовляют из углеродистой стали, второй и третьей секции — из жаропрочной стали. Так как трубы второй секции нагреваются до 600—800° С, то для предохранения нагретых труб от прогиба в конструкцию рекуператора включены противовесы, уравновешивающие трубы и создающие в них небольшие растягивающие усилия. Для более равномерного омывания труб рекуператора дымовыми газами по высоте шахты рекуператора устанавливают направляющие перегородки.

Игольчатые рекуператоры собирают из чугунных литых труб овального сечения, снабженных с одной или двух сторон для увеличения поверхности и эффективности теплоотдачи иглами (рис. 33). На концах труб имеются фланцы, при помощи которых трубы присоединяют друг к другу и к обвязочным рейкам. Рекуператоры монтируют так, что воздух проходит внутри игольчатых труб, а продукты горения снаружи. Игольчатые рекуператоры можно устанавливать под печью, над печью или в боровах (рис. 34).

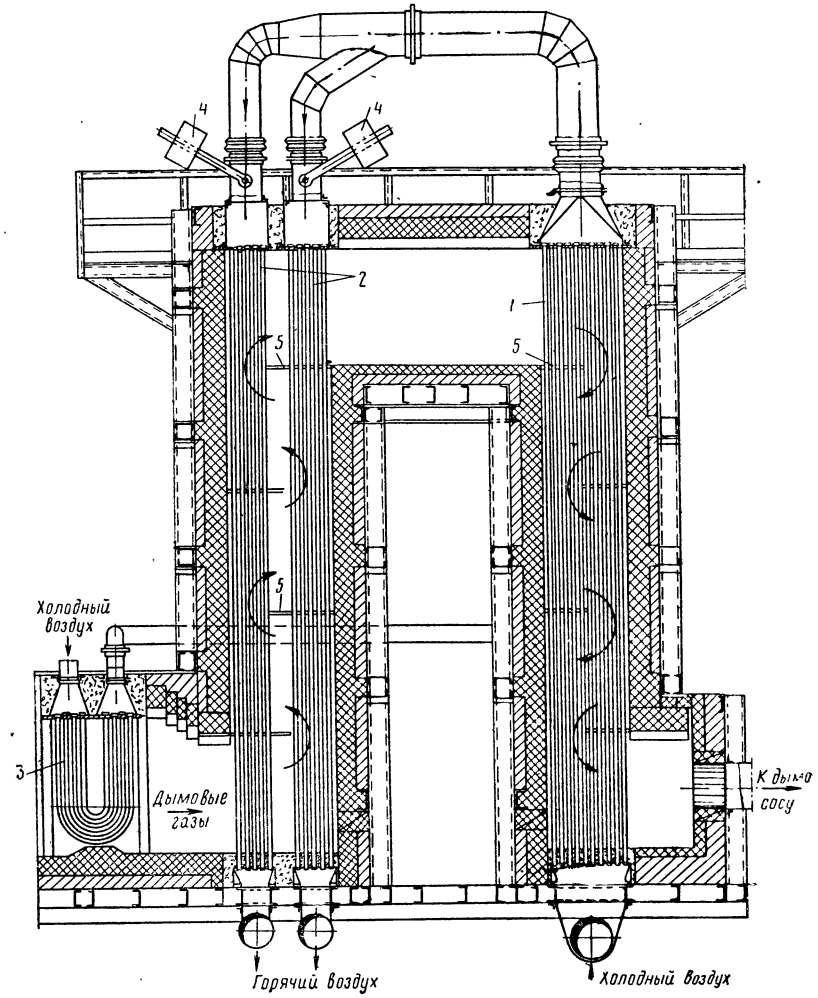


Рис. 32. Рекуператор с гладкими стальными трубами

1 и *2* — первая и вторая основные секции; *3* — дополнительная секция; *4* — противовесы; *5* — направляющие перегородки для дымовых газов

Для небольших печей применяют рекуператоры типа «термоблок», представляющие собой пучок труб, залитых чугуном с оставлением каналов между рядами труб. Через трубы пропускают нагреваемый воздух или газ, а через каналы в чугуне, располагаемые перпендикулярно пучку труб, — дымовые газы.

Недостатком термоблоков является их большая относительная масса на единицу передаваемого тепла.

Для печей с температурой отходящих газов выше 900—1000° С в последние годы начали применять так называемые «радиационные рекуператоры», в которых дымовые газы проходят с относительно небольшой скоростью в каналах большого сечения, т. е. со значительной толщиной слоя, в связи с чем теплоотдача от газов к стенке рекуператора происходит в основном за счет излучения — радиации тепла. Скорость подогреваемого воздуха в радиационных рекуператорах принимают равной 20—30 *м/сек* и выше.

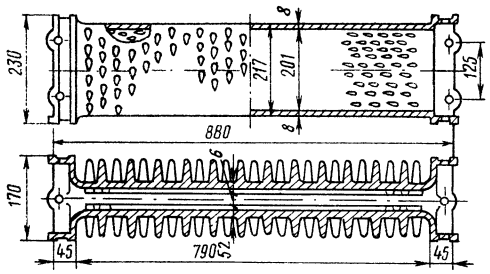


Рис. 33. Труба игольчатого рекуператора

На рис. 35 и 36 показаны два типа наиболее распространенных в Советском Союзе керамических рекуператоров: из трубчатых элементов и из фасонных камней с четырьмя прямоугольными каналами.

В рекуператорах первого типа дымовые газы проходят по трубам сверху вниз, а воздух омывает трубы снаружи, несколько раз меняя свое направление; в рекуператорах второго типа — по каналам снизу вверх проходит воздух, а дымовые газы омывают фасонные камни снаружи.

Регенераторы

Регенератор представляет собой камеру, заполненную насадкой из кирпичей, через которую попеременно проходят дымовые газы и нагреваемый воздух (газ).

На рис. 37 показана схема работы мартеновской печи с подогревом воздуха и газа в регенераторах. Печь оборудована четырьмя регенераторами: два из них воздушные для нагрева воздуха и два газовые для нагрева газа. При положении клапанов и шиберов, показанном на схеме, движение отходящих продуктов горения происходит против часовой стрелки. Продукты горения проходят левую пару регенераторов, нагревают насадку и уходят в дымовую трубу.

Воздух и газ для горения подаются через правую пару регенераторов и, проходя через них, нагреваются за счет аккумулированного насадкой тепла. После того как левые регенераторы нагреваются до требуемой температуры, а правые остынут, специальное устройство — командоаппарат — автоматически вклю-

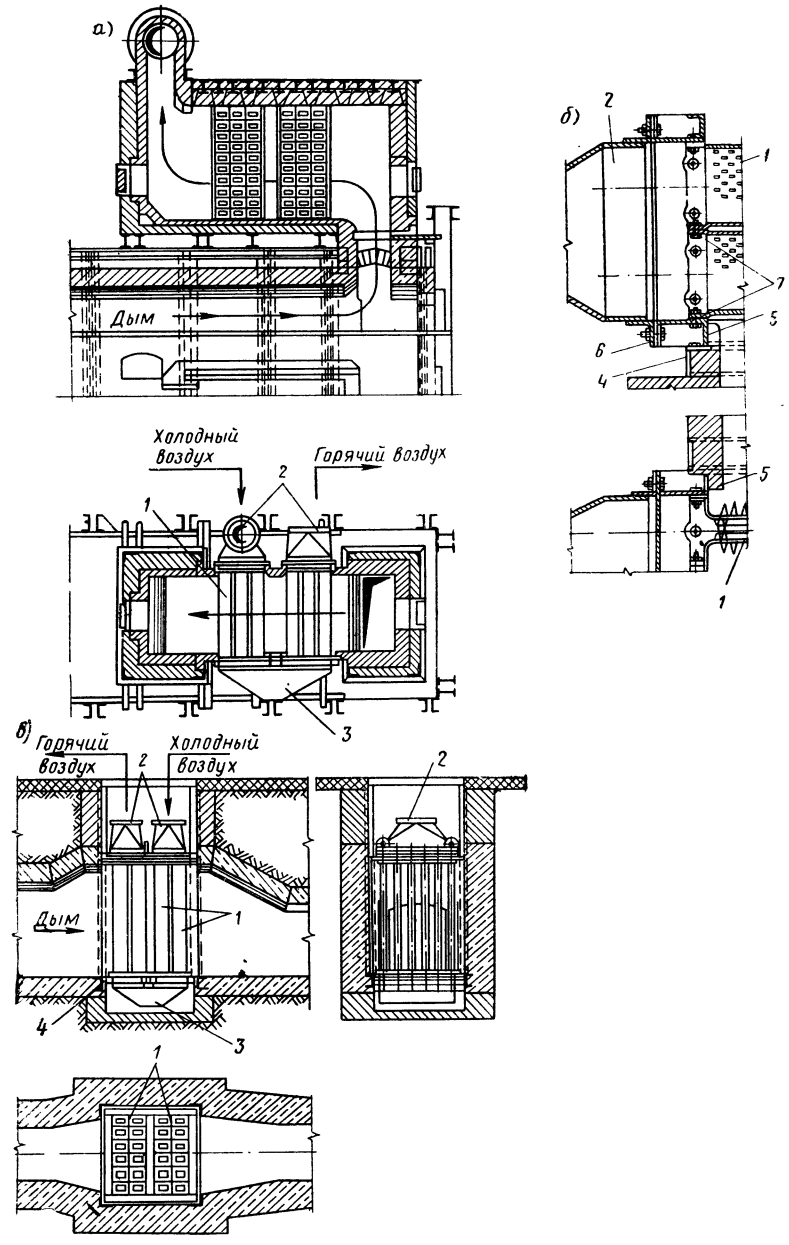


Рис. 34. Игольчатые рекуператоры

а — установка рекуператора над печью; *б* — деталь установки рекуператора с горизонтальными трубами; *в* — установка рекуператора в борове; *1* — игольчатая труба; *2* — воздушный патрубок; *3* — соединительная коробка; *4* — рама; *5*—крепежные рейки; *6* — болты; *7* — уплотнительная замазка

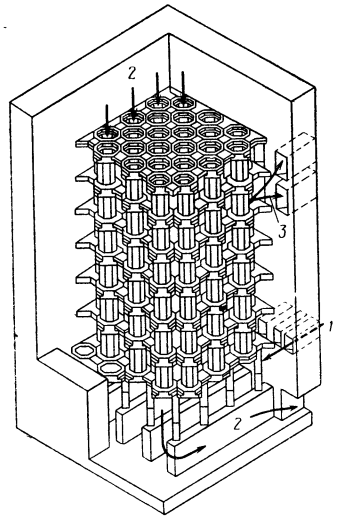


Рис. 35. Трубчатый керамический рекуператор

1 — холодный воздух; *2* — продукты горения; *3* — горячий воздух

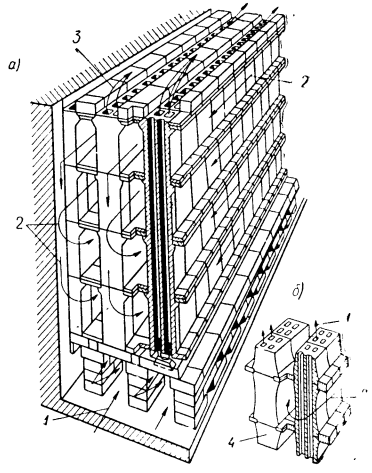


Рис. 36. Керамический рекуператор из огнеупорных изделий с четырьмя каналами

а — общий вид рекуператора; *б* — фасонные изделия; *1* — холодный воздух; *2* — продукты горения; *3* — горячий воздух; *4* — фасонное изделие

чает поочередно лебедки *6*, *5* и *7*. При этом лебедка *6* закрывает газовый клапан и открывает дымовой, лебедка *5* закрывает дымовой и открывает газовый, а лебедка *7* одновременно открывает воздушный клапан и закрывает дымовой шибер левого воздушного регенератора, а также закрывает воздушный клапан и открывает дымовой шибер правого воздушного регенератора.

В результате перекидки клапанов и шиберов продукты горения уходят через правые, остывшие регенераторы, а газ и воздух подаются через левые, нагретые. В регенераторах с керамической насадкой перекидка клапанов и шиберов производится обычно через каждые 10—30 *мин*. Для подогрева только воздуха устраивается одна пара регенераторов.

Наиболее употребительные типы регенераторных насадок показаны на рис. 38. Основанием для регенераторной насадки служит поднасадочная решетка, выкладываемая из фасонных огнеупорных изделий, опирающихся на столбики или стенки. Иногда поднасадочную решетку выполняют в виде арочек, выравниваемых сверху кирпичом, нижняя поверхность которого подтесывается по дуге арки (рис. 38, *б*).

В воздухонагревателях доменных печей, работающих также

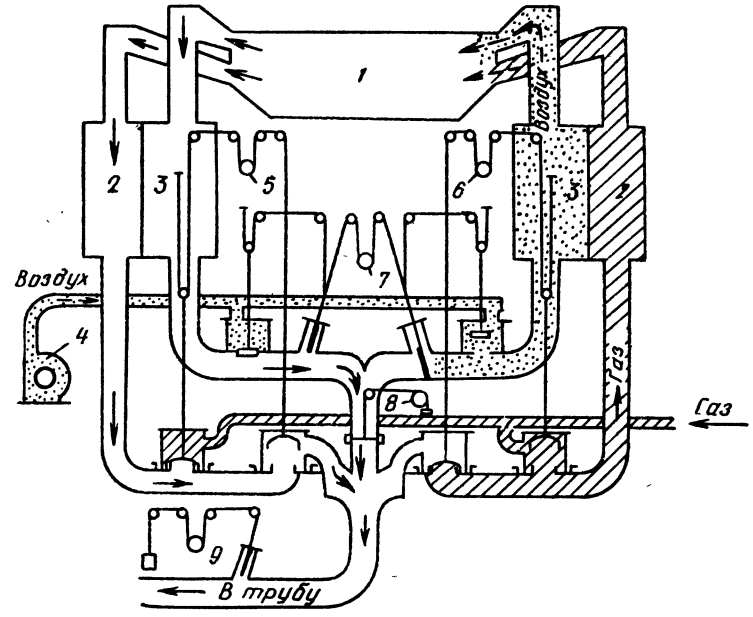


Рис. 37. Схема работы регенеративной мартеновской печи

1 — рабочее пространство; *2* — газовые регенераторы; *3* — воздушные регенераторы; *4*—вентилятор; *5* — лебедка левых газового и дымового клапанов; *6* — лебедка правых газового и дымового клапанов; *7* — лебедка газовых и воздушных шиберов; *8* — лебедка регулирующего шибера; *9* — лебедка дымового шибера

по принципу регенераторов, поднасадочная решетка выполняется из чугунных плит с отверстиями, соответствующими каналам насадки.

Для некоторых специальных небольших печей применяют регенераторы с металлической насадкой (шарики, ленты, трубки из жаропрочной стали), дающей значительно более развитую поверхность нагрева с интенсивной теплоотдачей 1 $м^2$ поверхности нагрева насадки.

Котлы-утилизаторы

Физическое тепло отходящих из печи дымовых газов используют в первую очередь в рекуператорах или регенераторах для подогрева воздуха и газа, так как это помимо экономии топлива улучшает работу печи. Однако отходящие дымовые газы и после рекуператоров или регенераторов обычно еще имеют температуру 500—700° С, т. е. содержат значительное количество тепла. Для утилизации его на печах с большим расходом топлива применяют котлы-утилизаторы, в которых за счет тепла отходящих дымовых газов получают пар, используемый затем на нужды завода.

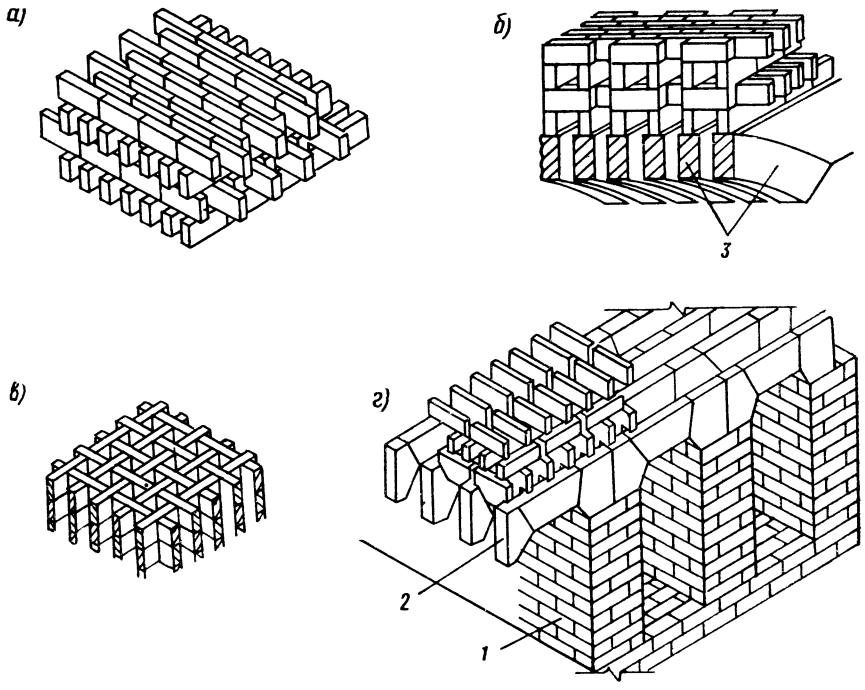


Рис. 38. Типы насадки регенераторов

а — с прямыми каналами; *б* — вразбежку; *а* — со сплошными каналами; *г* — поднасадочное устройство; *1* — поднасадочные стены; *2* — поднасадочные колосники (решетка) из фасонных огнеупорных изделий; *3* — поднасадочные колосники в виде арок

Котлы-утилизаторы располагают между печью и дымовой трубой. Для возможности ремонта и чистки без остановки печи котлы устанавливают на обводном борове, который можно отсечь от основного борова шибером (рис. 39).

Так как аэродинамическое сопротивление котла сравнительно большое, а температура отходящих из котла дымовых газов низкая (порядка 200—250° С), то тяги дымовой трубы не хватает для преодоления аэродинамического сопротивления, в связи с чем устанавливают дымосос, отводящий газы в дымовую трубу.

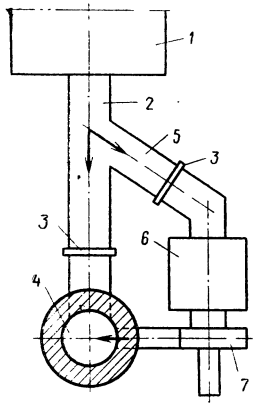


Рис. 39. Схема установки котла-утилизатора

1 — печь; *2* — основной боров; *3* — шиберы; *4* — дымовая труба; *5* — обводной боров; *6* — котел-утилизатор; *7* — дымосос

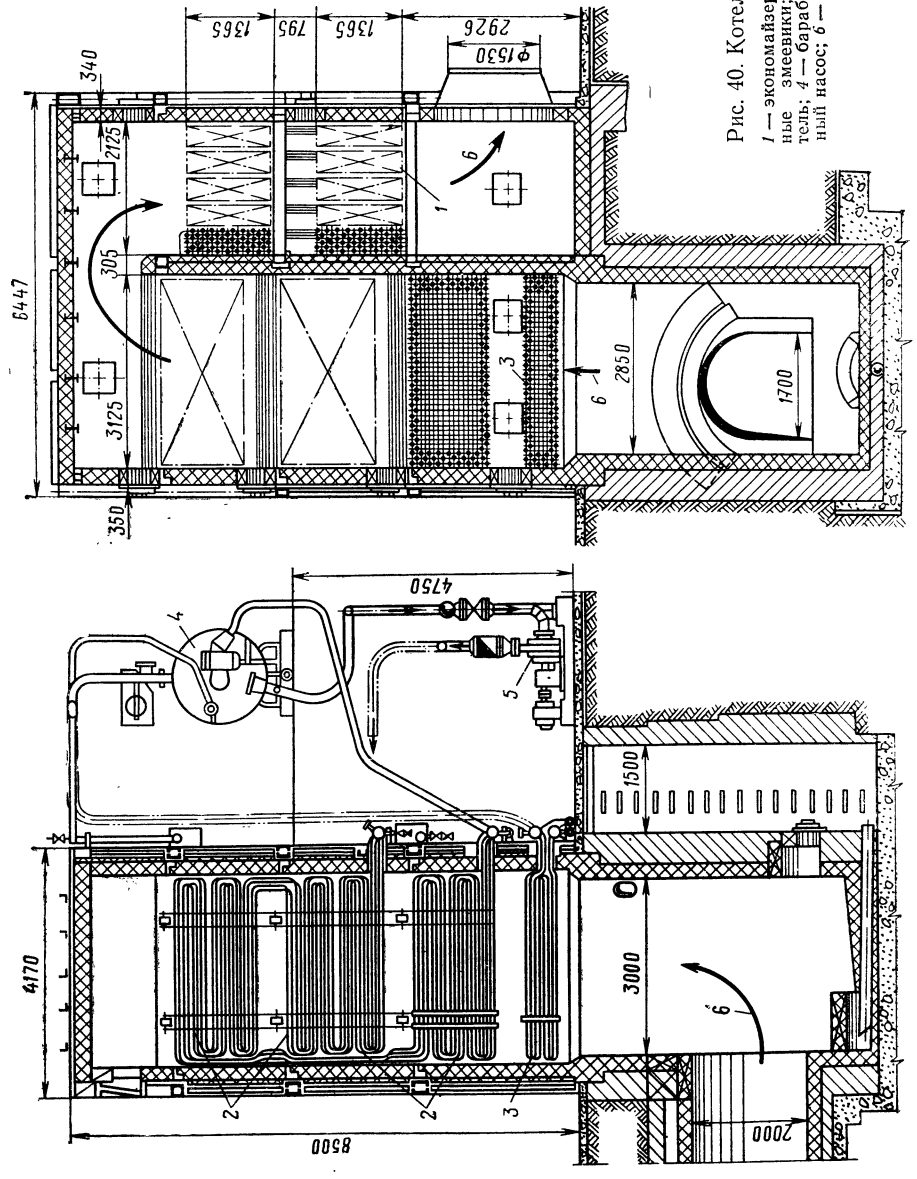


Рис. 40. Котел-утилизатор:
1 — экономайзер; *2* — испарительные змеевики; *3* — пароперегреватель; *4* — барабан; *5* — циркуляционный насос; *6* — дымовые газы

На рис. 40 показан котел-утилизатор типа КУ-80, устанавливаемый за мартеновскими печами. Поверхности нагрева котла, выполненные в виде ряда змеевиков, расположены в двух вертикальных газоходах.

В первом по ходу газов восходящем газоходе расположены пароперегреватель и испарительные змеевики, а в нисходящем — водяной экономайзер. Газоходы снаружи имеют легкий металлический каркас, а изнутри — футеровку из огнеупорного кирпича с изоляцией из диатомитового кирпича.

Барабан котла расположен сбоку газоходов и изолирован снаружи шлаковатными матами. Питательная вода поступает в экономайзер, подогревается там и проходит в барабан. Из барабана вода идет в испарительные змеевики, где нагревается до температуры насыщенного пара. Пароводяная смесь снова поступает в барабан, откуда пар идет в пароперегреватель, а вода циркуляционным насосом снова подается в испарительные змеевики.

В пароперегревателе пар подогревается до температуры 350—400° С и затем в виде сухого перегретого пара идет в заводской паропровод. Котел рассчитан на пропуск 80—100 тыс. $м^3/ч$ отходящих дымовых газов. Паропроизводительность котла до 15 $т/ч$ пара давлением 18 $кгс/см^2$.

Для меньших или бóльших количеств отходящих газов применяются котлы с соответственно меньшей или большей поверхностью нагрева.

ГЛАВА V

НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ И ТЕРМИЧЕСКИЕ ПЕЧИ И СУШИЛА

§ 15. КЛАССИФИКАЦИЯ ПЕЧЕЙ

Промышленные печи можно классифицировать по различным признакам: назначению, характеру протекающих процессов, виду топлива, способу выделения тепла, устройству рабочего пространства, способу обслуживания, способу использования тепла отходящих газов и др. Наиболее просто для характеристики печей классифицировать их по четырем основным признакам.

По технологическому назначению

а) Плавильные, служащие для плавки материалов (металлов, минералов, стекла и др.). К ним относятся доменные и мартеновские печи, вагранки, печи для плавки цветных металлов, стеклоплавильные и др.

б) Нагревательные, служащие для нагрева металла перед обработкой давлением: прокаткой — печи прокатных цехов, ковкой или штамповкой — кузнечные печи.

в) Термические, служащие для нагрева материалов с целью их термической обработки — закалки, отпуска, отжига, нормализации. К ним относятся печи для термической обработки стали, чугуна, стекла и т. д.

г) Обжиговые, служащие для обжига материалов. К ним относятся печи для обжига керамики, извести, цементного клинкера, серного колчедана.

д) Сушила, служащие для удаления влаги из материала или высушивания окрашенных изделий. Это — сушила для сушки форм и стержней в литейных цехах, для сушки сырца в керамической промышленности, для сушки дерева и малярные сушила.

е) Печи, служащие для получения из одного продукта другого путем его перегонки. К ним относятся печи нефтеперерабатывающих заводов, печи для получения искусственного жидкого топлива, коксовые батареи, ряд печей химической промышленности.

ж) Печи химической промышленности, служащие для нагрева материалов с целью проведения химических процессов.

По источнику тепловой энергии

а) Пламенные, в которых тепловая энергия получается путем сжигания топлива. Пламенные печи в свою очередь подразделяются на печи, работающие на твердом, жидком и газообразном топливе.

б) Электрические, в которых нагрев происходит за счет электроэнергии. По виду использования электроэнергии различают электрические печи сопротивления, дуговые, индукционные, контактные, электронные, инфракрасного нагрева.

По конфигурации рабочего пространства (рис. 41)

а) Камерные, в которых материал в процессе нагрева неподвижно лежит на поду. Температура рабочего пространства камерных печей во всех точках почти одинаковая.

б) Проходные, в которых материал постепенно по мере нагрева продвигается от загрузочного конца к выгрузочному. Температура на всем протяжении рабочего пространства поддерживается примерно одинаковой.

в) Методические, рабочее пространство которых вытянуто в длину. Нагрев материалов в них происходит по принципу противотока. Тепло в печь подается с одного конца, а материал, поступающий с противоположного торца, непрерывным потоком движется навстречу продуктам горения, отводимым у места загрузки материалов. При этом по мере продвижения по печи материал нагревается, а продукты горения, отдавая свое тепло материалу (и частично стенкам печи), охлаждаются.

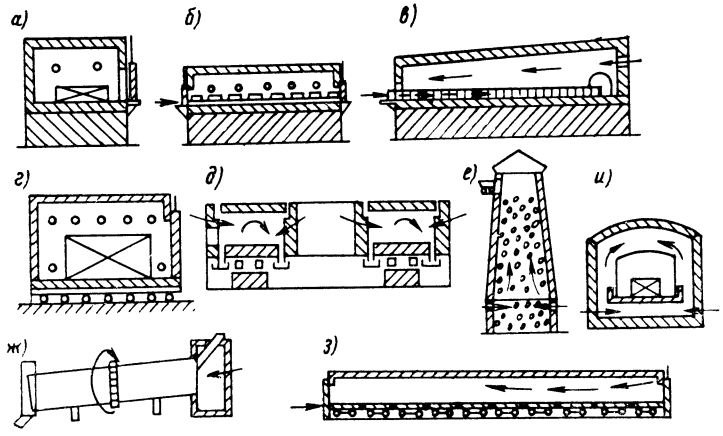


Рис. 41. Классификация промышленных печей по конфигурации рабочего пространства

а — камерная; *б* — проходная; *в* — методическая; *г* — камерная с выдвижным подом; *д* — с вращающимся кольцевым подом; *е* — шахтная; *ж* — цилиндрическая вращающаяся; *з* — туннельная; *и* — муфельная

г) С выдвижным подом, представляющие собой камерную печь, у которой для удобства загрузки и выгрузки материалов под выдвигается.

д) С вращающимся подом или карусельные — кольцевые и тарельчатые, в которых нагреваемый материал неподвижно лежит на поду, а под, вращаясь, передвигает его по рабочему пространству.

е) Шахтные, рабочее пространство которых расположено вертикально. Материал загружается в них сверху, а удаляется снизу.

ж) Цилиндрические вращающиеся, представляющие собой расположенный под небольшим углом вращающийся цилиндр. Материал в процессе нагрева, непрерывно перемешиваясь, постепенно проходит от верхнего загрузочного конца к нижнему, где и выдается из печи.

з) Туннельные с рабочим пространством в виде длинного канала; материал передвигается по печи на вагонетках.

Иногда материал для предохранения от непосредственного

соприкосновения с продуктами горения помещается в закрытую со всех сторон камеру-муфель. Муфель обогревается снаружи и передает тепло нагреваемому материалу (рис. 41, *и*).

По способу использования тепла отходящих дымовых газов

а) Рекуперативные, в которых тепло отходящих газов используется для подогрева воздуха или воздуха и газа в рекуператорах.

б) Регенеративные, в которых для тех же целей вместо рекуператоров применяются регенераторы.

в) Печи без использования тепла отходящих газов.

Хотя тепло отходящих газов печей используется часто и для подогрева воды или получения пара в котлах-утилизаторах, но эти устройства находятся, как правило, вне печи, на конструкции самой печи не отражаются и поэтому ее не характеризуют.

В печах с механизированным передвижением материалов к характеристике печи добавляют метод передвижения материалов, например: термическая проходная конвейерная печь, нагревательная методическая газовая печь с шагающими балками и т. п.

§ 16. НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ

Нагревательные печи предназначены для нагрева металла перед ковкой, штамповкой или прокаткой. При нагреве черных металлов температура в печах в зависимости от марки стали достигает 1350—1400° С, а в отдельных случаях 1500°С. В печах для нагрева цветных металлов температура равняется 500—950° С. Рабочее пространство нагревательных печей выкладывают из шамотного или высокоглиноземистого кирпича. В печах с температурой выше 1400°С свод выполняют из динасового кирпича. В процессе нагрева поверхность металла окисляется и окалина, попадая на под, взаимодействует с ним, образуя жидкий шлак, в дальнейшем застывающий на подине с образованием настылей. Чтобы избежать такого явления кладку верхних рядов подины выполняют из шлакоустойчивого талькового, магнезитового или форстеритового кирпича или делают хромитовую набивную подину.

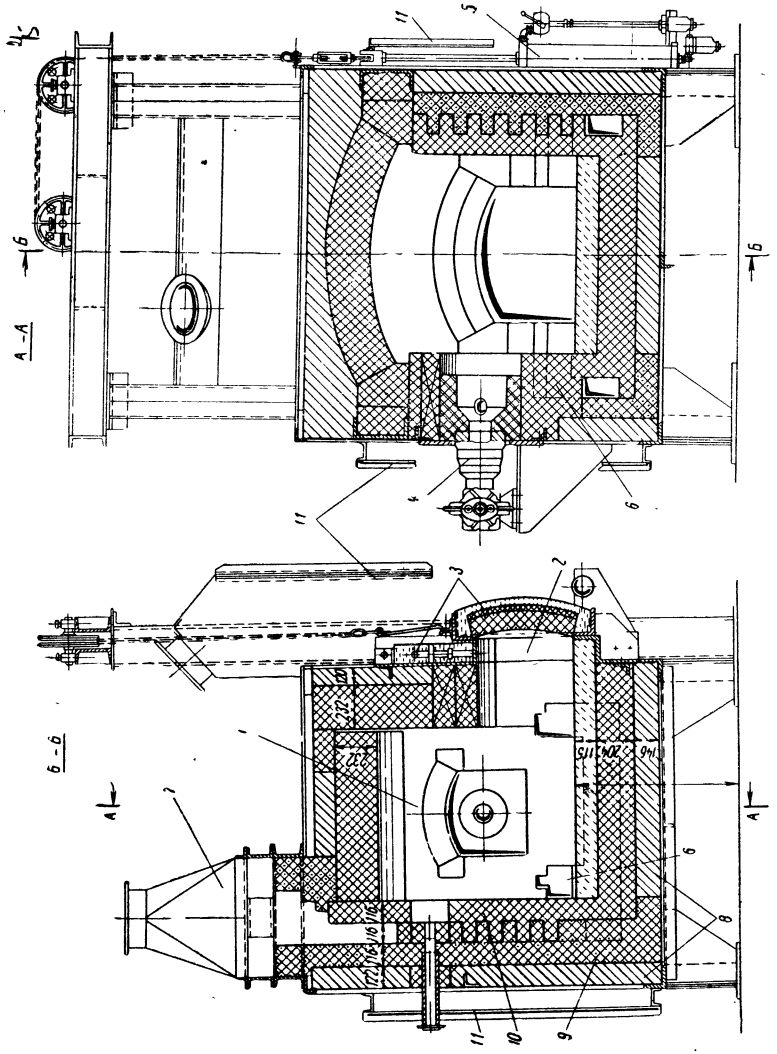
В последние годы вместо кладки из кирпича иногда применяют сборный жаростойких бетон.

Камерные и щелевые печи

Камерные печи для нагрева мелких и средних заготовок широко распространены в кузнечных цехах. Нагреваемый материал загружают на под печи и вынимают через рабочие окна (одно или несколько), расположенные в стене с одной стороны печи

Рис. 42. Камерная нагревательная печь

1 — рабочее пространство; *2* — рабочее окно; *3* — водоохлаждаемые рама и заслонка; *4* — горелка; *5* — пневмоцилиндр; *6* — дымовой канал; *7* — зонт; *8* — диатомитовый кирпич; *9* — легковесный шамот; *10* — шамот; *11* — защитные панели



(иногда с двух противоположных сторон) и закрываемые заслонками. Мелкие заготовки загружают и выгружают вручную, тяжелые — при помощи специальных загрузочных механизмов.

Типовая камерная нагревательная печь конструкции Теплопроекта (рис. 42) предназначена для нагрева металла под ковку и штамповку. Она работает на природном газе. Загрузка и выгрузка металла осуществляется через рабочее окно, расположен-

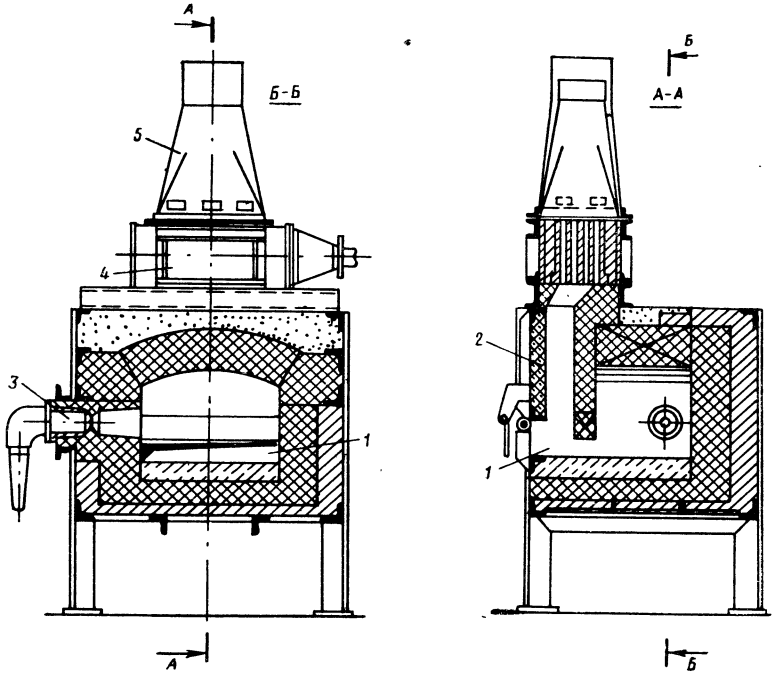


Рис. 43. Камерная щелевая печь

1 — щель; *2* — экран; *3* — инжекционная горелка; *4* — рекуператор; *5* — вытяжной зонт

ное с переднего торца печи. Горелка находится с боковой стороны печи. Печь не имеет отдельной топки. Горение происходит непосредственно в рабочем пространстве печи. Продукты горения отводятся через каналы, устроенные в боковых стенах печи, вверх, под зонт. Футеровка стен и свод рабочего пространства выложены из шамотного кирпича марки ША, под — из талькомагнезитового кирпича. Для уменьшения потерь тепла в окружающую среду стены, под и свод изолируются диатомитовым кирпичом. Так как диатомитовый кирпич можно применять при температуре не выше 900° С, то для снижения температуры на стыке диатомитовой кладки с футеровкой между ними предусмотрен слой легковесного шамота марки БЛ-1,0. Кладка печи заключена в сварной каркас из профильной стали с обшивкой из листовой

стали толщиной 4 *мм*. Для обеспечения нормальных условий работы обслуживающего персонала рабочее окно печи имеет водоохлаждаемые раму и заслонку, а снаружи стен печи предусмотрены навесные защитные панели из листа толщиной 2 *мм*, окрашенные алюминиевой краской. Механизм подъема заслонки пневматический. Печи иногда оборудуют рекуператорами для подогрева воздуха; его располагают вверху под зонтом. Аналогичные печи строят и с отводом отходящих газов в боров.

Для нагрева концов длинных заготовок применяют щелевые печи (рис. 43), отличающиеся от описанной выше камерной печи тем, что в их передней стенке вместо рабочего окна предусматривается щель, через которую засовывают концы заготовок. Для уменьшения потерь тепла щель делают по возможности небольшой высоты. Перед печью устраивают теплоизолированный или охлаждаемый водой экран. В пространство, образованное между экраном и печью, уходят дымовые газы.

Нагрев очень крупных слитков массой в несколько десятков тонн производят в камерных печах с выдвижным подом, который облегчает посадку и выдачу слитков из печи. Конструкция печи аналогична описанной ниже термической печи с выдвижным подом (см. рис. 55). Загрузку слитков на под и съем их производят мостовым краном при выдвинутом из печи поде.

Методические и полуметодические печи

Камерные печи обычно имеют низкий коэффициент полезного действия, так как газы уходят из камеры при очень высокой температуре (несколько выше температуры нагрева металла). Кроме того, затруднена загрузка и выгрузка заготовок среднего и крупного размера. В связи с этим широкое распространение для нагрева заготовок среднего и крупного размера правильной формы, обеспечивающей возможность проталкивания их по поду печи, получили методические печи с толкателями (рис. 44, 45). Металл загружается в одном конце методической печи, толкателем проталкивается по печи и выдается в другом. При этом металл, двигаясь навстречу продуктам горения, постепенно (методически) нагревается, а продукты горения остывают и уходят из загрузочного конца печи при температуре 700—1000° С. Окно для выдачи заготовок располагается в боковой стене печи (печи «с боковой выдачей») или в торцовой стене (печи «с торцовой выдачей»). Для выдачи заготовок из печи с боковой выдачей у рабочего окна устанавливается выталкивающий механизм.

По температурному режиму методические печи делятся на двухзонные и трехзонные. У двухзонных печей рабочее пространство подразделяется на методическую низкотемпературную часть, где происходит подогрев металла, и сварочную высокотемпературную часть, где осуществляется окончательный нагрев его.

В трехзонных печах помимо методической и сварочной частей

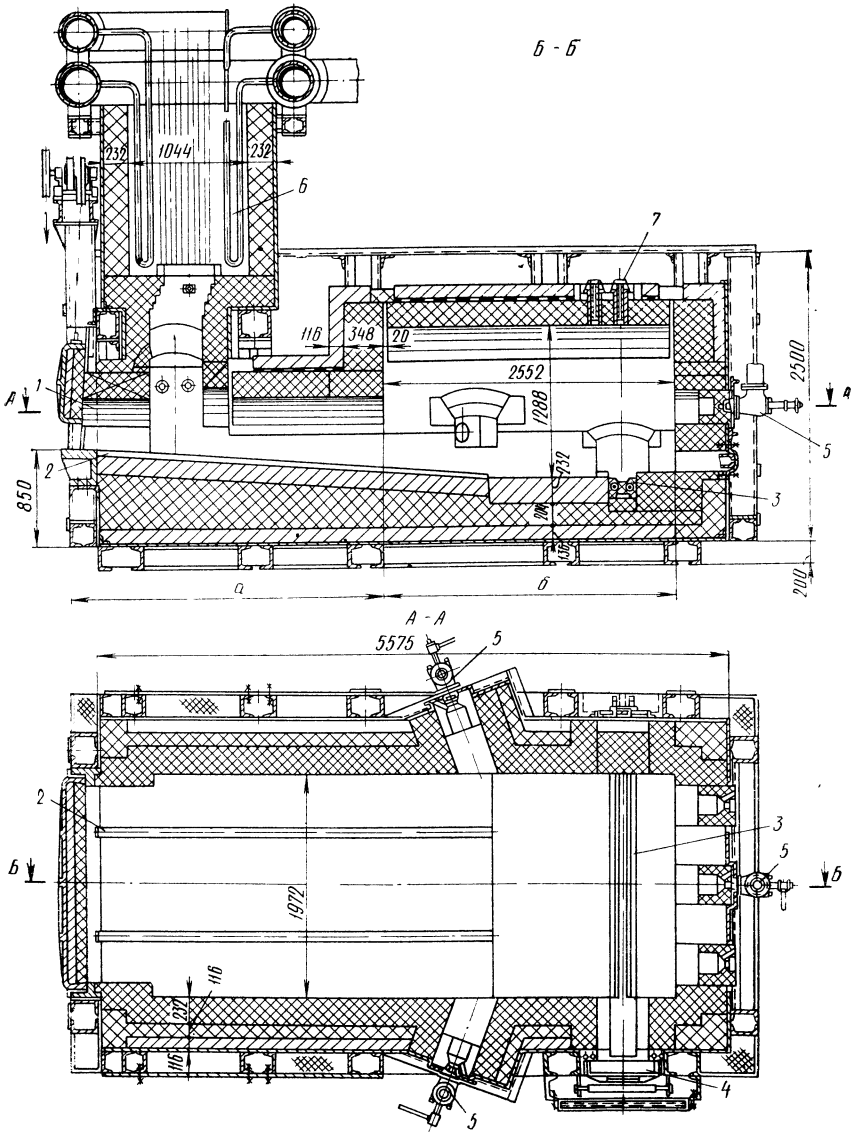


Рис. 44. Полуметодическая нагревательная печь

а — методическая зона; *б* — сварочная зона; *1* — загрузочное окно; *2* — стелюги; *3* — желоб; *4* — рабочее окно; *5* — горелки; *6* — рекуператор; *7* — отверстие для термопары

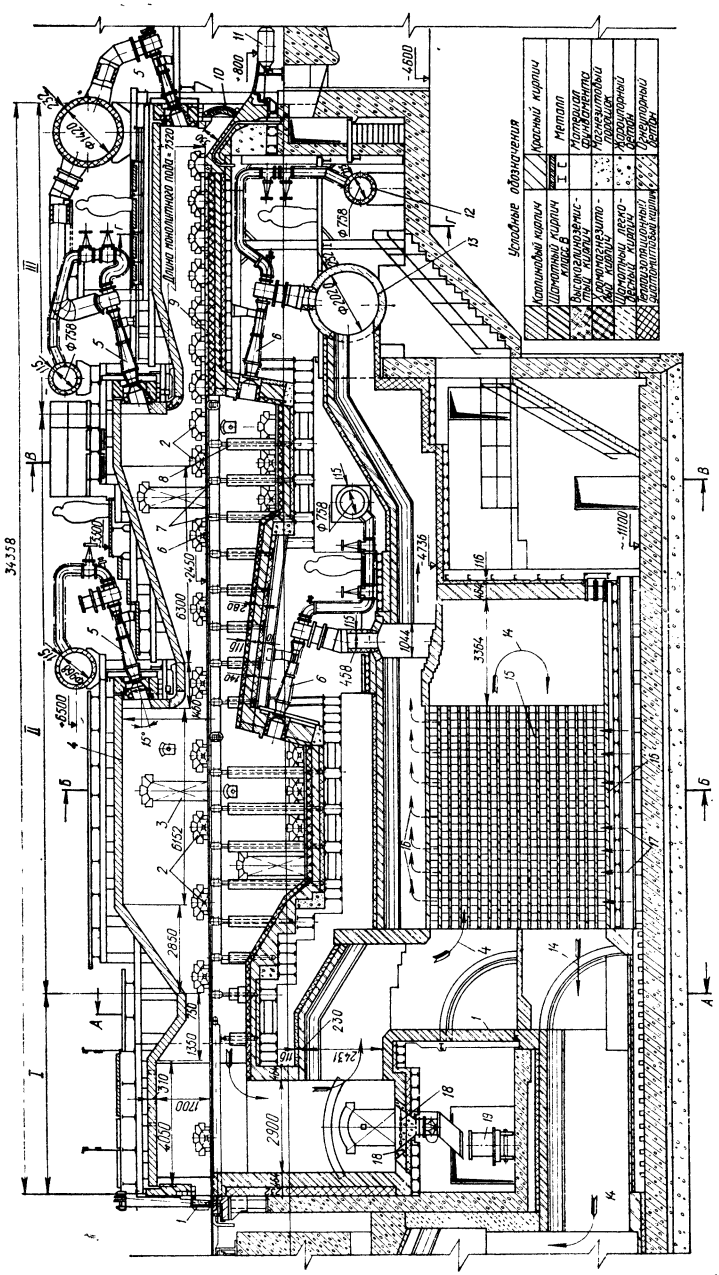


Рис. 45. Рекуперативная пятизонная нагревательная печь (продольный разрез)

1 — загрузочное окно; *2* — рабочие окна; *3* — ложное окно; *4* — свод; *5* — горелка; *6* — глиссажные трубы; *7* — опорные трубы; *8* — кирпичные столбики; *9* — стальные направляющие; *10* — заслонка окна выдачи; *11* — рольганг; *12* — газопровод; *13* — воздухопровод; *14* — движение дымовых газов; *15* — рекуператор; *16* — поднасадочная решетка; *17* — движение нагреваемого воздуха; *18* — воронка уборки шлака; *19* — вагонетка

имеется еще так называемая томильная зона, в которой поддерживается температура на 40—60° выше конечной температуры нагрева металла. В томильной зоне происходит выравнивание температур поверхностных и внутренних слоев нагреваемых заготовок, разность которых при быстром нагреве заготовок в сварочной зоне достигает большой величины.

Двухзонные методические печи небольшой длины (3,6—6 *м*), применяемые в кузнечных цехах для нагрева мелких заготовок, называют полуметодическими печами. На рис. 44 показана полуметодическая толкательная двухзонная печь с рекуператором, боковой выдачей заготовок и отводом отходящих газов вверх. Нагреваемые заготовки лежат в ней непосредственно на поду и обогреваются только сверху и с торцов. Заготовки подаются в печь через загрузочное окно толкателем, проходят через печь, нагреваются и выдаются через боковое рабочее окно выталкивателем. Для облегчения передвижения заготовок в методической и начале сварочной части в поду проложены стелюги-брусья из жаропрочной стали. По оси окна выдачи проложен водоохлаждаемый желоб, по которому осуществляется выталкивание заготовки. Стены и свод печи выполнены из шамота марки ША, под — из хромомагнезита. В качестве изоляции применены диатомитовый кирпич и легковесный шамот марки БЛ-1,3. Печь работает на природном газе. Горелки расположены с торца и с боков печи. Отходящие газы через отверстие в своде уходят в рекуператор для подогрева воздуха и далее под зонт. Аналогичные печи строят и с отводом отходящих газов в боров. Каркас печи — сварной со сплошной обшивкой стальным листом. Печь устанавливается непосредственно на полу цеха и не имеет фундамента.

Показанная на рис. 45 и 46 методическая печь с торцовой выдачей заготовок имеет три зоны нагрева — методическую, сварочную и томильную. В методической и сварочной частях печи заготовки передвигаются по глиссажным трубам и обогреваются также и с нижней стороны, в томильной — они передвигаются по стелюгам, заложенным в под, и обогреваются только сверху и с торцов. Нагреваемые заготовки подают рольгангом к загрузочному окну и проталкивают по печи толкателем. Они заполняют по длине весь под, поэтому при загрузке очередной заготовки в печь крайняя заготовка на противоположном конце печи автоматически выталкивается из томильной зоны и по наклонной водоохлаждаемой плите выдается через торцовое окно из печи на рольганг, подающий ее к прокатному стану.

В сварочной и методической частях предусмотрен самостоятельный подвод тепла как сверху, так и под глиссажные трубы. По числу мест подвода тепла (1 — в томильную и по 2 в сварочную и методическую части) печь называется «пятизонной». Она отапливается смешанным (коксо-доменным) газом и оборудована инжекционными горелками. Отходящие газы уходят через ды-

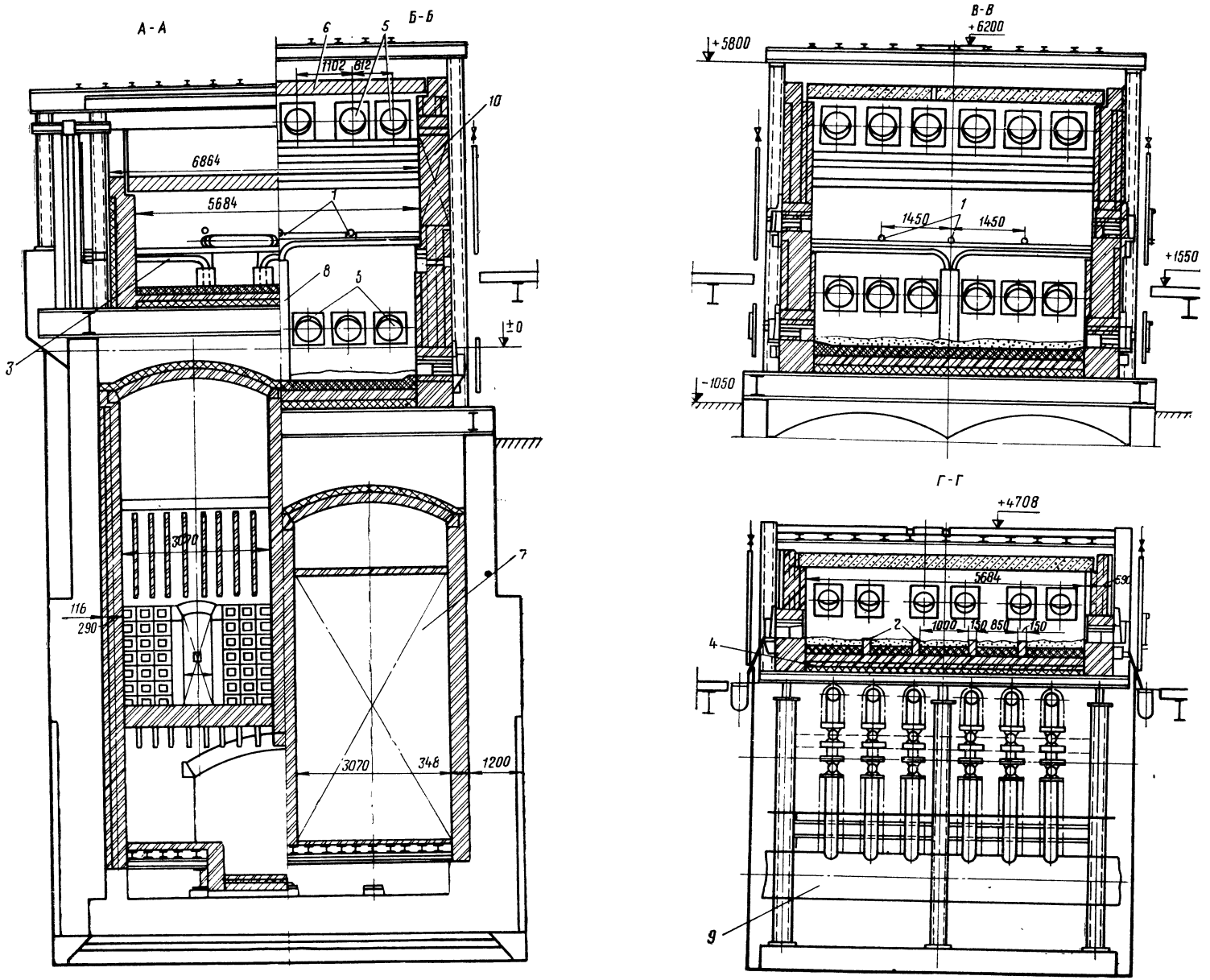


Рис. 46. Пятизонная методическая печь (поперечные разрезы)

1 — глиссажные трубы; *2* — стелюги; *3* — опорные трубы; *4* — монолитная подина; *5* — горелочные отверстия; *6* — подвесной свод; *7* — рекуператор; *8* — кирпичные столбики; *9* — газопровод; *10* — ложные окна

мовой пролет в загрузочном конце печи в рекуператор для подогрева воздуха из изделий с четырьмя отверстиями и далее в боров и дымовую трубу. В борове установлен металлический трубчатый рекуператор для подогрева газа.

Воздух подается под рекуперативную насадку. Пройдя рекуперативную насадку, нагретый воздух по каналу попадает в футерованные металлические воздухопроводы, подающие его к горелкам. Подогретый газ подается к горелкам также по футерованным газопроводам. Глиссажные трубы лежат на поперечных охлаждаемых водой трубах, опирающихся на стояки из труб, тоже охлаждаемых водой. Глиссажные и поперечные трубы для уменьшения потерь тепла изолированы жаростойким бетоном, опорные стояки заключены в кирпичные столбики.

Окалина из печи убирается через воронку в вагонетку, проходящую по туннелю под печью. Для ремонтных целей в стенах печи предусмотрены ложные окна, закладываемые кирпичом.

Стены печи в методической части и рекуператор выложены из шамотного кирпича марки ШБ, в сварочной и томильной зонах они футерованы каолиновым кирпичом, из него же выполнен подвесной свод. Выстилка в сварочной части и под в томильной выполнены из хромомагнезитового кирпича; горелочные камни — из высокоглиноземистого огнеупора. Изоляционная кладка предусмотрена из легковесного шамота и диатомитового кирпича.

На заготовках, проталкиваемых по охлаждаемым водой глиссажным трубам, в местах прохождения труб остаются темные полосы (менее нагретые, чем остальной металл), которые полностью не ликвидируются в томильной зоне и вредно сказываются в процессе проката заготовки. В последние годы начали применять «теплые» глиссажные трубы, имеющие керамическую прокладку между водоохлаждаемыми трубами и стальными накладками, по которым передвигаются слитки, а также строить печи с шагающим подом.

Преимуществом печей с шагающим подом по сравнению с методическими толкательными печами помимо этого являются: а) возможность располагать заготовки на некотором расстоянии друг от друга, благодаря чему металл нагревается с трех сторон, что значительно ускоряет и улучшает качество нагрева, а также в связи с сокращением времени пребывания металла в печи уменьшает окалинообразование; б) возможность нагрева металла различной толщины без постепенного перехода от большей толщины к меньшей, и наоборот; в) возможность при ремонтных работах и других длительных остановках (например, на праздничные дни) легко разгрузить печь, в то время как разгрузка печей с толкателем — сложная, требующая затраты большого количества ручного труда работа; г) при вынужденных кратковременных остановках нагреваемый металл из самой горячей зоны можно вернуть в зону подогрева, тем самым исключив большое окалинообразование.

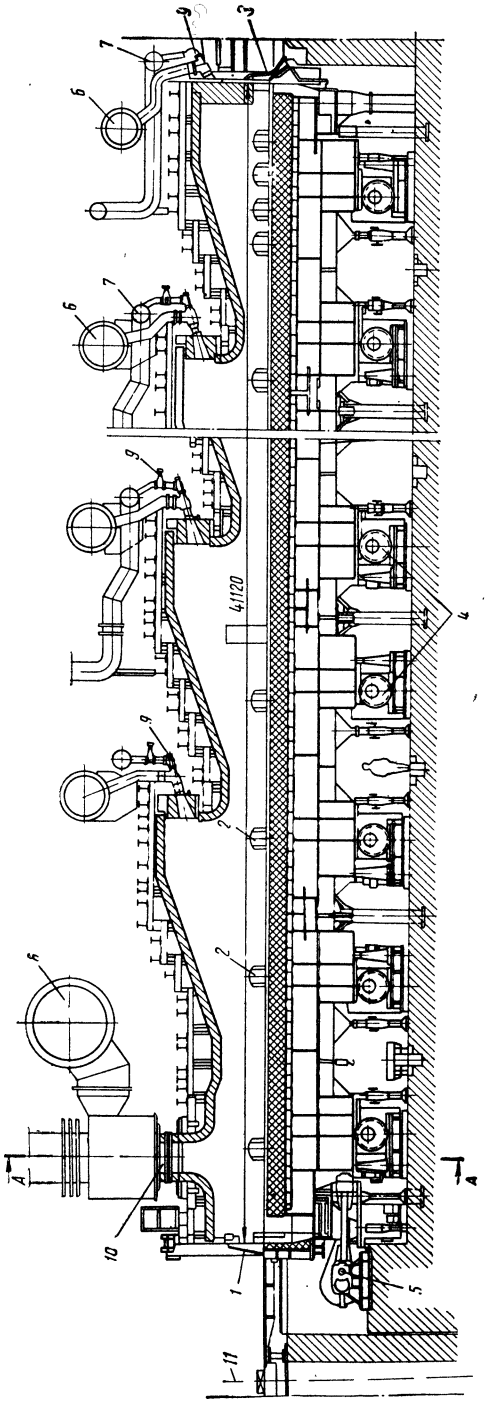


Рис. 47. Методическая печь с шагающим подом (продольный разрез)
1 — окно загрузки; *2* — смотровые окна; *3* — окно выгрузки; *4* — механизм подъема балок; *5* — механизм передвижения; *6* — воздухопроводы; *7* — газопроводы; *8* — дымовой боров; *9* — горелки; *10* — дымовые каналы; *11* — ось рольганга загрузки

На рис. 47 и 48 показана печь с шагающим подом для нагрева заготовок сечением 250×250÷330×330 *мм* и длиной до 6400 *мм*. Печь имеет четыре самостоятельных зоны нагрева с соответствующими интервалами нагрева, что достигается регулированием температурного уровня в каждой зоне. Под выполнен из трех шагающих балок, двух неподвижных и двух керамических бортиков. При опущенных шагающих балках заготовки

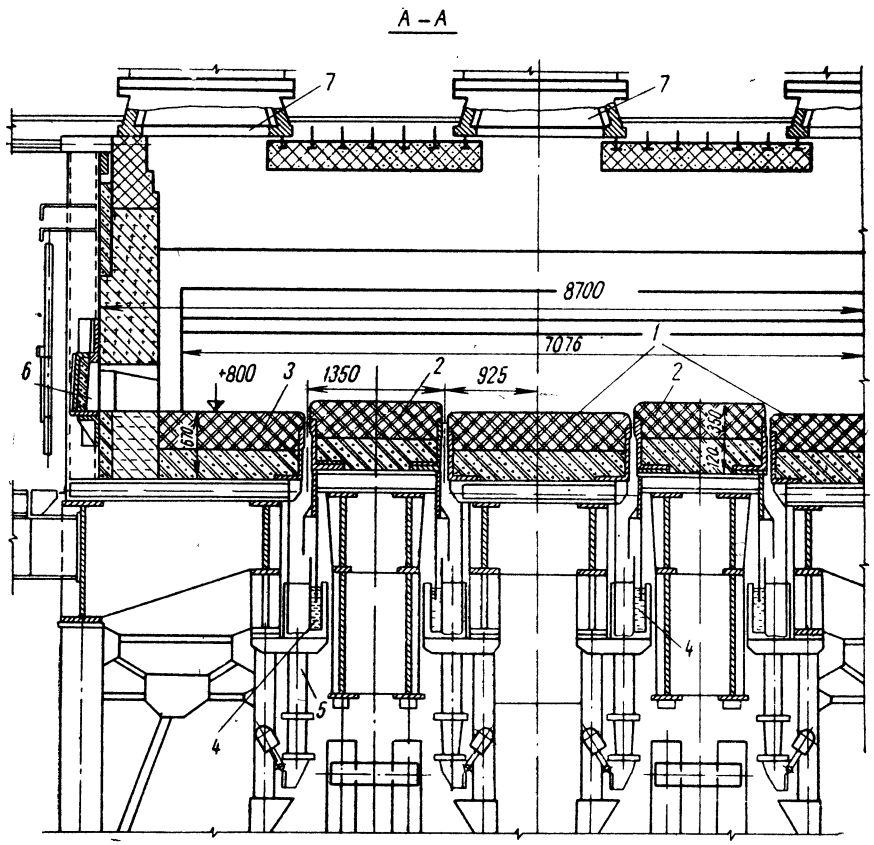


Рис. 48. Методическая печь с шагающим подом (поперечный разрез)

1 — неподвижные балки; *2* — подвижные балки; *3* — керамические бортики; *4* — водяные затворы; *5* — уборка окалины; *6* — смотровое окно; *7* — дымовые каналы

лежат на керамических бортиках и неподвижных балках. Высота подъема шагающих балок 200 *мм*, шаг 662 *мм*. Цикл работы шагающего пода от 60 до 71 *сек*. Для герметизации пода устроены водяные затворы с проточной водой — ножи, закрепленные на неподвижных и подвижных балках и керамических бортиках. Они входят в короб, наполненный водой. Окалина, просыпаю-

щаяся в щели между подвижными и неподвижными балками, убирается через специальные воронки в бункера, откуда удаляется. Стены печи выложены из шамотного кирпича марки ША с изоляцией легковесным шамотом и диатомитовым кирпичом; подина — подвижные и неподвижные балки и бортики, зафутерованы высокоглиноземистыми изделиями; свод — подвесной из каолиновых изделий.

Кольцевые печи

Для нагрева заготовок неправильной формы, затрудняющей передвижение их при помощи толкателя, применяют печи с кольцевым или тарельчатым подом.

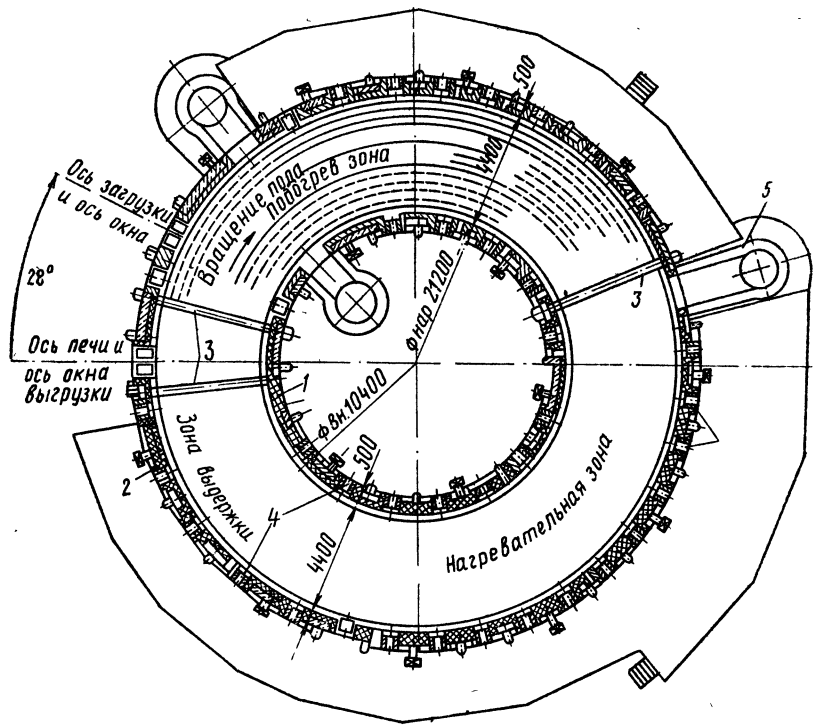


Рис. 49. План кольцевой нагревательной печи

1 — внутренняя стена; *2* — наружная стена; *3* — перегородки; *4* — горелочные отверстия; *5* — дымоотборы

Кольцевая печь состоит из неподвижного кольцевого канала и вращающегося кольцевого пода (рис. 49, 50). Технология нагрева металла аналогична нагреву в методической печи. Заготовки при помощи специального механизма укладываются

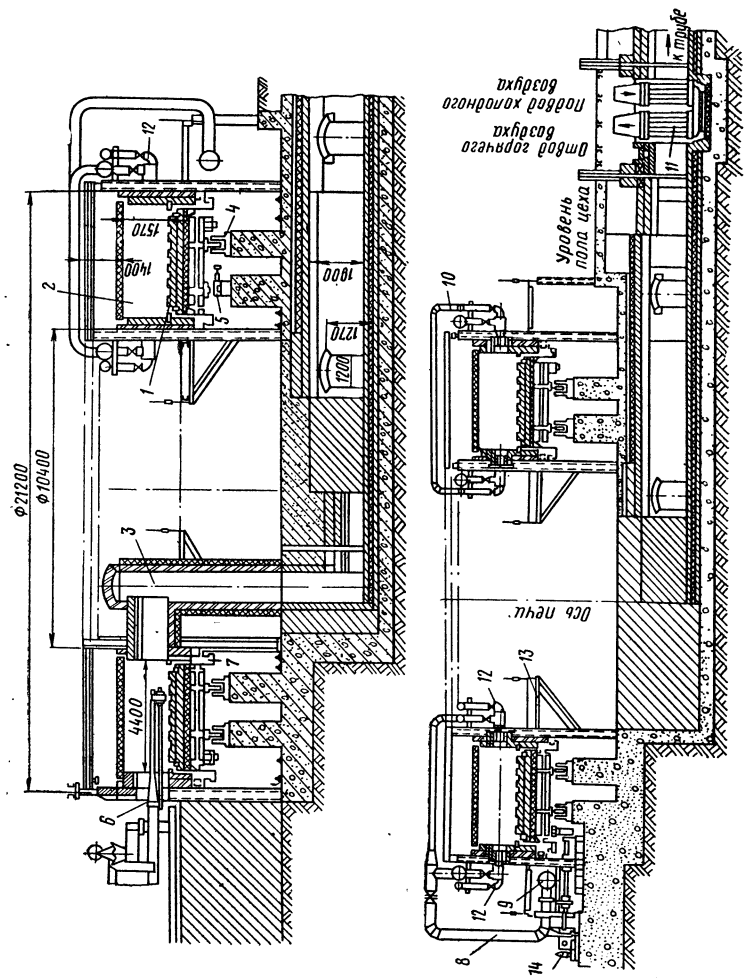


Рис. 50. Кольцевая нагревательная печь (поперечные разрезы)

1—кольцевой вращающийся под; *2* — неподвижный кольцевой канал; *3* — дымоотборы; *4* — опорный ролик; *5* — упорный ролик; *6* — загрузочное устройство; *7* — водяной затвор; *8* — воздухопровод; *9* — воздушный коллектор; *10* — газопровод; *11* — воздушный игольчатый рекуператор; *12* — горелки; *13*—площадки для обслуживания печи; *14* — привод

на вращающийся под печи и при вращении его последовательно проходят зоны: методическую (подогрева), сварочную (нагрева) и томильную (выдержки). Попадающие в камеру выгрузки нагретые заготовки вынимают из печи.

Скорость вращения пода рассчитывают таким образом, чтобы время, затрачиваемое на один оборот пода, соответствовало времени, необходимому на нагрев заготовки.

Основанием стен канала служат опорные кольца, закрепленные на каркасе печи. Канал перекрыт подвесным сводом, также подвешиваемым на каркасе. Под опирается на два-три ряда катков и приводится во вращение одним или несколькими приводами. Зазоры между стенами и вращающимся подом перекрывают водяным затвором, препятствующим выбиванию газов через зазор и подсосу воздуха.

Нож затвора крепится к вращающейся подине, а сам затвор устанавливается на стенах; в затворе циркулирует вода, в которую входит нож затвора. Печь разделена перегородкой на две зоны: методическую и сварочно-томильную. Место выгрузки заготовок (у некоторых печей место загрузки) также выделено двумя перегородками. Перегородки выкладывают на охлаждаемых водой трубах, и они не доходят до поверхности пода на расстояние, несколько большее высоты заготовок. Горелки и форсунки расположены с внутренней и с наружной стороны канала. Отвод продуктов горения осуществляется через несколько дымоотводов — один на границе между сварочной и методической зонами и два перед окном загрузки. Для использования тепла отходящих газов в борове установлен игольчатый рекуператор, подогревающий воздух. У некоторых печей рекуператоры устанавливают в вертикальных дымоотборах.

Печи с вращающимся тарельчатым подом отличаются от кольцевых тем, что под выполнен у них в виде сплошного диска и нет внутренних кольцевых стен. По технологии нагрева заготовок эти печи аналогичны камерным печам. Зазор между вращающимся подом и кольцевой стеной также перекрывается водяным затвором. При диаметре до 2—2,5 *м* тарельчатый под вращается на центральной оси, при бо́льших диаметрах — на катках. Загрузку и выгрузку заготовок производят обычно через одно и то же окно. Отвод продуктов горения осуществляют через каналы в стене печи в сводный дымоотвод, расположенный над стеной, и из него в вытяжной зонт. Печи с тарельчатым подом применяют чаще всего для нагрева небольших заготовок в кузнечных цехах.

Нагревательные колодцы

Слитки толщиной более 400 *мм* нагревают в нагревательных колодцах, позволяющих производить обогрев слитка со всех сторон, в то время как в методических печах только с двух сто-

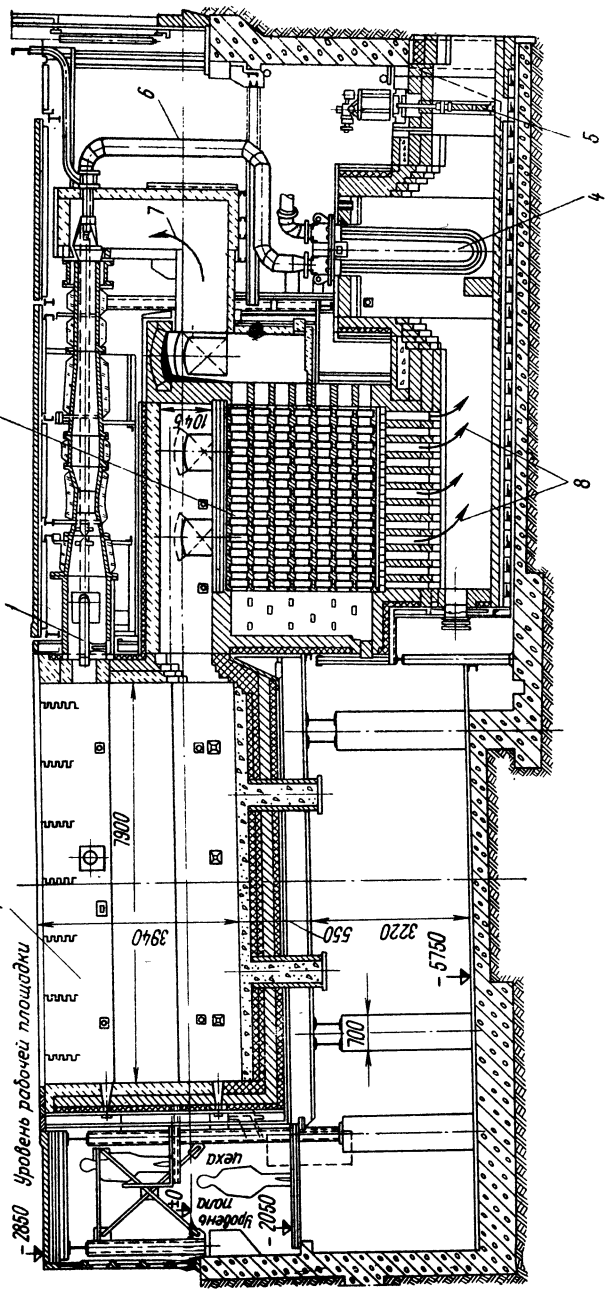


Рис. 51. Нагревательные колодцы с верхней горелкой

1 — рабочая ячейка; *2* — горелка; *3* — керамический трубчатый рекуператор; *4* — металлический рекуператор для подогрева газа; *5* — шибер; *6* — газопровод; *7* — подогретый воздух; *8* — продукты горения

рон (не считая торцов). Это позволяет значительно уменьшить время нагрева слитков и улучшить равномерность прогрева. Нагревательные колодцы бывают двух видов: регенеративные и рекуперативные.

В Советском Союзе в настоящее время строятся преимущественно рекуперативные колодцы с горелкой, расположенной сверху (рис. 51), с рабочей камерой прямоугольного сечения; регенеративные колодцы в последние годы не строят. Слитки загружают в рабочую камеру (ячейку) вертикально и устанавливают с небольшим наклоном в сторону стенок ячеек, на которые их опирают верхним концом. В одну ячейку устанавливают 4—14 крупных слитков. Колодец закрывают крышкой, имеющей катки с боковых сторон и откатываемой в сторону во время загрузки и выгрузки слитков с помощью специального механизма.

У некоторых типов нагревательных колодцев крышка приподнимается и отодвигается в сторону напольным краном. Крышки по краям имеют нож, который при закрывании рабочего пространства входит в песочный затвор. Колодец, показанный на рис. 51, отапливается газообразным топливом. Дымоотбор устроен с той же стороны, где расположена горелка. Скорость выхода из горелки смеси газа с воздухом выбирается с таким расчетом, чтобы кинетической энергии струи было достаточно для проталкивания газов до противоположной стены камеры и пламя имело петлеобразную траекторию. Отходящие из камеры газы проходят трубчатый керамический рекуператор для подогрева воздуха и уходят в боров, в котором расположен трубчатый металлический рекуператор для подогрева газа (если колодцы работают не на природном газе). В рабочую камеру помещается в два ряда по длине 14 слитков массой по 7—8 *т*. Колодцы объединяются в группы по 2—4 рабочие камеры, обслуживаемые одной дымовой трубой.

Секционные печи скоростного нагрева

При ускорении нагрева и сокращении времени пребывания заготовки в печи уменьшается окисление ее и образование окалины. Для скоростного нагрева применяют печи, в которых повышенную скорость нагрева получают за счет поддержания в рабочем пространстве высокой температуры порядка 1300—1500° С и создания условий для равномерного поступления тепла ко всем частям поверхности нагреваемого изделия. В печах скоростного нагрева греют главным образом изделия круглого поперечного сечения (круглые заготовки, трубы) диаметром до 200 *мм*. Так как печи скоростного нагрева работают в очень тяжелых условиях, их составляют из нескольких секций, каждую из которых, в случае выхода из строя, можно легко заменить новой при кратковременной остановке печи.

На рис. 52 показана отапливаемая природным газом секци-

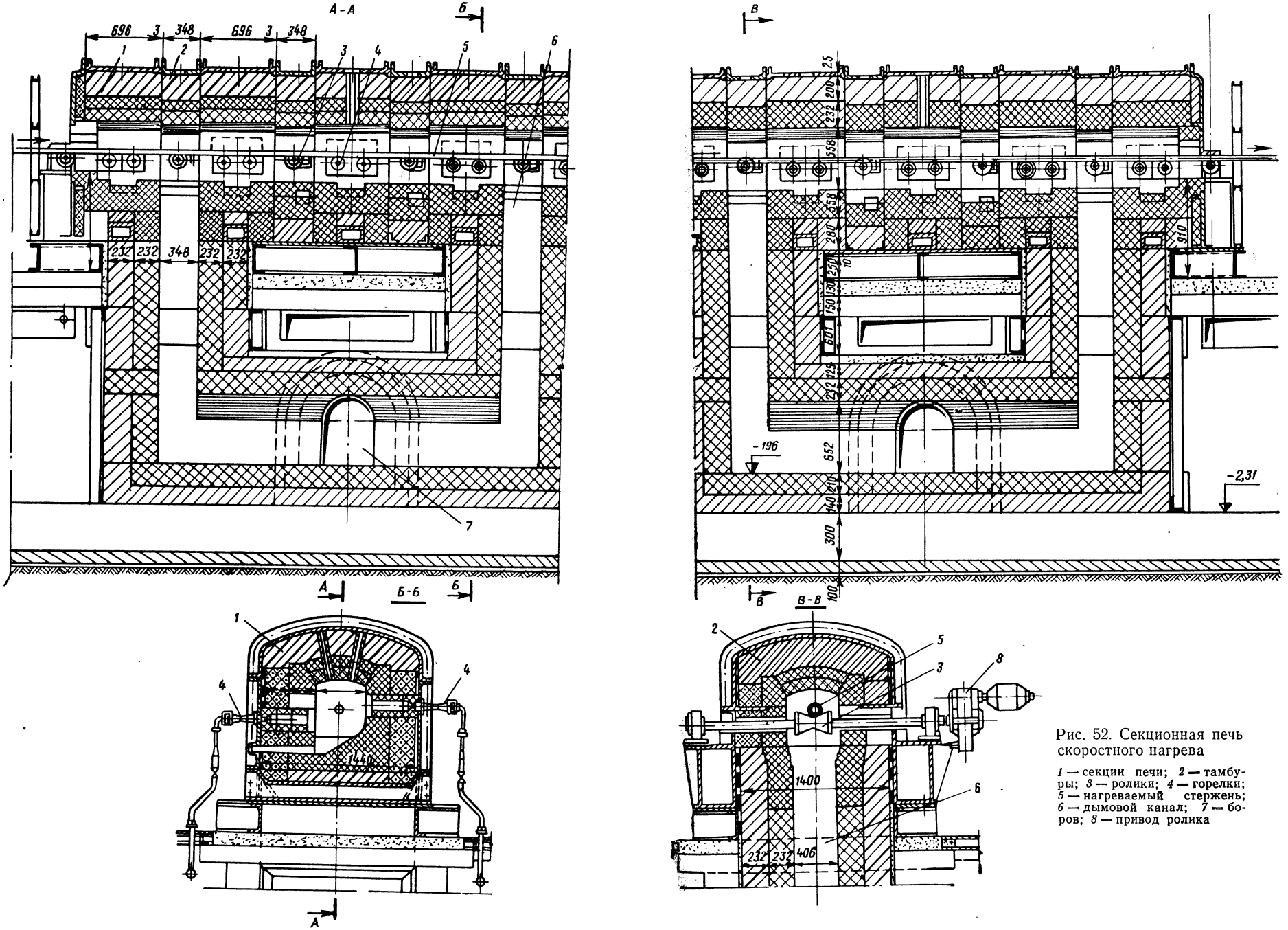


Рис. 52. Секционная печь скоростного нагрева

1 — секции печи; *2* — тамбуры; *3* — ролики; *4* — горелки; *5* — нагреваемый стержень; *6* — дымовой канал; *7* — боров; *8* — привод ролика

онная печь скоростного нагрева прутков диаметром 22—24 *мм* для высадочного автомата, изготовляющего болты. Скорость подачи прутков в автомат равна 16,5 *м/мин*. Так как при температуре в рабочем пространстве 1250—1300° С время нагрева прутка составляет 2 *мин*, то длина рабочего пространства печи принята 33 *м*. Подача прутков и их передвижение по печи осуществляется одноручьевым непрерывно действующим рольгангом. Печь состоит из 32 секций длиной по 696 *мм* и 31 тамбура длиной по 348 *мм*, расположенных между ними. Каждая секция имеет по две верхних и две нижних горелки и легко может быть при необходимости ремонта убрана или заменена другой. Кожух секций — сборный из литых чугунных частей. В тамбурах располагаются водоохлаждаемые ролики рольганга. Ролики профилированы и расположены под некоторым углом к поперечной оси печи, благодаря чему пруток при прохождении печи вращается вокруг своей продольной оси, что позволяет нагревать его равномерно. Для ремонта роликов в тамбурах имеются съемные футерованные крышки и предусмотрены лючки для подправки прутков и уборки окалины.

Для изменения времени пребывания прутков в печи окружная скорость роликов (скорость перемещения прутка) регулируется от 10 до 20 *м/мин*. Дымовые газы убираются через тамбуры в боров, как показано на рисунке, или вверх под колпак. С боковых сторон печи предусмотрены траншеи и подвал для чистки и ремонта боровов, где также расположены трубы водяного охлаждения роликов.

Печи безокислительного нагрева

В последние годы в промышленности распространяются печи безокислительного нагрева для получения после нагрева или термообработки изделий с чистой неокисленной поверхностью. Применение таких печей резко сокращает окисление металла и, как следствие, потерю металла, переходящую в окалину, которая составляет в обычных печах от 2 до 5% нагреваемого металла. Помимо этого отсутствие окалины исключает брак от вдавливания окалины в поверхность металла при ковке, штамповке или прокате; повышается стойкость штампов и валков. Нагрев заготовок без образования окалины позволяет применять точную штамповку с минимальными допусками, что дает значительную экономию металла и уменьшает затраты на механическую обработку деталей. Для нагрева изделий до температуры 900—1000° С, главным образом для термообработки, а также для газовой цементации применяют муфельные печи или печи с радиационными трубами, описанные в § 17.

Для нагрева металла под ковку и штамповку до температуры выше 1000° С муфельные печи и печи с радиационными трубами не подходят, так как достижение такой температуры лими-

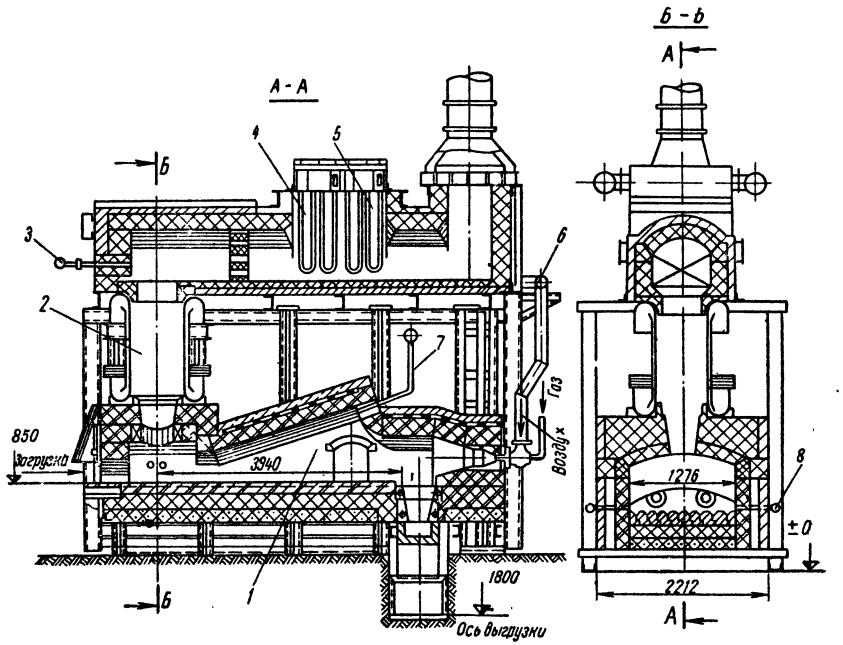


Рис. 53. Полуметодическая печь безокислительного нагрева

1 — рабочее пространство; *2* — щелевой радиационный рекуператор для подогрева первичного воздуха от 400 до 700° С; *3* — подвод вторичного воздуха при режиме холостого хода; *4* — трубчатый рекуператор для подогрева первичного воздуха до 400° С; *5* — трубчатый рекуператор для подогрева вторичного воздуха; *6* — подвод первичного воздуха; *7* — подвод вторичного воздуха при рабочем режиме; *8* — подвод третичного воздуха

тируется стойкостью муфелей и радиационных труб. Для этих целей получили применение печи безокислительного нагрева открытым пламенем, в которых безокислительная среда образуется непосредственно в рабочем пространстве печи при сжигании газообразного или жидкого топлива с коэффициентом расхода воздуха $\alpha=0{,}5$. Необходимая температура в рабочем пространстве достигается в результате внесения в печь дополнительного тепла с воздухом, подогреваемым до температуры 1000° С в регенераторах, или передачей в рабочее пространство части тепла, полученного при дожигании продуктов неполного сгорания, и одновременно подогрева воздуха, идущего на горение, в рекуператоре до температуры 550—700° С. Большее распространение получили рекуперативные печи.

Полуметодическая печь безокислительного нагрева с желобчатым подом для нагрева под ковку и штамповку круглых заготовок диаметром 50—120 *мм* и длиной 150—500 *мм*, показанная на рис. 53, работает с подогревом воздуха в рекуператорах. Дожигание продуктов неполного сгорания предусмотрено в

ней непосредственно в рабочем пространстве зоны безокислительного нагрева над металлом, закрытым слоем безокислительной атмосферы. Первичный воздух нагревается последовательно в двух рекуператорах до температуры 600—700° С. Вторичный воздух подогревается до температуры 300° С в третьем рекуператоре. Работает печь по следующей схеме. К горелкам, расположенным на торцовой стене со стороны выгрузки, поступает весь газ и первичный воздух в количестве, равном 50% теоретического, нагретый в рекуператорах до температуры 600—700° С. Вторичный воздух подается через свод в зону высоких температур. Конфигурация свода печи обеспечивает передачу излучением получаемого при дожигании продуктов неполного сгорания тепла в безокислительную зону, где температура нагрева металла выше 850° С. До температуры 850° С металл нагревается продуктами полного сгорания, но окисляется незначительно, так как при температурах ниже 850° С скорость окалинообразования, как указано в § 9, очень мала. При температурах выше 850° С металл находится в безокислительной атмосфере. Под печи выложен из карборундовых фасонных камней с желобами. Заготовки проталкиваются механизмами вдоль желобов по одной, последовательно.

§ 17. ТЕРМИЧЕСКИЕ ПЕЧИ

Термическая обработка металлов производится для улучшения их структуры и придания свойств, необходимых для данных конкретных условий: прочности, твердости, износоустойчивости, вязкости и т. п. Термическая обработка включает в себя ряд операций: нагрев до определенной температуры, выдержку при ней определенное время и охлаждение с заданной скоростью. Наиболее распространенными операциями термической обработки являются: отжиг, нормализация, закалка, отпуск и цементация.

Отжиг — нагрев до определенной температуры, выдержку при ней и медленное охлаждение в печи — производят для получения стали с равномерной структурой, свободной от внутренних напряжений. При отжиге сталь нагревают до температуры 750—1150° С в зависимости от ее состава. Нормализацию применяют для устранения внутренних напряжений в стали. Она отличается от отжига тем, что после выдержки металл сразу выдается из печи и охлаждается на воздухе. Закалку — нагрев, выдержку и быстрое охлаждение (в воде, масле и пр.) — производят для придания стали твердости. При закалке обыкновенную сталь нагревают до температуры 850—900° С, а специальные легированные стали — до 1250° С.

Отпуск применяют для устранения или уменьшения напряжений, полученных в результате закалки. При отпуске металл проходит те же операции, что и при отжиге или нормализации, но при этом нагревается до более низких температур — от 150 до 600° С.

Цементацией называется химико-термический процесс поверхностного насыщения углеродом изделий из стали с малым содержанием углерода (0,1—0,25%). При этом получают изделия с мягкой сердцевиной и твердой поверхностью. Такие изделия хорошо сопротивляются ударам и истиранию. Цементацию производят путем нагрева изделий до температуры 950—1000° С в среде, насыщенной углеродом. Для этого изделия помещают в ящики, заполненные твердым или жидким карбюризатором — веществом, содержащим углерод, нагревают их в печи и выдерживают при заданной температуре.

В последнее время более широкое распространение получил процесс газовой цементации, при котором изделия нагревают в среде с искусственной атмосферой, содержащей углеродистые соединения. При термической обработке особенно важно получить равномерный прогрев изделия по сечению и минимальное окисление его поверхности. В связи с этим сжигание мазута, ярко светящийся факел которого с высокой температурой может вызвать местный перегрев, производят не в рабочем пространстве, как в нагревательных печах, а в отдельных топках, расположенных обычно под подом или сбоку рабочего пространства. Низкотемпературные печи (до 650—750° С) оборудуют отдельными топками и при использовании газообразного топлива. Наиболее распространенными для термической обработки печами являются камерные, проходные, вертикальные, муфельные и ванные.

Камерные печи

На рис. 54 показана камерная печь, отапливаемая газом или мазутом, с топками, расположенными под подом. Под выложен из карборундовых плит, хорошо прогревается и обеспечивает нагрев изделий снизу.

Горелки или форсунки устанавливаются по одной с каждой стороны печи (по одной на топку), с противоположной стороны располагаются гляделки. Топки соединяются между собой тремя каналами. Продукты горения выходят в рабочее пространство через пламенные окна, расположенные между подом и стенами; отходящие газы уходят через дымовые каналы, расположенные в стене у рабочего окна, в рекуператор типа «термоблок» и далее под зонт. Перед рабочим окном предусмотрен второй зонт для отбора выбивающихся из рабочего окна газов. Топка футеруется шамотным кирпичом марки ША, рабочее пространство — легковесным шамотом марки БЛ-1,3; для изоляции применяется диатомитовый кирпич. Для термообработки крупных поковок и литых изделий, которые трудно загружать в обычные камерные или проходные печи, в интервале температур 500—1150° С

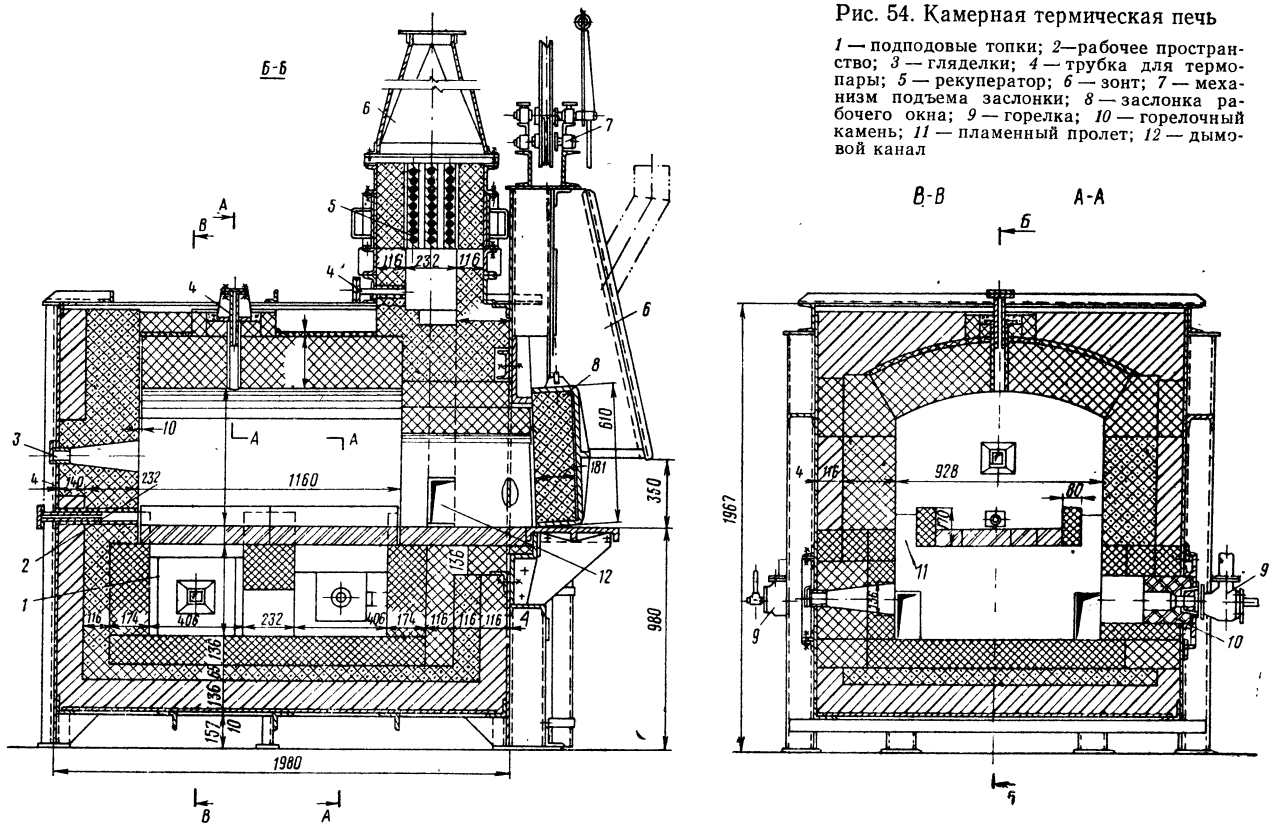


Рис. 54. Камерная термическая печь

1 — подподовые топки; *2*—рабочее пространство; *3* — гляделки; *4* — трубка для термопары; *5* — рекуператор; *6* — зонт; *7* — механизм подъема заслонки; *8* — заслонка рабочего окна; *9* — горелка; *10* — горелочный камень; *11* — пламенный пролет; *12* — дымовой канал

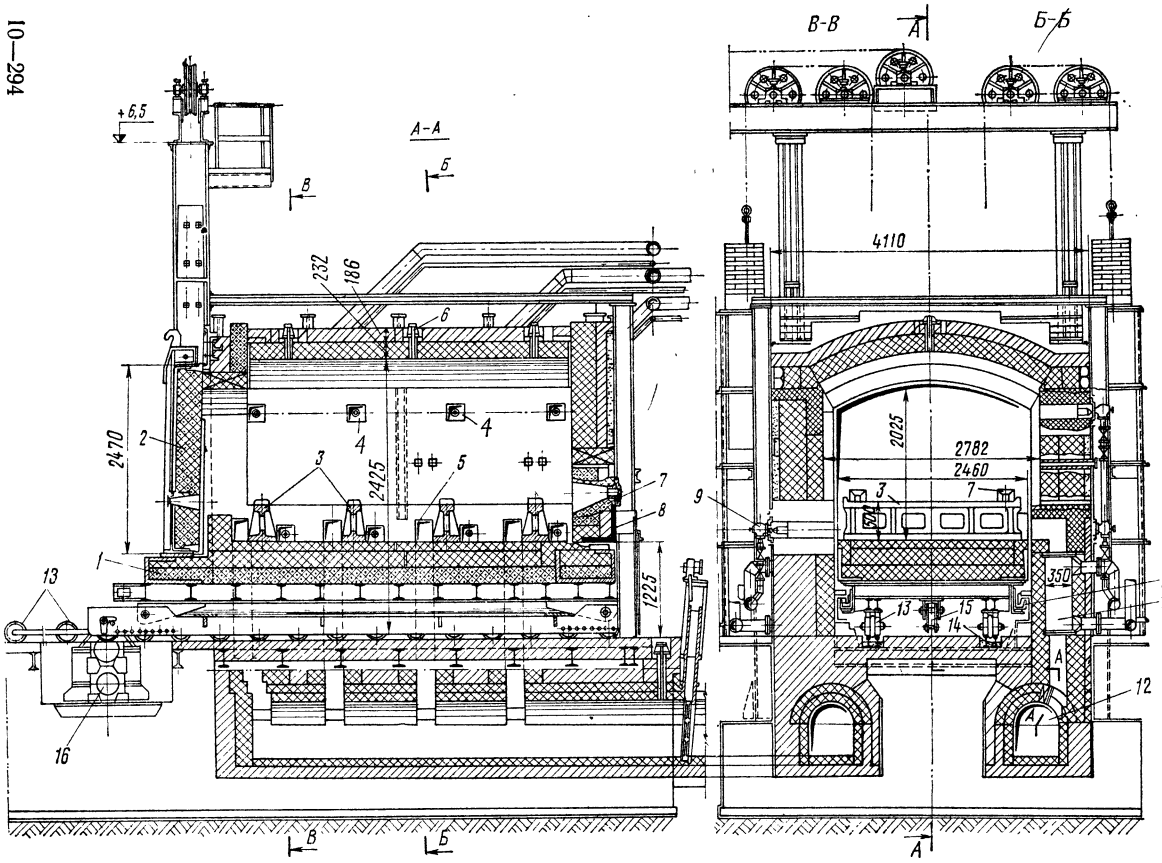
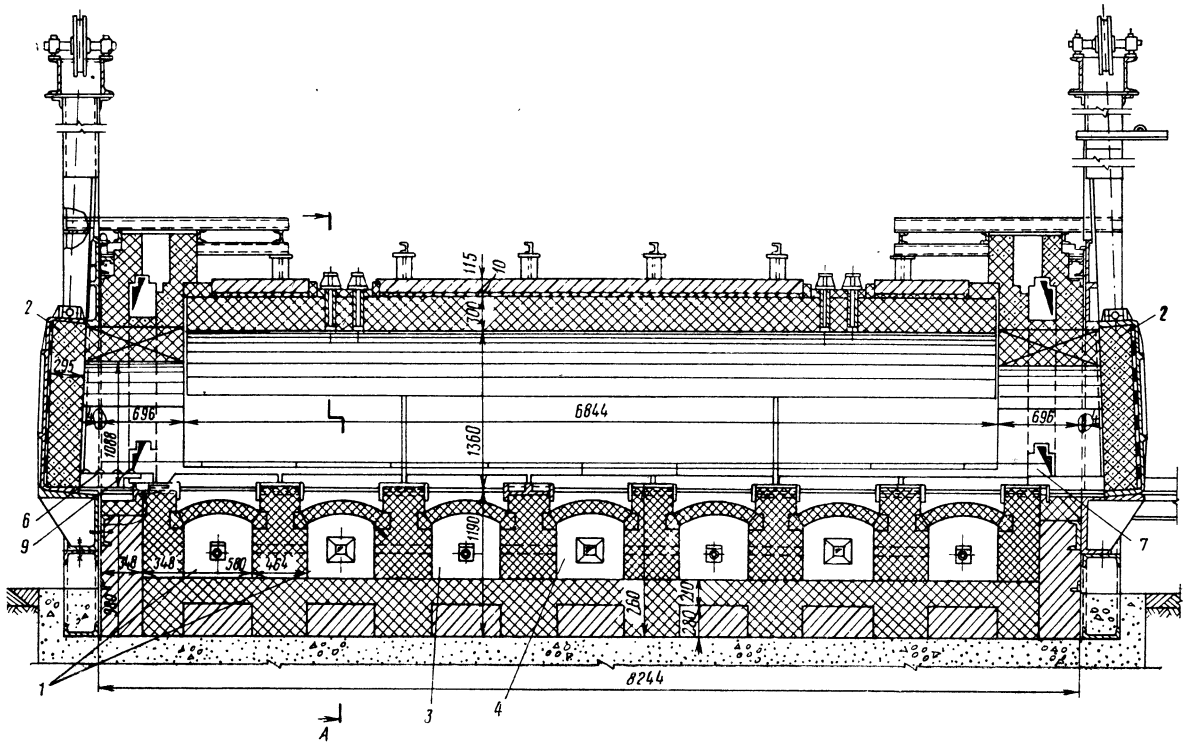


Рис. 55. Печь с выдвижным подом

1—выдвижной под; *2* — заслонка; *3*—подставки; *4* — горелочные туннели; *5*—дымовые каналы; *6*—отверстие для термопары; *7* — гляделка; *8* — опорная балка; *9* — горелка; *10* — песочный затвор; *11* — рекуператор; *12* — боров; *13* — ролики; *14* — пути; *15* — бесконечная цепь; *16*—электропривод



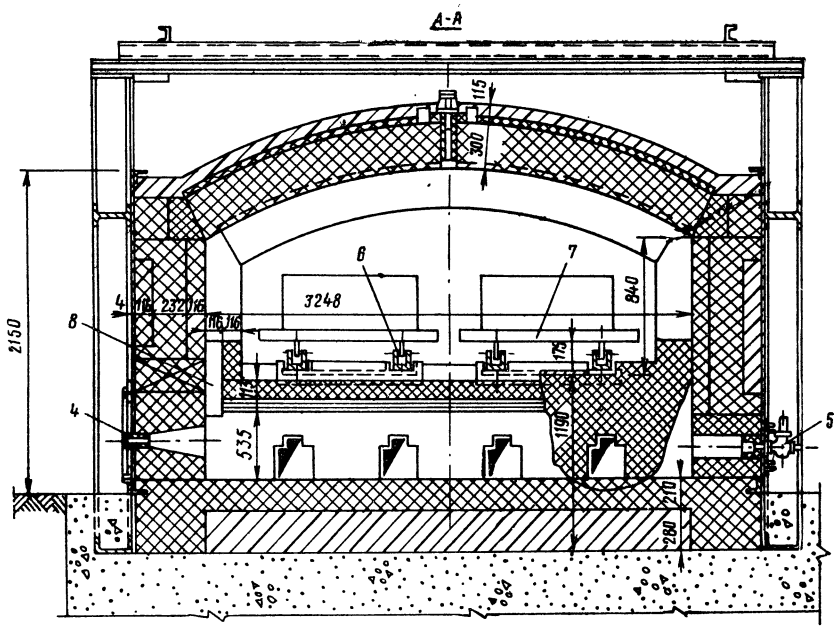


Рис. 56. Проходная термическая печь

1 — подподовые топки; *2* — заслонки загрузочного и выгрузочного окон; *3* — горелочный туннель; *4* — гляделка; *5* — горелка; *6* — подовые направляющие с роликами; *7* — поддоны; *8* — пламенный пролет; *9* — дымовой канал

применяют печи с выдвижным подом (рис. 55). Загрузку изделий на под и съем их производят мостовым краном при выдвинутом из печи поде. Для более равномерного нагрева изделия обычно укладывают на подставки высотой 400—500 *мм*, что позволяет газам омывать их со всех сторон.

Печь работает на природном газе и оборудована расположенными в два ряда по высоте печи горелками с принудительной подачей газа и воздуха. Факелы нижних горелок направлены под садку, а верхних горелок — под свод. В печах, работающих на жидком топливе, форсунки отделяют от рабочего пространства перевальной стенкой, предохраняющей изделия от непосредственного влияния факела горения. Отвод продуктов горения из печи осуществляется через вертикальные каналы в боров под печью, затем в сборный боров и дымовую трубу. В сборном борове установлен поворотный шибер для регулирования давления в рабочем пространстве печи. Поступающий для горения воздух подогревается в рекуператорах, установленных в вертикальных дымовых каналах. Температура подогрева воздуха около 200° С. Для герметизации печи устроен песочный затвор, состоящий из закрепленного на раме выдвижного пода корытообразного затвора, заполненного песком, в который входит «нож» второй части затвора, закрепленный за кладку стены, а также обеспечено плотное прилегание заслонки, закрывающей передний торец печи, к плитам обрамления. Механизм подъема заслонки электрический. В заднем торце печи стена опирается на разгрузочные арки и литую балку, под которую проходит торец выдвижного пода. Установка выдвижного пода печи состоит из футерованной огнеупорным кирпичом рамы, песочного затвора, путей для перемещения пода и механизма перемещения. Под перемещается на роликах по путям, проложенным на полу печи и цеха. Механизм выдвижения пода состоит из бесконечной цепи, закрепленной за раму пода и переброшенной через звездочку, приводимую во вращение электродвигателем через редуктор и пару шестерен. Кладка печи многослойная с изоляцией диатомитовой кладкой и минераловатными матами. Снаружи кладка заключена в сварной каркас с обшивкой из листовой стали толщиной 6 *мм*.

Проходные печи

Проходные печи применяют при серийном производстве для термической обработки большого количества изделий малого и среднего размера. Печь, показанная на рис. 56, оборудована подподовыми топками и отапливается газообразным или жидким топливом. Горелки и форсунки устанавливаются в шахматном порядке, с противоположной стороны топки устроены глядельки. Продукты горения поступают в печь через пламенные пролеты в поду со стороны, противоположной вводу горелок,

и уходят в дымовые каналы, расположенные в боковых стенах печи у загрузочного и выгрузочного окон. Нагреваемые изделия укладываются на поддоны из жаропрочной стали, продвигаемые толкателем по уложенным на поду направляющим с роликами. Печь заключена в металлический каркас со сплошной обшивкой. Футеровка выполнена из шамота, в качестве изоляционных слоев применены легковесный шамот и диатомитовый кирпич. Очень часто вместо толкателя, направляющих и поддонов в термических проходных печах применяют различные конвейеры (см. рис. 27—29), а также механизированные поды — роликовые, шагающие и т. п.

Вертикальные печи

Длинные изделия (паровозные оси, валы, стволы орудий и т. п.) нагревают для термообработки в вертикальном положении в печах, рабочее пространство которых представляет собой цилиндрическую шахту (рис. 57). Печь имеет сплошной металлический кожух, футерованный изнутри огнеупорным кирпичом с изоляцией пенодиатомитовым кирпичом.

Для получения равномерного нагрева изделий горелки расположены в три яруса по высоте печи, горелочные туннели направлены тангенциально к поперечному сечению печи и в печи предусматривается рециркуляция дымовых газов за счет энергии продуктов сгорания газа и воздушных струй, расположенных снизу и сверху горелки. Струи газовоздушной смеси из горелок вводятся не непосредственно в рабочее пространство печи, а в расположенные в кладке инжекционные устройства, подсасывая при помощи них газы из рабочего пространства и затем снова выбрасывая смесь в него. При работе на мазуте применяют короткофакельные форсунки и устраивают у каждой из них небольшие форкамеры, чтобы предохранить изделия от местного перегрева факелом. Продукты горения отводятся через отверстия в стене вверху печи в кольцевой канал, соединенный с боровом. Загрузка и выгрузка изделий производится сверху. Печь перекрывается футерованной крышкой, состоящей из двух половин, откатывающихся в стороны. Для герметизации печи на крышке предусмотрен песочный затвор. Изделия подвешиваются к траверсе, расположенной по оси печи над крышкой. Во время загрузки и выгрузки изделий траверса откатывается в сторону. В конструкции траверсы предусмотрены пружины, приподнимающие ее; когда траверсу нагружают изделием, пружины сжимаются, и траверса садится на упоры.

Печи для термообработки в специальной атмосфере

Для уменьшения угара, получения чистой поверхности нагреваемых для термообработки деталей, а также для термохимических процессов (цементации, азотирования и т. п.) широко применяются муфельные печи или печи с радиационными труба-

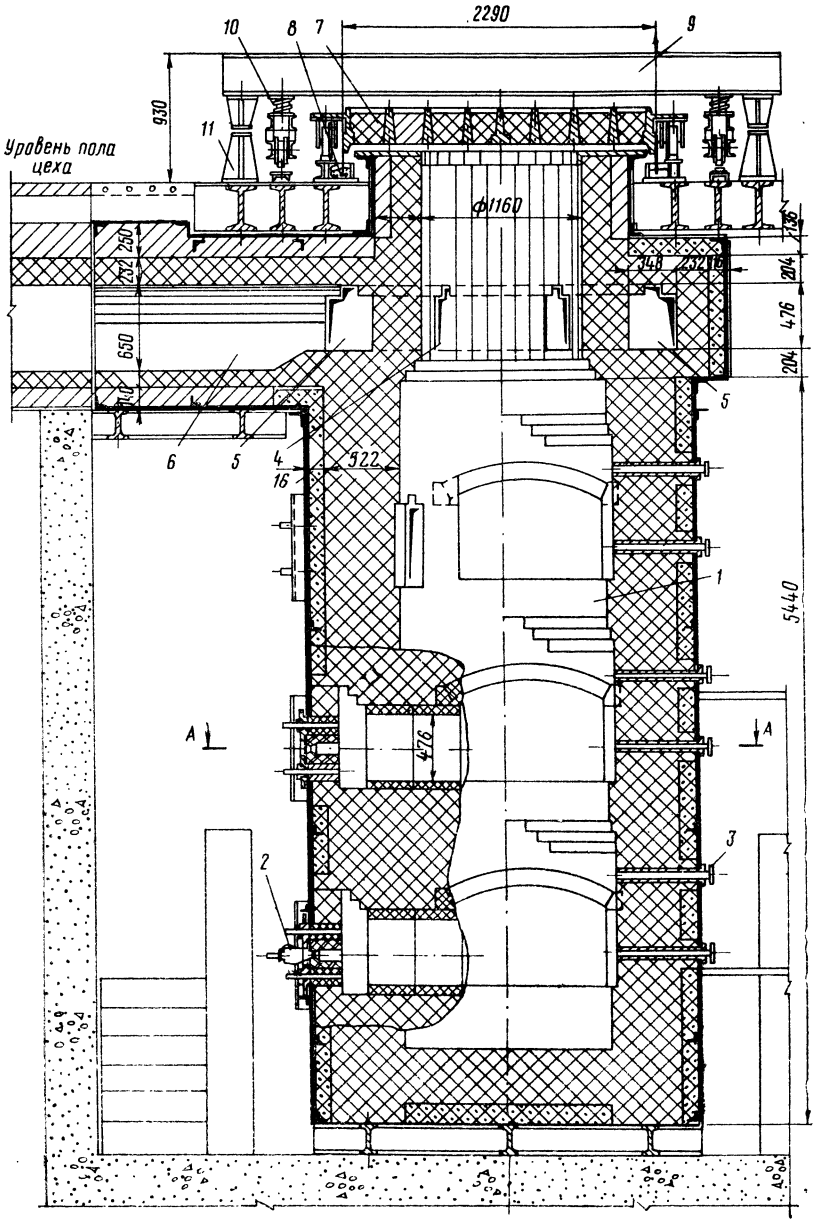
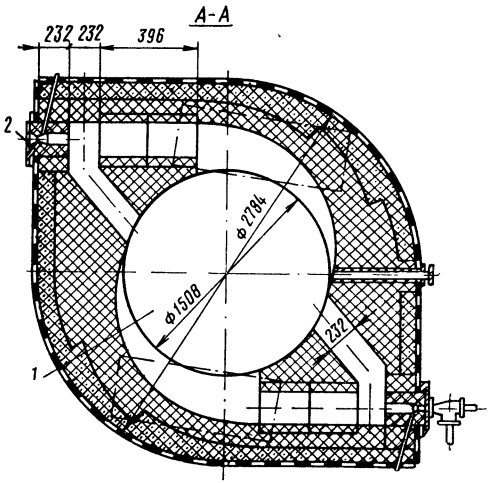


Рис. 57. Вертикальная термическая печь

1 — рабочее пространство; *2* — горелки; *3* — трубки для термопар; *4*—дымовые пролеты; *5* — кольцевой канал; *6* — боров; *7* — крышка; *8* — песочный затвор; *9* — траверса для подвески изделий; *10* — пружина; *11* — упор



ми, в рабочем пространстве которых создается специальная атмосфера, предохраняющая детали от окисления или создающая условия для протекания определенных термохимических процессов. В муфельных печах нагреваемые изделия помещают в муфель, отделяющий их от продуктов горения и заполняемый

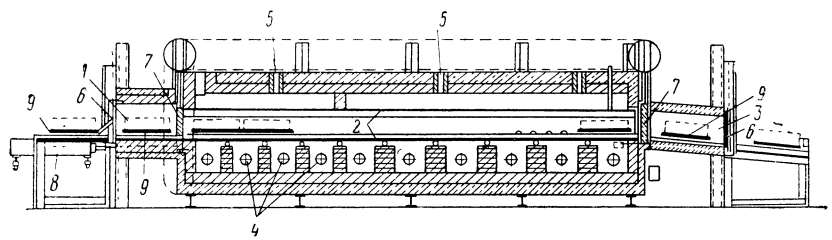


Рис. 58. Муфельная проходная печь

1 — загрузочная камера; *2* — муфель; *3* — разгрузочная камера; *4* — подподовые топки; *5* — отверстия для термопар; *6* — наружные заслонки; *7* — внутренние заслонки; *8* — гидравлический толкатель; *9* — поддон с изделиями

защитной атмосферой, состав которой препятствует образованию окислов на поверхности нагреваемых изделий, или, при газовой цементации, карбюризирующим газом, содержащим углеродистые соединения, науглероживающие поверхность изделий. Муфель обогревается снаружи и передает тепло нагреваемым изделиям. Муфельные печи применяются также и для других химико-термических процессов (например, азотирования).

На рис. 58 показана муфельная проходная толкательная печь с продвижением изделий на поддонах по роликовым на-

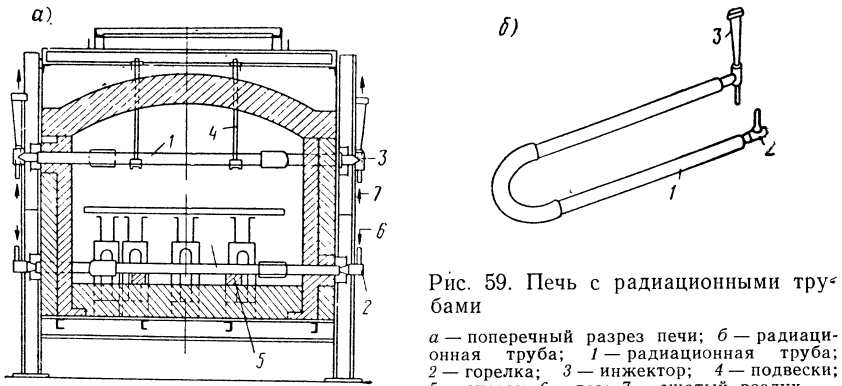


Рис. 59. Печь с радиационными трубами

а — поперечный разрез печи; *б* — радиационная труба; *1* — радиационная труба; *2* — горелка; *3* — инжектор; *4* — подвески; *5* — опоры; *6* — газ; *7* — сжатый воздух

правляющим. Печь имеет подподовые топки, газы из которых омывают муфель снаружи и уходят из печи через отверстия в своде. У торцов печи устроены загрузочная и разгрузочная камеры, отделенные от наружной атмосферы и муфеля герметическими заслонками. Поддоны с уложенными на них изделиями подают в загрузочную камеру вручную, после чего наружную заслонку закрывают, а внутренние — загрузочную и разгрузочную — открывают, затем поддон толкателем подают в муфель. При этом крайний поддон с противоположной стороны муфеля выходит в разгрузочную камеру. После этого внутренние заслонки закрывают, открывают наружную заслонку разгрузочной камеры и выдают из нее поддон с изделием. Далее операции повторяются. Нейтральную атмосферу или карбюризирующий газ подают в муфель через специальные отверстия в нем.

Недостатком описанной конструкции муфельных печей (с муфелированием садки) является высокая стоимость, так как большого размера муфель, отливаемый из специальной хромоникелевой стали, очень дорог. Кроме того, эти печи в случае прогара муфеля или образования в нем трещин должны быть остановлены на длительное время для ремонта. Вследствие этого большее распространение находят печи с муфелированием пламени, так называемые печи с радиационными (излучающими) трубами, в которых газообразное топливо сжигают внутри труб из жаропрочной стали. Трубы нагреваются до высокой температуры и излучают тепло на нагреваемые изделия. Рабочее пространство печи заполняют газом требуемого состава. На рис. 59 показан поперечный разрез печи с радиационными трубами для нагрева рессор перед закалкой. Трубы расположены по всей длине печи сверху и снизу нагреваемых рессор. Верхние трубы укреплены на подвесках, а нижние лежат на опорах. К одному концу каждой трубы подведена горелка, а к другому — работающий от сжатого воздуха инжектор, просасывающий продукты горения через трубу и отводящий их под колпак. Радиационные трубы стоят дешевле муфеля и замена их в случае необходимости может быть осуществлена без остановки печи.

Для термообработки листовой стали применяются так называемые колпаковые печи. Это тоже муфельные печи, состоящие из стационарного пода (стенда) и двух сменных колпаков — отапливаемого и муфельного. Муфельный колпак из жаропрочной стали надевается сверху на подлежащие термообработке рулоны или стопки листовой стали, уложенные на под. Поверх муфельного колпака помещают отапливаемый муфель и газопроводы его подключают к цеховому газопроводу. Под муфельный колпак подают нейтральный газ, включают горелки обогревательного колпака и обогревают муфельный колпак с размещенными в нем рулонами или стопками. По окончании нагрева отапливаемый колпак переносится на другой стенд с муфельным колпаком, а металл остывает на стенде под муфельным колпаком в нейтральной атмосфере. Один обогреваемый колпак обслуживает обычно три стенда с необогреваемыми колпаками.

§ 18. СУШИЛА

Сушкой называется процесс удаления влаги из материала. К сушке также относят процесс твердения лаков и олиф путем окисления их кислородом воздуха (малярные сушила). Сушка бывает естественная и искусственная. Естественная сушка — на открытом воздухе под навесом — производится очень редко, ее применяют при сушке сырца на старых кирпичных заводах и иногда дерева. При искусственной сушке содержащаяся в материале влага поглощается нагретым воздухом или дымовыми газами, которые затем отводят при помощи дымовой трубы или вентилятора.

Сушила с искусственной сушкой бывают пламенные, электрические и паровые, причем пламенные подразделяются на сушила прямого действия, где сушка материалов производится непосредственно продуктами горения, и воздушные, в которых сушильным агентом служит воздух, подогретый в устройствах рекуператорного типа.

В электрических и паровых сушилах сушка производится воздухом, подогретым при помощи электроэнергии (нагревательными элементами) или пара (змеевиками или в воздухоподогревателях). Сушку материалов производят при температуре от 110° С (дерево) до 900—1000° С (глина). Ниже приводится описание наиболее распространенных типов сушил: камерных, конвейерных, туннельных, барабанных, в кипящем слое и пневмопотоке.

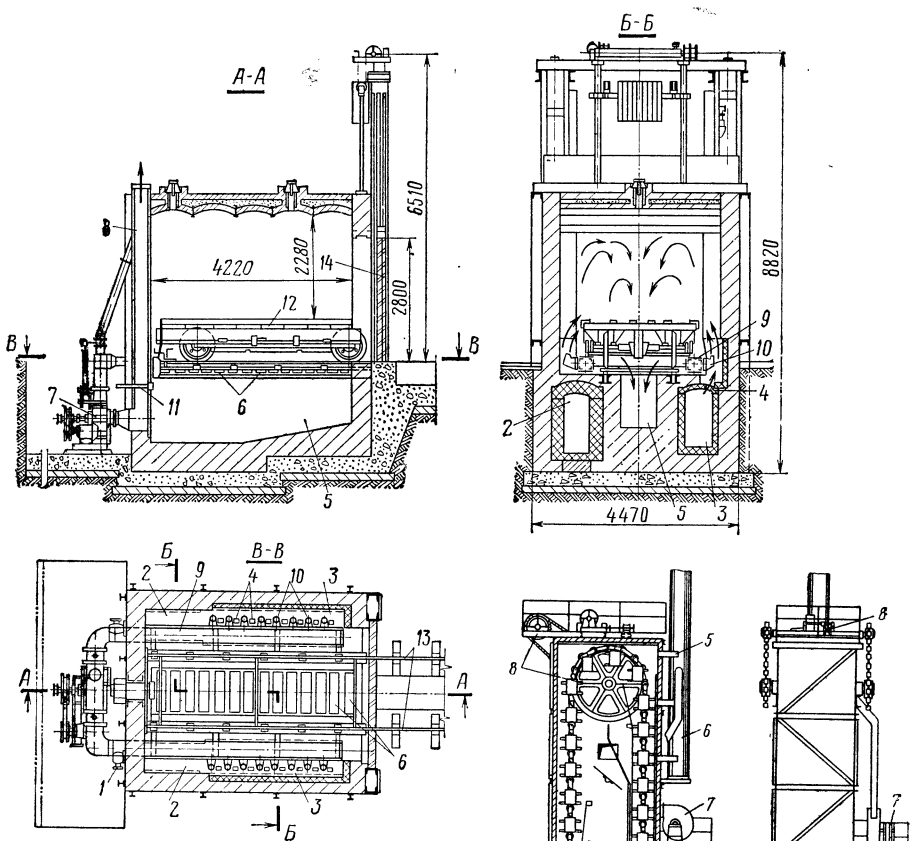


Рис. 60. Камерное сушило для сушки форм

1 — горелка; *2* — топка; *3*—огневые каналы; *4* — отверстия в своде огневых каналов; *5* — отводящий боров; *6* — чугунные плиты с отверстиями; *7* — дымосос; *8* — дымовая труба; *9* — металлический короб; *10* — сопла; *11* — шибер; *12* — тележка; *13* — рельсовый путь; *14* — подъемная дверь

Рис. 61. Вертикальное конвейерное сушило для сушки стержней

1 — конвейер; *2* — полки; *3* — топка; *4* — отверстия в своде; *5* — отверстия для отвода газов; *6* — отводная труба; *7* — вентилятор; *8* — привод конвейера

Камерные сушила

Типовое камерное сушило конструкции Теплопроекта, отапливаемое газом, служит для сушки литейных форм и крупных стержней (рис. 60). Продукты горения из топки проходят по двум боковым каналам и входят в камеру через отверстия в сводах каналов. Уходят продукты горения через расположенный по оси сушила канал, перекрытый чугунными плитами с отверстиями. Сушило запроектировано с искусственной рециркуляцией газов. Дымосос, отсасывающий газы из среднего канала, частично выбрасывает их в дымовую трубу, а частично возвращает в сушило через металлические короба с соплами. Выходя со значительной скоростью из сопел, рециркулируемые газы захватывают выходящие из отверстий боковых каналов продукты горения, перемешиваются с ними, поднимаются вверх и, остывая, опускаются вниз, нагревая высушиваемый материал и отнимая у него влагу. Затем остывшие газы снова уходят в средний канал.

Искусственная рециркуляция создает хорошую циркуляцию газов в камере, что способствует более равномерной и быстрой сушке материалов. Высушиваемый материал укладывают на тележку, передвигаемую по рельсовому пути, проложенному по поду сушила и перед ним. Камера закрывается поднимающимися или открывающимися в сторону дверьми. Сушило работает при температуре 250—500° С, в связи с чем его выкладывают, за исключением топки и боковых каналов, из обыкновенного глиняного кирпича. Топку и боковые каналы футеруют шамотным кирпичом марки ШБ, в зоне топки — в 1 кирпич и дальше в полкирпича.

Вертикальные и горизонтальные конвейерные сушила

В литейных цехах машиностроительных заводов для сушки и подсушки стержней и форм получили распространение механизированные вертикальные и горизонтальные сушила, работающие в автоматическом режиме с технологическим оборудованием цеха. Вертикальные конвейерные сушила применяют для сушки литейных стержней при температуре от 250 до 400° С (рис. 61). Стены сушила выполнены из закрепленных на каркасе панелей, состоящих из двух металлических листов, внутреннее пространство между которыми заполнено изоляцией из минераловатных матов, совелитовых плит или алюминиевой фольги. Внутри рабочего пространства сушила помещены полочный конвейер и топка (газовая или мазутная). Рабочее пространство разделено на две камеры вертикальной перегородкой, не доходящей до верха сушила. В первой камере происходит нагрев и сушка стержней, во второй — охлаждение. Загрузку стержней на полки конвейера и выгрузку их производят че-

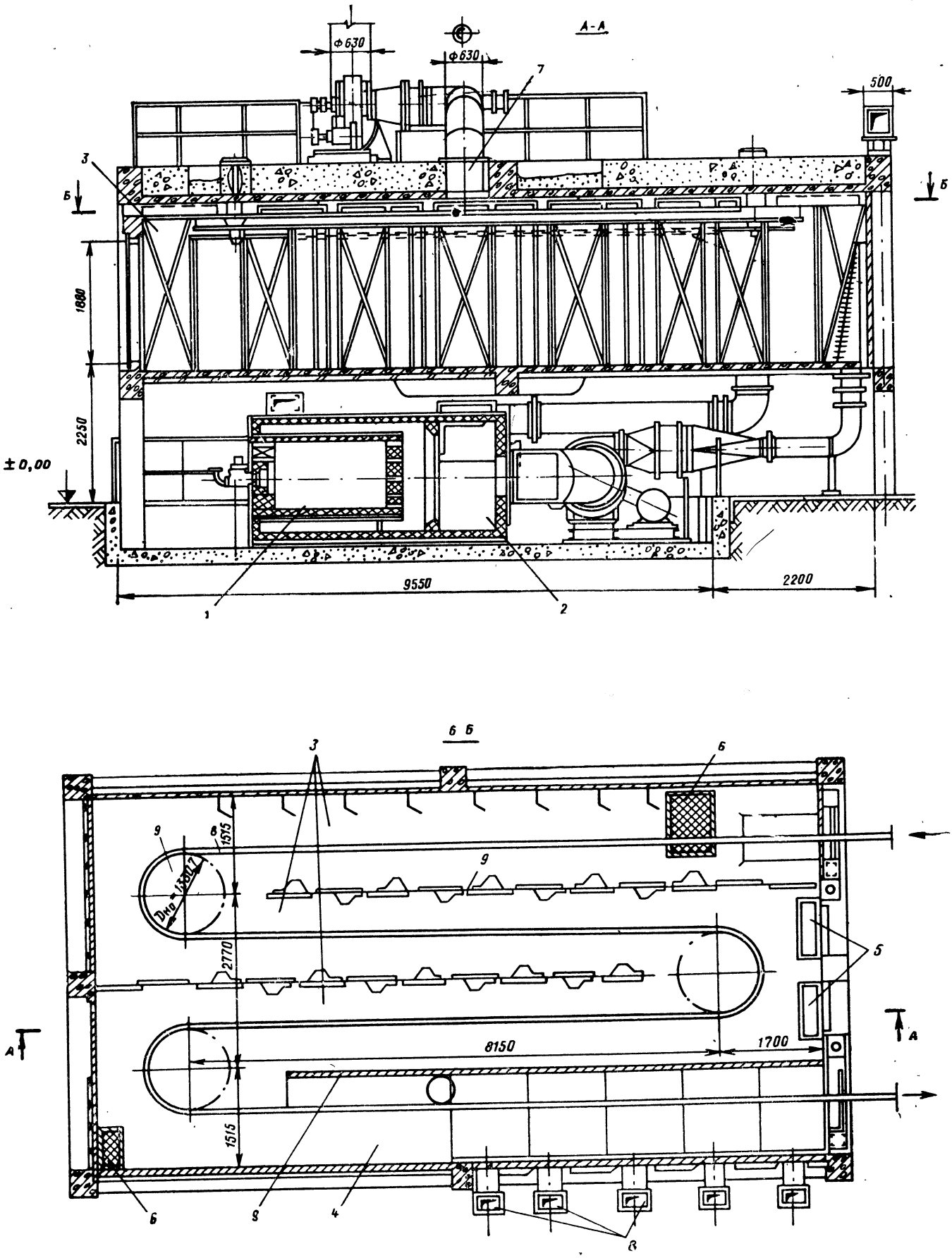


Рис. 62. Горизонтальное конвейерное сушило для сушки теплоизоляционных изделий

1 — топка; *2* — камера смешения; *3* — зона сушки; *4* — зона охлаждения; *5* — подвод теплоносителя; *6* — отбор газов на рециркуляцию; *7* — отбор газов на выброс; *8* — подача холодного воздуха; *9* — перегородка

рез окна, расположенные с противоположных сторон сушила внизу. Горячие газы из топки выходят через отверстия в своде топки, высушивают стержни и затем уходят через отверстие в стенке в дымовую трубу. Вентилятор, установленный на каркасе сушила, засасывает частично рециркулируемые газы и частично свежий воздух, попадающий в камеру охлаждения через окно выгрузки, а затем подает их в топку для разбавления свежих горячих продуктов горения и в отводную трубу для создания эжекции.

Горизонтальные конвейерные сушила (рис. 62) применяют в литейных цехах для сушки крупных стержней и поверхностной подсушки форм при температуре 250—450° С и в малярных цехах для сушки окрашенных изделий при температуре 120° С. Конвейеры в них расположены горизонтально и, как правило, выходят в цех для более удобной загрузки и выгрузки стержней, форм или изделий. Стержни и формы укладывают на этажерки, подвешенные к конвейеру, а изделия подвешивают на крюки конвейера.

Камера сушки четырехходового горизонтального сушила с подвесным конвейером, показанного на рис. 62, выполнена в железобетонном корпусе вместе с зоной охлаждения. Часто ограждение горизонтальных сушил выполняется аналогично показанному на рис. 61 вертикальному сушилу — металлический каркас, заполненный металлическими панелями с заложенной внутри них изоляцией. Теплоноситель — продукты сгорания мазута, сжигаемого в расположенной под камерой сушки топке, смешанные в камере смешения с рециркуляционными газами, — поступает в камеру сушила при температуре 500—700° С двумя потоками: противоточным в зоне сушки и прямоточным в зоне физико-химических преобразований, затем потоки направляются к коробам отсоса и далее в камеру смешения. Часть отработанных газов удаляется в атмосферу.

Привод цепей конвейера, к которым подвешены этажерки с высушиваемыми изделиями, расположен вне печи. Цепи конвейера также выходят из печи в цех для загрузки на этажерки подлежащих сушке изделий и съема с этажерок высушенных изделий. Изделия, уложенные на поддоны, грузятся на этажерки. Внутри камеры устроены перегородки, отделяющие один ход сушила от другого. На перегородках и стене камеры охлаждения имеются специальные панели для направления и завихрения потока газов. В зону охлаждения подается холодный воздух из цеха.

Для сушки небольших форм применяют проходные сушила с сетчатыми конвейерами.

Туннельные сушила

Туннельные сушила применяют главным образом для сушки керамических и теплоизоляционных изделий. Они представляют собой туннель, по которому периодически передвигается поезд вагонеток с высушиваемым материалом (рис. 63). Туннельные сушила работают чаще всего по принципу противотока — сушильный агент (продукты горения, отходящие газы из обжиговых печей или подогретый воздух) подается в направлении, противоположном направлению движения вагонеток. Применяют также сушила прямоточные — вагонетки и сушильный агент движутся в одном направлении — и с использованием прямотока и противотока комбинированно, как это показано на рис. 62. Часто для удобства компоновки цеха туннели соединяют в блоки из нескольких параллельных туннелей. Иногда туннельные сушила блокируются с туннельными обжиговыми печами — вагонетки непосредственно из туннеля сушила поступают в туннель обжиговой печи. Длина туннеля обычно равняется 15—30 *м*, ширина 0,9—2,0 *м* и высота в свету 1,6—2 *м*. Стены туннелей выполняют из железобетона, обыкновенного глиняного кирпича или металлических панелей с изоляцией минераловатными матами. Двери сушил во избежание больших потерь тепла должны плотно закрываться.

На рис. 62 показан блок из двух сушил для сушки теплоизоляционных изделий. Топки сушил выполнены в самостоятельном каркасе и установлены на площадке сушила. Мазут сжигается в форсунках низкого давления. В каждой топке установлено по одной форсунке. Температура топочных газов, уходящих из камеры горения, порядка 1000—1100° С. В камере смешения топочные газы охлаждаются до 500—700° С за счет подсоса холодного воздуха из цеха. Свежие топочные газы с температурой 500—700° С и отработанные дымовые газы с температурой 80° С поступают в смеситель, откуда полученная рабочая смесь с температурой 200—220° С нагнетается циркуляционным вентилятором в распределительные короба на стороне загрузки и выгрузки. В каждой зоне туннеля установлен самостоятельный вентилятор. Предусмотрена возможность самостоятельного регулирования температуры теплоносителя на стороне выгрузки до 150—160° С за счет подсоса холодного воздуха перед вентилятором. Проходя через туннель, теплоноситель отдает тепло материалу, насыщается влагой и через жалюзийные короба поступает в сборные короба, откуда часть газов возвращается на рециркуляцию, а избыток отсасывается выхлопным вентилятором и выбрасывается в атмосферу. Для охлаждения высушенных изделий до 40—50° С предусмотрена камера охлаждения, в которой изделия охлаждаются за счет атмосферного воздуха, нагнетаемого в камеру вентилятором. Удаление отработанного воздуха осуществляется также вентилятором.

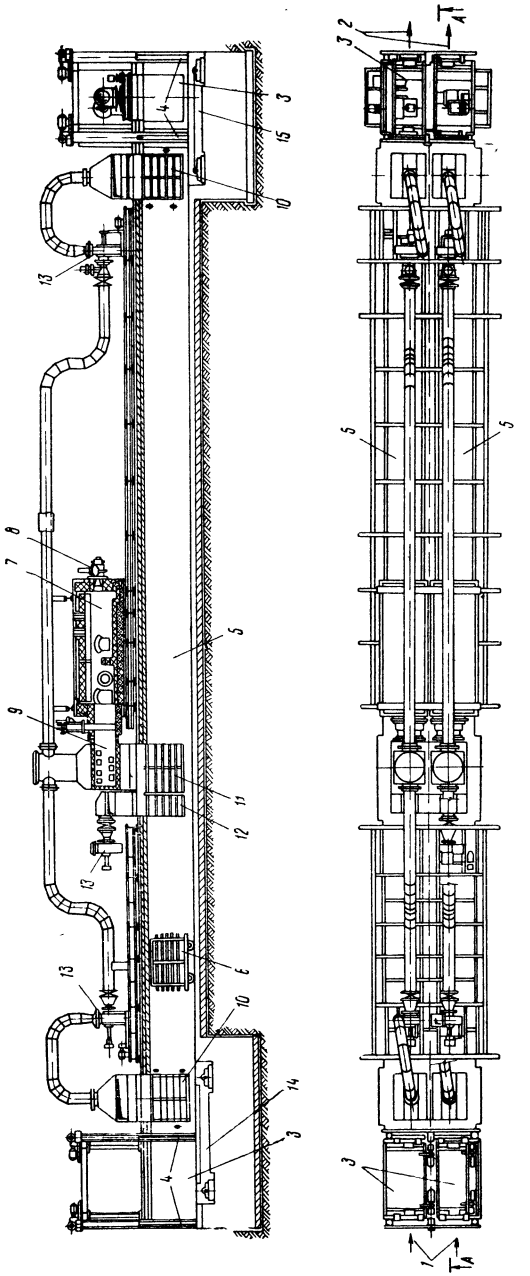


Рис. 63. Туннельное сушило для сушки теплоизоляционных изделий

1 — загрузка; *2* — выгрузка; *3* — загрузочный и выгрузочный тамбуры; *4* — подъемные двери; *5* — туннель; *6* — вагонетка с этажеркой; *7* — топка; *8* — форсунка; *9* — камера смешения; *10* — подача теплоносителя; *11* — отбор газов на рециркуляцию; *12* — отбор газов на выброс; *13* — вентиляторы; *14* — толкатель; *15* — выталкиватель

Барабанные сушила

Для сушки сыпучих и мелкокусковых материалов применяют барабанные сушила, представляющие собой наклонный под углом 4—6° к горизонту полый барабан, вращающийся со скоростью 0,5—8 *об/мин* (рис. 64). Высушиваемый материал загружается в верхний конец барабана и при вращении его передвигается к разгрузочному устройству. Сушка осуществляется дымовыми газами, поступающими со стороны загрузки материалов и уходящими с конца выгрузки (некоторые сушила работают по принципу противотока). Длина барабана составляет обычно 8—14 *м* при диаметре от 1,5 до 2,8 *м*. Барабан опирается бандажами, охватывающими цилиндрический кожух, на ролики и приводится во вращение электродвигателем через редуктор и пару зубчатых колес, одно из которых закреплено в виде венца на барабане. Для предотвращения сползания барабана устанавливаются упорные ролики, соприкасающиеся с бандажами сбоку. Загрузка и выгрузка материала происходит непрерывно. Для уплотнения мест стыков вращающегося барабана и неподвижных топочной камеры и камеры для отбора отработанных газов

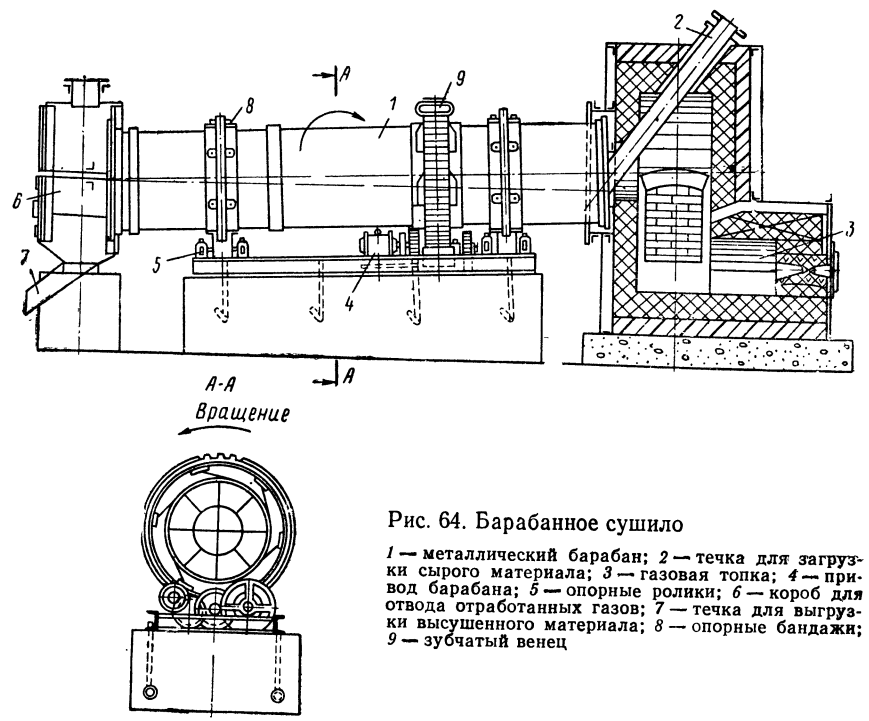


Рис. 64. Барабанное сушило

1 — металлический барабан; *2* — течка для загрузки сырого материала; *3* — газовая топка; *4* — привод барабана; *5* — опорные ролики; *6* — короб для отвода отработанных газов; *7* — течка для выгрузки высушенного материала; *8* — опорные бандажи; *9* — зубчатый венец

делают лабиринтные уплотнения. Сушильные барабаны снабжаются различными системами внутренних устройств для разделения материала на мелкие потоки и пересыпания его во время сушки для интенсивного омывания газами.

Сушила для сушки материала в пневмопотоке и в кипящем слое

Для интенсификации процесса сушки в последние годы начала внедряться сушка сыпучих материалов в пневмопотоке и в кипящем слое. Такие сушила имеют ряд преимуществ по сравнению с барабанными: сушка происходит более интенсивно с резким сокращением пребывания материала в сушиле, уменьшается стоимость установки при той же производительности. В пневмопоточных сушилах процесс сушки сочетается с пневмотранспортом высушиваемого материала. Сырые сыпучие материалы при помощи питателя подаются в трубу, где со скоростью, в несколько раз превышающей скорость витания крупинок высушиваемого материала, движется теплоноситель. Благодаря большой поверхности соприкосновения сыпучего материала с теплоносителем и большой скорости омывания его теплоносителем происходит быстрая сушка — в течение нескольких секунд. При выходе из трубы высушенный материал отделяется в сепараторе и охлаждается в холодильнике. Разработанная Теплопроектом установка для сушки песка (рис. 65) состоит из топки с камерой смешения, трубы, в верхней части которой расположен сепаратор для отделения и выгрузки песка, холодильника и циклонов для осаждения пыли из выбрасываемых отработавших газов. В нижней части трубы расположен питатель сырого песка. Материал поступает из бункера через питатель в трубу, подхватывается сушильным агентом, имеющим температуру 800° С, высушивается, отделяется в сепараторе и охлаждается в холодильнике.

Принцип действия сушила в кипящем слое заключается в том, что через слой высушиваемого материала, лежащего на решетке, с определенной скоростью продувают теплоноситель (воздух, дымовые газы); при этом слой расширяется, высота его увеличивается, он становится похожим на кипящую жидкость (псевдоожиженное состояние). На рис. 66 показана установка, разработанная для сушки формовочных песков, которая работает на газе или мазуте. Установка состоит из топки для сжигания топлива, камеры смешения, рабочей решетки, рабочей камеры, загрузочного и разгрузочного устройств, дымоотсасывающей установки с пылеуловителями для очистки отработавших газов и холодильника. Живое сечение рабочей решетки примерно 3%. Вся установка работает под разрежением. Газ, подаваемый в сушило, выполняет две функции: приводит материал в псевдо-

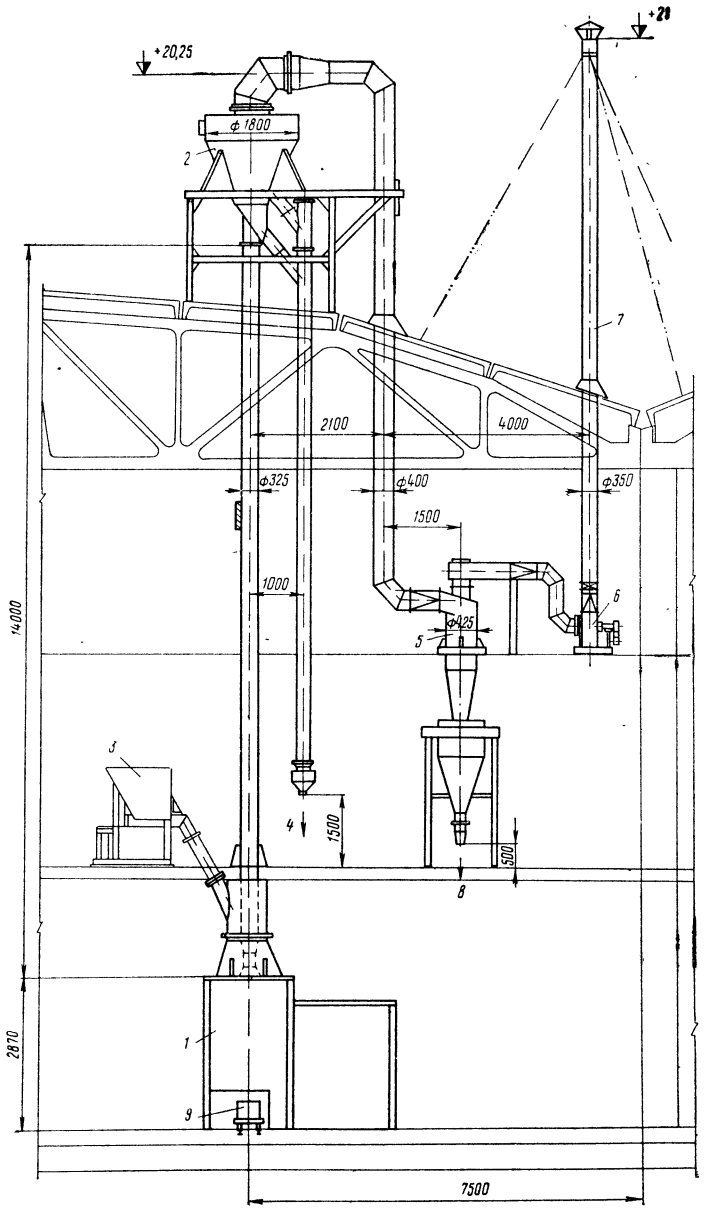


Рис. 65. Установка для сушки сыпучих материалов в пневмопотоке

1 — топка; *2* — сепаратор; *3* — загрузка сырого материала; *4* — выгрузка высушенного материала; *5* — циклон для очистки отходящих газов; *6* — вентилятор; *7* — дымовая труба; *8* — удаление осажденной из отходящих газов пыли; *9* — вагонетка для удаления крупных кусков сушимого материала

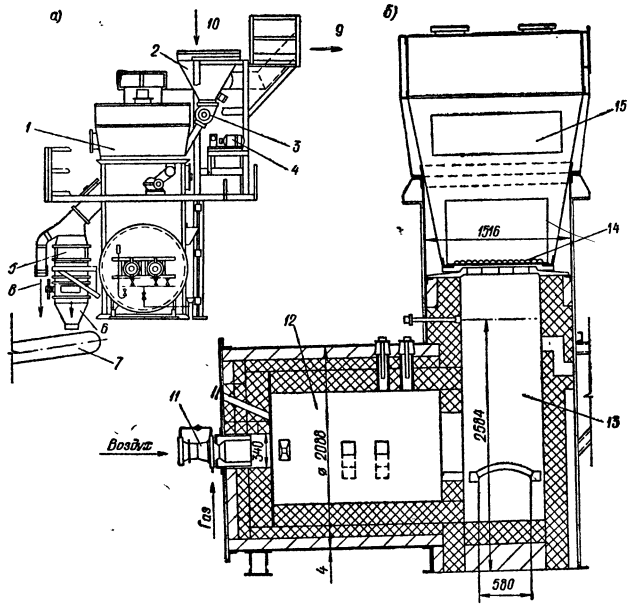


Рис. 66. Установка для сушки сыпучих материалов в кипящем слое

а — общий вид установки; *б* — рабочая камера с топкой; *1* — рабочая камера с топкой; *2* — загрузочный бункер; *3* — питатель; *4* — привод питателя; *5* — холодильник; *6* — выдача сухого материала; *7* — конвейер; *8* — выдача крупных частиц; *9* — в циклон и дымовую трубу; *10* — загрузка сырого материала; *11* — горелки; *12* — топка; *13* — камера смешения; *14* — решетка; *15* — рабочая камера

ожиженное состояние и отбирает у высушиваемого материала влагу.

Рабочая решетка бывает двух типов: провальная и беспровальная. В беспровальной решетке сверху над отверстиями устанавливаются колпачки или разрезанная пополам труба с боковыми отверстиями (см. рис. 65), препятствующие просыпанию высушиваемого материала.

Для сушки материалов, выдерживающих высокую температуру теплоносителя (1000—1200° С), применяют распределительные решетки из жаростойкого бетона с колпачками из шамота или других жароупорных материалов.

ГЛАВА VI

ПЛАВИЛЬНЫЕ ПЕЧИ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

§ 19. ДОМЕННЫЕ ПЕЧИ

Элементы доменной печи и основы доменного процесса

Доменная печь относится к шахтным печам и служит для выплавки чугуна из железных руд (рис. 67). Верхняя цилиндрическая часть печи называется колошником и служит для приемки материалов и отвода газов. Расположенная ниже коническая часть печи называется шахтой. Цилиндрическая часть печи, расположенная ниже шахты, носит название распар и соединяет верхнюю коническую часть с нижней обратной конической частью печи — заплечиками. Расширяющаяся конусообразная форма шахты способствует опусканию материалов, а суживающаяся форма заплечиков соответствует уменьшению объема материалов вследствие их плавления. Нижняя цилиндрическая часть печи называется горном. В верхней части горна — фурменной зоне — вводится в печь дутье и происходит сгорание кокса, а в нижней — металлоприемнике — скапливаются расплавленный чугун и шлак.

Чугуном называют сплав железа с углеродом, в котором содержится от 2 до 4,3% углерода и незначительное количество примесей: кремния, марганца, серы и фосфора.

Железо содержится в руде в количестве 35—70% в виде окислов: Fe_2O_3, Fe_3O_4 и FeO.

При выплавке чугуна из руды протекают сложные химические процессы, заключающиеся в том, что находящееся в руде железо освобождается от химически связанного с ним кислорода, т. е. восстанавливается. Одновременно железо освобождается от пустой породы и части вредных примесей (серы, фосфора), содержащихся в руде, и поглощает некоторое количество углерода, марганца и кремния.

Исходные материалы — кокс, руда и известь, служащая плавнем (флюсом) для пустой породы, называемые шихтой, — загружают в печь сверху через колошник. Опускаясь вниз навстречу поднимающимся продуктам горения, они постепенно высушиваются и нагреваются. Воздух для горения подается в фурменную зону, где происходит сгорание кокса.

Продукты горения, поднимаясь вверх, раскаляют близлежащие слои кокса и руды; при этом углерод кокса вступает в реакцию с окислами железа и восстанавливает их по формулам:

$$3Fe_2O_3 + C = 2Fe_3O_4 + CO;$$

$$Fe_3O_4 + C = 3FeO + CO;$$

$$FeO + C = Fe + CO.$$

Одновременно углекислый газ, образовавшийся от сгорания кокса, проходя через его раскаленный слой, взаимодействует с углеродом и превращается в окись углерода $CO_2+C=2CO$. Окись углерода в свою очередь является восстановителем железа по формулам:

$$3Fe_2O_3 + CO = 2Fe_3O_4 + CO_2;$$

$$Fe_3O_4 + CO = 3FeO + CO_2;$$

$$FeO + CO = Fe + CO_2.$$

Восстановленное железо поглощает некоторое количество углерода и других примесей (марганца, кремния) и образует чугун. Чугун и пустая порода с известью в зоне высоких температур плавятся, при этом чугун как более тяжелый опускается вниз, а сплав пустой породы с известью — шлак — скопляется поверх слоя чугуна.

Выпуск чугуна и шлака из доменной печи в чугуновозные и шлаковозные ковши производят через отверстия в горне — летки; причем шлаковая летка расположена несколько выше чугунной. Выпуск чугуна производится 6—8 раз в сутки, а шлака — каждый час.

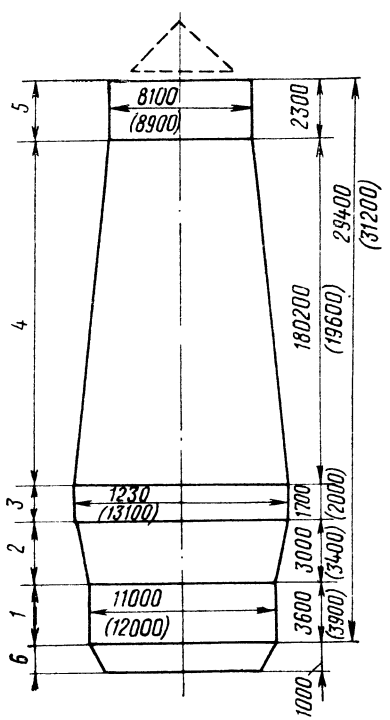


Рис. 67. Профиль доменной печи объемом 2700 и 3200 $м^3$ (в скобках размеры печи $V=3200$ $м^3$)
1 — горн; *2* — заплечики; *3*—распар; *4*—шахта; *5* — колошник; *6* — ось чугунной летки

Чугун является основным продуктом доменной плавки. Он подается в жидком виде в конверторы или мартеновские печи для переплавки в сталь или в специальные разливочные машины для разливки в чушки, которые затем идут также для переплавки в сталь или для изготовления чугунных отливок.

Шлак — побочный продукт, его количество составляет до 60% веса выплавленного чугуна; он используется как дешевый строительный материал для приготовления шлаковой ваты, цемента, бетона, кирпича и др.

Отходящие из печи газы содержат значительное количество окиси углерода, являются горючими с теплотворностью 3560—4190 *кДж/м³* [850—1000 *ккал/м³*]. В связи с тем что они выносят из печи значительное количество пылевидной руды, так называемой колошниковой пыли, их перед использованием пропускают через пылеуловитель и газоочистку, где пыль оседает.

Очищенный доменный газ используют как топливо для коксовых батарей и паровых котлов; в смеси с коксовальным газом он идет для отопления воздухонагревателей доменных печей, мартеновских и нагревательных печей. При сжигании 1 *т* кокса получается около 4000 $м^3$ газа.

В наиболее высокотемпературной зоне печи требуется температура порядка 1800° С, а при выплавке специальных сортов чугуна даже 2000° С. Получить такие температуры при подаче холодного воздуха для горения кокса нельзя. В связи с этим воздух перед подачей в доменную печь подогревают до температуры 900—1200° С в воздухонагревателях регенеративного типа.

Каждая доменная печь оборудуется тремя-четырьмя воздухонагревателями, через один из которых подается подогреваемый воздух, а три (два) других в это время находятся на разогреве. Нагрев насадки воздухонагревателей ведется за счет сжигания в них смеси коксо-доменного или природного газа. Для создания в печи давления, достаточного для преодоления сопротивления столба шихты, воздух (дутье) подается под давлением 3—4 *кгс/см²* и выше от специальной воздуходувки.

Схема доменной печи показана на рис. 68.

Шихтовые материалы хранят в бункерах, откуда их подают в колошник с помощью наклонного подъемника[1]. По наклонному мосту подъемника проложены два рельсовых пути, по которым движутся навстречу друг другу две вагонетки — скипы. Достигнув верхнего положения, скип опрокидывается и материалы высыпаются в приемную воронку печи. В это время в скип, находящийся в нижнем положении, засыпают материалы из бункеров, после чего опорожненный скип опускают, а загруженный поднимают. Вся работа по загрузке печи автоматизирована.

Величина доменной печи характеризуется полезным объемом ее рабочего пространства. В Советском Союзе наиболее распространены печи объемом 2000 $м^3$. В настоящее время строятся печи объемом 3200 $м^3$ и подготовляется строительство доменной печи объемом 5000 $м^3$.

Отношение полезного объема печи к ее суточной производительности $\frac{V}{P}$ называется коэффициентом использования полез-

[1] В печи объемом 5000 $м^3$ шихта в приемную воронку подается конвейерами.

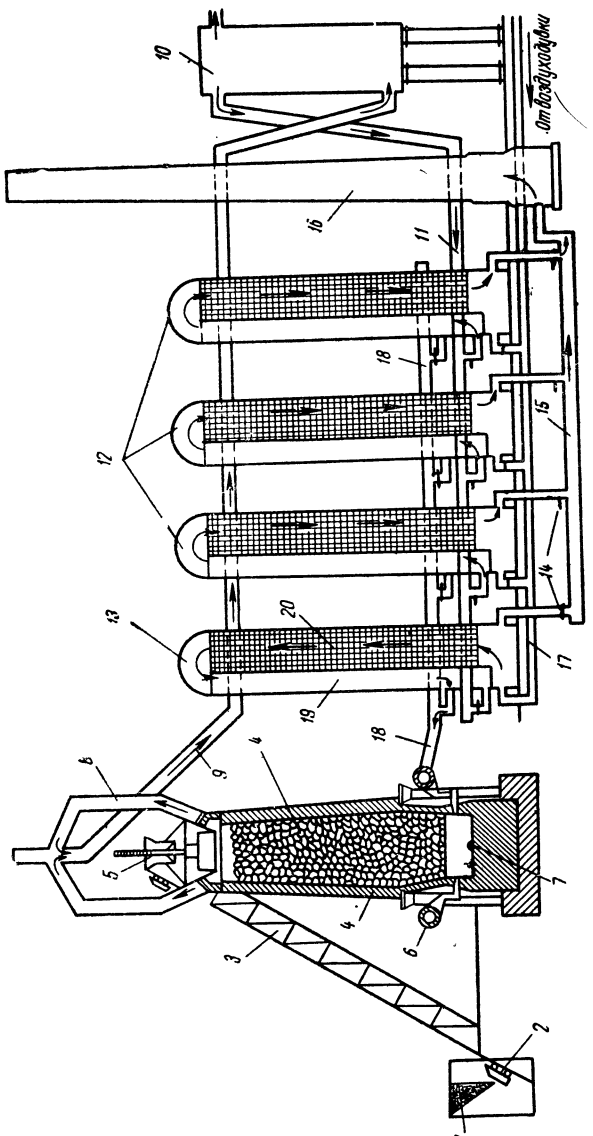


Рис. 68. Схема работы доменной печи

1 — бункер; *2* — скип; *3* — наклонный мост; *4* — доменная печь; *5* — приемная воронка; *6* — кольцевой воздухопровод; *7* — чугунная летка; *8* — газоотводы; *9* — нисходящий газопровод; *10* — газоочистка; *11* — газопровод чистого газа; *12* — воздухонагреватели на «газе»; *13* — воздухонагреватель на «воздухе»; *14* — дымовые клапаны; *15* — боров; *16* — дымовая труба; *17* — воздухопровод холодного воздуха; *18* — прямой воздухопровод горячего воздуха; *19*—камера горения; *20*—насадка

ного объема печи (КИПО). Величина КИПО колеблется в среднем от 0,55 до 0,8. Таким образом, суточная производительность печи объемом 3200 $м^3$ при КИПО=0,55 достигает $\frac{3200}{0,55}$ = =5800 *т* чугуна. На получение 1 *т* чугуна расходуется около 0,8—0,85 *т* кокса.

Конструкция доменной печи

Доменная печь заключена снаружи в сплошной стальной кожух с толщиной листов до 40—60 *мм*, футерованный изнутри огнеупорными изделиями и расположенный на фундаменте (рис. 69).

Часть фундамента, которая возвышается над землей, называется пнем. Так как в пне развиваются температуры выше 200° С, то верхнюю часть его выполняют из жаростойкого бетона.

На пне выкладывают лещадь. Кладка лещади эксплуатируется в очень тяжелых условиях, так как подвергается действию высокой температуры (порядка 1400—1550° С) и гидростатического давления чугуна, шлака и массы шихты. Помимо этого, чугун проникает в швы кладки. Если при этом кирпич не будет достаточно хорошо зажат соседними кирпичами, то он, имея меньшую объемную массу, чем чугун, всплывет. Этим самым ослабляется зажим соседних

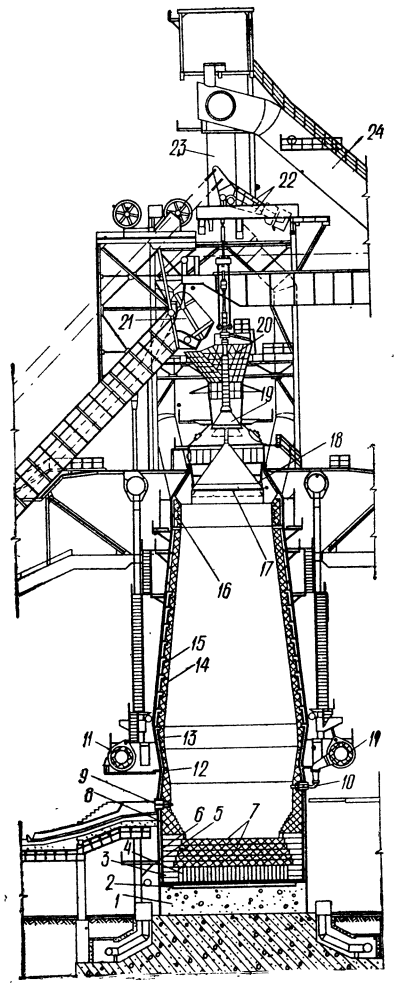


Рис. 69. Доменная печь объемом 3200 $м^3$

1 — печь из жароупорного бетона; *2* — подлещадные холодильники; *3* — периферийные углеродистые блоки; *4* — вертикальные углеродистые блоки; *5* — вертикальные холодильники; *6* — углеродистая набойка; *7* — высокоглиноземистая часть лещади; *8* — кладка горна; *9* — шлаковая летка; *10* — воздушная фурма; *11* — кольцевой воздухопровод; *12*—заплечики; *13*—распар; *14*—кладка шахты; *15* — вертикальные холодильники шахты; *16* — защитные сегменты; *17* — большой конус; *18* — чаша; *19* — малый конус; *20* — загрузочная воронка; *21*—скип; *22* — балансиры конусов; *23* — газоотводы; *24* — нисходящий газопровод

кирпичей, что может повлечь разрушение лещади. Поэтому лещадь выкладывают из высокоогнеупорных материалов (высокоглиноземистого кирпича) с очень тонкими швами между отдельными кирпичами (или блоками).

Для понижения температуры кладки лещади по периферии внутри кожуха помещают холодильники — чугунные плиты с залитыми внутри их змеевиками, по которым циркулирует вода. Снизу лещади в современных печах располагают чугунные плиты с трубами, охлаждаемыми вентиляторным воздухом.

Для улучшения передачи тепла от кладки лещади к холодильникам нижнюю часть лещади и периферию ее в верхней части выкладывают из графитированных или углеродистых блоков, имеющих бо́льшую теплопроводность, чем шамотный и высокоглиноземистый кирпич, а зазор между кладкой и холодильниками заполняют углеродистой массой. Высота лещади достигает 5000 *мм*.

Кладка металлоприемника подвержена действию высоких температур (1500—1700° С) и разъедающему действию чугуна и шлака, поэтому ее также выкладывают из высокоогнеупорных материалов с тонкими швами. Футеровка металлоприемника в печах объемом 2000—3200 $м^3$ достигает толщины 1600—2500 *мм* и, так же как и лещадь, охлаждается вертикальными плитовыми холодильниками. Нижнюю часть футеровки металлоприемника выполняют из углеродистых блоков.

Чугунная летка располагается несколько выше лещади, в связи с чем на последней образуется мертвый слой жидкого чугуна, предохраняющий ее от разрушения чугуном (при выпуске последнего через летку) и шлаком. В месте прохода чугунной летки углеродистые блоки заменяют кладкой из высокоглиноземистого кирпича. Летку выкладывают в виде прямоугольного канала размером 200×300 *мм* и заключают в специальную металлическую раму. Чугунную часть летки во время работы печи закрывают пробкой из огнеупорной массы, забиваемой при помощи механизма, называемого электропушкой. Для выпуска чугуна в пробке пробивают электробуром отверстие.

Шлаковые летки (обычно их две) располагают на высоте 1800—2600 *мм* от лещади. Шлаковая фурма конической формы охлаждается водой и имеет отверстие для выпуска шлака диаметром 65 *мм*.

Фурма входит в медный холодильник, поверх которого имеется еще один чугунный холодильник со змеевиком (рис. 70). Отверстие шлаковой летки закрывают специальным стопором.

Кладка фурменной зоны подвергается действию высокой температуры (1600—1700° С) и химическому воздействию капель шлака и чугуна, стекающих в металлоприемник; она выполняется из шамотного кирпича марки ША с тонкими швами. Толщина футеровки фурменной зоны колеблется от 1250 до 345 *мм*.

Конструкция воздушных фурм аналогична устройству шлаковых, только отверстие для вставки сопла, подающего воздух, больше отверстия для выпуска шлака (диаметр 175—200 *мм*). Конец воздушной фурмы несколько выступает из футеровки внутрь печи, чтобы отвести поток газа от футеровки.

Заплечики подвергаются действию высокой температуры, истиранию кусками руды и кокса и разъеданию каплями шлака. Их выполняют из шамотного кирпича марки ША с тонкими швами. Во всех современных печах применяют тонкостенные заплечики с футеровкой толщиной 345 *мм*, охлаждаемой плитовыми холодильниками. Благодаря интенсивному охлаждению заплечиков на их поверхности образуется слой шлака с большим содержанием углерода — гарнисаж, защищающий кладку от воздействия жидких продуктов плавки.

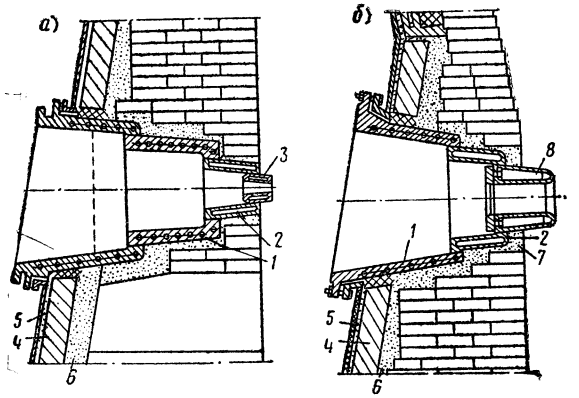


Рис. 70. Шлаковая фурма (*а*) и воздушная фурма (*б*)

1 — чугунный холодильник; *2* — медный холодильник; *3* — шлаковая фурма; *4*—вертикальные холодильники; *5* — кожух; *6* — углеродистая масса; *7* — шамотно-глинистая масса; *8* — воздушная фурма

Распар бывает тонкостенный — с футеровкой толщиной 345 *мм* и толстостенный — с футеровкой толщиной 1380—690 *мм*. Футеровка тонкостенного распара аналогична футеровке заплечиков, а толстостенного — футеровке шахты.

Температура в шахте изменяется от 1000 до 1100° С в нижней части, до 200—350° С — в верхней части. В связи с этим для кладки шахты применяют менее огнеупорный кирпич марки ШБ, чем для низа доменной печи. Кладка шахты в основном подвергается истирающему действию опускающихся кусков шихты. Помимо этого, в верхней части шахты в зоне температур 300—700° С происходит отложение в порах и трещинах кирпича и в швах кладки сажистого углерода, металлического цинка и окиси цинка — цинкита.

Сажистый углерод образуется в газах в результате так называемой реакции Белля: $2CO=CO_2+C$, протекающей в присутствии окиси железа при температуре 450—700° С. Сажистый углерод со временем претерпевает полиморфные превращения (переходя из одной модификации в другую), сопровождающиеся увеличением объема, что влечет за собой разрушение кладки.

Аналогичное действие на кладку оказывает содержащийся в некоторых железных рудах цинк. Отлагаясь в кладке и соединяясь в дальнейшем с окисью или двуокисью углерода, он переходит в окись цинка ($Zn+CO_2=ZnO+CO$, $Zn+CO=ZnO+C$), что сопровождается увеличением объема.

В связи с этим для футеровки шахты применяют высокопрочный кирпич, хорошо сопротивляющийся истиранию. При этом кирпич должен быть плотным, малопористым, без трещин и с малым содержанием окиси железа.

Кладка толстостенного распара (или шахты) печей объемом до 2000 $м^3$ основывается на широком металлическом кольце, называемом моратором, опирающемся на колонны. В печах объемом 2700, 3200 и 5000 $м^3$ распар (шахта) опирается на консоль вертикального холодильника. Толщина футеровки шахты 750—920 *мм*. В нижней части шахта охлаждается аналогично горну и заплечикам плитовыми вертикальными холодильниками или в старых печах горизонтальными холодильниками, закладываемыми в кладку. Колошниковую часть кладки шахты предохраняют от разрушения ударами загружаемых материалов стальными защитными сегментами. Колошниковое устройство служит для равномерной загрузки шихты в печь и отвода газов.

Засыпной аппарат состоит из приемной воронки, куда засыпают материал, малого конуса, закрывающего снизу приемную воронку, и большого конуса, прилегающего к чаше, прикрепленной на фланце опорного кольца шахты. Малый конус закреплен на полой штанге, внутри которой проходит штанга большого конуса. При загрузке сначала опускают малый конус и материал из приемной воронки высыпается на большой конус, затем малый конус поднимают, закрывая отверстие приемной воронки, а большой конус опускают, высыпая материалы в печь. Двойной запор сделан для того, чтобы во время засыпки газы не выбивались наружу. Опускание и подъем конусов производят при помощи рычагов — балансиров, соединенных с тросом конусной лебедки. Приемная воронка состоит из неподвижной и вращающейся частей. Последняя для равномерного распределения материалов по окружности печи поворачивается вместе с малым конусом на определенный угол после загрузки каждой очередной порции материалов. Работа засыпного устройства автоматизирована и связана с работой скипового подъемника. Колошниковый газ, имеющий температуру 150—300° С, уходит в газоотводы через четыре отверстия в куполе печи.

Воздухонагреватели

Воздухонагреватель доменной печи представляет собой цилиндрический кожух высотой 35—55 *м* и диаметром 8—10,5 *м* с днищем и куполообразным верхом, сваренный из листовой стали толщиной 20 *мм* (рис. 71). В связи с необходимостью применения в верхней части высокотемпературных воздухонагревателей усиленной теплоизоляции кожух имеет в верхней части несколько больший диаметр, чем внизу. Изнутри кожух футеруют шамотным, а у высокотемпературных воздухонагревателей в верхней части — высокоглиноземистым кирпичом. Внутри воздухонагревателя размещается камера горения, служащая для сжигания газа. Остальное пространство заполняется насадкой, аналогичной насадке регенераторов со сплошными каналами (см. рис. 36, *в*). В воздухонагревателях печей объемом 3200 и 5000 $м^3$ насадка предусмотрена из специальных фасонных кирпичей с отверстиями. В воздухонагревателях доменных печей объемом 5000 $м^3$ камера горения вынесена наружу в самостоятельном кожухе, а в воздухонагревателе все внутреннее пространство занято насадкой.

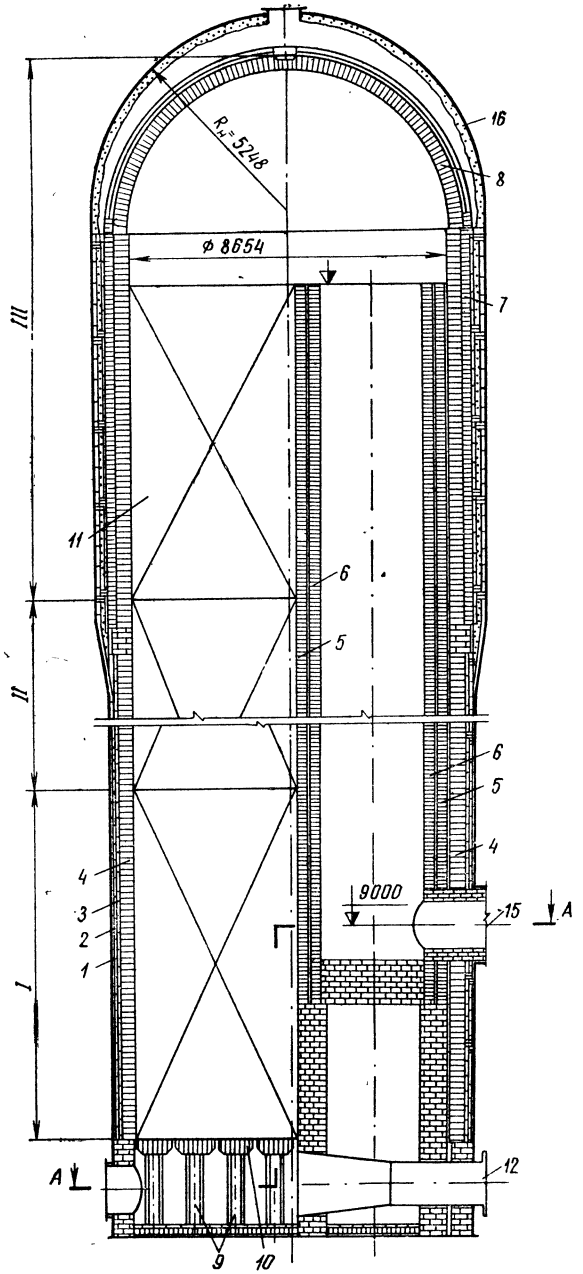
Насадка поддерживается массивной чугунной поднасадочной решеткой с отверстиями, соответствующими каналам насадки. Решетка лежит на поднасадочных чугунных колоннах. Воздухонагреватель крепят к фундаменту мощными болтами, чтобы воздух, подаваемый в него под большим давлением, не мог выгнуть нижнее плоское днище.

Смесь доменного и коксовального газов подается горелкой вместе с необходимым для горения воздухом в камеру горения. Продукты горения поднимаются в подкупольное пространство и отсюда опускаются вниз через насадку, нагревая ее. Пройдя насадку, охлажденные до 150—250° С газы уходят из поднасадочного пространства через два дымовых клапана в боров, соединяющий воздухонагреватели с дымовой трубой.

После того как насадка нагреется до требуемой температуры, горелку выключают, дымовые клапаны перекрывают, а шиберы холодного и горячего дутья, соединяющие воздухонагреватель с воздухопроводами холодного и горячего дутья, открывают. Холодный воздух поступает через патрубок холодного дутья в поднасадочное пространство, проходит снизу вверх насадку, постепенно нагреваясь за счет аккумулированного насадкой тепла, тем самым охлаждая ее, и поступает в подкупольное пространство, откуда через камеру горения и штуцер горячего дутья подается в прямой воздухопровод горячего воздуха, соединяющий воздухонагреватели с кольцевым воздухопроводом доменной печи. Как только насадка охладится до определенной температуры, подачу холодного воздуха в воздухонагреватель прекращают, и повторяется цикл нагрева насадки.

Наружную сторону стены камеры горения выкладывают из того же кирпича, что и стены воздухонагревателя; внутри камеру горения футеруют в один кирпич высокоглиноземистым кирпичом.

Для уменьшения потерь тепла через кожух кладку стен воздухонагревателя изолируют снаружи диатомитовым или легковесным шамотным кирпичом. Между кожухом и кладкой остав-



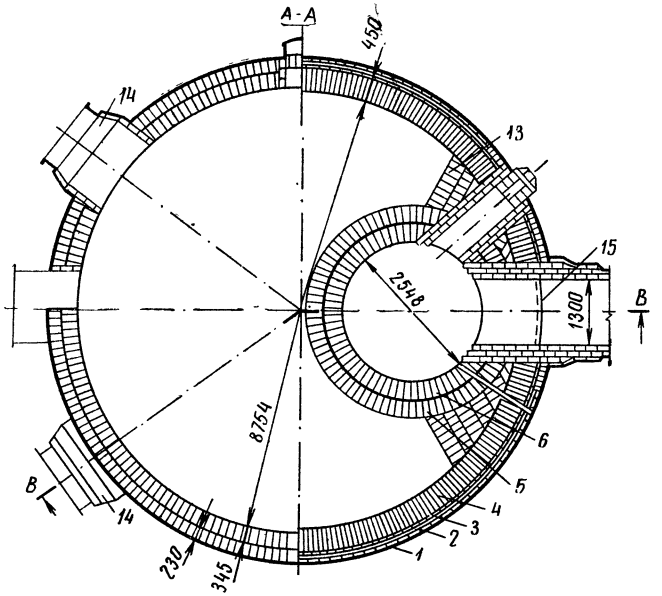


Рис. 71. Воздухонагреватель доменной печи

I — шамотная кладка; *II* — высокоглиноземистая кладка (Al_2O_3—62%); *III* — высокоглиноземистая кладка (Al_2O_3 — 72%); *1* — кожух; *2* — диатомитовая кладка; *3* — шамотно-асбестовая засыпка; *4*—кладка кольцевых стен; *5* — кладка камеры горения; *6* — футеровка камеры горения; *7*—легковесный шамот; *8* — купол; *9* — поднасадочные колонны; *10* — поднасадочная решетка; *11* — насадка; *12* — штуцер холодного дутья; *13* — закладка углов; *14* — штуцер дымового клапана; *15* — штуцер горелки; *16* — торкретбетонная изоляция кожуха купола

ляют зазор толщиной около 65 *мм* для температурного роста кладки; зазор обычно заполняют смесью гранулированного доменного шлака с асбестом. Из этих же соображений оставляют свободное пространство между кладкой купола и изоляцией купола кожуха.

Купол кожуха изолируют изнутри жаростойким торкрет-бетоном. Торкрет-бетон армируют стальной сеткой, закрепляемой на приваренных к кожуху штырях.

Переключение воздухонагревателей с «дутья» на «нагрев» и обратно производится автоматически в зависимости от заданной минимальной температуры воздуха или температуры нагрева насадки.

Воздухопроводы, газопроводы и пылеуловители

Холодное дутье подают в воздухонагреватели от воздуходувок по воздухопроводу холодного дутья, который у воздухонагревателей обычно располагается внизу вдоль фронта их со стороны камеры горения.

От воздухопровода отходят к воздухонагревателям патрубки, перекрываемые шиберами. Горячее дутье из воздухонагревателей через патрубок с шибером поступает в прямой воздухопровод, также расположенный вдоль фронта воздухонагревателей от стороны камеры горения. Прямой воздухопровод соединяет воздухонагреватели с кольцевым воздухопроводом, откуда воздух через патрубки и фурменные рукава подается в воздушные фурмы печи (см. рис. 67). Воздухопроводы сваривают из листовой стали толщиной 8—10 *мм* и футеруют внутри огнеупорным и изоляционным кирпичом. Шиберы горячего дутья имеют специальное водяное охлаждение. Фурменные рукава отливают из стали и изнутри также футеруют огнеупорным кирпичом.

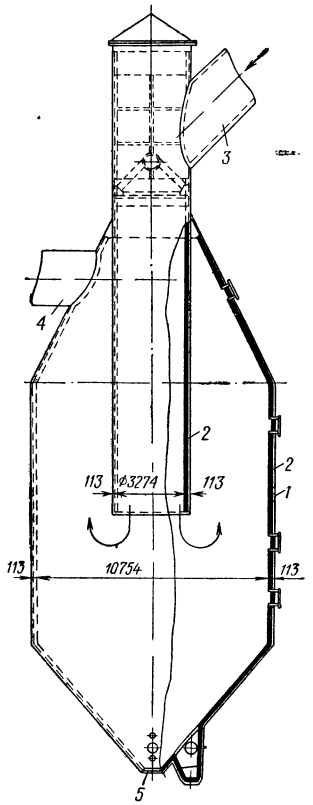


Рис. 72. Пылеуловитель

1 — кожух; *2*—футеровка; *3*—подвод газов; *4* — отвод газов; *5* — люк для удаления колошниковой пыли

Колошниковый газ отводят из печи по четырем газоотводам, присоединяемым затем по два к двум ветвям нисходящего газопровода (см. рис. 69). В нижней части перед входом в пылеуловитель эти две ветви соединяют в один газопровод. Газоотводы и нисходящий газопровод футеруют торкретбетоном или шамотным кирпичом. В местах присоединений и поворотов, где футеровка наиболее подвержена износу от содержащейся в газе пыли, торкрет-бетон или кирпич заменяют стальными плитами.

Пылеуловитель служит для сухой очистки колошникового газа от пыли, которой в нем содержится до 20—25 *г* в 1 $м^3$. Он выполняется в виде стального цилиндрического сосуда с конусообразными верхней и нижней частями диаметром 11—13 *м* и высотой 26—27 *м* (рис. 72). Принцип действия пылеуловителя основан на том, что газ, попадая в него, благодаря большому диаметру пылеуловителя теряет скорость, подъемная сила его резко падает и пыль оседает. Осевшую пыль периодически удаляют через затвор в нижнем конусе. Конус пылеуловителя внутри футеруют шамотным кирпичом или жаростойким торкретбетоном. В пылеуловителе оседает до 80% содержащейся в газе пыли. После пылеуловителя газ подается в мокрый скруббер, где очищается от пыли (содержание пыли не более 0,8—

0,5 $г/м^3$). Окончательную очистку газа обычно производят в электрофильтрах. Очищенный в электрофильтрах доменный газ (содержание пыли не более 0,05—0,1 $г/м^3$) поступает в газопроводы чистого газа и используется как топливо.

§ 20. МАРТЕНОВСКИЕ ПЕЧИ

Схема мартеновской печи и основы мартеновского процесса

Мартеновская печь служит для выплавки стали из чугуна и стального лома (скрапа). Сталь по составу отличается от чугуна меньшим содержанием углерода, а также вредных примесей — серы и фосфора. Сущность получения стали заключается в удалении из чугуна части углерода и вредных примесей.

Различают два способа получения стали в мартеновских печах: скрап-процесс и рудный процесс.

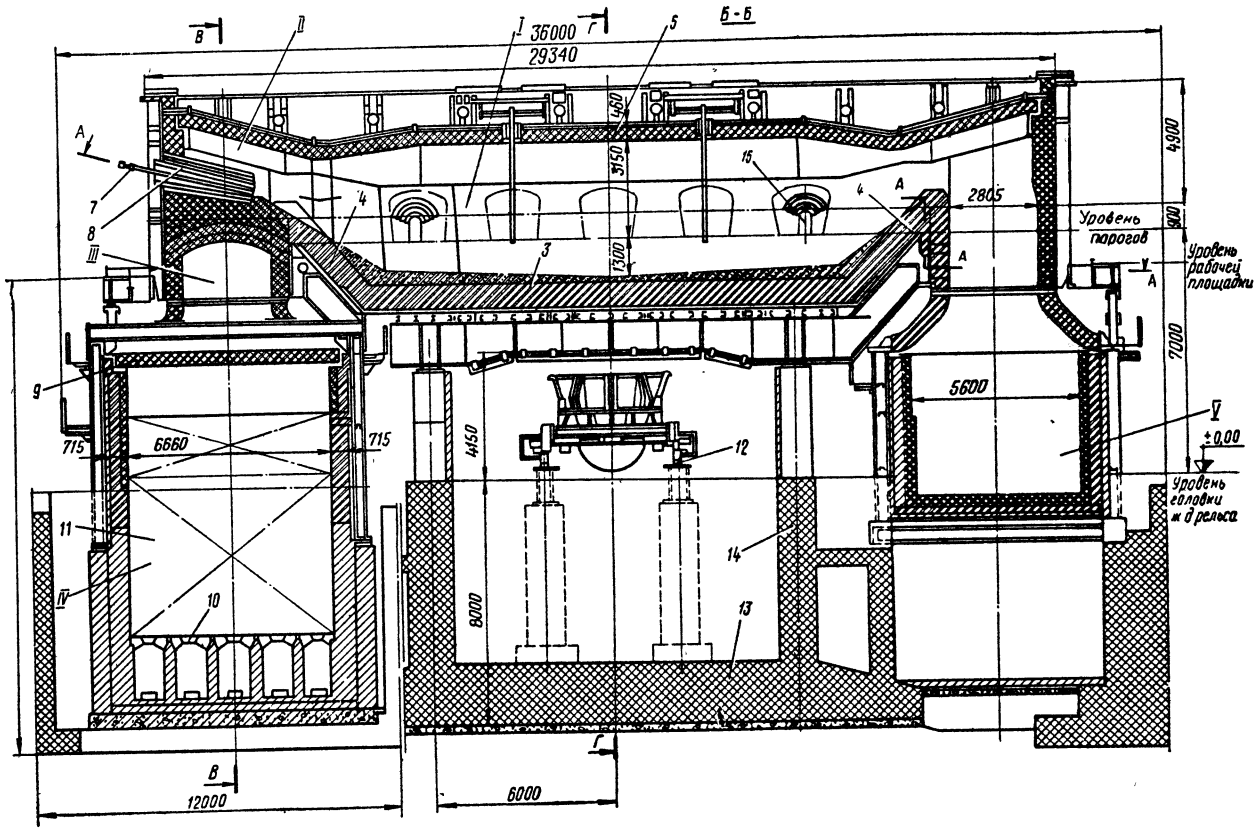
При скрап-процессе плавка ведется на твердой шихте, состоящей главным образом из 60—80% стального лома и 15—40% чугуна. Скрап-процесс применяется на заводах, не имеющих доменного производства.

На заводах, имеющих доменные печи, работают на рудном процессе, при котором в мартеновскую печь заливают жидкий чугун. В этом случае шихта состоит из 80—90% чугуна и 20—10% железной руды и скрапа.

Мартеновские печи отапливаются природным газом, мазутом или смешанным коксо-доменным газом.

Мартеновская печь, отапливаемая природным газом или мазутом, представляет собой ванную регенеративную печь (рис. 73, 74), основными элементами которой являются: рабочее пространство с ванной, в которой происходит плавление стали; головки печи, расположенные по торцам рабочего пространства и служащие попеременно для подачи топлива и воздуха в рабочее пространство и отвода из него продуктов горения; вертикальные каналы, по которым попеременно с одной стороны подается к головкам воздух от регенераторов, а с противоположной стороны уходят продукты горения; регенераторы для подогрева воздуха; шлаковики, расположенные между вертикальными каналами и регенераторами и служащие для осаждения капель шлака, уносимых отходящими из рабочего пространства газами; система боровов и газоходов, по которым отводятся из регенераторов продукты горения и подается в регенераторы воздух, и дымовая труба для отвода продуктов горения.

При отоплении печи низкокалорийным смешанным коксо-доменным газом помимо воздуха подогревают также и газ. Поэтому печи, работающие на коксо-доменном газе, оборудуются с каждой стороны двумя регенераторами — одним для подогре-



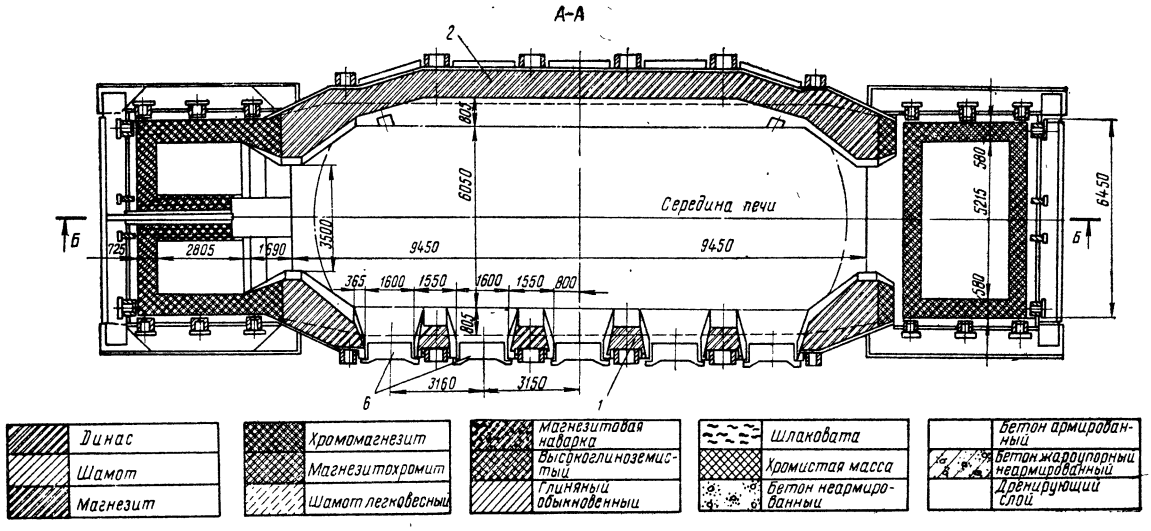
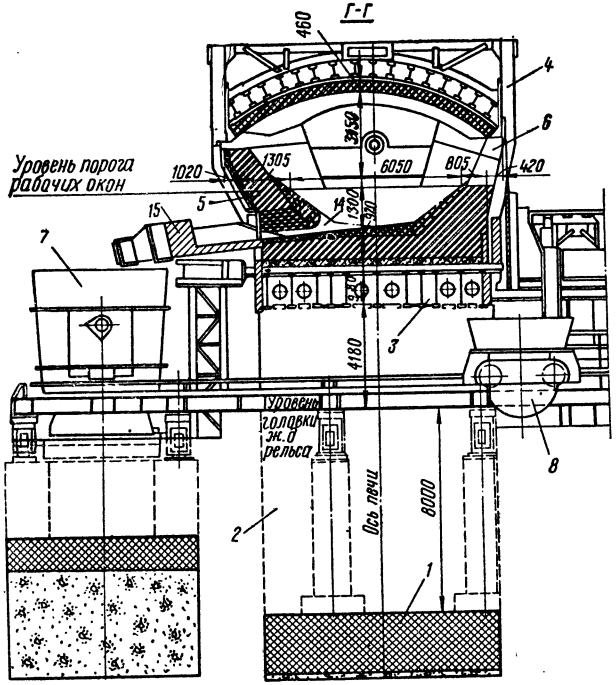


Рис. 73. Типовая мартеновская печь емкостью 600 *т*, отапливаемая природным газом или мазутом (продольный разрез и план)

I — рабочее пространство; *II* — головки; *III* — вертикальные каналы; *IV* — регенераторы; *V* — шлаковики; *1* — передняя стена; *2* — задняя стена; *3* — подина; *4* — торцовые откосы; *5* — главный свод; *6* — рабочие окна; *7* — горелка (форсунка); *8* — водоохлаждаемый кессон; *9* — подвесной свод регенераторов; *10*—поднасадочная решетка; *11*—насадка; *12*—путь для шлакового ковша; *13* — фундамент под рабочее пространство печи; *14* — колонны; *15* — шлаковая летка



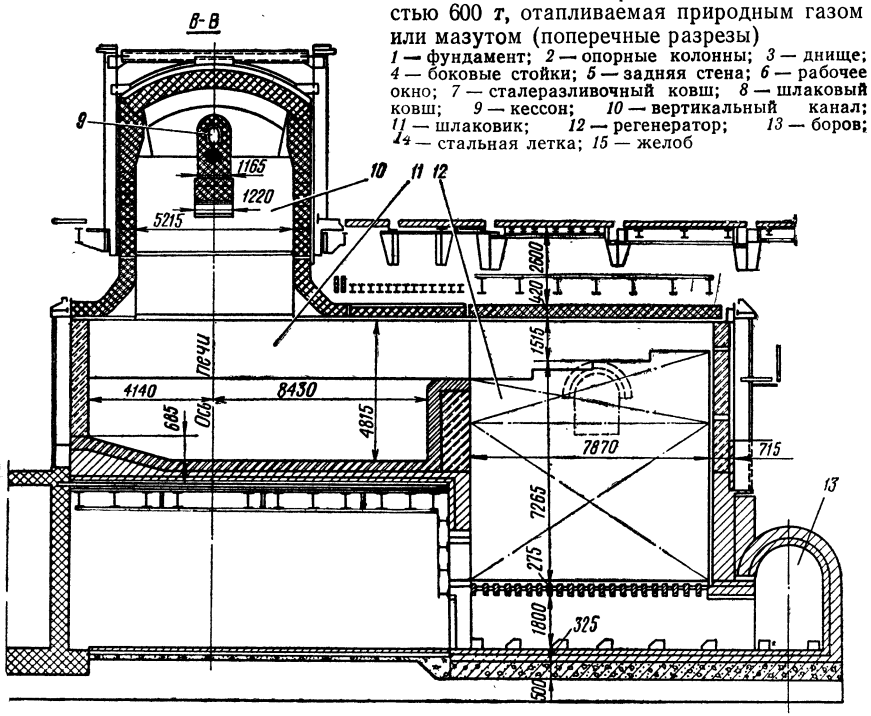


Рис. 74. Типовая мартеновская печь емкостью 600 *т*, отапливаемая природным газом или мазутом (поперечные разрезы)

1 — фундамент; *2* — опорные колонны; *3* — днище; *4* — боковые стойки; *5* — задняя стена; *6* — рабочее окно; *7* — сталеразливочный ковш; *8* — шлаковый ковш; *9* — кессон; *10* — вертикальный канал; *11* — шлаковик; *12* — регенератор; *13* — боров; *14* — стальная летка; *15* — желоб

ва воздуха и другим для подогрева газа — и соответственно двумя шлаковиками и вертикальными каналами — воздушными и газовыми (рис. 75). Схема тепловой работы мартеновской печи, отапливаемой коксо-доменным газом, показана на рис. 37.

Так как температура продуктов горения, уходящих из регенератора, еще достаточно высока (600—800° С), то для использования их физического тепла в современных мартеновских цехах между печью и дымовой трубой устанавливают котел-утилизатор.

Рабочее пространство, головки и вертикальные каналы называют верхним строением печи, а шлаковики и регенераторы, расположенные под рабочей площадкой, — нижним.

Мартеновские печи разделяются на кислые с футеровкой из кислых материалов — динаса, кварцевой набойки и основные с футеровкой из основных материалов — магнезита и магнезитовой наварки. В настоящее время распространены основные печи; выплавка стали в кислых печах изредка встречается на машиностроительных заводах.

Загрузку печи скрапом и рудой производят при помощи завалочной машины, которая берет хоботом мульду (ковш) со скрапом или рудой, вводит ее в печь через рабочие окна, устроенные в передней стене, и там, опрокидывая, выгружает.

Жидкий чугун заливают в печь из ковша по желобу, устанавливаемому в завалочном окне. В печь сначала загружают мелкий чистый лом и железную руду, а затем известняк, стальной лом и чугун. Во время загрузки в печь подают наибольшее количество тепла, чтобы прогреть загружаемые материалы и ускорить их плавление. Процесс плавки в основных мартеновских печах делится на два периода: плавление и доводка.

В период плавления скрапа и чугуна окисляется железо, которое переходит в шлак в виде FeO. В дальнейшем FeO взаимодействует с примесями чугуна, окисляя их

$$Si + 2FeO = 2Fe + SiO_2; \quad Mn + FeO = Fe + MnO;$$

$$2P + 5FeO = 5Fe + P_2O_5; \quad C + FeO = Fe + CO\,(газ).$$

К концу плавления шихты известняк прогревается и превращается в известь ($CaCO_3 = CaO + CO_2$), которая ошлаковывает кремнезем SiO_2. Окислы марганца и фосфора также переходят в шлак.

Период доводки металла наступает сейчас же за расплавле-

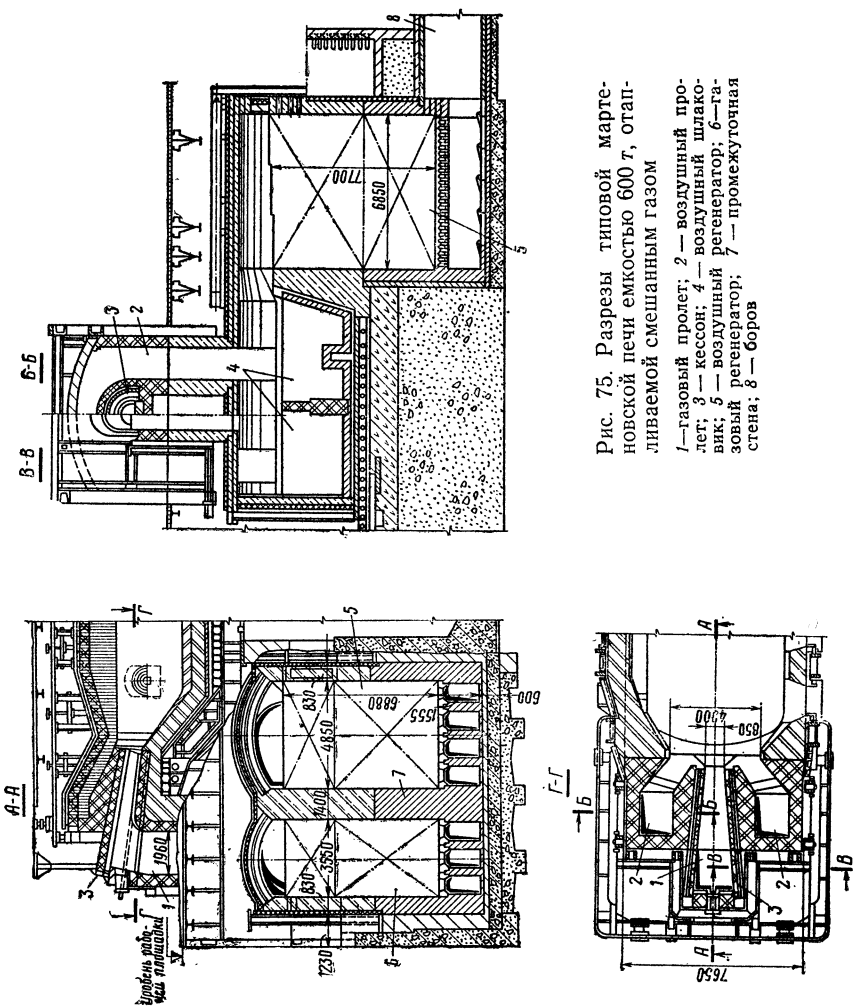


Рис. 75. Разрезы типовой мартеновской печи емкостью 600 *т*, отапливаемой смешанным газом

1—газовый пролет; *2* — воздушный пролет; *3* — кессон; *4* — воздушный шлаковик; *5* — воздушный регенератор; *6*—газовый регенератор; *7* — промежуточная стена; *8* — боров

нием шихты. Начало его характеризуется энергичным окислением углерода за счет FeO. Для обеспечения в этот период более интенсивного окисления примесей добавляют железную руду, увеличивающую содержание FeO в ванне. Образовавшиеся при окислении углерода газы, удаляясь из ванны, создают впечатление бурного кипения жидкой ванны. В период кипения сталь доводится до требуемого химического состава, дегазируется, но в ней еще растворено большое количество окиси железа FeO. Кислород в стали является вредной примесью, придающей ей красноломкость — хрупкость в горячем состоянии. Поэтому для удаления кислорода сталь раскисляют, добавляя в ванну раскислители — ферромарганец и ферросилиций. Раскисление идет по реакциям:

$$FeO + Mn = MnO + Fe;$$

$$2FeO + Si = SiO_2 + 2Fe.$$

После раскисления сталь выпускают через летку в ковш. Отверстие летки забивается огнеупорной пробкой, которую при выпуске пробивают.

При выплавке специальных легированных сортов стали в ванну добавляют соответствующие легирующие элементы: ферротитан, феррохром, никель и др. Для интенсификации процесса в последние годы применяют обогащение воздуха, идущего на горение, кислородом.

Мартеновские печи характеризуются емкостью, которая соответствует массе металлической садки (чугуна и скрапа). Фасонносталелитейные цехи, где сталь используется для отливки изделий, оборудуют печами емкостью 5—100 *т*; на металлургических заводах наибольшее распространение получили печи емкостью 250—600 и до 900 *т*. За сутки печь выдает 1,5—2,5 плавки. Удельная производительность мартеновских печей в Советском Союзе составляет в среднем 6—10 *т* на 1 $м^2$ площади пода в сутки (площадь пода условно замеряется на уровне порога завалочных окон). Удельный расход тепла колеблется от 3760—5400 *кДж/кг* (900—1300 *ккал/кг*) стали для больших печей и до 840 *кДж/кг* (2000 *ккал/кг*) для малых печей. В последние годы строительство новых мартеновских печей прекратилось, их заменили конверторы. Однако большая часть стали выплавляется пока еще в мартеновских печах.

Рабочее пространство печи

Рабочее пространство печи состоит из ванны, передней и задней стен и свода.

Ванной называется нижняя часть рабочего пространства печи до уровня порогов рабочих окон, образованная снизу подиной, с торцов — торцовыми откосами, с боков — откосами передней и задней стен. Подина выкладывается на сварном листовом

настиле толщиной 15—20 *мм*, лежащем на поперечных двутавровых балках, уложенных в свою очередь на балках, расположенных параллельно продольной оси печи.

Продольные балки консольно опираются на две колонны, имеющие самостоятельный фундамент, не связанный с фундаментами шлаковиков и регенераторов. По концам продольных балок устроены специальные металлические конструкции — стулья, на которые опираются торцовые откосы ванны. Стулья служат опорой также и для головок печи. Кладка ванны испытывает воздействие: высокой температуры (до 1600° С), ударов твердой шихты, разъедания жидкой сталью и шлаком, давления от массы металла и шлака.

Подины основных мартеновских печей выкладывают из нескольких рядов магнезитового кирпича, поверх которого в начале эксплуатации печи наваривают слой обожженного магнезитового порошка, смешанного с 10—25% мартеновского шлака.

Подину кислых мартеновских печей выкладывают из динасового кирпича с наваркой из кварцевого песка. Снизу и с боков подину изолируют для уменьшения потерь тепла несколькими слоями шамотного и легковесного шамотного кирпича. Общая толщина кладки подины колеблется от 750 до 1225 *мм* в зависимости от емкости печи. В откосе задней стенки в плоскости поперечной оси печи на уровне подины устроена стальная летка. Она выполнена в виде отверстия шириной 300 *мм* и высотой 300—400 *мм*, перекрытого полуциркульной аркой. Подина выполняется с уклоном 0,1—0,14 к выпускному отверстию.

Задней стенкой печи называется стенка, находящаяся против рабочих окон печи. Основанием задней стенки служит верхний ряд кладки подины. Задняя стенка выкладывается уступами с уклоном наружу от основания до верха. Уклон придает стенке большую устойчивость, она служит намного дольше, чем вертикальная.

Помимо стальной летки, упомянутой выше, в задней стенке имеется еще одно-два отверстия для выпуска шлака.

В передней стенке печи располагают рабочие окна. Кладка передней стенки состоит из ряда столбиков между рабочими окнами и по краям. Столбики укладывают на предпоследнем ряде кладки подины и выполняют также с уклоном в сторону каркаса печи. В современных печах окна перекрывают подпятовой балкой, охлаждаемой водой (см. рис. 74 и 76).

Кладка стен рабочего пространства испытывает воздействие: высокой температуры (1700° С и выше), ударов загружаемой шихты и химического воздействия пыли и брызг шлака. Кладку стен основных печей выполняют из магнезитового и хромомагнезитового кирпича, а кислых — из динасового. Толщина кладки стен на уровне порогов рабочих окон (включая наварку) достигает 750—1100 *мм* и вверху — 460—575 *мм*.

Кладка крепится жестким металлическим каркасом. Стойки

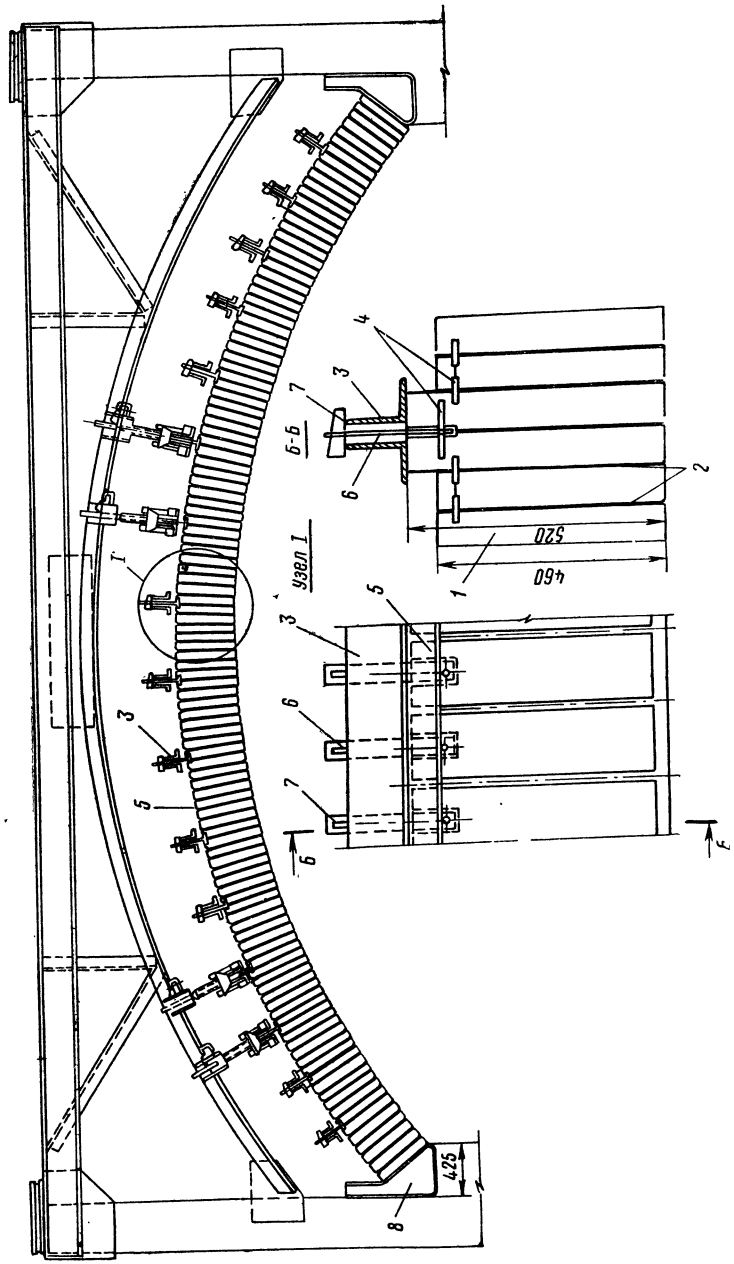


Рис. 76. Распорно-подвесной магнезито-хромитовый свод

1 — кирпичи; *2* — стальные прокладки; *3* — уголки; *4* — штыри; *5* — удлиненные клиновые кирпичи; *6* — стальная полоса; *7* — клин; *8* — подпятовые, охлаждаемые водой, балки

каркаса выполняют из слябов (заготовок для прокатки листа), а поперечные стяжки — из швеллеров или двутавровых балок: передняя стена на высоту до уровня порогов рабочих окон, а задняя на всю высоту армируются литыми стальными плитами. Рабочие окна обрамлены охлаждаемыми водой рамами и закрываются охлаждаемыми водой заслонками, футерованными огнеупорным кирпичом.

Своды мартеновских печей эксплуатируются в тяжелых условиях, так как помимо влияний, которые испытывают стены, на них еще действуют факел горения топлива и значительные напряжения от распора свода.

Хорошо сопротивляется нагрузкам при высоких температурах динасовый кирпич, имеющий очень высокую температуру начала деформации под нагрузкой в 2 *кгс/см*^{2}. Поэтому раньше у всех мартеновских печей своды выкладывались из этого кирпича. Однако в связи с интенсификацией мартеновских процессов, требующей повышения температуры в печи, влекущей ускоренный износ свода, динас в главных сводах мартеновских печей заменен магнезито-хромитовым кирпичом.

В настоящее время динасовые своды имеются только в кислых печах и в незначительном количестве мелких мартеновских печей. Так как магнезито-хромитовый кирпич имеет сравнительно низкую температуру начала деформации под нагрузкой и не может воспринимать напряжения, возникающие в своде при температурах, развиваемых в процессе работы, то применяют распорно-подвесную конструкцию свода.

На рис. 76 показан распорно-подвесной свод конструкции Стальпроекта. Свод опирается на водоохлаждаемые подпятовые балки, поверхность которых, обращенная к своду, выполнена по форме пятовых кирпичей. Подпятовые балки шарнирно подвешены при помощи тяг к каркасу.

Свод набирают насухо из термостойкого магнезито-хромитового кирпича. В радиальные швы между кирпичами помещают стальные прокладки толщиной 0,8 *мм*, которые при разогреве печи обеспечивают сваривание отдельных кирпичей в монолит. В каждом кирпиче и в каждой радиальной прокладке имеются отверстия, в которые при наборе свода вставляют стальные штыри диаметром 16 *мм* и длиной 50 *мм*, препятствующие выпадению отдельных кирпичей. Над сводом параллельно продольной оси печи при помощи тяг подвешены на кронштейнах, приваренных к верхним ригельным балкам и подкосам каркаса печи, парные угольники. Свод подвешивается к этим угольникам, для чего при кладке свода через восемь — десять кирпичей укладывают специальные удлиненные клиновые кирпичи с пазами для подвесок. В качестве подвесок применяют стальные полосы шириной 50 *мм* и толщиной 8—9 *мм*.

Подвески продольных уголков, к которым крепятся прокладки, окончательно закрепляют при помощи клина только после

разогрева свода, чтобы в процессе разогрева при росте свода они могли свободно перемещаться.

Головки и вертикальные каналы

Головки мартеновских печей служат для смешения топлива и воздуха, а также для отвода продуктов горения. Помимо этого они должны придавать факелу горения определенное направление на ванну (чтобы он «лизал» ванну), в связи с чем головки имеют некоторый наклон по направлению к подине. В головках для низкокалорийного топлива газ подается в центральный ее пролет, а воздух — по бокам. При этом для лучшего перемешивания газа и воздуха воздушные пролеты направлены под углом к оси газового пролета. Учитывая, что стенки газового пролета головки при проходе через них уходящих из печи газов работают в очень тяжелых условиях, так как омываются горячими газами со всех сторон, их выполняют в виде охлаждаемого водой стального кессона, зафутерованного изнутри и снаружи огнеупорным кирпичом. Головки в задней части переходят в вертикальные каналы, соединяющие их со шлаковиками. Свод головок выполняется аналогично главному своду.

Головки и вертикальные каналы основных печей выкладывают из хромомагнезитового кирпича, а кислых — из динасового и закрепляют жестким каркасом. Вертикальные каналы опирают обычно на своды шлаковиков. Печи, работающие на высококалорийном газе или жидком топливе, имеют одноканальные головки и вертикальные каналы, по которым проходит воздух. Горелки для высококалорийного газа или форсунки устанавливают по центру головки в кессоне.

Шлаковики и регенераторы

Газовые и воздушные шлаковики и регенераторы каждой стороны печи заключают в металлический кожух. У печей, имеющих воздушные и газовые регенераторы, их разделяют толстой промежуточной стеной. Шлаковики и регенераторы испытывают: воздействие высокой температуры, которая в верхних рядах насадки и под сводом достигает 1400° С и выше; резкие изменения температур при переключении регенераторов с горячих отходящих газов на холодный воздух, шлакование пылью, уносимой из ванны отходящими газами. Шлаковики выкладывают из динасового кирпича, изолируют снаружи диатомитовым кирпичом и футеруют изнутри в основных печах хромомагнезитовым кирпичом. Свод шлаковиков в последнее время делают подвесным. Шлаковики отделяют от регенераторов перевальной стеной. Внутреннюю кладку наружных стен регенераторов и разделительные стены в верхней более высокотемпературной

части выполняют из динасового кирпича, а в нижней (примерно на $^1/_2$—$^1/_3$ высоты) — из шамотного.

Наружную кладку выполняют в верхней части из шамотного кирпича, а в нижней из обыкновенного глиняного кирпича. Кладку регенераторов снаружи изолируют диатомитовым кирпичом. Регенераторные камеры перекрывают лучковым сводом из динасового кирпича или подвесным — из магнезито-хромитового кирпича.

Под регенеративной камеры выкладывают из нескольких рядов на плашку шамотного и обыкновенного глиняного кирпича. На поду выкладывают поднасадочное устройство — опорные столбики и поднасадочную решетку (см. рис. 38, *г*), поверх которых укладывают регенеративную насадку. Поднасадочное устройство и нижнюю часть насадки кладут из шамотного кирпича, верхнюю часть насадки — из динасового.

Верхние ряды насадки для увеличения стойкости часто выкладывают из высокоглиноземистого или форстеритового кирпича. К поднасадочному пространству регенераторов присоединяются борова и газоходы, выполненные из обыкновенного глиняного кирпича и зафутерованные изнутри шамотным кирпичом.

§ 21. КОНВЕРТОРЫ

Основы конверторного процесса

Конверторы служат для получения стали из жидкого чугуна. Сущность конверторного способа получения стали состоит в том, что через слой жидкого чугуна продувают воздух или на слой жидкого чугуна подают под большим давлением кислород, который окисляет углерод и другие примеси, выгорающие или переходящие в шлак.

Конвертор представляет собой грушевидный сосуд из листовой стали, зафутерованный изнутри огнеупорным материалом. Воздух из воздухопровода в конвертор поступает снизу через полую цапфу, а кислород — сверху через водоохлаждаемую фурму. Жидкий чугун, доставляемый в ковшах, заливают в конвертор через горловину, для чего конвертор наклоняют в горизонтальное положение. Затем конвертор ставят в вертикальное положение и начинают продувать через него воздух или, в кислородных конверторах, опускают фурму и начинают подавать кислород. По окончании процесса подачу воздуха или кислорода прекращают, из кислородных конверторов вытаскивают форму, конвертор поворачивают и выливают готовую сталь в ковш. В связи с интенсивным перемешиванием процесс длится всего 10—25 *мин*, при этом в результате реакций окисления примесей чугуна выделяется значительное количество тепла, благодаря чему чугун (в дальнейшем сталь) и шлак сохраняются в жидком состоянии.

Различают три вида процесса: кислый — «бессемеровский», основной — «томассовский», названные по имени изобретателей этих процессов Бессемера и Томасса, открывших эти процессы, и кислородный. В соответствии с видом процесса футеровку конверторов выполняют из кислых огнеупорных материалов (динаса) или основных (доломита, магнезиальных). Томассовский процесс применяют для переработки чугунов с большим содержанием фосфора (1,8—2%) и серы (больше 0,06%), так как для перевода их в шлак требуется присадка извести, разрушающей кислую футеровку.

Бессемеровский процесс получения стали можно разделить на три периода. В первом периоде кислород воздуха окисляет железо $2Fe+O_2=2FeO+544\,300$ *кДж* [128 860 *ккал*]. Закись железа перемешивается с металлом; при этом примеси, имеющие большее сродство с кислородом, отнимают его от закиси железа по реакциям:

$$Si + 2FeO = Fe + SiO_2 + 370\,000 \text{ кДж } [88\,280 \text{ ккал}];$$

$$Mn + FeO = Fe + MnO + 125\,650 \text{ кДж } [30\,200 \text{ ккал}].$$

Получающиеся окислы примесей переходят в шлак, в связи с чем этот период называют периодом шлакообразования. Он длится 3—4 *мин*. Благодаря большому выделению тепла в результате реакций окисления температура в конверторе повышается на 300—400°.

Во втором периоде происходит окисление углерода по реакции $FeO+C=Fe+CO_{газ}$—74 400 *кДж* [17 810 *ккал*]. Выходя из горловины конвертора, окись углерода сгорает, образуя ослепительно белое пламя высотой до 5—6 *м*. Выгорание углерода длится 8—10 *мин*. Так как выгорание углерода происходит с поглощением тепла, то температура в конверторе несколько понижается. При получении стали с содержанием углерода 0,4—0,5% процесс продувки на этом и заканчивается.

Третий период бывает только при выплавке стали с малым содержанием углерода, когда в течение 1—3 *мин* продолжается выгорание углерода.

После окончания процесса продувки подачу кислорода прекращают, конвертор поворачивают в горизонтальное положение и производят раскисление стали ферросилицием, ферромарганцем и алюминием по реакциям:

$$2FeO + Si = SiO_2 + 2Fe;$$

$$FeO + Mn = MnO + Fe;$$

$$3FeO + 2Al = Al_2O_3 + 3Fe.$$

Раскислители вводят прямо в конвертор, в разливочный ковш или в струю металла, вытекающего из конвертора.

Томассовский процесс, как упоминалось выше, предназначен для переплавки фосфористых чугунов. Для перевода фосфора в шлак в конвертер перед заливкой чугуна забрасывают известняк в количестве около 15% массы чугуна.

Томассовский процесс также имеет три периода. Первый и второй периоды аналогичны первому и второму периодам бессемеровского процесса: происходит окисление железа, кремния, марганца и выгорание углерода. Так как для основного процесса применяют чугуны с малым содержанием кремния, то первый период заканчивается раньше, чем при кислом процессе, и проходит с меньшим выделением тепла. Во втором периоде происходит также растворение извести в шлаке.

В третий период протекает окисление фосфора и образование в шлаке прочных соединений окислов фосфора с растворенной в нем известью по реакции: $P_2+5FeO+4CaO=4CaO+P_2O_5+5Fe+3\,070\,000$ *кДж* [735 000 *ккал*]. Реакция протекает с большим выделением тепла, благодаря чему температура металла в это время повышается. Раскисление стали производят так же, как и при кислом процессе.

Конверторный способ плавки стали имеет ряд достоинств по сравнению с мартеновским: высокая производительность при несложном оборудовании конвертерных цехов, отсутствие необходимости в топливе, дешевизна постройки. Однако воздушные конвертеры широкого распространения не получили в связи с трудностью получения стали заданного состава, необходимостью получения чугуна определенного химического состава и большим угаром металла. В настоящее время в СССР осталось небольшое количество бессемеровских конвертеров малой емкости (до 25—30 *т*); томассовский процесс совсем не применяется. Зато широкое применение нашли кислородные конвертеры, позволяющие переплавлять в конверторе обычный передельный чугун и получать сталь требуемого качества. Дутье — чистый кислород — подают в ванну сверху через водоохлаждаемую фурму, установленную на расстоянии 400 *мм* над уровнем ванны. При этом в самом начале происходит энергичное окисление фосфора, а через 2—3 *мин* после начала продувки — интенсивное окисление углерода.

Металл из кислородных конвертеров выливают через летку; при этом уменьшается перемешивание металла со шлаком. Раскислители вводят в ковш или в струю металла. В ближайшие годы намечено строительство ряда крупных конвертерных цехов с применением кислородного дутья. Емкость современных конвертеров достигает 130—300 *т*. Годовая производительность такого конвертера 1 200 000—3 000 000 *т* стали, т. е. он дает столько же стали, сколько мартеновский цех с 4—5 печами емкостью 250—500 *т*. Намечается строительство конвертеров емкостью до 350 *т*.

Конструкции конверторов

Принципиальной разницы в конструкции кислых и основных конвертеров, за исключением материала футеровки, нет. Конвертер состоит из днища, корпуса цилиндрической формы и шлама конической формы, заканчивающегося горловиной (рис. 77 и 78).

На цилиндрическую часть конвертора свободно надевается

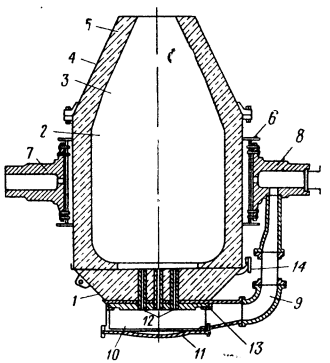


Рис. 77. Вертикальный разрез бессемеровского конвертора

1 — днище; *2* — цилиндрическая часть; *3* — шлем; *4* — кожух; *5* — футеровка; *6*—стальное кольцо; *7*—цапфа, на которую надевается зубчатое колесо; *8* — полая цапфа; *9* — воздушное колено; *10* — воздушная коробка; *11* — отъемная крышка; *12* — сопла фурм; *13*—фурменная крышка; *14* — струбцины

кольцо с цапфами, закрепляемое на нем несколькими скобами. Цапфы опираются на подшипники стоек. На одной цапфе закреплено зубчатое колесо, связанное с приводным механизмом поворота конвертора. В воздушных конверторах дутье от компрессора давлением 2—2,5 *кгс/см²* подается по второй полой цапфе, присоединенной к воздухопроводу. Полая цапфа соединена коленом с воздушной коробкой, расположенной под днищем.

Воздух в конвертор поступает через фурмы, заложенные в футеровку днища. Днище конвертора съемное и крепится к цилиндрическому кожуху при помощи струбцин. Крышка воздушной коробки откидная, а в закрытом положении крепится чекой.

Стены бессемеровского (кислого) конвертора футеруют динасовым кирпичом, днище набивают кварцевой массой, в которую вставляют фурму из шамотного огнеупора. Футеровку основных кислородных конверторов выполняют из специального периклазошпинелидного или смолодоломитового кирпича. Днища у кислородных конверторов бывают как съемные, так и глухие (глуходонные конвертеры). Толщина кладки стен и днища у кислых конверторов 420—750 *мм* и у основных — 900—1100 *мм*. Между кладкой стен и кожухом оставляют зазор для температурного роста футеровки, заполняемый засыпкой или набойкой.

Конструкция конверторов с кислородным дутьем отличается от обычного конвертора отсутствием воздушного дутья и наличием летки для выпуска стали и шлака (см. рис. 78).

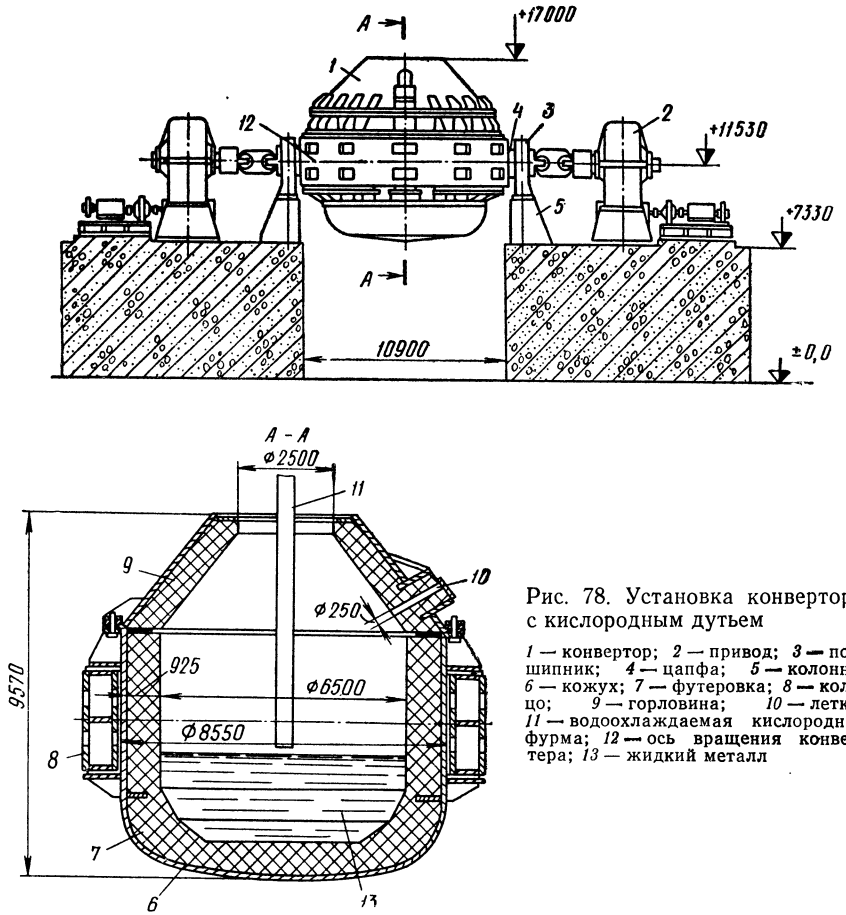


Рис. 78. Установка конвертора с кислородным дутьем

1 — конвертор; *2* — привод; *3* — подшипник; *4* — цапфа; *5* — колонна; *6* — кожух; *7* — футеровка; *8* — кольцо; *9* — горловина; *10* — летка; *11* — водоохлаждаемая кислородная фурма; *12* — ось вращения конвертера; *13* — жидкий металл

§ 22. МИКСЕРЫ

Для обеспечения правильного ведения процесса, большой производительности и экономичности работы мартеновских печей и конверторов требуется заливать в них жидкий чугун постоянного состава и температуры.

Для выравнивания состава и температуры чугун из чугуновозных ковшей заливают в сборники, называемые миксерами. Из миксеров чугун усредненного состава подают в мартеновские печи и конверторы.

Емкость миксеров от 600 до 2000 *т*. Конструкция миксеров почти одинакова для всех емкостей. Они представляют собой бочкообразный сварной или клепаный стальной кожух, футерованный изнутри огнеупорным кирпичом (рис. 79). Снаружи ко-

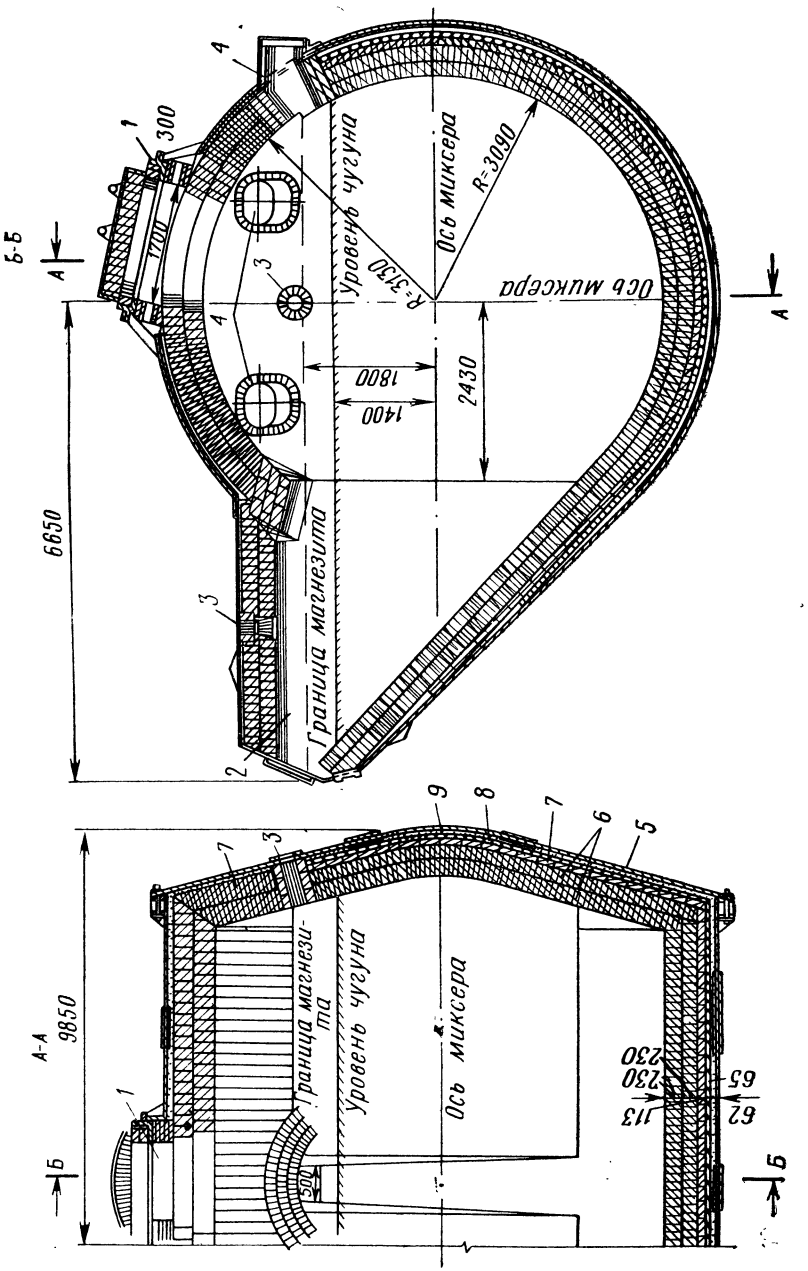


Рис. 79. Миксер емкостью 1300 *т*

1 — горловина; *2* — сливной носок; *3* — горелочное отверстие; *4* — смотровые отверстия; *5* — кожух; *6* — магнезитовая кладка; *7* — шамотная кладка; *8* — диатомитовая кладка; *9* — диатомитовая засыпка

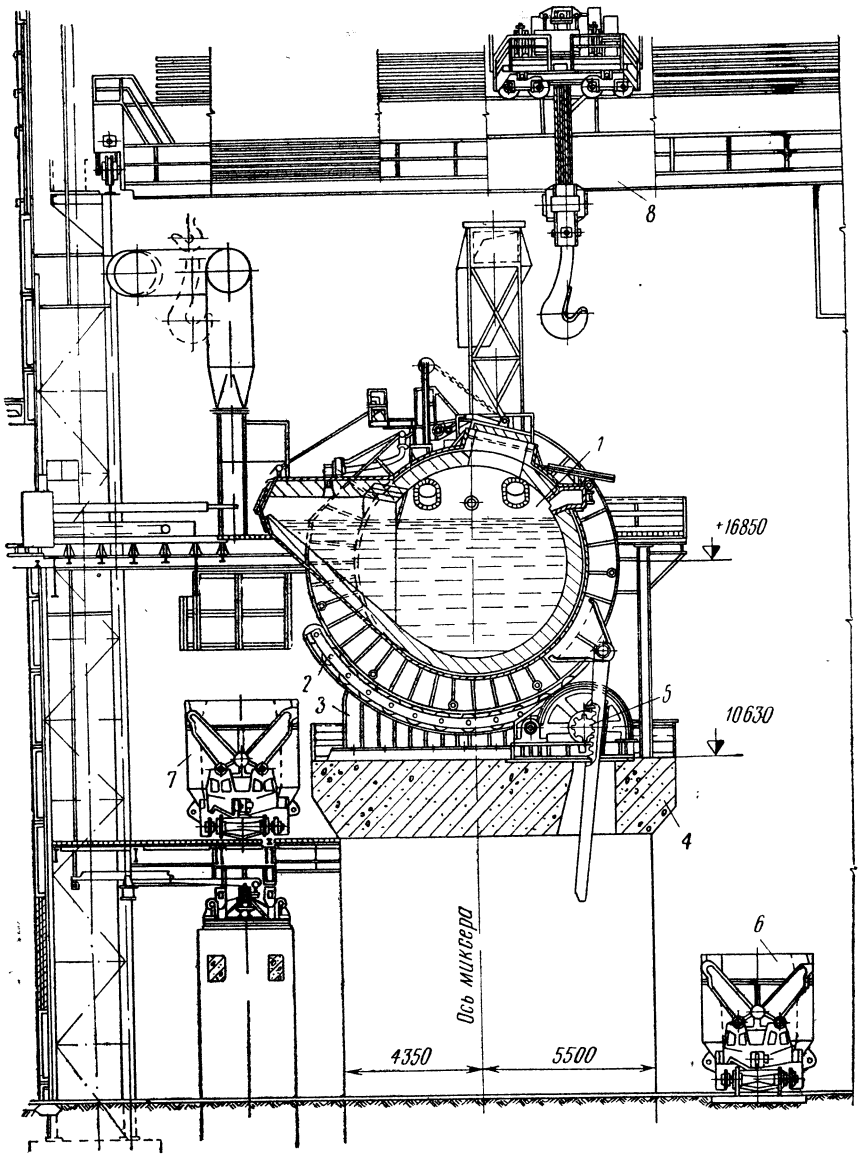


Рис. 80. Схема установки миксера

1 — миксер; *2* — катки; *3* — рама; *4* — фундамент; *5* — механизм наклона миксера; *6* — чугуновозный ковш для заливки миксера; *7* — чугуновозный ковш для приемки чугуна из миксера; *8* — заливочный кран

жуха имеются бандажи, которыми миксер опирается на катки, установленные на опорной раме фундамента (рис. 80).

Миксер оборудуется приводным механизмом, поворачивающим его вокруг горизонтальной оси. Чугун заливается в миксер через верхнее заливное отверстие — горловину — с помощью заливочного крана, а выпускается через сливной носок путем наклона бочки миксера.

При длительном хранении жидкий чугун может остыть, поэтому в больших миксерах устанавливают три горелки или форсунки — две по торцам миксера и одну у сливного носка. В миксере предусмотрены смотровые отверстия, расположенные по два в торцах бочки и одно против сливного носка. Горловину, сливной носок и смотровые отверстия закрывают откидными крышками, футерованными огнеупорным кирпичом.

Нижнюю часть бочки миксера до отметки, лежащей на 300—400 *мм* выше уровня заливки чугуна, футеруют магнезитовым кирпичом. Наружные слои выкладывают из шамотного и диатомитового кирпича. Верхнюю часть бочки футеруют шамотным кирпичом. Между кладкой и кожухом устраивают слой засыпки толщиной 50—65 *мм* из диатомитового порошка. Общая толщина футеровки миксера от 650 до 1000 *мм*.

§ 23. ВАГРАНКИ

Вагранка является наиболее распространенным плавильным агрегатом в чугунолитейных цехах и представляет собой шахтную печь цилиндрической формы (рис. 81).

Вагранку попеременно загружают через завалочное окно, расположенное вверху шахты, чугуном и коксом с добавкой извести в качестве флюса и некоторых других добавок для придания чугуну тех или иных свойств.

В нижней части вагранки — горне — расположены фурмы, подающие дутье, чугунная и шлаковая летки. Зона в области фурм называется плавильным поясом. Кокс, сгорая, расплавляет чугун, который затем выпускается через чугунную летку.

Получающийся от расплавления золы кокса и флюсов шлак, плавающий на поверхности жидкого чугуна, выпускают через шлаковую летку. Продукты горения поднимаются вверх и нагревают опускающуюся вниз шихту, а затем уходят в трубу, над которой устраивают искрогаситель — большой колпак, футерованный изнутри в полкирпича обыкновенным глиняным или шамотным кирпичом. Принцип работы искрогасителя заключается в том, что газы, попадая в него, теряют скорость и дважды меняют направление; при этом происходит осаждение содержащихся в газах твердых частиц.

Так как в процессе расплавления чугуна образуется большое количество окиси углерода, которая, уходя в трубу, уносит много неиспользованной химической энергии топлива, то иногда

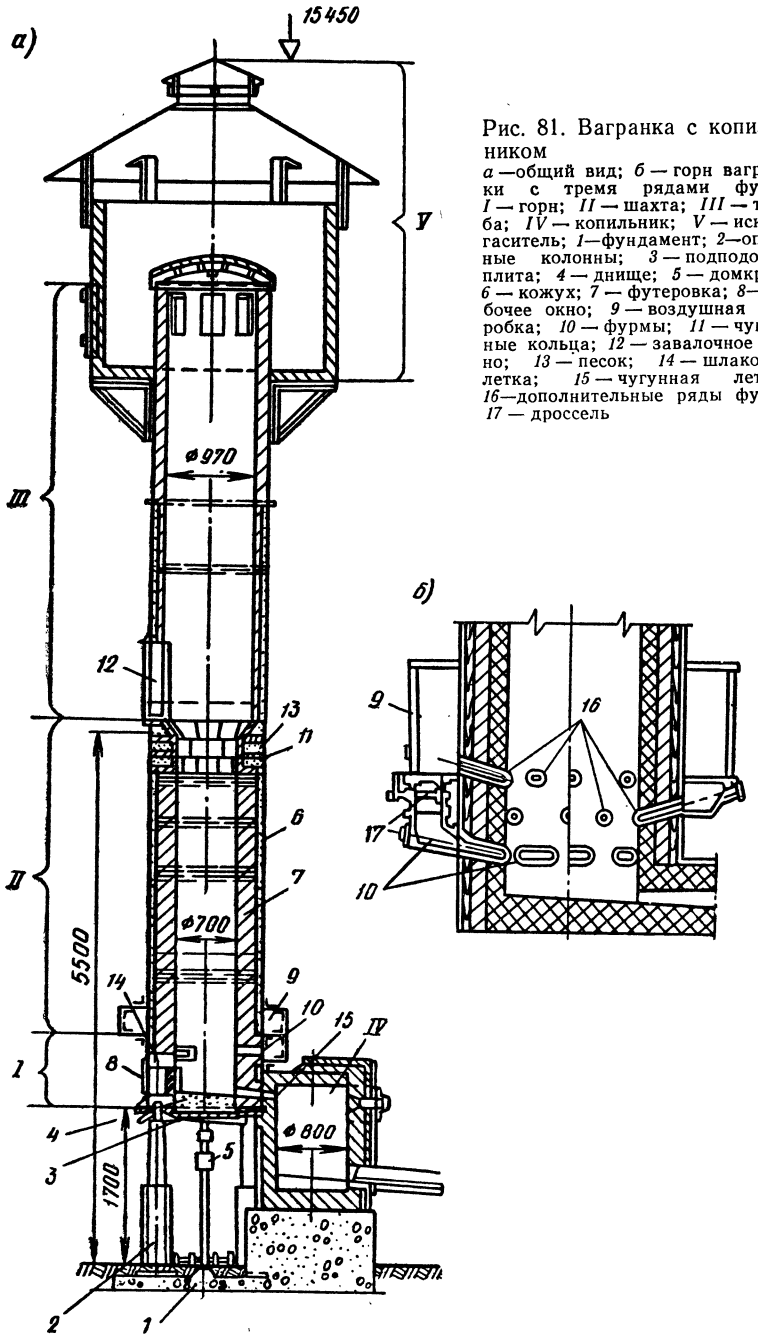


Рис. 81. Вагранка с копильником

а — общий вид; *б* — горн вагранки с тремя рядами фурм; *I* — горн; *II* — шахта; *III* — труба; *IV* — копильник; *V* — искрогаситель; *1*—фундамент; *2*—опорные колонны; *3* — подподовая плита; *4* — днище; *5* — домкрат; *6* — кожух; *7* — футеровка; *8*—рабочее окно; *9* — воздушная коробка; *10* — фурмы; *11* — чугунные кольца; *12* — завалочное окно; *13* — песок; *14* — шлаковая летка; *15* — чугунная летка; *16*—дополнительные ряды фурм; *17* — дроссель

выше основного ряда располагают в шахматном порядке еще один или два ряда фурм, в которые для дожигания CO подают до 25% вдуваемого в вагранку воздуха (рис. 81, *б*). Воздух к фурмам подается от вентилятора через воздушную коробку. Для регулирования соотношения между основным и добавочным воздухом на основных фурмах устанавливают регулирующие клапаны (дроссели).

Кожух вагранки сваривают из стального листа толщиной 6—10 *мм*. Изнутри кожух футеруют шамотным или полукислым кирпичом. Толщина футеровки колеблется от 113 до 250 *мм* в зависимости от размеров вагранки. При толщине больше 113 *мм* футеровка обычно выполняется по толщине в два ряда.

Для возможного температурного расширения кладки между футеровкой и кожухом оставляют небольшой зазор (20—30 *мм* у малых вагранок и 50 *мм* у больших), заполняемый густым шамотным раствором или песком. На огнеупорную кладку вагранки действуют расплавленные чугун и шлак, движущиеся куски шихты, а в нижней части действует довольно высокая температура.

В верхней части шахты, немного ниже уровня завалочного окна, футеровка подвергается ударам кусков чугуна и кокса. В этом месте огнеупорную футеровку заменяют сборными чугунными кольцами, промежуток между кольцами и кожухом заполняют песком.

Чтобы нагрузка от чугунных колец не передавалась на огнеупорную футеровку, их укладывают на несущее кольцо, привариваемое к кожуху вагранки.

Шахта вагранки опирается на подовую плиту, удерживаемую стальными колоннами, установленными на фундаментной плите. Снизу шахта закрывается откидным днищем, поддерживаемым в закрытом положении домкратом. Днище футеруется набивной огнеупорной массой. Для текущего ремонта набивки подины и розжига вагранки в горне имеется рабочее окно. Загрузка вагранки в большинстве случаев механизирована.

С целью накапливания чугуна для заливки крупных форм и получения чугуна постоянного химического состава большинство вагранок снабжают передним горном, называемым копильником и представляющим собой сосуд цилиндрической формы, зафутерованный шамотом или полукислым кирпичом. В вагранках расплавленный чугун непрерывно стекает с лещади через переходную летку в копильник, откуда его выдают через летку с желобом, расположенным на уровне лещади копильника. В средней части копильника имеется летка для спуска шлака.

Продолжительность одного цикла плавки вагранки составляет 10—20 *ч*, после чего вагранка выбивается и производят ремонт ее футеровки. Производительность вагранки зависит от внутреннего диаметра и колеблется от 1 до 25 *т/ч* при диаметре в свету от 500 до 2000 *мм* и полезной высоте от оси нижнего

ряда фурм до нижнего края загрузочного окна от 3 до 5 *м*. Расход кокса составляет 8—12% массы металла. Средний съем чугуна с 1 $м^2$ поперечного сечения вагранки 7—9 *т/ч*.

В последнее время все большее распространение получают вагранки с предварительным подогревом дутья в рекуператорах, что помимо экономии топлива повышает температуру выплавляемого чугуна и производительность вагранки, а также способствует оздоровлению труда у вагранки, так как уменьшает содержание окиси углерода в отходящих из вагранки газах. Для подогрева воздуха используют отходящие из вагранки и содержащие значительное количество CO газы. Иногда устраивают для рекуператора дополнительно самостоятельную топку, отапливаемую газом или мазутом.

У некоторых крупных вагранок производительностью 10—20 *т/ч* в плавильном поясе устанавливают, аналогично горну доменной печи, плитовые вертикальные холодильники с помещенными в них в процессе отливки шамотными кирпичами. После установки холодильников плавильный пояс футеруют дополнительно шамотным кирпичом класса А вполкирпича. Холодильники намного увеличивают срок службы футеровки без ремонта и облегчают ремонт, который сводится к восстановлению тонкого слоя внутренней футеровки.

Помимо вагранок для плавки чугуна применяют также ванные печи.

В главе VI описаны только пламенные плавильные печи; электрические плавильные печи приведены в главе X.

ГЛАВА VII

ПЕЧИ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

При производстве цветных металлов: меди, алюминия, цинка и др. основными агрегатами являются промышленные печи различных конструкций и типов.

По технологическому признаку производства этих металлов промышленные печи цветной металлургии условно можно разделить на три основных группы.

К первой группе относятся отражательные, шахтные печи и другие, в которых путем плавления руд или их концентратов (обогащенных руд) получают полупродукт с низким содержанием основного продукта (меди, цинка, олова, свинца и т. п.).

Во вторую группу входят отражательные печи для огневого рафинирования, конверторы и другие, в которых из полупродукта удаляется большая часть находящихся в нем примесей, а содержание основного продукта значительно увеличивается.

К третьей группе относятся печи и электролизные ванны, в которых металл получается практически в чистом, без примесей виде.

Отражательные печи являются наиболее крупными плавильными арегатами цветной металлургии и широко применяются при производстве меди, никеля и олова. В отражательных печах осуществляют плавление концентратов, в том числе обогащенных медных руд. Конечным продуктом плавки в этом случае является штейн с содержанием меди от 30 до 40% (в редких случаях до 80%), состоящий из сульфидов FeS и Cu_2S (80—90%) и шлаков, содержащих в основном окислы SiO_2; Al_2O_3 и CaO. Штейн, полученный при плавке концентратов, содержит меди 10—35% и является полупродуктом при производстве рафинированной и товарной меди с содержанием Cu не менее 99%.

Практически в процессе переработки медных концентратов происходит разделение сульфидных составляющих (образующих штейн) от пустой породы (в виде окислов), переходящей в шлак. Содержание меди в штейне увеличивается в основном за счет перехода железа из штейна в шлак по реакции $CuO_2 + FeS = Cu_2S$ (в штейн) $+ FeO$ (в шлак).

Источниками тепла в отражательных печах являются каменноугольная пыль, природный газ или мазут, сжигаемые с помощью 4—6 горелок или форсунок, которые устанавливают в торцевой стене рабочего пространства печи. Продукты горения и газы, образующиеся в результате химических реакций в печи, поступают через отводящий боров в котел-утилизатор и далее в дымовую трубу.

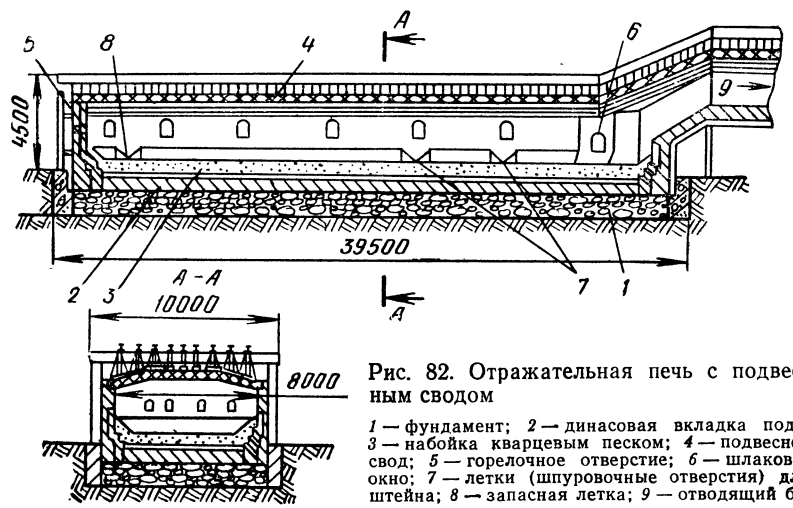


Рис. 82. Отражательная печь с подвесным сводом

1 — фундамент; *2* — динасовая вкладка пода; *3* — набойка кварцевым песком; *4* — подвесной свод; *5* — горелочное отверстие; *6* — шлаковое окно; *7* — летки (шпуровочные отверстия) для штейна; *8* — запасная летка; *9* — отводящий боров

Продукты горения в рабочем пространстве печи (рис. 82) нагревают шихту, шлаки и огнеупорную кладку свода и стен печи. Шихта и шлаки в отражательных печах, как и в других плавильных ванных печах, в больших количествах получают тепло от нагретой огнеупорной кладки свода и верхней части стен.

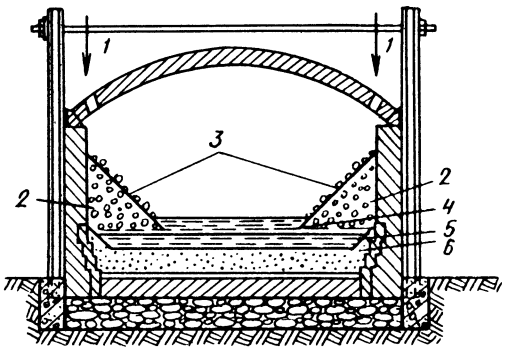


Рис. 83. Схема плавки в отражательной печи

1 — загрузка шихты; *2* — откосы, образованные шихтой; *3* — места интенсивного плавления шихты; *4* — жидкий шлак; *5* — жидкий штейн; *6* — набивная подина

Характерной особенностью отражательных печей является плавление шихты у боковых стен рабочего пространства. Загружаемая через отверстие в главном своде шихта располагается в виде плавающих в расплаве откосов, опирающихся с одной стороны на боковые стены рабочего пространства печи (рис. 83). Верхние слои шихты под действием высоких температур отходящих газов нагреваются и в расплавленном состоянии по откосам стекают в ванну, при этом обнажаются следующие слои твердой шихты. Таким образом, процесс плавки в отражательных печах представляет собой непрерывное расплавление шихты и стекание ее по откосам в ванну.

Под или лещадь отражательной печи выкладывают по выровненному фундаменту из динасового кирпича. Боковые стены печи толщиной 2—2,5 кирпича кладут также из динаса. Для предохранения нижней части динасовых стен от разъедания штейном и шлаками их защищают слоем магнезитовой или хромомагнезитовой кладки толщиной в один кирпич на высоту несколько выше уровня шлака. Торцевая стена, в которой устанавливаются форсунки или горелки, кладется из шамота и магнезита или хромомагнезита. Свод печи арочного типа выполняют из динасового кирпича размером 380 или 500 *мм*. Подвесные своды делают из магнезитового или хромомагнезитового кирпича размером 350—400 *мм*. Так как подвесные своды более устойчивы и просты в эксплуатации, то все новые отражательные печи строятся только с подвесными сводами.

Перед пуском печи в эксплуатацию на кирпичную кладку ле-

щади с помощью пневматических трамбовок набивается слой из огнеупорной глины толщиной 50—100 *мм*, а затем второй слой из чистого кварцевого песка толщиной 600—800 *мм*. При нагреве набивного слоя из кварцевого песка до температуры 1500—1600° С за счет спекания зерен кварца (в основном в ви-

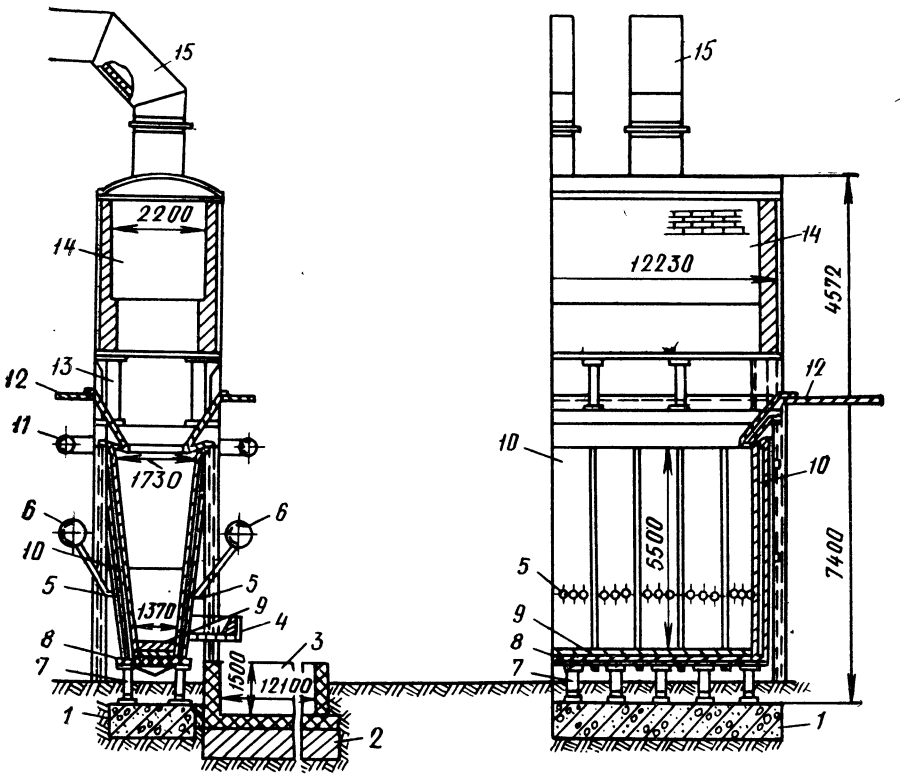


Рис. 84. Шахтная печь для плавки медных руд

1 — фундамент печи; *2* — фундамент переднего горна; *3* — передний горн; *4* — переливной желоб; *5* — фурма; *6* — воздухопровод; *7* — колонны; *8* — опорная плита; *9* — футеровка дна; *10* — кессон; *11* — подвод воды; *12* — колошниковая площадка; *13* — загрузочное окно; *14* — шатер; *15* — газоход

де тридимита) образуется плотная монолитная подина рабочего пространства печи.

Загрузку в печь шихты производят через отверстия в главном своде, расположенные около пят по всей длине свода на расстоянии 1,2—1,5 *м* друг от друга. Продукты плавки — штейн и шлак — выпускают из печи по мере их накопления, причем штейн выпускают через две летки (шпуровочные окна), находящиеся на уровне пода в одной из боковых стен печи. В окна вставлены чугунные или медные охлаждаемые водой плиты

с квадратными отверстиями, в которые устанавливают чугунные втулки (летки) с внутренним диаметром 45—50 *мм*. Шлак удаляют из печи через окно, расположенное в боковой стенке ванны ближе к ее хвостовой части на высоте 700—800 *мм* от уровня пода. Заливку жидких составляющих шихты (конверторных шлаков) в рабочее пространство печи производят через желоб, устанавливаемый в окне, расположенном в боковой стенке печи. Температура в печи на расстоянии 3,5 *м* от торцевой стенки, в которой расположены горелки или форсунки, достигает 1550—1600° С, в середине печи 1300—1350° С и в хвостовой части печи у входа в боров не превышает 1200—1250° С.

Термический к. п. д. отражательных печей в связи с высокой температурой продуктов горения, поступающих в боров, составляет всего 20—30%. При наличии котлов-утилизаторов общий энергетический к. п. д. повышается до 55—65%.

Отражательные печи для огневого рафинирования меди, плавки оловянных концентратов и т. п. отличаются от описанной выше конструкции только размерами, некоторыми конструктивными особенностями огнеупорной кладки, загрузкой шихты и распределением ее в рабочем пространстве (не на откосы, а по всей площади ванны), но принципиальные схемы их работы аналогичны.

Шахтные печи наряду с отражательными печами нашли в цветной металлургии широкое применение для плавки руд меди, никеля и свинца. Печь (рис. 84) представляет собой шахту, собранную из металлических водоохлаждаемых кессонов, вследствие чего эти печи часто называют ватержакетными, т. е. имеющими водяную рубашку.

В нижней части шахты в кессонах имеются отверстия (фурмы), через которые подается воздух, необходимый для горения топлива. Выпуск продуктов плавки производят через отверстия (летки), находящиеся на уровне низа (лещади) печи. Газообразные продукты через надколошниковую камеру (шатер) и газоходы отводятся в пылеуловители и далее в дымовую трубу.

Загрузку шихты, состоящей из руды, оборотов продуктов переработки цветных металлов, флюсов и кокса, производят в определенных количествах и в определенной последовательности — вначале кокс, а затем руда, флюсы и обороты.

Наиболее высокая температура печи наблюдается в фурменной зоне, где она достигает 1400—1600° С. Газы, нагретые в фурменной зоне до температуры 1350—1500° С, поднимаются вверх и нагревают опускающуюся сверху вниз шихту (загружаемые в печь сырые материалы). Температура газов на уровне колошника 350—550° С.

Конечным продуктом плавки в этих печах, как и в отражательных, являются: штейн, шлак и газы CO_2 и SO_2. Образующиеся сернистые газы являются ценным продуктом для получения серы.

Лещадь печи, лежащую на стальных или чугунных водоохлаждаемых плитах, футеруют магнезитовым или хромомагнезитовым кирпичом. Шахта состоит из прямоугольных кессонов и имеет в вертикальном сечении форму трапеции, обращенной меньшим основанием вниз. Торцевые кессоны, имеющие форму трапеции, устанавливают вертикально. Кессоны представляют собой полые емкости прямоугольной (для боковых стен) или трапецеидальной (для торцевых стен) формы из листового металла толщиной 10—20 *мм* (внутренняя стенка) и 6—10 *мм* (наружная стенка).

Внутри кессона имеются продольные ребра жесткости, а в нижней его части — люк для чистки кессона от накипи. В наружной стенке кессона расположены два отверстия для подвода (нижнее) и отвода (верхнее) воды. В кессонах, образующих боковые стенки шахты, запрессовывают по три стальные втулки диаметром 60—100 *мм* для установки в них фурм, соединенных с воздухопроводом, по которым подается дутье. Кессоны скрепляют между собой болтами, для чего к бортам их приваривают металлические пластины с отверстиями. Щели между кессонами заполняют асбестовым шнуром.

Печи загружают рудой, флюсом и коксом с колошниковой площадки, расположенной на уровне края кессонов вдоль боковых стен печи, через окна надколошникового устройства, закрываемые шарнирно-подвешенными дверцами.

Надколошниковое пространство состоит из металлического каркаса, опирающегося на самостоятельные колонны (не связанные с каркасом шахты), с футеровкой из шамотного кирпича. Своды надколошникового пространства арочного типа из шамотного кирпича имеют отверстия для газоходов, футерованных шамотным кирпичом, через которые газы из печи с мелкими частицами руды идут в осадительные камеры.

Расплавленные штейн и шлак скапливаются в нижней части шахты и вместе через окно-отверстие, расположенное в боковой стенке печи, поступают в желоб. В той части стенки, где расположен желоб, устанавливают кессон более короткий, чем остальные. В пространстве между коротким кессоном и лещадью выставляют так называемый «выпускной кессон», состоящий из медной плиты с залитым в нее плоским змеевиком из труб, по которым циркулирует вода. Отверстие в выпускном кессоне соединено с желобом, состоящим из водоохлаждаемых металлических плит, футерованных огнеупорным кирпичом. Из желоба шлак и штейн непрерывной струей через выполненный из огнеупорного кирпича сливной порог (в конце желоба) попадают в имеющий овальную форму отстойник, называемый передним горном, высотой 1,2—1,5 *м*, шириной 3,5—5 *м* и длиной до 15 *м*. Дно и стены переднего горна футеруют шамотным или хромомагнезитовым кирпичом. Свода горн не имеет. Штейн выпускают периодически, по мере его накопления через летки, располо-

женные в боковых стенах горна на уровне его пода. Шлаки выпускают через окно, расположенное в торцевой части горна.

Кроме шахтных печей для плавки медных руд в цветной металлургии распространены и другие шахтные печи для получения полупродуктов свинца, никеля и т. п. Они имеют свои конструктивные особенности, вызванные спецификой технологического процесса, но в принципе аналогичны описанной выше шахтной печи.

§ 25. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПЕЧИ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Печи для обжига цинковых концентратов в кипящем слое

Для получения цинка электролитическим способом, содержащего химически чистого Zn 99%, исходным сырьем, поступающим в электролизные ванны, является сернокислый цинк $ZnSO_4$ в виде растворенных в серной кислоте обожженных в печах цинковых концентратов. В связи с этим целью обжига цинковых концентратов является получение соединений цинка, которые легко растворяются в серной кислоте. Находящийся в концентратах цинк в виде сернистого цинка ZnS в процессе обжига окисляется кислородом воздуха по реакции

$$2ZnS + 3O_2 = 2ZnO + 2SO_2.$$

Окись цинка ZnO хорошо растворяется в серной кислоте. Часть окиси цинка в процессе обжига переходит в сульфат цинка ($ZnO+SO_3=ZnSO_4$), являющийся наиболее ценным продуктом обжига, так как он хорошо растворяется в воде, т. е. для перевода его в раствор не надо затрачивать серную кислоту. Эти две реакции, протекающие со значительным выделением тепла, являются основными в процессе обжига цинковых концентратов.

Обжиг цинковых концентратов осуществляют в шахтных печах, которые по принципу действия и устройству мало чем отличаются от печей для обжига медных концентратов, описанных выше, а также в многоподовых пересыпных печах и печах для обжига в кипящем слое.

В последние годы печи для обжига в кипящем слое все больше внедряются для обжига сырья и полупродуктов различных цветных металлов, так как обеспечивают полноту выжигания серы при высокой производительности. Обжиг в кипящем слое назван так потому, что подающийся в печь в виде пыли концентрат подхватывается воздухом, поступающим через отверстия в поде печи, становится подвижным, и состояние его по внешнему виду напоминает кипение.

Схематическая печь для обжига цинковых концентратов в кипящем слое показана на рис. 85. Она состоит из цилиндрической

обжиговой камеры, пода, через отверстия в котором подается воздух, устройства для загрузки шихты и удаления готовой продукции и газоотводящей системы.

Обжиговая камера представляет собой металлический кожух из листового металла, футерованный изнутри шамотным кирпичом. Между кожухом и шамотной футеровкой имеется теплоизоляционная прослойка. Купольный свод камеры футерован шамотным кирпичом, или, как и стены обжиговой камеры, может быть выполнен из жаростойкого бетона.

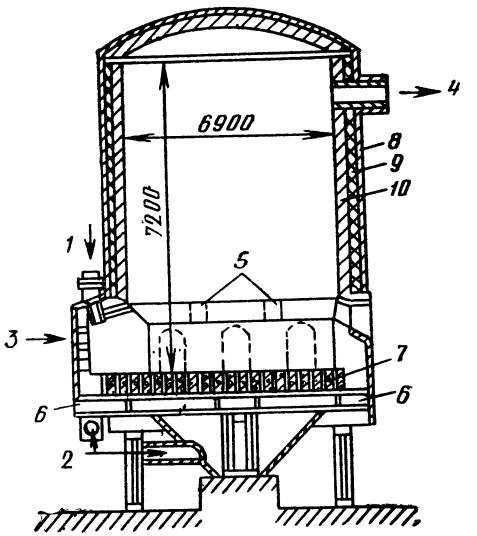


Рис. 85. Печь для обжига в кипящем слое

1 — загрузка концентрата; *2* — подвод воздуха; *3* — форсунки (горелки); *4* — вывод отходящих газов; *5* — разгрузочные окна; *6* — воздушная камера; *7* — днище с отверстиями; *8* — кожух; *9* — теплоизоляция; *10* — шамотная футеровка

В верхней части камеры имеется газоотвод, через который отходящие газы и мелкие частицы продукта в виде пыли по газопроводам попадают в электрофильтры, расположенные рядом с обжиговой печью.

Концентрат загружается в печь (в зону кипящего слоя) через специальный бункер, а обожженный материал удаляется самотеком по трубам через отверстия, находящиеся на уровне кипящего слоя. Нагрев материала до температуры 850—950° С происходит в основном за счет протекающих в печи экзотермических реакций. Для подачи тепла извне печь имеет форсунки или горелки, работающие на жидком или газообразном топливе.

Под печи, через отверстия в котором подается воздух (или газ), поддерживает материал в состоянии кипящего слоя. Он выполняется из металлических плит или жаростойкого бетона.

Чтобы обжигаемый материал не засорял отверстия в поде, их защищают грибообразными соплами или огнеупорными шарами, укладываемыми в лунки отверстий. Воздух, подаваемый от вентилятора (или нескольких вентиляторов), поступает в специальную воздушную коробку, разделенную на отдельные секции, имеющие самостоятельный подвод воздуха, для обеспечения ровной и устойчивой работы печи.

Площадь пода наиболее распространенных печей для обжига в кипящем слое цинковых концентратов, в зависимости от производительности, составляет 20—30 $м^2$. Высота обжиговой

камеры 6—10 *м*, а диаметр 6—8 *м*. Высота кипящего слоя 800—1500 *мм*.

Электролизные ванны для получения алюминия

Исходным продуктом для производства алюминия электролитическим путем является чистый глинозем, полученный из бокситов, содержащих $Al_2O_3 \approx 65\%$.

Наиболее распространенным способом получения глинозема является спекание боксита при высоких температурах с содой и известняком. Получаемый при этом продукт, содержащий алюминат натрия, после выщелачивания водой в виде алюминатного раствора разлагают углекислотой с выделением алюминия. Прокаливая последний, получают глинозем, годный для электролиза.

Схема электролизной ванны показана на рис. 86.

Процесс получения алюминия в электролизной ванне сводится к следующему. Постоянный электрический ток, проходя через электролит — расплавленный криолит ($3\,NaF \cdot AlF_3$ или Na_3AlF_6) и растворенный в нем глинозем Al_2O_3, поддерживает их в расплавленном состоянии и одновременно электролитически разлагает глинозем. Образующийся при этом алюминий собирается на подине ванны, служащей катодом. Таким образом, в ванне имеются два жидких слоя — слой алюминия и слой электролита, в который частично опущен анод.

В процессе работы на боковых стенках ванны за счет электролита образуется гарнисаж. На открытой поверхности ванны электролит образует твердую корку, на которую из бункеров подается глинозем. По мере необходимости корку разбивают и глинозем поступает в электролит. «Сгорание» (расход) анода происходит за счет выделения на нем кислорода, окисляющего углерод до CO и CO_2.

Алюминий извлекают из ванны с помощью сифона или вакуум-ковша через отверстие, пробиваемое в корке электролита.

Кожух ванны прямоугольной формы из листового металла крепят к фундаменту анкерными болтами. Дно ванны и ее боковые стены футеруют шамотным кирпичом. На шамотную футеровку дна наносят слой углеродистой массы, на которую устанавливают прессованные предварительно обожженные угольные подовые блоки.

Электрический ток подается к углеродистым подовым блокам (катодам) с помощью стальных стержней. Для обеспечения надежного контакта зазоры между блоками и стальными стержнями заливают чугуном. Швы между блоками заполняют нагретой до 70—80° С углеродистой массой. Боковые стены ванны впритык к шамотной кладке футеруются углеродистыми плитами. Глубина ванны от пода до верха футеровки стен составляет 0,4—0,5 *м*.

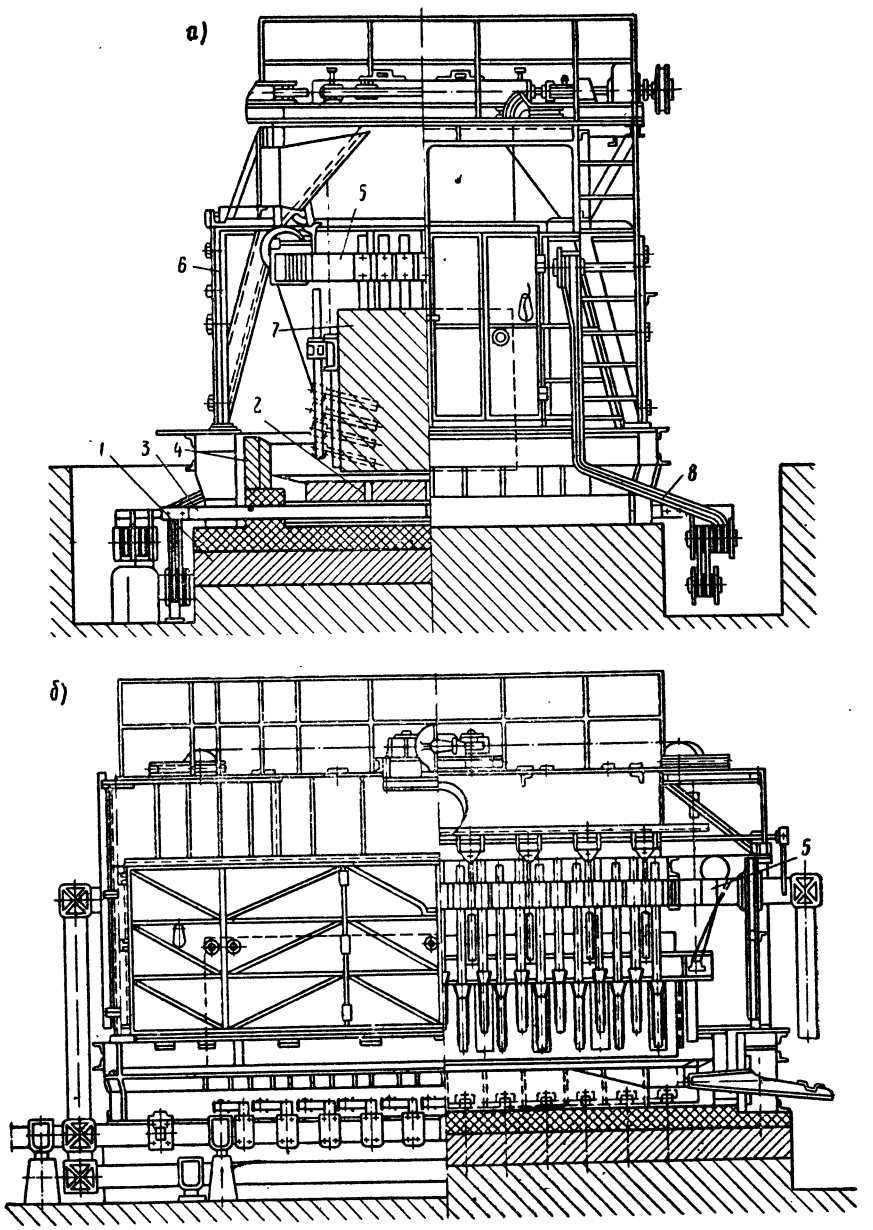


Рис. 86. Электрическая алюминиевая ванна с самообжигающимся анодом

а — поперечный разрез; *б* — вид спереди и продольный разрез; *1* — шамотный кирпич; *2* — катодные угольные блоки; *3* — стальные стержни; *4* — углеродистые плиты; *5* — рама анода; *6* — неподвижная рама; *7* — анод; *8* — алюминиевые шины

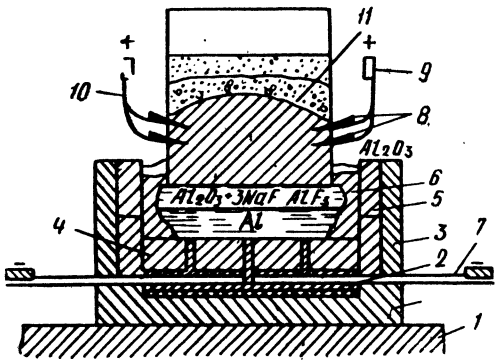


Рис. 87. Схематический разрез ванны с самообжигающимся анодом

1 — фундамент; *2* — катодные блоки; *3* — шамотная футеровка; *4* — подовые углеродистые блоки; *5* — стержни; *6* — гарнисаж; *7* — стальные стержни; *8*—стальные штыри; *9* — шины; *10* — гибкий кабель; *11* — анод

Непрерывный самообжигающийся анод представляет собой прямоугольный кожух из алюминиевых листов, куда периодически загружают горячую анодную массу, состоящую из прокаленного при температуре 1300° С без доступа воздуха нефтяного или пекового коксика (сухой остаток после перегонки нефти или каменноугольной смолы) и пека (продукт перегонки каменноугольной смолы с температурой размягчения 45—60° С).

Загружаемая анодная масса в своей верхней части находится в тестообразном состоянии и по мере опускания вниз за счет тепла, выделяемого ванной, превращается в сплошной твердый монолит.

Для предохранения от распора загружаемой анодной массой алюминиевый кожух заключен в металлический каркас, по которому анод движется вниз, как по направляющим. Электрический ток к аноду подводится с помощью алюминиевых шин через гибкие шины и стальные штыри, забиваемые в тело анода.

Штыри забивают в четыре ряда по 16—25 шт. в каждом ряду. По мере опускания анода их переставляют снизу вверх. Для подъема и опускания анода имеется специальное устройство, состоящее из механизма подъема, установленного на неподвижной раме, тросов, к которым прикреплен каркас анода, и ушков, закрепленных на каркасе и служащих для захвата забитых в тело анода штырей (рис. 87). На раме, опирающейся на колонны печи, смонтированы бункера, из которых глинозем поступает в печь, и металлические шторные дверцы, закрывающие ванну со всех сторон.

ГЛАВА VIII

ПЕЧИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

§ 26. ПЕЧИ ДЛЯ ОБЖИГА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Строительные материалы обжигаются в кольцевых, туннельных, шахтных и однокамерных печах.

Туннельные печи

Туннельные печи представляют собой непрерывно действующие установки, в которых по специальному туннелю навстречу продуктам горения движутся вагонетки с обжигаемыми на них изделиями.

Туннельные механизированные печи в значительной степени вытеснили кольцевые и периодические газокамерные установки и в настоящее время находят все более широкое применение для обжига кирпича, керамических облицовочных материалов и труб, изделий из фарфора, огнеупорных изделий.

Основным видом топлива для туннельных печей является природный газ. В ряде случаев используется жидкое и твердое низкосортное топливо, сжигаемое в выносных топках.

Принцип работы туннельных печей заключается в том, что по мере продвижения по туннелю печи материалы, погруженные на вагонетки, вначале подогреваются (в зоне подогрева) за счет отходящих продуктов горения и нагретого воздуха, поступающего в зону подогрева из зоны охлаждения, затем обжигаются (в зоне обжига) и охлаждаются (в зоне охлаждения).

В туннельных печах регулируется подача топлива, воздуха для горения и охлаждения продукции, а также и количество продуктов горения и нагретого воздуха. Это осуществляется за счет установки раздельно работающих вентиляторов, дымососов и рециркуляции дымовых газов и воздуха по рециркуляционным каналам, располагаемым вдоль печи над сводом, по которым дымовые газы и воздух могут быть поданы в соответствующие зоны печи. Так, по системе рециркуляционных каналов отсасываемый воздух из одних участков зоны охлаждения подается в другие участки этой же зоны, продукты горения и воздух из зоны подогрева можно подавать в зону обжига и т. д. Регулирование распределения продуктов горения и воздуха позволяет применять широкую автоматизацию процессов подогрева, обжига и охлаждения изделий, обеспечивающую получение наилучших технико-экономических показателей работы этих видов печей. Размеры туннелей зависят от вида топлива, назначения и производительности туннельных печей. Длина туннельных пе-

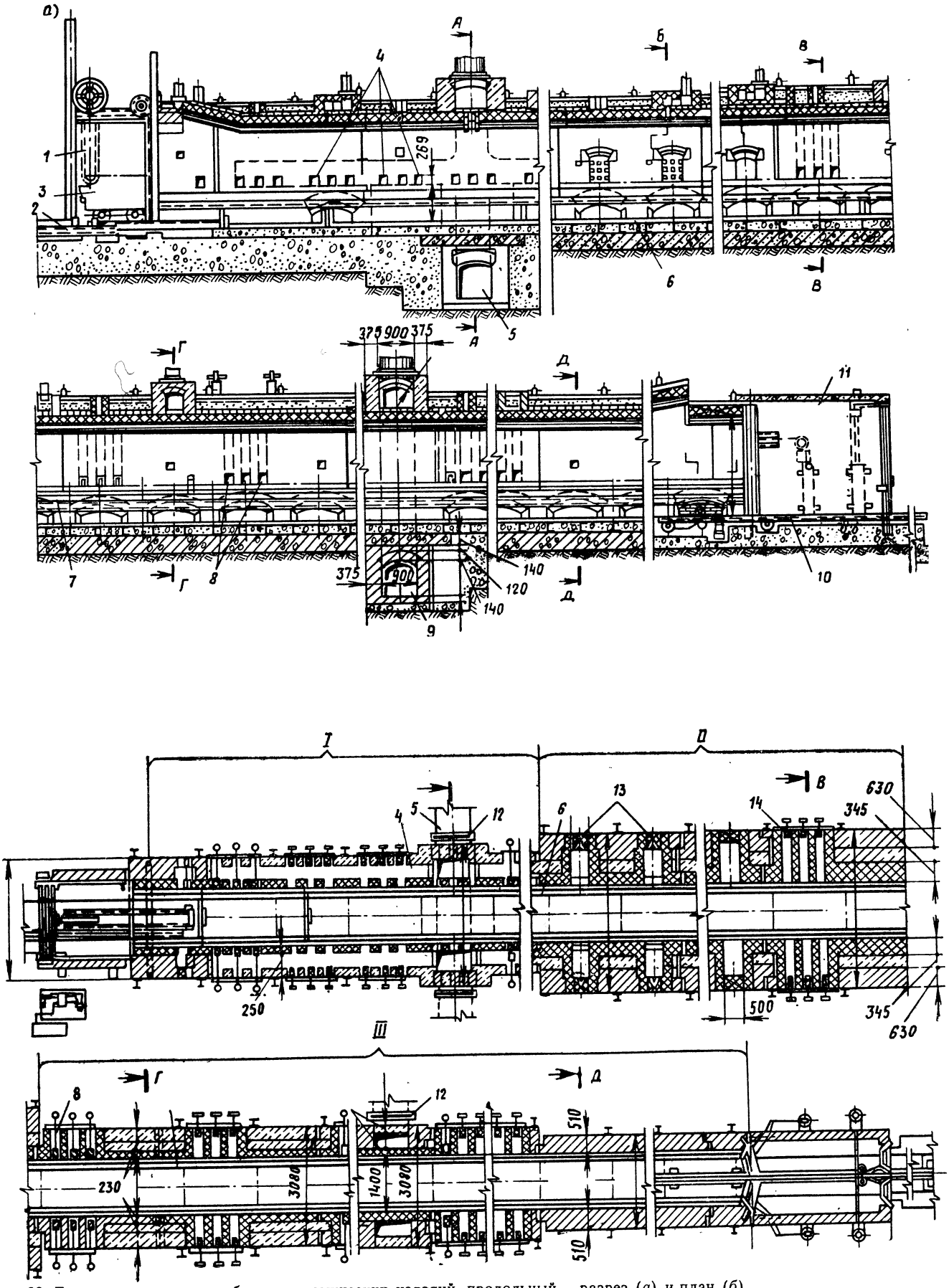


Рис. 88. Туннельная печь для обжига керамических изделий, продольный разрез (*а*) и план (*б*)

I — зона подогрева; *II* — зона обжига; *III* — зон охлаждения; *1* — входная камера; *2* — толкатель; *3* — вагонетка; *4* — дымовые каналы; *5* — боров; *6* — рельсовый путь; *7* — песочный затвор; *8* — каналы отбора подогретого воздуха; *9* — воздушный канал; *10* — вытаскиватель; *11* — выходная камера; *12* — шиберы; *13* — горелочное отверстие; *14* — заслонка

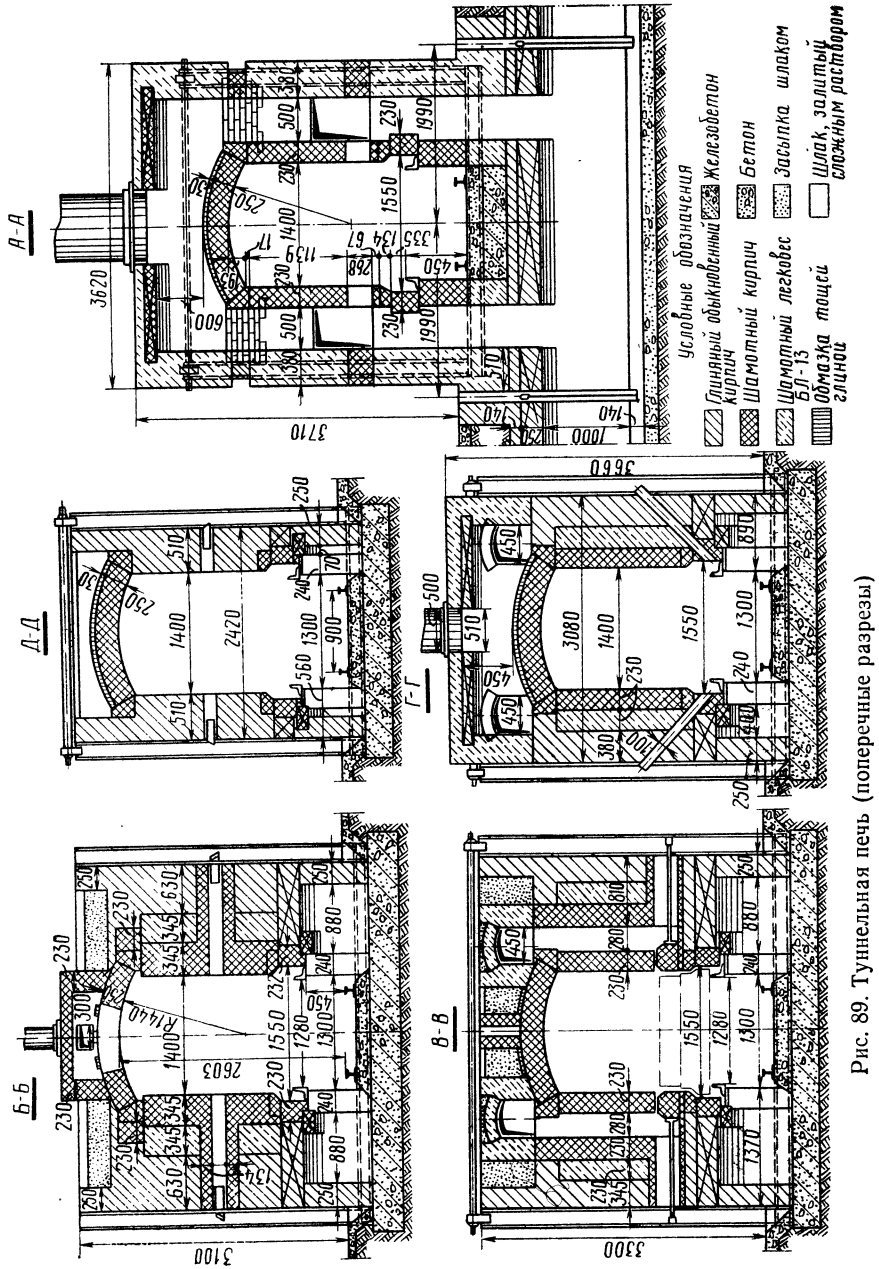


Рис. 89. Туннельная печь (поперечные разрезы)

чей колеблется от 5 до 150 *м*, ширина (внутри) — от 1,5 до 3 *м* и высота от пода вагонетки до замка свода 1,6—1,8 *м* от головки рельсов до замка свода 2,5 до 2,8 *м*.

На рис. 88, 89 показана туннельная печь для обжига керамических изделий длиной 87,5 *м*, шириной канала (в свету) 1,4 *м* и высотой (от головки рельсов до замка свода) 2,6 *м*. Стены печи выполнены в зоне подогрева из обыкновенного глиняного кирпича (380 *мм*) и шамотного кирпича (230 *мм*); в зоне обжи-

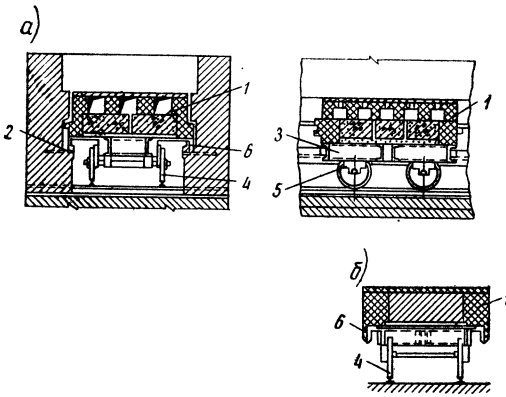


Рис. 90. Вагонетки туннельных печей

а — с канализированным подом; *б* —со сплошным подом; *1* — футеровка; *2* — песочный затвор; *3* — рама; *4* — полускаты; *5* — буксы; *6* — фартук с ножом

га — из обыкновенного глиняного кирпича (630 *мм*), изоляционного (345 *мм*) и шамотного (345 *мм*); в зоне охлаждения (ближе к зоне обжига) — из обыкновенного глиняного кирпича (380 *мм*), изоляционного (230 *мм*) и шамотного (230 *мм*) и в конце зоны охлаждения — только из обыкновенного глиняного кирпича (510 *мм*).

Свод туннеля по всей его длине выполнен из шамотного кирпича (250 *мм*). Межсводовые каналы выполнены из шамотного легковесного кирпича.

Для предотвращения попадания продуктов горения и воздуха из рабочей части туннеля в подвагонеточное пространство вдоль всей печи (по обеим сторонам) устроен песчаный затвор. В стенах печи имеются специальные отверстия, через которые в песчаный затвор периодически подсыпают песок.

В начале туннельной печи имеется входная камера, а в конце — выходная камера с затворами, обеспечивающими герметичность туннеля при закатывании и выкатывании из печи вагонеток. Продвижение вагонеток по рельсовым путям внутри печи происходит с помощью гидравлических или механических (винтовых) толкателей.

Подъем и опускание затворов связаны с работой толкателей. При заталкивании вагонетки с помощью системы автоматической регулировки происходит подъем заслонок, подача в печь

очередной груженой вагонетки (в начале печи) и выкатка вагонетки (в конце печи) с готовой продукцией. При возвращении механизма толкания в исходное положение затворы автоматически опускаются.

Вагонетки туннельных печей (рис. 90) двухосные. Рама вагонетки состоит из жесткого металлического каркаса, на который кладется огнеупорная футеровка, служащая одновременно и основанием для размещения на ней обжигаемой продукции и подиной рабочего пространства туннеля. Футеровка вагонеток выполняется из различных огнеупорных материалов: шамотных фасонных изделий, нормального шамотного кирпича, жаростойкого бетона в различных комбинациях. В торцах футеровки вагонеток устраивают специальные выступы и впадины для создания надежного уплотнения между ними.

Топливосжигающие устройства в печи располагаются в обеих стенах зоны обжига. Продукты горения из зоны обжига направляются в зону подогрева и из нее через боров и дымовую трубу в атмосферу или с помощью дымососа в сушильные камеры. Холодный воздух в зону охлаждения подается вентилятором. Воздух, нагретый за счет тепла остывающей продукции, частично поступает в зону обжига (вторичный воздух), а частично через окна в стенах печей и вертикальные каналы в межсводовый канал и через него в зону подогрева. Излишки воздуха с помощью дымососов поступают в сушильные камеры.

Конструкции туннельных печей в зависимости от назначения и видов топлива хотя несколько отличаются друг от друга, однако принцип их работы и основные конструктивные элементы остаются те же.

В последнее время широкое распространение получили туннельные печи, сооружаемые из жаростойких блоков. Конструкция туннельной печи, работающей на твердом топливе, производительностью 8—12 млн. шт. условного обыкновенного глиняного кирпича в год показана на рис. 91. Длина печи 70 *м*, ширина туннеля 1740 *мм*, высота 2480 *мм* (от верха головки рельсов до свода).

По длине печи укладывается 29 блоков, по высоте — 3 блока. Свод подвесной. Всего стеновых блоков 184 шт. —20 типоразмеров. Длина каждого блока 2250 *мм*, за исключением концевых блоков печи, длина которых составляет 2140 и 1125 *мм*. Высота блока первого ряда (по вертикали) 1185 *мм*, второго ряда — 850 *мм* и третьего ряда —850 *мм*. Несмотря на довольно большое количество типоразмеров стеновых блоков (20), их практически можно изготовить в 8 типах опалубки, так как блоки первого ряда, а также второго и третьего рядов отличаются только по длине и наличием в них отверстий. Изготовление различных блоков осуществляется в опалубке, где бетонируются основные виды блоков, путем вставки в нее различных вкладышей.

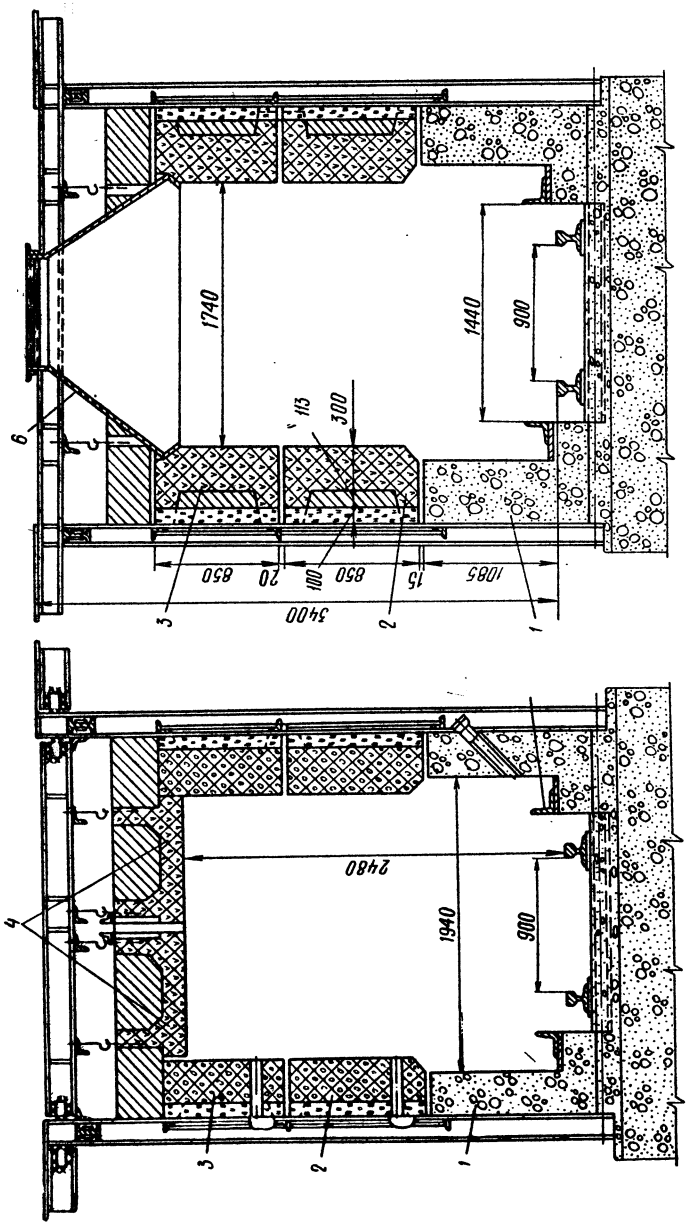


Рис. 91. Туннельная печь из жаростойких железобетонных блоков
1 — цокольный блок (первый ряд); *2* — стеновой блок (второй ряд); *3* — стеновой блок (третий ряд); *4* — сводовые блоки; *5* — песочный затвор; *6* — короб рециркуляции дымовых газов

Состав бетона для изготовления блоков: первого ряда — портландцемент 350 *кг*, тонкомолотая добавка — 120 *кг*, песок и щебень из отвальных доменных шлаков соответственно 900 и 1000 *кг*; второго и третьего рядов — в зоне подогрева и охлаждения — портландцемент — 350 *кг*, тонкомолотый шамот ШБ — 120 *кг*, песок шамотный — 650 *кг*, щебень шамотный ШБ — 700 *кг*; зоны обжига: глиноземистый цемент 400 *кг*, песок шамотный ШБ — 700 *кг*, щебень шамотный — 750 *кг*.

Блоки второго и третьего рядов в зоне обжига двухслойные — бетон и диатомитовый кирпич; последний располагается между ребрами бетонных блоков. Максимальная масса блоков 2,75 *т*, минимальная — 0,7 *т*. Монтаж стеновых блоков осуществляется без перевязок горизонтальных и вертикальных швов на растворе следующего состава: портландцемент марки 400 16—20%, шамотный порошок 80—84%, огнеупорная глина (в % от массы сухой смеси сверх 100%) 0,8—1,2%. Вертикальные швы (пазы) заполняются этим же раствором с обязательным их уплотнением с помощью вибратора. Между наружной стороной стеновых блоков второго и третьего рядов и кожухом печи (из листового алюминия $\delta = 0{,}8$ *мм*) прокладывается слой минеральной ваты толщиной 100 *мм*. Для заполнения температурных швов в стенах печи применяется масса следующего состава: шамотный мертель марки ШК-2—70%; асбест хризотиловый сорт VI—30%, вода — 200—250 *л*.

Сводовые блоки, подвешиваемые на специальных подвесках к верхним поперечным балкам каркаса печи, однотипные. Бетон для их изготовления применяется такой же, как и для стеновых блоков зоны обжига. Швы между блоками перекрываются пенодиатомитовым кирпичом на растворе. Пазухи между ребрами сводовых блоков и между ребрами блоков и каркасом печи футеруются диатомитовым кирпичом на растворе. Верхняя часть свода покрывается асбестоцементной штукатуркой толщиной 20 *мм*.

Шахтные печи промышленности строительных материалов

В промышленности строительных материалов шахтные печи обычно применяют для получения материалов путем обжига минерального сырья.

Рабочее пространство шахтных печей, в которых ведется обжиг материалов, по высоте можно разделить на три части: зону обжига, расположенную несколько ниже середины печи; зону подогрева — выше зоны обжига до загрузочного отверстия и зону охлаждения — ниже зоны обжига до разгрузочных устройств.

В зоне охлаждения поступающий в шахту печи холодный воздух охлаждает готовую продукцию, выходящую из зоны обжига, и при этом нагревается до температуры 300—500° С.

В зоне обжига, куда попадает нагретый воздух, происходит полное сгорание топлива и обжиг материалов при требуемых по технологии температурах.

Из зоны обжига газообразные продукты горения выходят в зону подогрева, проходят через загруженные в шахту материалы, подогревают их и при температуре 200—400° С удаляются из печи в атмосферу.

Топливом для шахтных печей служит природный газ, мазут и твердое топливо: кокс, антрацит и каменный уголь. Кокс и антрацит загружают вместе с обжигаемым материалом. Каменный уголь сжигают в специальных выносных топках, располагаемых вне рабочего пространства шахтной печи.

Шахтные печи используют для обжига гипса, цемента, шамота и ряда других материалов, но чаще для обжига минерального сырья на известь. Сырьем для производства извести являются: чистые известняки, мел, известняк-ракушечник и другие породы, состоящие в основном из углекислого кальция $CaCO_3$.

В зоне подогрева из сырья, загружаемого в печь, удаляется влага и при температуре 1100—1200° С (зона обжига) происходит разложение известняка по реакции $CaCO_3 = CaO + CO_2$ (газ), являющейся основной реакцией при производстве извести-кипелки, которая после гашения водой превращается в гашеную известь-пушонку $Ca(OH)_2$, которую используют для при-

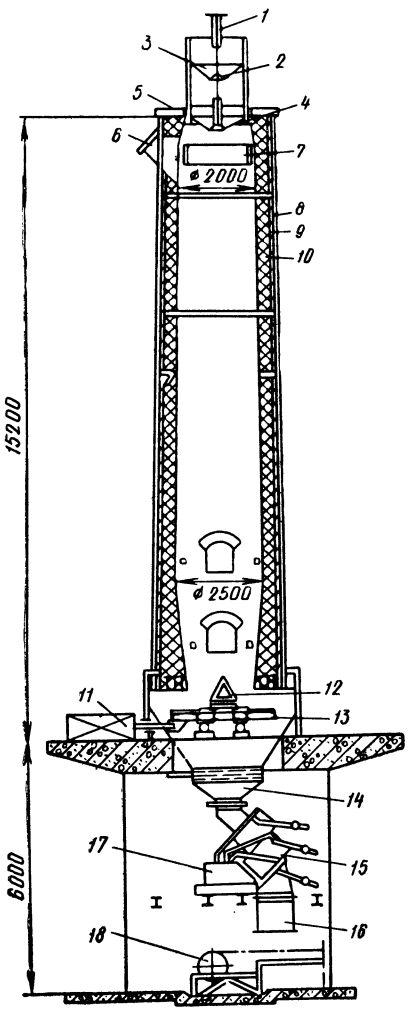


Рис. 92. Шахтная пересыпная известеобжигательная печь

1 — тяга конуса; *2* — первый конус; *3* — загрузочная воронка; *4* — второй конус; *5* — распределительная воронка; *6* — выход газа; *7* — защитное устройство; *8* — кожух; *9* — изоляционная засыпка; *10* — шамотная кладка; *11* — привод вращающейся чаши; *12* — распределительный конус; *13* — вращающаяся чаша; *14* — бункер; *15* — затворы; *16* — разгрузочный рукав; *17* — привод затворов; *18* — конвейер

готовления растворов для кирпичной и других видов кладки штукатурки, побелок и т. п.

На рис. 92 показана шахтная пересыпная печь для обжига извести, работающая на коксе, загружаемом вместе с сырьем. Футеровка зоны охлаждения из шамотного кирпича, но может быть выполнена и из жаростойкого бетона, зона обжига — из хромомагнезитового или многошамотного кирпича с повышенной механической прочностью (доменный кирпич). Зону подогрева футеруют шамотным кирпичом повышенной прочности, а верхнюю часть этой зоны выполняют из чугунных плит. Основанием печи служит железобетонный фундамент (нижняя плита, колонны и обвязочные балки), поверх которого смонтирован кожух из листового металла. Применение чугунных плит и футеровки шахты из особо прочных огнеупоров (предел прочности при сжатии 300—800 *кгс/см*^{2}) объясняется механическими воздействиями на футеровку кусков шихты, опускающейся сверху вниз и истирающей ее, а также ударами кусков шихты о футеровку при загрузке. Зазор между футеровкой и кожухом заполняется теплоизоляционным материалом. Подача материалов, известняка и топлива в печь в принципе не отличается от процесса загрузки шихты в доменную печь.

Для отвода продуктов горения из печи в верхней части зоны подогрева имеются два дымохода.

Удаление из шахты готовой продукции производится с помощью специального устройства, состоящего из вращающейся чаши, имеющей в центре отверстия, а по периферии скребки. Во время вращения чаши скребки направляют известь к отверстию, через которое она и ссыпается по трубе, вставленной в это отверстие и вращающейся вместе с чашей. Из трубы известь попадает на разгрузочный стол, с которого скребками, прикрепленными к трубе, сбрасывается в бункер, откуда поступает в трехшлюзовой барабанный затвор, расположенный внизу бункера. При повороте барабанного затвора на 180° известь через отводящие рукава удаляется из печи.

Шахтные печи, отапливаемые газообразным топливом, в нижней части по центру имеют особое устройство из огнеупорного кирпича, называемое керном. В керне по его периферии расположены газовые горелки, к которым подводится газ. Устройство керна в центре печи обусловливается необходимостью равномерного прогревания шихты по всему сечению шахты. При установке горелок по диаметру печи снаружи обеспечить это практически невозможно.

§ 27. ВРАЩАЮЩИЕСЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ПЕЧИ

Вращающаяся цилиндрическая печь представляет собой полый стальной цилиндр, футерованный внутри огнеупорными изделиями и вращающийся вокруг своей оси (рис. 93). Цилиндр

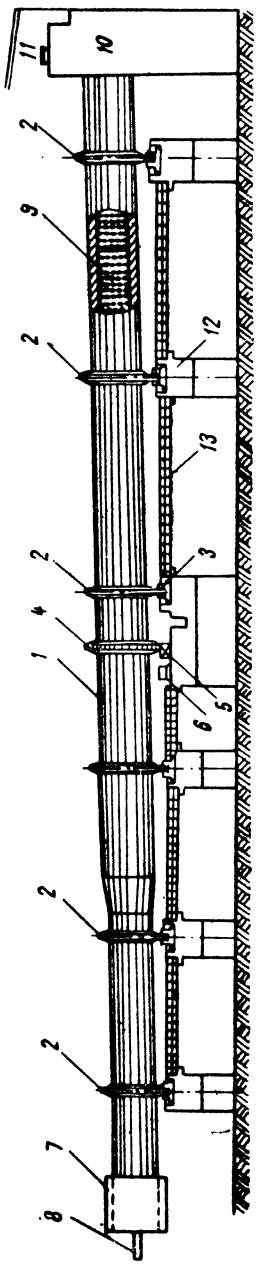


Рис. 93. Вращающаяся барабанная печь

1 — барабан; *2* — бандажи; *3* — опорные ролики; *4* — зубчатый венец; *5* — редуктор; *6* — электродвигатель; *7* — головка печи с холодильниками; *8* — подача топлива; *9* — цепная зона; *10* — пылеосадительная камера; *11* — загрузочная воронка; *12* — фундаменты; *13* — переходные площадки

несколько наклонен к горизонтали и поэтому материалы, загружаемые в него, пересыпаются при его вращении и передвигаются от высокого конца к низкому, навстречу продуктам сгорания топлива, сжигаемого в горелках, установленных в нижнем торце барабана.

Небольшие вращающиеся печи применяют для производства керамзита (вспученных глин), а также для обжига извести и гипса. В более крупных вращающихся печах выполняют обжиг каустического и металлургического магнезита и шамота. Наибольшее распространение вращающиеся печи получили при производстве цементного клинкера, являющегося исходным материалом при производстве цемента.

Основным сырьем для получения цементного клинкера, а следовательно и цемента, являются известняки, глины и известняковые мергели. Поступающее на завод сырье дробится, дозируется и направляется в резервуары, оборудованные особыми устройствами для перемешивания массы, куда подается также большое количество воды. В процессе перемешивания сырья с водой образуется сметанообразная масса, называемая шламом, который после дополнительного измельчения на специальных мельницах подается в шлам-бассейн — в резервуары больших размеров, оборудованные мешалками. После выдержки в них в течение нескольких суток шлам по системе трубопроводов поступает в распределительные баки, оттуда — во вращающиеся печи на обжиг. Влажность шлама в среднем составляет 33—38%, но может колебаться и в более широких пределах в зависимости от видов сырья.

Печь по длине условно разбита на ряд зон, в каждой из которых сырьевая смесь (шлам), поступающая в печь, по мере продвижения от верхнего, холодного, к нижнему, горячему, концу печи проходит следующие стадии:

1) в зоне подсушки происходит испарение свободной влаги. Температура газов в начале зоны 800—1000° С, в конце 200—250° С, обжигаемого материала соответственно 250 и 25° С, рабочей поверхности футеровки 800 и 70° С. Футеровка покрыта слоем шлака и подвергается истирающему действию обжигаемого материала;

2) в зоне подогрева происходит выгорание органических веществ и удаление химически связанной воды из составляющих глины. Температура газов в начале зоны 1250° С, в конце 1100° С, обжигаемого материала соответственно 500 и 250° С, рабочей поверхности футеровки 920 и 80° С. Футеровка подвергается истирающему действию гранулированного порошкообразного материала;

3) в зоне кальцинирования протекают основные реакции разложения $CaCO_3$ на CaO и CO_2. Температура газов в начале зоны 1600° С, в конце 1250° С, обжигаемого материала соответственно 900 и 500° С, рабочей поверхности футеровки 1320

и 920° С. Футеровка подвергается истирающему действию гранулированного материала;

4) в зоне экзотермических реакций преобладают основные реакции в твердом состоянии между CaO и SiO_2; Al_2O_3 и FeO с образованием $3CaO \cdot SiO_2$, содержание которого в готовом клинкере составляет 50—65%, и $3CaO \cdot Al_2O_3$ (10—15%). Температура газов в зоне 1600° С, обжигаемого материала в начале зоны 900° С, в конце 1400° С, рабочей поверхности футеровки соответственно 1400 и 1320° С. На футеровку воздействует клинкер в жидкой фазе. На поверхности футеровки образуется защитная обмазка (гарнисаж);

5) в зоне спекания происходит спекание с частичным плавлением материала и усиленно протекают реакции (перечисленные в п. 4). Температура газа в зоне 1600° С, обжигаемого материала 1400° С, рабочей поверхности футеровки в начале зоны 1450° С, в конце 1400° С. На футеровку воздействует жидкая фаза клинкера, образуя на ее поверхности защитную обмазку;

6) в зоне охлаждения готовый продукт — клинкер остывает до 1000—1100° С. Футеровка подвергается истиранию раскаленными твердыми кусками клинкера и резкому охлаждению холодным воздухом.

Выходящий из печи при температуре 1000—1100° С клинкер охлаждается во внешних холодильниках, расположенных вокруг печи или под печью, до температуры около 100° С и подается на склад, где и хранится до помола. При помоле в специальных мельницах к клинкеру добавляют до 1—3% гипсового камня $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ для замедления схватывания цемента и до 15% гидравлических добавок (гранулированных доменных шлаков и др.), удешевляющих стоимость цемента. После помола цемент выдерживают в емкостях (силосах) в течение 15—20 суток, что обеспечивает достижение стандартных сроков схватывания, а затем упаковывают в тару и направляют потребителям.

Корпус печей сваривается из листовой стали толщиной 50—60 *мм*. Для облегчения монтажа корпус печи вначале собирается в виде отдельных обечаек (царг), которые устанавливают на опоры и потом соединяют друг с другом (сваривают). К корпусу печи крепятся 7—9 бандажей из стального обработанного литья, которыми печь опирается на опорные ролики, установленные под углом 4° к горизонту. Подшипники опорных роликов устанавливают на металлических рамах, связанных с железобетонными фундаментами печи анкерными болтами.

На средней опоре устанавливают контрольные ролики, которые начинают вращаться (что служит сигналом о ненормальной работе установки) только в том случае, если происходит смещение корпуса вдоль оси печи. Вблизи этой опоры расположен и зубчатый венец (ведущая шестерня), с помощью которой печь через редуктор электродвигателя приводится во вращение.

Питание печи шламом осуществляется через верхний конец

печи по течке от ковшового питателя. Топливом для вращающихся печей служат газ, мазут и угольная пыль. Печи для получения цементного клинкера, как правило, отапливают угольной пылью, подаваемой с нижней торцовой стороны печи с помощью пылеугольных горелок. Горелки представляют собой две трубы — одна внутри другой, причем по внутренней трубе подаются угольная пыль и первичный воздух (15—30% от общего его расхода) и по кольцевому каналу между двух труб — вторичный воздух (85—70%). Продукты горения и газы удаляются из печи через пылеуловительные камеры в дымовую трубу. Пылеуловительные камеры с электрофильтрами, в которых происходит осаждение цементной пыли, уносимой из печи продуктами горения, соединяются с верхним концом печи с помощью уплотнителей, предотвращающих подсос наружного воздуха.

В «холодном» конце печи к корпусу крепят цепи, увеличивающие теплообменную поверхность зоны в 7—5 раза. Длина цепной зоны 12—22 *м*.

Об эффективности работы вращающихся печей судят по удельному объему клинкера, т. е. по годовой производительности, отнесенной к 1 $м^2$ рабочей поверхности футеровки, по тепловой мощности и тепловому напряжению зоны горения.

При нормальных условиях работы тепловые напряжения в зоне горения составляют около 350 000 $Вт/м^3$ [300 000 $ккал/м^3 \times ч$)], а удельная производительность различных печей — 16 — 24 *кг* клинкера на 1 $м^2$ футеровки в 1 *ч*.

Для высокопроизводительной работы вращающихся печей большое значение имеет подбор огнеупоров и тщательное выполнение ее футеровки. Футеровка печей обеспечивает предохранение корпуса от действия высоких температур, уменьшение тепловых потерь наружной поверхности печи и передачу тепла обжигаемому материалу.

В связи с этим футеровочные материалы вращающихся печей должны обладать высокой прочностью и твердостью, необходимой огнеупорностью, устойчивостью против химического воздействия обжигаемого материала, термической стойкостью в условиях резких колебаний температур и теплопроводностью, обеспечивающей необходимую температуру на корпусе печи. Этим требованиям в большей степени удовлетворяют изделия, изготовленные специально для футеровки вращающихся печей, в том числе: шамотные марки «Ц» — клин торцевой: Ц-1; Ц-1А; Ц-2; Ц-3; клин ребровый: Ц-4, Ц-5 и Ц-6; многошамотные марки «ЦМ» — клин торцевой: ЦМ-1, ЦМ-1А, ЦМ-2, ЦМ-3, ЦМ-4 и ЦМ-5; клин ребровый: ЦМ-6, ЦМ-7, ЦМ-8 и ЦМ-9; хромомагнезитовые изделия обжиговые марки «ХМЦ» и безобжиговые марки «БМХЦ»; магнезито-хромитовые марки «МХЦ» и периклазошпинелидные марки «ПШЦ».

Хромомагнезитовые, магнезито-хромитовые и периклазошпинелидные огнеупорные изделия указанных выше марок выпускаются в виде торцевого двустороннего клина 10 типоразмеров для печей различных диаметров и различных зон футеровки печей.

Футеровка вращающихся печей состоит из отдельных примыкающих друг к другу участков, укладываемых на растворе и насухо (без раствора) с прокладкой между кирпичами металлических пластин толщиной 1,25—2 *мм*. Футеровку ведут продольными рядами с перевязкой поперечных швов смежных рядов. Для перевязки поперечных швов используют специальные перевязочные кирпичи, которые кладут в начале и конце продольного ряда данного участка. При кладке порогов футеровка выполняется кольцами.

Наиболее распространенными для обжига клинкера являются печи следующих размеров (в *м*): 3,6×150; 4,5×135; 4,5×170 и 5×185 (первые цифры обозначают диаметр печи, вторые — ее длину).

В последнее время в основном строят печи 4,5×170 и 5×185 *м* с суточной производительностью до 2000 *т* клинкера. Разработан проект печи диаметром 7 *м* и длиной 230 *м*, производительностью 3000 *т* клинкера в сутки.

Футеровка современных вращающихся печей для обжига цементного клинкера длиной 185 *м* выполняется следующим образом: (начиная от холодного конца) участок длиной 39,7 *м* — многошамот, 53,7 *м* — шамот, 21 *м* — многошамот, 6,9 *м* — тальк, 20 *м* — магнезито-хромит, 25 *м* — периклазошпинелид, 5 *м* — магнезито-хромит, 3,6 *м* — тальк и 2,6 *м* — многошамот.

Печи 4,5×135 *м*. Зона длиной 21,8 *м* — из клинкер-бетона — 1 мас. ч. цемента марки 400 и 4,5 мас. ч. клинкера крупностью 3—8 *мм*; зона длиной 37,2 *м* — многошамот класса А с содержанием Al_2O_3 не менее 8%; зона длиной 44,8 *м* — многошамот с содержанием Al_2O_3 не менее 39%; зона длиной 5,1 *м* — высокоглиноземистый кирпич с содержанием Al_2O_3 не менее 62%; зона длиной 20,2 *м* — магнезитохромитовый кирпич; зона длиной 2,3 *м* — высокоглиноземистый кирпич с содержанием Al_2O_3 не менее 62% и зона длиной 3,6 *м* — многошамотный кирпич класса А с содержанием Al_2O_3 не менее 39%.

Вращающиеся печи для обжига других видов продукции (извести, шамота, магнезита) по принципу работы и основным конструктивным узлам практически мало отличаются от печей для обжига цементного клинкера. Особенностью является то, что печи для обжига шамота имеют специальный холодильник в виде вращающегося барабана, расположенного под печью (у нижнего конца печи), в котором остывает выгружаемый из печи обожженный шамот. В коротких печах для обжига клинкера подсушку, подогрев и кальцинирование сырья (с влажностью 8—15%) производят на конвейерном кальцинаторе — движущейся решетке, а высокотемпературные процессы и спекание осуществляют в печи. Сырье подогревают на решетке отходя-

щими газами из вращающейся печи, причем газы могут дважды проходить через слой сырья; при этом теплообмен очень эффективен, и процесс подготовки сырья на решетке происходит скорее, чем во вращающихся печах.

В последние годы в опытном порядке осуществляется футеровка вращающихся печей из блоков жаростойкого бетона. Внедрение блочной футеровки этого вида печей позволяет механизировать труд огнеупорщика и обеспечить выполнение работ в сжатые сроки, что особенно важно при их ремонте. На нескольких вращающихся печах были зафутерованы отдельные участки из бетона: 1) 500 *кг* жидкого стекла плотностью 1,30 (на 1 $м^3$ бетона), 150—210 *кг* технического глинозема марки ГЗ, 1890 *кг* магнезитового (металлургического) порошка марки МПК-88 и 1010 *кг* тонкомолотого магнезита с остатком на сите № 0,088 20%; 2) 330 *кг* жидкого стекла плотностью 1,30 (на 1 $м^3$ бетона), 700 *кг* портландцемента марки 400, 1200 *кг* шамота класса А дробленого с максимальным размером зерен до 20 *мм* и тонкомолотого шамота класса А с остатком на сите № 0,088 5—10%.

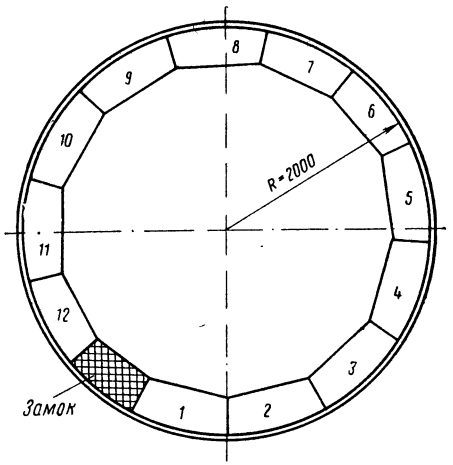


Рис. 94. Футеровка вращающихся печей блоками из жаростойкого бетона

Кроме приведенных составов бетона блочная футеровка выполнялась из других составов, причем опыт эксплуатации печей с блочной футеровкой показал, что наиболее перспективными являются бетоны на силикатных вяжущих (жидкое стекло) и фосфатной связке с высокоглиноземистыми заполнителями, так как они обладают хорошими термомеханическими свойствами и имеют довольно высокую температуру деформации под нагрузкой при высокой механической прочности в нагретом состоянии.

Размер блоков 700×892×1008×230 *мм*, масса около 500 *кг*. В печах диаметром 4 *м* таких блоков (на жаростойком растворе) укладывается в одно кольцо 12 шт. Забивка замка производится штучными огнеупорными изделиями (рис. 94).

§ 28. СТЕКЛОВАРЕННЫЕ ПЕЧИ

Сырьем для получения стекла являются: кремнезем, борный и фосфорный ангидриды, амфотерная окись алюминия, окиси свинца и цинка, окислы щелочных и щелочноземельных металлов.

Кремнезем SiO_2 является основным и обязательным компонентом большинства промышленных стекол, а различные добавки к нему служат для придания стеклу требуемых свойств. Так, окислы щелочных металлов Na_2O и K_2O, добавляемые к кремнезему, играют роль плавней, понижающих температуру его плавления и вязкость.

Для придания стеклу химической устойчивости в него вводят окиси кальция CaO, магния MgO, бария BaO, цинка ZnO и др. Окись алюминия Al_2O_3 придает стеклу термическую и механическую прочность.

Основными составляющими стекла являются SiO_2, CaO и Na_2O; так, в оконном стекле SiO_2 содержится 70—72%, CaO — 7—8%, Na_2O — 14—15%, $Al_2O_3+Fe_2O_3$ — 1—2% и MgO — 3—4%.

Соотношения сырых материалов выбирают в зависимости от требуемого состава стекла и технологии его производства. Варка стекла заключается в превращении при высоких температурах смеси сырых материалов (шихты) в стекломассу, пригодную для изготовления из нее изделий.

Процесс производства стекла можно разделить на три стадии:

1) стеклообразование, во время которого происходят химические реакции между составляющими шихты и образование вязкой массы с большим выделением газов (CO_2, SO_2, NO_2), образующих в расплаве пузыри;

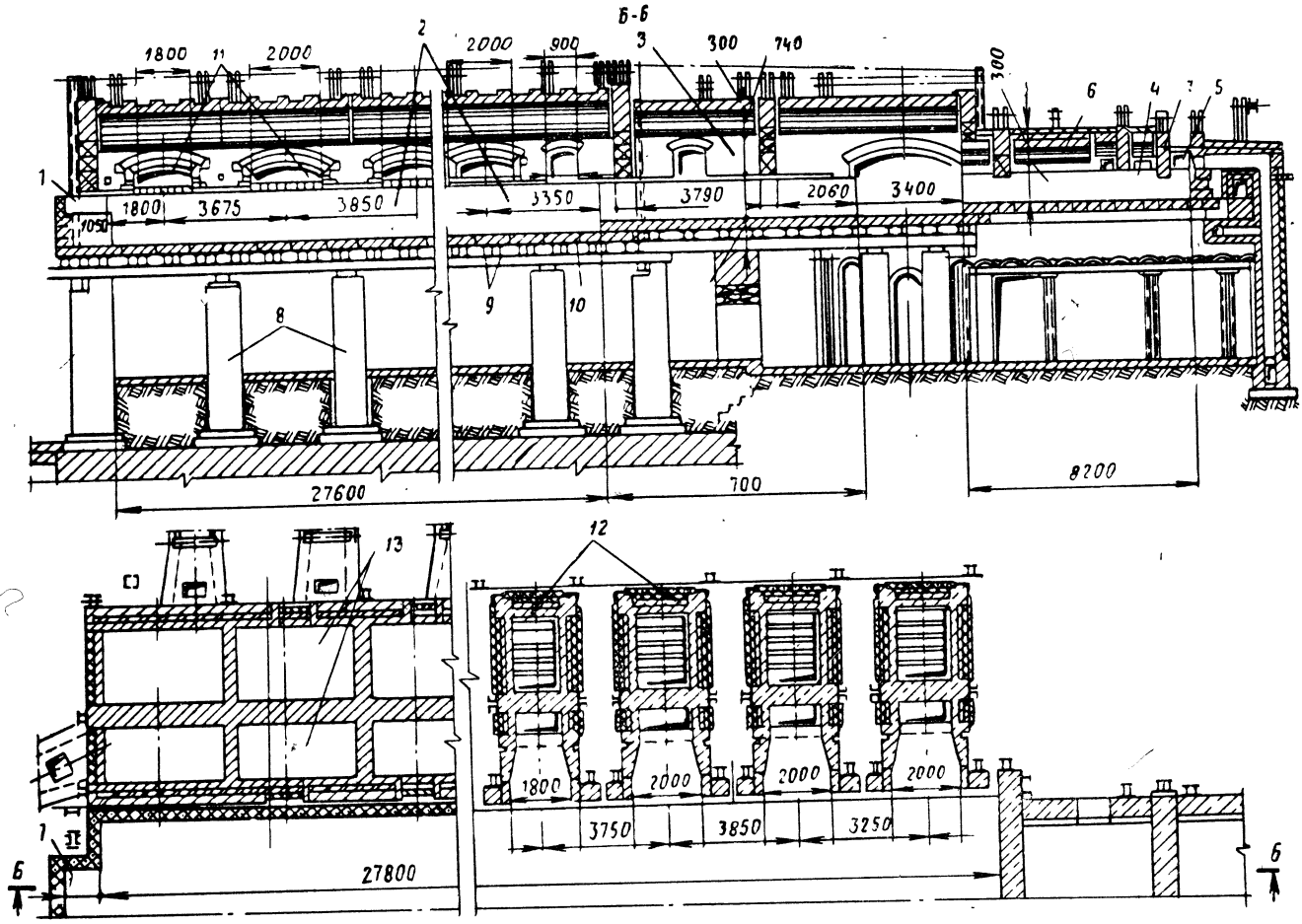
2) дегазация или осветление, когда происходит удаление из стекломассы газов (пузырей);

3) студка, т. е. снижение вязкости стекломассы до определенной величины, требуемой при производстве изделий.

В связи с большой номенклатурой изделий из стекла (оконного, зеркального, кварцевого оптического, полого, специального, стекла для лабораторной посуды, термометров, электрических ламп и т. д.) изготовление его производят в различных по своей конструкции стекловаренных печах.

Основными видами стекловаренных печей в настоящее время являются горшковые, в которых процессы стекловарения протекают последовательно во времени в одной и той же емкости, и ванные печи непрерывного действия, в которых процессы варки происходят в отдельных частях печи по мере продвижения стекломассы из одной части печи в другую. Наибольшее применение в производстве стекла находят ванные печи непрерывного действия как более производительные, экономичные и механизированные. Горшковые печи применяются только при варке оптического, технического и других специальных видов стекла в небольших количествах.

На рис. 95 и 96 показана ванная стекловаренная печь для производства оконного стекла при помощи девяти машин вер-



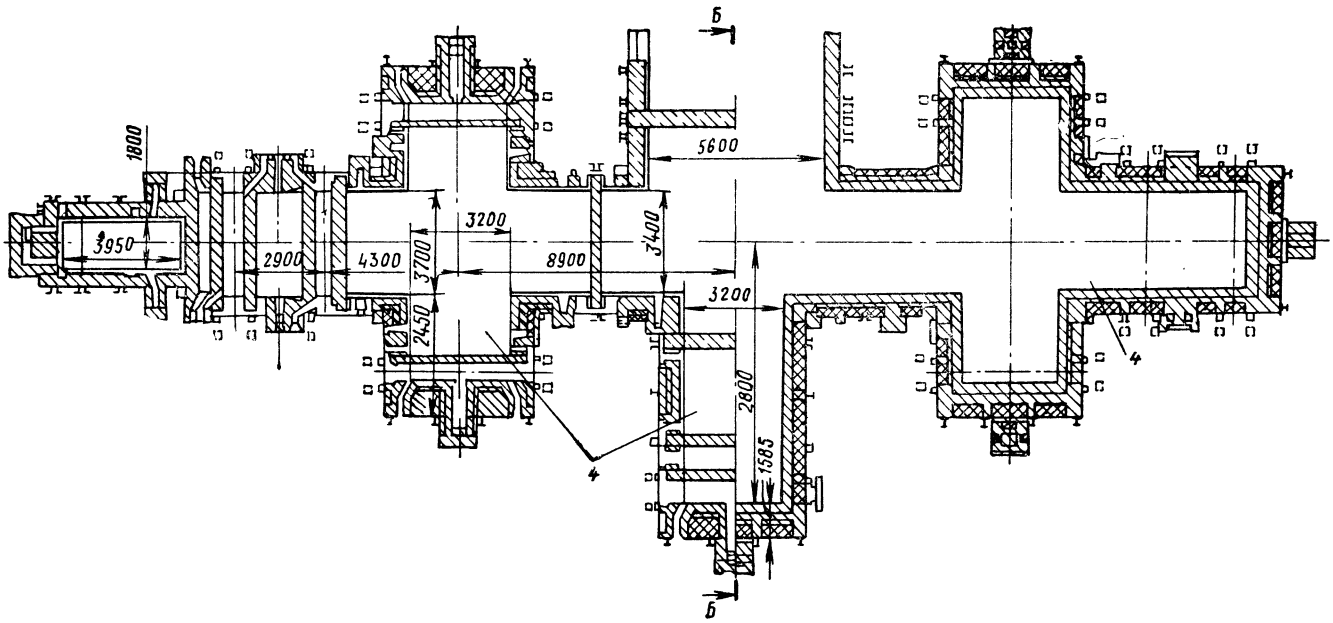


Рис. 95. Ванная стекловаренная печь

а — продольный разрез; *б* — план ванны печи; *в* — план машинного канала; *1* — засыпной карман; *2* — варочная часть; *3* — студочная часть; *4* — выработочная часть (каналы ВВС); *5* — подмашинная камера; *6* — подогревательная камера; *7* — лодочка; *8* — опорные столбы; *9* — продольные и поперечные балки для бассейна; *10* — дно бассейна; *11* — влеты горелок; *12* — горелки; *13* — регенераторы

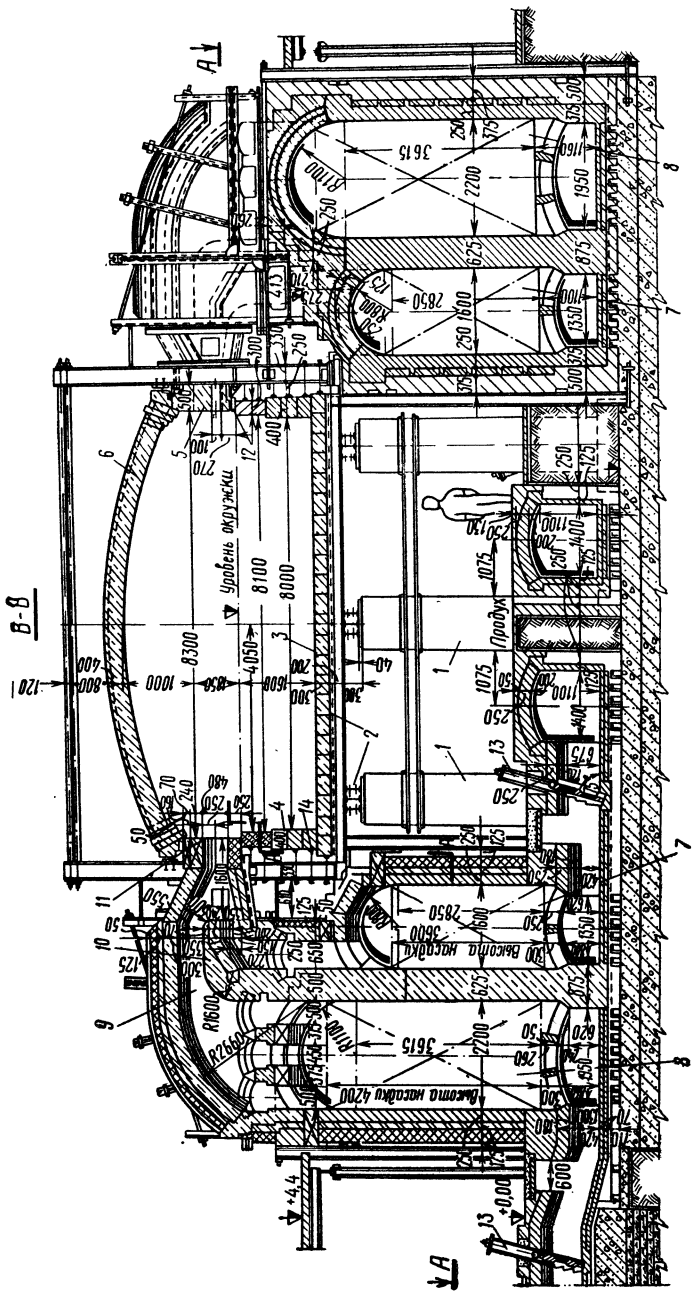


Рис. 96. Ванная стекловаренная печь (поперечный разрез)
1 — опорные столбы; *2* — донные балки бассейна; *3* — дно бассейна; *4* — стены бассейна (окружка); *5*—подвесные стены печи; *6*—свод; *7* — газовый регенератор; *8* — воздушный регенератор; *9* — горелки; *10* — язык; *11* — влет горелки; *12* — заклинок; *13* — шибер; *14* — распорные болты

тикального вытягивания стекла (ВВС) с машинным каналом. Печь состоит из верхнего строения — ванны или рабочего пространства печи с машинным каналом, горелок и каркаса и нижнего строения — регенераторов, газо-воздухо-дымовых каналов с перекидными устройствами и шиберами и опорных столбов. Рабочее пространство печи, состоящее из дна ванны, окружки (стен, укладываемых на донные брусья), подвесных стен и свода, делится на варочную часть, в которую через так называемый засыпной карман загружается шихта и плавится стекломасса, и студочную часть, где происходит остывание стекломассы.

Варочная часть отделяется от студочной части низкоопущенной аркой — пережимом. Дно студочной части выше дна варочной части на толщину бруса, из которого выкладывается дно ванны. Студочная часть заканчивается в месте примыкания ее к машинному каналу, расположенному перпендикулярно ей.

Машинный канал состоит из проточного канала, соединяющегося со студочной частью ванны, выработочных каналов и подмашинных камер, из которых машинами вертикального вытягивания стекла производится выборка стекломассы в виде ленты. После остывания и резки ленты получается оконное стекло.

Основанием печи служит сплошная железобетонная плита, на которой возводят опорные столбы, регенераторы и дымоходы с перекидными устройствами для газа, воздуха и продуктов горения. Опорные столбы кладут из обыкновенного глиняного кирпича марки 100 на цементном растворе. Для предохранения от разрушения в случае прорыва стекла нижние части столбов на высоту 1 *м* обкладывают шамотным кирпичом. Поверх кладки опорных столбов, для передачи на них равномерной нагрузки от верхнего строения печи, укладывают чугунные плиты, на которых монтируют продольные балки — прогоны, а по ним поперечные балки, являющиеся основанием дна бассейна. К этим же балкам крепят вертикальные стойки — колонны рабочего пространства верхнего строения печи. Между опорными столбами сооружают газо-дымовые каналы. Выстилку каналов по бетонному основанию выполняют из обыкновенного глиняного кирпича с «шансами» (отверстиями вдоль канала), по которым циркулирует воздух, охлаждающий бетон. По обыкновенному глиняному кирпичу пода канала (выстилке) укладывают шамотный кирпич.

Наружные стенки каналов кладут из обыкновенного глиняного, а внутренние — шамотного кирпича, причем через шесть-семь рядов (по мере совпадения горизонтальных швов) шамотную кладку перевязывают с кладкой из обыкновенного глиняного кирпича. Свод каналов кладут из шамотного кирпича и по нему делают выстилку из обыкновенного кирпича. Газо-дымовые каналы, как и воздушно-дымовые (идущие параллельно газо-дымовым со стороны воздушных регенераторов), соединя-

ются с поднасадочными камерами регенераторов. В местах подключения каналов к регенераторам устанавливают шиберы, с помощью которых регулируют подачу газа и воздуха в регенераторы и отключают их в случае необходимости от работающих регенераторов. Газо-дымовые и воздушно-дымовые каналы после регенераторов соединяются в местах установки перекидных устройств в один общий дымоход, идущий к дымовой трубе.

Выстилку пода регенераторов выполняют по бетонному основанию из обыкновенного глиняного кирпича. В местах регенераторных камер выстилку выполняют с расчетом на воздушное охлаждение бетонной плиты.

Наружную кладку стен регенератора делают из обычного кирпича толщиной в $1\frac{1}{2}$ кирпича. Огнеупорную кладку наружных стен выполняют шамотной (низ) и динасовой (верх) в один кирпич. Между обычной и шамотной кладкой укладывают изоляционный кирпич толщиной в $\frac{1}{2}$ кирпича. Разделительные стенки между газовыми и воздушными регенераторами толщиной в $2\frac{1}{2}$ кирпича и между регенераторными камерами (воздушными и газовыми) толщиной в $1\frac{1}{2}$ кирпича кладут из шамотного (низ) и динасового (верх) кирпича.

До уровня поднасадочных арок (хомутиков), на которые после выравнивания (натеса) укладывается насадка, огнеупорную кладку стен газовых и воздушных регенераторов и разделительной стенки между газовыми и воздушными регенераторами делают на 1 кирпич толще для укладки (на обрезах стен) пят поднасадочных арок.

Насадку регенераторов укладывают на выровненные шамотным кирпичом поднасадочные арки (хомутики). Нижнюю часть насадки выкладывают из специального большемерного шамотного кирпича марки ШБ и верхнюю часть из такого же по размерам шамотного кирпича марки ША или высокоглиноземистого кирпича. Насадку кладут почти до уровня пят сводов регенераторов. Между крайними кирпичами насадки и стенами регенераторов оставляют температурный зазор порядка 10—12 *мм*.

Своды регенераторов выполняют в два оката. Первый окат из динасового кирпича, второй из шамотного кирпича. Между первым и вторым окатами (сводами) оставляют зазор для возможности расширения (роста) динасового свода во время розжига печи.

По верху сводов регенераторов укладывают изоляционный кирпич и делают выстилку из обыкновенного глиняного кирпича. Для образования прямоугольных отверстий (проемов), через которые газ и воздух поступают в горелки и продукты горения из горелок в регенеративные газовые и воздушные камеры, своды над ними делают не сплошные, а с разрывом в центральной их части. На арках, образующих проем, основываются стены вертикальных каналов горелок.

Обвязка регенераторов состоит из металлических колонн, устанавливаемых по боковым и торцовым стенкам. Низ колонн закреплен в бетонном фундаменте. Вверху колонны стянуты болтами (тягами). Подпятовые металлические балки укладывают в местах установки пят поднасадочных арок и сводов регенераторов.

Своды горелок выкладывают из динасового кирпича, на который укладывают изоляционный кирпич. Часть свода горелок, так называемый понурый или наклонный свод, идущий от свода горелок, перекрывающий воздушный канал и примыкающий к влетам, выполняют из крупноразмерного фасонного динасового кирпича без изоляции.

Свод, перекрывающий газовый канал (язык), делают в виде арки из динасового кирпича. Подину горелок основывают на металлических конструкциях (в виде решетки), на которые укладывают изоляционный и затем динасовый кирпич. Обвязку горелок выполняют из проката в виде уголка.

Дно рабочего пространства печи (или ванны) выкладывают из крупноразмерных (1000×400×300 *мм*) многошамотных брусьев по металлическим полоскам, проложенным вдоль ванны на поперечных прогонах. Брусья кладут длинной стороной вдоль оси ванны без перевязки насухо, без раствора. Крайние брусья дна распирают с помощью специальных болтов, которые крепят к металлическим колоннам рабочего пространства печи. Дно студочной части печи делают выше дна варочной части на толщину бруса и выполняют из таких же по размеру брусьев. Первый ряд брусьев студочной части (при переходе из варочной части) укладывают из специальных многошамотных брусьев, имеющих скосы (по длине бруса), что предотвращает всплывание их в расплавленной стекломассе. Дно машинных каналов выкладывают выше дна студочной части на толщину бруса из многошамотных брусьев несколько бо́льших размеров, чем брусья дна варочной и студочной частей ванны, также со скосами по торцам для предотвращения всплытия в расплавленной стекломассе.

В последние годы на дно ванны поверх многошамотных брусьев укладывают плитки из «бакора».

Брусья машинного канала кладут на столбики из шамотного кирпича, промежутки между которыми заполнены чистым кварцевым песком. Столбики кладут на основание из обыкновенного глиняного кирпича, уложенного на металлоконструкции каркаса канала.

Стены варочной, студочной частей и машинного канала (окружка) делают из стенового бруса размером 500×400×300 *мм*. Первые (нижние) три ряда окружки в варочной части и два ряда в студочной части кладут из многошамотных брусьев, а четвертый ряд окружки в варочной части (в пределах первых 5 горелок от загрузочной части печи) выкладывают из муллита и

далее из высокоглиноземистых или каолиновых брусьев. Из этих же материалов выкладывают третий ряд в студочной части печи и два ряда окружки в машинном канале. Брусья окружки кладут насухо с перевязкой только вертикальных швов. Они, так же как и донные брусья, распираются болтами.

В машинном канале непосредственно на брусья окружки кладут стены из динасового кирпича, на которые устанавливают пяты и возводят свод из динасового нормального или специального кирпича толщиной 250 *мм*. Стены в варочной и студочной частях печи выше окружки делают подвесными; они не опираются непосредственно на брусья окружки, а возводятся на чугуных полосах (лафетах), лежащих на чугунных кронштейнах, прикрепленных к колоннам рабочего пространства печи. Подвесные стены делают из большемерных динасовых фасонных изделий, а в местах примыкания к ним горелок оставляют отверстия для прохода в рабочее пространство печи продуктов горения (из камеры горения горелки) и отвода их из ванны. Обрамление этих отверстий, называемых влетами, выполняют в виде окна с арочным сводом, выкладываемым из динасового фасонного кирпича или муллитовых фасонных изделий. Выравнивание арок влетов производят фасонными динасовыми изделиями. Пяты сводов варочной и студочной частей ванной печи не опирают на стены (как в машинном канале), а устанавливают на подпятовые балки, уложенные на чугунные кронштейны, укрепленные на колоннах. Свод кладут из динасового кирпича толщиной 400 *мм* в варочной и 300 *мм* в студочной частях. Распор свода воспринимается тягами, соединяющими верх колонн рабочего пространства печи.

Плавление шихты и нагрев стекломассы в стекловаренных печах производят природным газом, мазутом или генераторным газом. В тех случаях, когда стекловаренные печи отапливают природным газом или мазутом, устраивают только воздушные регенераторы. Газовые и воздушные регенераторы применяют только при отоплении печей низкокалорийным генераторным газом. Схема перекидки клапанов и движения газов и воздуха аналогична описанной выше для мартеновских печей.

Часть продуктов горения из варочной части поступает в студочную часть и машинный канал. Чтобы продукты горения более интенсивно отдавали свое тепло стекломассе, в студочной части печи и в машинном канале делают низкоопущенные прямые арки (пережимы), наличие которых обеспечивает прохождение продуктов горения непосредственно около зеркала стекломассы. Таких пережимов имеется в студочной части два и в машинном канале три (в местах перехода проточных каналов в выработочные). Продукты горения из выработочных каналов удаляются через дымоходы (вертикальные стояки и подземные борова) в дымовую трубу, специально сооружаемую для отвода продуктов горения из машинного канала. Если для подогрева стекломассы не хватает тепла, приносимого продуктами горения, поступающими из варочной части печи, и стекломасса становится очень вязкой, ее подогревают, сжигая мазут или газ в форсунках (горелках), устанавливаемых в выработочной части машинного канала.

Расплавленная стекломасса во время работы печи находится примерно на одном и том же уровне, так как объем стекломассы, выбираемой машинами, восполняется расплавом шихты, загружаемой в печь. Из выработочной части стекломасса непрерывно перемещается в студочную часть и машинный канал. Для удаления из стекломассы посторонних включений на пути ее движения устанавливают керамические лодочки, плавающие в расплавленной стекломассе.

Лодочки, устанавливаемые в студочной части (на всю ее ширину), состоят из трех и более частей, а устанавливаемые в машинном канале — делаются по длине равными ширине канала. Плавающие по поверхности стекломассы посторонние включения собираются около лодочек и через окна специальными приспособлениями удаляются из печи. Дно, стены и горелки во время работы печи охлаждаются воздухом, подаваемым от вентиляторов.

Стекловаренные печи непрерывного действия применяют для производства оконного, зеркального и других видов стекла. В зависимости от видов производимого стекла и видов топлива конструкции печей различны, но отдельные конструктивные элементы их существенного различия не имеют. Это относится к дымоходам, регенераторам, ванне печи с дном из брусьев, окружке, подвесным стенам и сводам. Следует отметить, что в настоящее время большинство крупных стекловаренных печей строится с отоплением природным газом, как наиболее дешевым и калорийным видом топлива. В зарубежной литературе имеются сведения о применении рекуперативных и электростекловаренных печей.

Горшковые печи, отапливаемые обычно генераторным газом, также имеют две пары газовоздушных регенераторов, горелки, газо-воздухо-дымовую систему и по принципу работы мало чем отличаются от рассмотренной выше ванной печи. Под горшковых печей выкладывают из крупных шамотных или динасовых изделий впритирку без раствора. В кладке окружки из многошамотных брусьев оставляют отверстия для обслуживания горшков во время работы печи и отверстия для их садки. Снаружи окружка обкладывается изоляционным и обыкновенным кирпичом. По окружке из динасового кирпича выкладывают стены с проемами и рабочими окнами.

Часто горшковые печи имеют круглую форму. В таких случаях свод над рабочим пространством печи выполняется в виде купола кольцами из динасового кирпича. Кладка сводов печей, имеющих прямоугольную форму, выполняется так же, как

и сводов ванных печей. Варят стекло в таких печах в горшках круглого сечения с расширением в верхней части. Загрузку шихты в горшки производят периодически по мере их освобождения от стекломассы (выработки). Выработка стекломассы из горшков выполняется с оставлением горшков в печи или с удалением их из рабочего пространства через специальные отверстия, закрываемые во время работы печи футерованными заслонками. Горшковые печи малоэффективны, и поэтому варка стекла в них ведется только для специальных целей — оптического стекла, хрусталя и т. п.

ГЛАВА IX

ПЕЧИ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ И ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Печи нефтеперерабатывающей и химической промышленности по назначению и конструкции весьма разнообразны. Наиболее распространенными из них являются печи для переработки нефти и получения серосодержащих газов, являющихся основным сырьем для производства серной кислоты и др.

Остальные виды печей химической промышленности, кроме печей для кальцинирования соды, в основном низкотемпературные, небольшие по своим размерам и не имеют каких-либо существенных отличий (конструктивных элементов) от печей, описанных выше.

§ 29. ТРУБЧАТЫЕ ПЕЧИ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Трубчатые печи нефтеперерабатывающей промышленности служат для производства из нефтяного сырья моторного бензина и других продуктов (керосин, газойль, соляровое масло), в том числе сырья для химической промышленности (этилена, пропана, бутана).

Нагрев нефтяного сырья — сырой нефти (метод прямой гонки) или продуктов ее переработки (крекинг-процесс) осуществляют в трубчатых печах различных конструкций. На рис. 97 представлена типовая двухкамерная трубчатая печь с наклонным сводом. До последнего времени печами этого типа оснащались все нефтеперерабатывающие заводы. В настоящее время строительство таких печей почти прекращено, однако они имеются в большом количестве на нефтеперерабатывающих заводах. Основанием печи служит ленточный бетонный фундамент, на котором установлен каркас печи, состоящий из вертикальных стоек, к верхней части которых прикреплены металлические фермы, соединенные по верхнему поясу металлическими прогонами. К прогонам крепят листы волнистого шифера, образующие кровлю, защищающую огнеупорную кладку свода от атмосферных осадков. К нижнему поясу ферм крепят прогоны из швеллеров, к которым в поперечном направлении подвешивают чугунные балочки для навески шамотных фасонных изделий и подвесок из хромоникелевой жаропрочной стали для труб.

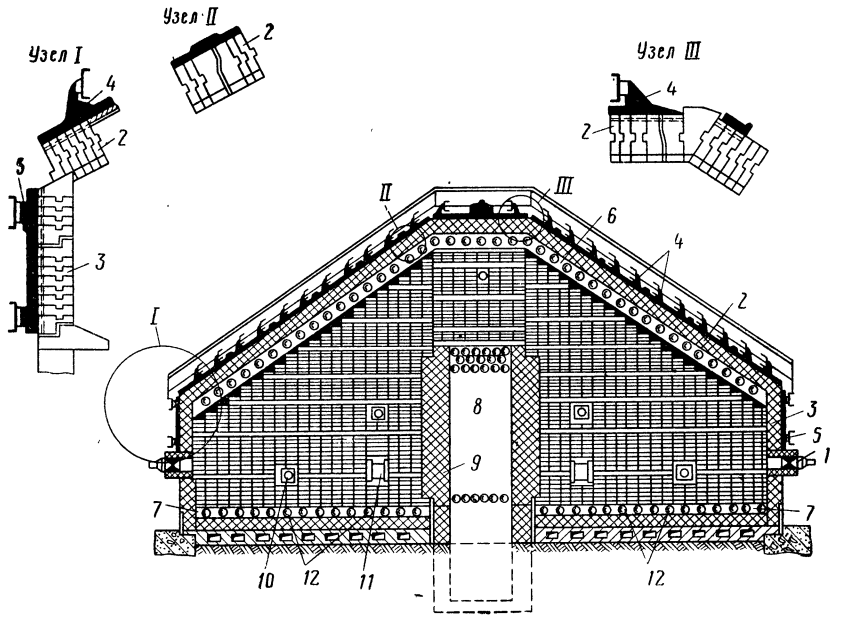


Рис. 97. Двухкамерная трубчатая печь с наклонным сводом

1 — форсунка; *2* — подвесной свод; *3* — подвесные стены; *4* — подвески свода; *5* — подвески стен; *6* — потолочный экран; *7* — подовый экран; *8* — конвекционная секция; *9* — перевальные стены; *10* — гляделки; *11* — люк; *12* — трубы змеевика

К вертикальным стойкам каркаса боковых и торцовых стен печи крепят в продольном направлении швеллеры, а к ним — чугунные подвески для навешивания шамотных фасонных изделий, образующих футеровку рабочих камер печи. К вертикальным стойкам каркаса крепят также переходные площадки и лестницы для обслуживания форсунок и соединений труб (змеевика), по которым циркулируют нефтепродукты. В торцовых стенах к каркасу по периметру свода и пода крепят решетки из серого и жаропрочного чугуна для опирания труб змеевика.

Под печи выполняется из большеразмерных плит из жаростойкого бетона. Кладку боковых стен рабочих камер до верха форсуночных камер выполняют из нормального шамотного кирпича толщиной 345 *мм* (1,5 кирпича), а выше форсуночных камер — из шамотных фасонных изделий, которые навешивают на

чугунные подвески. Торцовые стены печи (кроме конвекционной камеры) выполняют только из шамотных фасонных изделий, подвешенных на чугунных подвесках.

Свод печи делают из шамотных фасонных изделий, также навешиваемых на чугунные подвески. В стенах и сводах печи оставляются температурные швы, заполняемые шнуровым асбестом. Стены конвекционной камеры (перевальные) выкладывают из шамотных фасонных изделий толщиной 460 *мм*.

С наружной стороны огнеупорная кладка стен и свода покрывается слоем теплоизоляционной обмазки. Боковые и торцовые стены печи после нанесения обмазки закрываются листами, которые крепят к каркасу печи.

Змеевики трубчатых печей, по которым циркулируют нагреваемые нефтепродукты, делают из бесшовных цельнотянутых труб из углеродистых или специальных марок стали диаметром от 60 до 152 *мм* и длиной от 6 до 18 *м* в зависимости от длины трубчатой печи. Трубы, устанавливаемые на поду печи, опирают концами на подовые решетки, а устанавливаемые по своду печи — на решетки сводового экрана и подвески, закрепленные на нижнем поясе фермы.

В конвекционной камере трубы опирают на решетки, изготовляемые из специальных жаропрочных марок стали. Для соединения концов труб, выходящих из печи, применяют двойники из легированных сталей, кованые или литые.

Продукты переработки нефтяного сырья поступают в одну из нижних труб конвекционной камеры, проходят последовательно через все трубы, а затем через трубы, расположенные на поду и своде печи, откуда нефтяное сырье в жидком и парообразном состоянии подается в аппаратуру, где происходит разделение нагретых продуктов нефти на бензин, керосин и др.

Трубчатые печи обогревают жидким топливом. Продукты горения нагревают огнеупорную кладку и трубы змеевика, расположенные непосредственно в рабочих камерах, как за счет конвекции, так и за счет радиации факела. Из рабочей камеры продукты горения поднимаются вверх на высоту перевальных стен конвекционной камеры и за счет конвекции нагревают пучок труб, расположенных в ней, а затем поступают через боров и дымовую трубу в атмосферу.

В настоящее время взамен трубчатых шатровых печей широкое распространение получают более производительные и более совершенные печи для переработки нефтепродуктов. Одной из характерных особенностей этого вида печей (рис. 98) является расположение форсунок в поде печи и направление движения продуктов горения в рабочем пространстве печи и зоне подогрева только снизу вверх. Такое направление продуктов горения при наличии пережима в верхней части рабочей камеры и равномерный (по длине зоны подогрева) отбор охлажденных отходящих газов с дальнейшим выбросом их через газопроводы и дымовую трубу в атмосферу позволяют обеспечить лучшую отдачу тепла нагреваемому продукту и повысить производительность и коэффициент полезного действия печи, который доходит до 0,77.

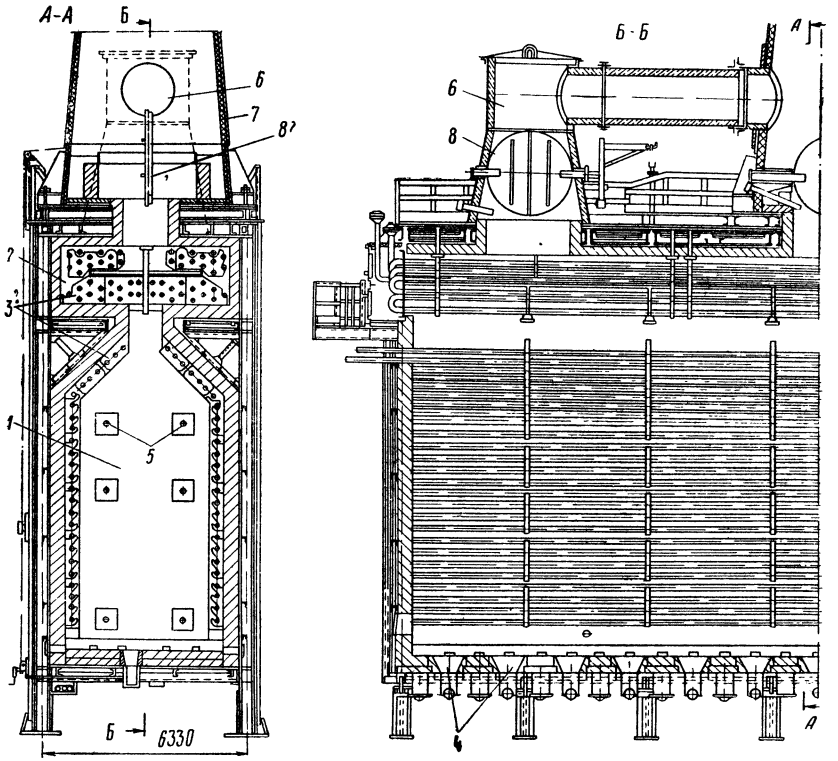


Рис. 98. Трубчатая печь с подовыми форсунками (горелками)

1 — радиантная камера; *2* — конвекционная камера; *3* — змеевики; *4* — горелочные отверстия; *5* — гляделки; *6* — дымоход; *7* — дымовая труба; *8* — поворотный шибер

Основанием печи служат отдельно стоящие железобетонные фундаменты, к которым с помощью анкерных болтов крепятся основные стойки каркаса печи. Продольные и торцовые стойки каркаса через определенные промежутки (по высоте) обвязаны швеллерами и уголками, к которым крепятся подвески с укладываемыми на них трубами змеевика.

К стойкам каркаса также крепятся металлические конструкции пода печи, кронштейны пережима (в местах перехода рабочей камеры в зону подогрева), конструкции оснований газопроводов и дымовой трубы, трубные решетки, а также лестницы и обслуживающие площадки. К конструкциям пода печи крепятся горелки, обвязки к ним (газо- и воздухопроводы).

Футеровка печи выполняется из фасонных шамотных изделий,

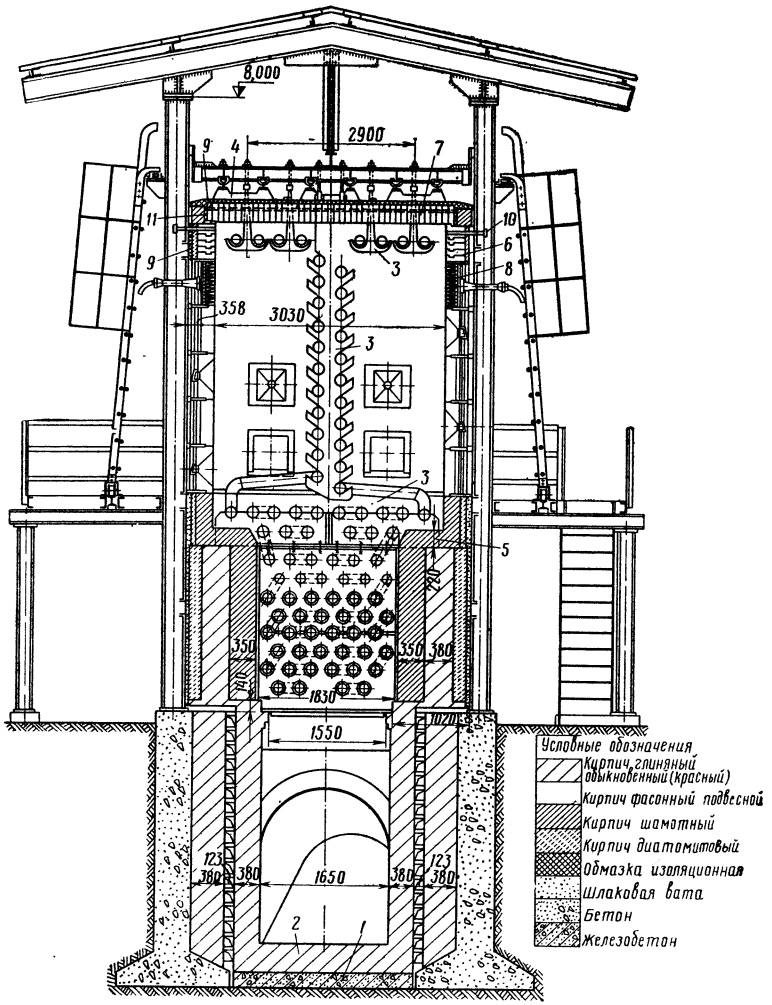


Рис. 99. Пиролизная трубчатая печь

1 — фундаменты; *2* — выстилка; *3* — опоры и подвески; *4* — балки; *5* — под: *6* — подвесные стены; *7* — подвесной свод; *8* — беспламенные горелки; *9* — теплоизоляция; *10* — штуцер для термопары; *11* — асбестовый шнур

навешиваемых на специальные подвески, закрепляемые с помощью болтов к швеллерам (продольным) каркаса печи, или из панелей жаростойкого бетона, облицованных с наружной стороны стальными листами в виде короба (кассеты). Для обеспечения прочности жаростойкого бетона к стальному листу в шахматном порядке привариваются анкеры U-образной формы.

Часть футеровки (при выполнении ее в бетонном варианте) —

основание под трубу, газоходы и сама дымовая труба — выполняется из штучных огнеупорных материалов. Печи указанной конструкции работают самостоятельно или в виде установки (блока), состоящей из нескольких печей, но имеющих общий сборник продуктов горения и одну дымовую трубу. Целесообразность строительства таких установок заключается в том, что при остановке (на ремонт) одной из печей установка продолжает работать и выпускать продукцию.

Пиролизная трубчатая печь, оборудованная газовыми керамическими панельными горелками (рис. 99), служит для получения низших ароматических углеводородов, главным образом бензола и толуола. Процесс разложения нефтяных продуктов протекает при температурах 600—850° С (при выходе пирогаза из радиантных секций).

Трубы змеевика в нижней части печи опирают на литые решетки из жаропрочной стали, устанавливаемые через 1,5—2 *м* друг от друга по длине печи, а в рабочем пространстве печи — на подвески из жаропрочной стали, укрепленные на верхней раме, и на решетки, установленные в нижней части печи. Трубы змеевика, проходящие по своду, опираются на подвески, закрепленные также на верхней раме. В торцовых стенах печи трубы змеевика опирают на чугунные изолированные с внутренней стороны решетки.

Продукты переработки поступают в одну из нижних труб змеевика в нижней части печи, проходят по всему змеевику и выходят из труб, расположенных около свода.

Продукты горения нагревают трубы змеевика и находящийся в нем продукт переработки в рабочем пространстве печи до температуры около 850° С и в нижней части — печи — до 300—350° С. Охлажденные до 300° С продукты горения через дымоход, боров и дымовую трубу удаляются в атмосферу.

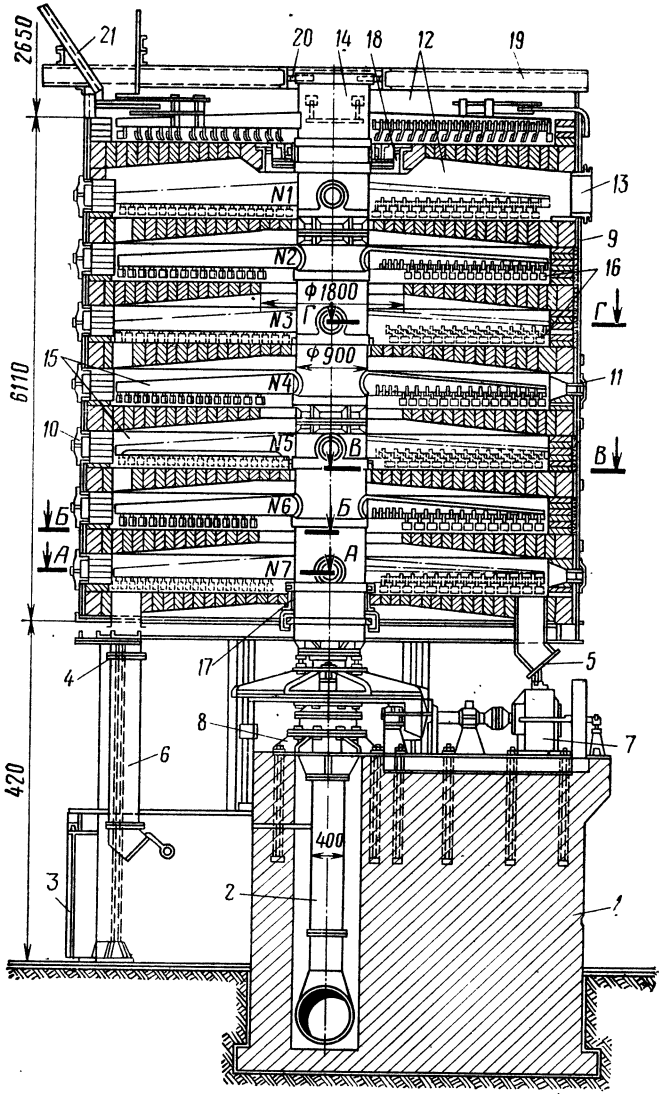
§ 30. ПЕЧИ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Механическая семиполочная печь

Механическая семиполочная печь предназначена для обжига колчеданов с получением сернистого газа SO_2, являющегося основным продуктом при производстве серной кислоты (схематически по реакции: $SO_2+O+H_2O=H_2SO_4$).

Сырьем для получения SO_2 служат: сера, серный колчедан и другие содержащие серу продукты. Важнейшим из указанных видов сырья является серный колчедан — пирит, богатые залежи которого находятся на Урале и в Закавказье.

При обжиге серного колчедана в полочных печах получают SO_2 и отходы — колчедановые или пиритовые огарки по реакции: $4FeS_2+11O_2=2Fe_2O_3+8SO_2$. Пиритовые огарки, содержащие до 40—66% Fe, 10—12% SiO_2, 0,7—1,5% Cu, 0,3—0,6% Zn, после



обогащения используют как сырье для получения меди, чугуна и др.

Семиполочная печь (рис. 100) сооружается на бетонном фундаменте, к которому с помощью анкерных болтов крепят механизм вращения вала с гребками, опорный механизм и металлоконструкции каркаса печи, состоящего из колонн, нижней рамы, являющейся основанием, и каркас из листовой стали. Футеровку стен печи выполняют из шамотного кирпича или жаростойкого бетона.

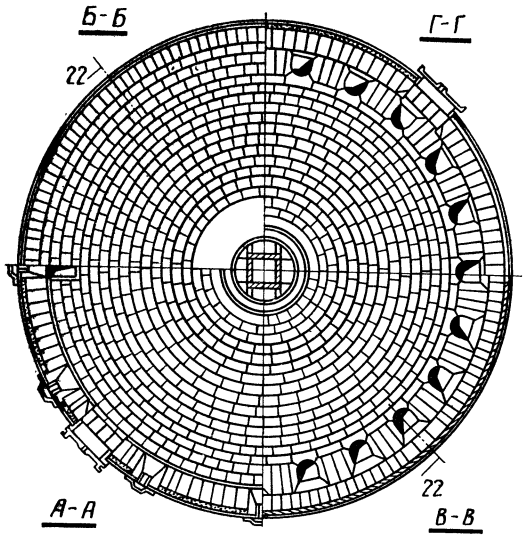


Рис. 100. Механическая семиполочная печь

1 — фундамент; *2* — труба для воздуха, охлаждающего вал и гребки; *3* — двери тамбура печи; *4* — колонны и рама; *5* — течка для механизированной выгрузки; *6*—течка для ручной выгрузки огарка; *7* — механизм привода печи; *8* — опорный механизм; *9* — кожух; *10* — люк; *11* — воздушный шибер; *12* — коробка для выхода газа; *13* — патрубок; *14* — центральный вал; *15* — гребки; *16* — лопатки; *17* — уплотняющие кольца; *18* — питатель рабочего свода; *19* — площадка над печью; *20* — направляющие ролики переднего конца вала; *21* — загрузочный бункер (№№ — номера камер и сводов); *22* — ось люков

Своды сферической формы, разделяющие рабочее пространство печи по вертикали на несколько камер, выполняют из фасонных шамотных изделий или из жаростойкого бетона.

В центре сводов имеются отверстия цилиндрической формы для прохождения вала и пересыпки колчедана с одного свода на другой. В рабочих сводах 1, 3 и 5 эти отверстия расположены по окружности свода (23 шт.) в местах примыкания его к футеровке стен, а в сводах 2, 4 и 6 — около вала. В рабочем своде 7 имеются квадратные отверстия для удаления огарка, расположенные в местах примыкания свода к футеровке стен. В сушильном (верхнем) своде для пересыпки продукта на 1-й рабочий свод имеется специальное устройство — питатель рабочего свода.

Чугунный вал, к которому крепят чугунные гребки с лопатками, устанавливается на опорное устройство. Верхняя часть вала вращается в направляющих роликах, укрепленных на металлоконструкциях, образующих верхнюю площадку печи. Вал и гребки охлаждаются воздухом, проходящим внутри вала. Вращение вала осуществляется с помощью электродвигателя через редуктор и систему зубчатых шестерен.

Воздух для горения поступает в рабочее пространство печи через отверстия, перекрываемые шиберами. Газы выходят через патрубок, расположенный в камере, образованной сушильным сводом и первым рабочим сводом.

Дробленый до кусков размером 6—10 *мм* серный колчедан подается в загрузочную воронку, расположенную на верхней площадке печи, откуда поступает на свод сушильной камеры, по которой с помощью лопаток, насаженных на гребки, вращающие-

ся с валом, перемещается к питательному устройству и через него просыпается на свод первой рабочей камеры, где начинается горение серы. Лопатками гребков первой рабочей камеры горящий колчедан перемещается по своду к периферии (к футеровке стен) и через отверстия в своде пересыпается на свод второй рабочей камеры, где гребками перемещается от периферии к центру и через отверстия в своде (у вала) пересыпается на свод третьей рабочей камеры и т. д. В нижней камере остатки от обжига колчедана (огарки) через проемы удаляются из печи. Температура в печи достигает 600—650° С в нижних камерах, где происходит наиболее интенсивное горение серы, и до 260° С в верхних камерах. Дополнительных средств обогрева, кроме тепла, получаемого при горении серы, пересыпные печи не имеют.

В зависимости от производительности и технологии производства пересыпные печи в конструктивном отношении имеют некоторые различия, но принцип их работы остается неизменным.

Печь для обжига флотационного колчедана в кипящем слое

Для получения сернистого газа кроме рудных серных колчеданов ценным сырьем являются и отходы, получаемые при обогащении руд цветных металлов флотационным методом (извлечение продукта из руд или отходов путем растворения их в воде, а также растворах кислот и щелочей).

Флотационный колчедан представляет собой хорошо просушенный мелкий порошок с содержанием серы 37—48%. При обжиге флотационного колчедана, так же как и в пересыпных печах, получают сернистый газ SO_2 и огарки (отходы). Для обжига флотационных колчеданов применяют полочные, форсуночные (в которых пылевидный колчедан вдувается в рабочее пространство печи с помощью форсунок) и другие типы печей. В последнее время для этой цели используют печи для обжига в кипящем слое, одна из конструкций которых представлена на рис. 101. Процесс работы печи заключается в том, что загружаемый в виде порошка колчедан за счет воздуха, поступающего в рабочее пространство печи через отверстия в подине и провальную камеру, находится во взвешенном состоянии. При этом достигается хороший контакт воздуха с частицами колчедана, обеспечивающий полное сгорание находящейся в нем серы. Температура в печи поддерживается только за счет тепла, выделяемого при горении серы. Температура газов на выходе из печи составляет около 900° С и огарка 800° С.

Основанием печи является бетонный фундамент, на который устанавливают металлические колонны с опорной рамой и цилиндрическим кожухом. Стены печи футеруют шамотным и диатомитовым кирпичом. Свод печи купольного типа выполняют из большемерного шамотного кирпича, по верху которого делают

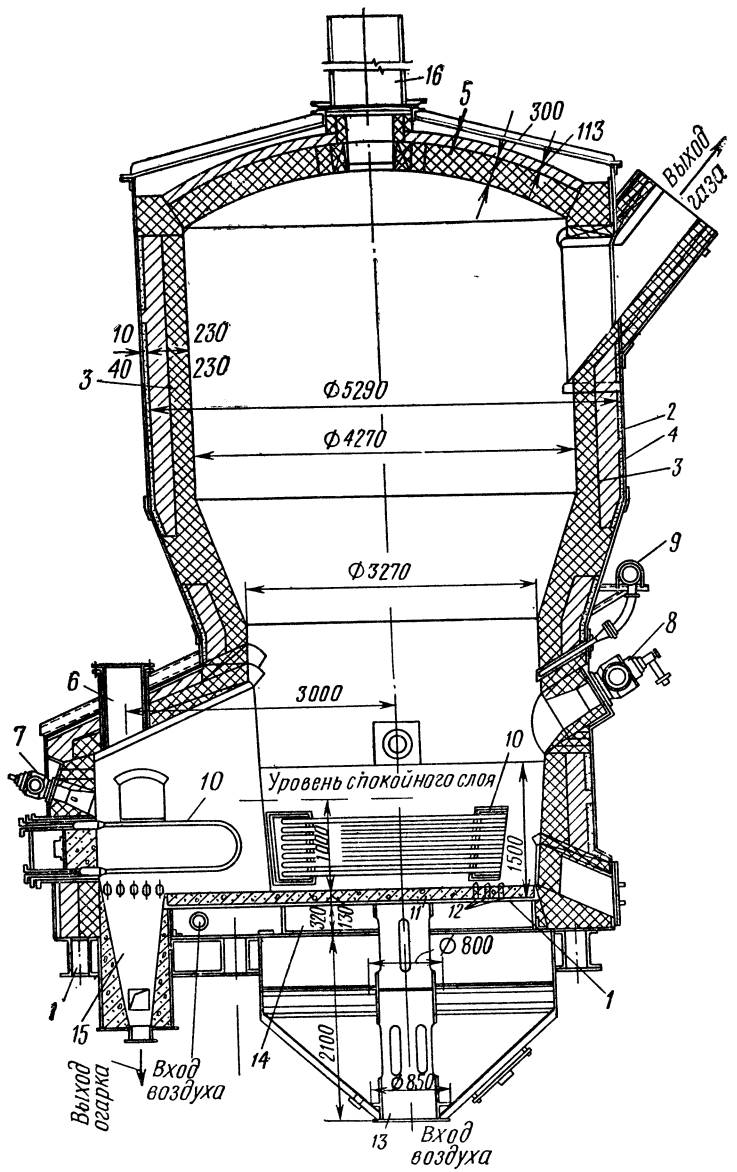


Рис. 101. Печь для обжига колчедана в кипящем слое

1 — нижняя рама; *2* — кожух; *3* — футеровка; *4* — засыпка; *5* — купольный свод; *6* — течка для засыпки колчедана; *7* — форсунка; *8* — горелка; *9* — подача вторичного воздуха; *10* — регистры для охлаждения; *11* — днище; *12* — грибки для прохода воздуха; *13* — воздухопровод; *14* — воздушная коробка; *15* — бункер для удаления огарка; *16* — выхлопная труба

изоляционную кладку из диатомитового кирпича. В центре свода имеется круглое отверстие, соединяющее рабочее пространство печи с выхлопной трубой (предохранительным клапаном). В верхней части рабочего пространства печи (немного ниже свода) имеется отверстие для выхода газов.

Колчедан загружают в печь через металлическую трубу, установленную в своде загрузочной части печи. Для розжига (зажигания сырья) печь оборудована мазутными форсунками или газовыми горелками. Для охлаждения нижней части рабочего пространства и загрузочной части печи установлены трубчатые холодильники. Подину печи выполняют из жаростойкого бетона, в которую вмонтированы «грибки» для подачи воздуха. В загрузочной части пода печи имеется отверстие для удаления огарка.

Воздух для создания кипящего слоя подводят по воздухопроводу в распределительную коробку. Основную часть воздуха подают через отверстия в подине (грибки), а остальную часть непосредственно в провальное отверстие загрузочной камеры (отверстие для удаления огарка).

Печь для сжигания сероводорода

Для получения сернистого газа SO_2 сжигают сероводород H_2S в специальных печах, одна из которых показана на рис. 102. Печь представляет собой цилиндрическую камеру, где сжигается сероводород, подаваемый вместе с воздухом через горелки. Дно и стены печи футерованы шамотным кирпичом, а между кожухом и шамотной футеровкой проложен листовой асбест. Куполообразный свод печи выполнен из шамотного кирпича. В нижней части печи имеются поднасадочные устройства, выполненные в виде арок, на которые до половины высоты печи укладывается насадка из шамотного кирпича. Насадка служит для стабилизации теплового режима, а также в некоторой степени выполняет роль катализатора. В верхней части футеровки стен имеются четыре отверстия. Одно из них служит для установки предохранительного клапана, другое является смотровым люком, а через следующие два с помощью горелок подается смесь сероводорода и воздуха.

Для удаления из печи продуктов горения (в основном сернистого газа) в поднасадочной части печи имеется специальное отверстие, связанное с газоходом, по которому сернистый газ транспортируется для дальнейшей переработки. Температура в печи поддерживается за счет тепла, выделяемого при сжигании сероводорода, и на выходе из печи не превышает 1000° С.

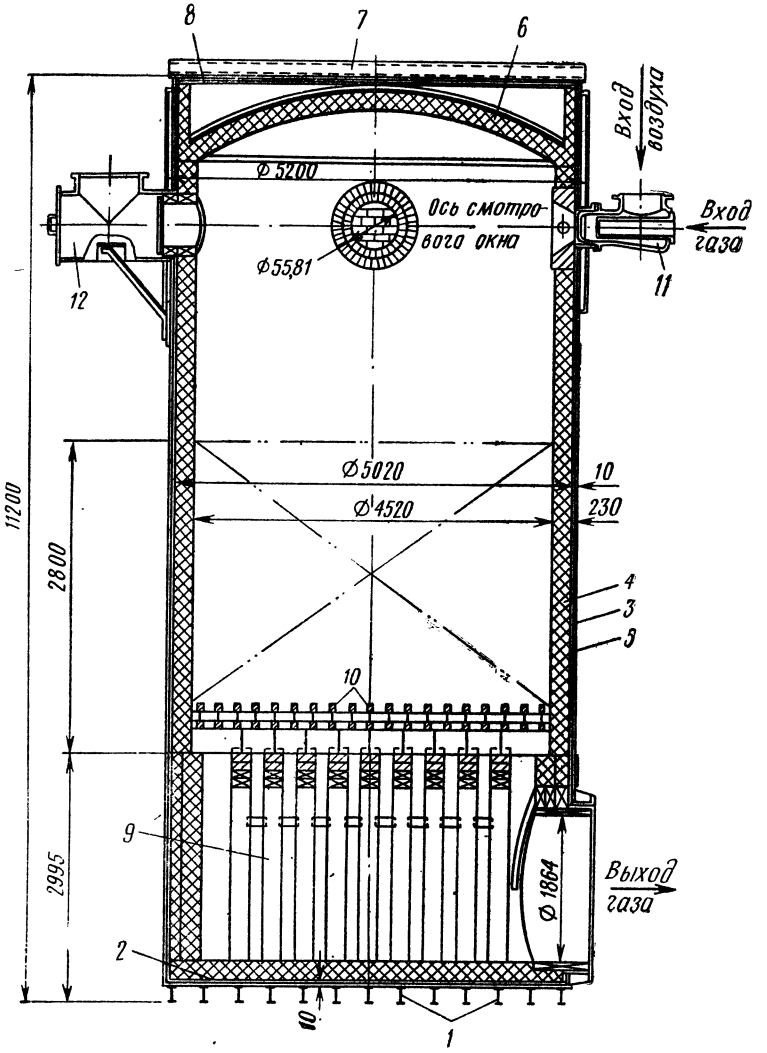


Рис. 102. Печь для сжигания сероводорода

1 — опорная рама; *2* — днище; *3* — кожух; *4* — футеровка; *5* — асбестовый лист; *6* — свод; *7* — верхняя рама; *8* — крышка; *9* — поднасадочное устройство; *10* — насадка; *11* — горелка; *12* — предохранительный клапан

ГЛАВА X

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЛАВИЛЬНЫЕ И НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ

§ 31. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Электрический нагрев имеет широкое распространение в различных отраслях промышленности. Электрические печи используются как агрегаты для производства высококачественной стали, ферросплавов, цветных металлов, для нагрева под термообработку и термохимическую обработку, для нагрева под ковку и штамповку.

Преимущество электронагрева по сравнению с нагревом в пламенных печах заключается в следующем: возможность достижения высоких температур; обеспечение больших скоростей нагрева; обеспечение высокой точности и равномерности нагрева вследствие легкости регулирования электрического и температурного режимов; возможность более надежной герметизации электропечей и в связи с этим обеспечение возможности нагрева в вакууме, нейтральных и контролирующих атмосферах, что позволяет вести нагрев и плавку при низком угаре металла и более полного использования легирующих добавок; возможность широкой механизации и автоматизации технологических процессов.

Основным и единственным недостатком электронагрева является относительная дороговизна электроэнергии. Электрические печи подразделяются на: дуговые, индукционные, диэлектрические, печи сопротивления. В последнее время применяются электронные и плазменные печи.

При дуговом нагреве превращение электрической энергии в тепловую происходит в электрической дуге. Эти печи делятся на три группы: с зависимой, независимой и закрытой дугой.

В печах первой группы электрическая дуга возникает между одним или несколькими электродами и нагреваемым металлом. В этом случае основная часть мощности от электрической дуги передается поверхности металла излучением, а тепло в массе металла распространяется за счет теплопроводности и конвекции (дуговые электросталеплавильные печи).

В печах второй группы электрическая дуга горит между двумя электродами на некотором расстоянии от металла. Поверхность металла в этом случае получает тепло исключительно в результате лучеиспускания.

В печах третьей группы электрическая дуга горит под слоем твердой шихты между одним или несколькими электродами и расплавом. Печи с закрытой дугой относятся к агрегатам смешанного типа, в которых нагрев осуществляется электрической дугой или по способу сопротивления в зависимости от данного технологического процесса.

Индукционный нагрев характеризуется тем, что при прохождении электрического тока через медную катушку — индуктор — электрическая энергия превращается в энергию переменного магнитного поля, которое, воздействуя на нагреваемый металл, и наводит в нем вихревые токи. Индукционные печи разделяются на печи с железным сердечником и без него. В печах с железным сердечником переменное магнитное поле проходит по специальному замкнутому магнитопроводу (сердечнику). В печах без сердечника переменное магнитное поле, образуемое при прохождении электрического поля через индуктор, пронизывает нагреваемый металл и замыкается через окружающее индуктор пространство.

Диэлектрический нагрев основан на том, что в высокочастотном электрическом поле в твердых непроводящих электрический ток материалах происходит поляризация атомов и молекул, в результате чего возникает трение между частицами и выделяется тепло по всей массе диэлектрика, расположенного между пластинами электродов, к которым подводят электрическую энергию высокой частоты.

Электрические печи, работающие по принципу электронагрева сопротивлением, подразделяются на две группы: прямого и косвенного действия. Различие между ними состоит в том, что в первом случае напряжение подают к торцам нагреваемого изделия, а во втором случае тепло выделяется при прохождении тока в высокоомных нагревательных элементах, которые разогреваются и передают тепло поверхности нагреваемого изделия.

Электронный нагрев основан на превращении кинетической энергии разогнанных до больших скоростей электронов при их ударе о поверхность нагреваемого объекта. Плазменный нагрев основан на выделении тепла в ионизированном газовом потоке, который образуется во время дугового разряда в токе, подаваемого под давлением газа.

Наиболее широкое распространение в промышленности получили электрические печи — дуговые с зависимой дугой, индукционные печи с сердечником и без него и печи сопротивления с высокоомными нагревательными элементами.

Электронагревательные установки состоят из двух основных частей: печи и электрической подстанции, на которой расположены преобразователи электроэнергии, распределительная, пусковая и контрольно-измерительная аппаратура.

Основными показателями работы электрических печей являются электрический и тепловой к. п. д., а также производительность и удельный расход электроэнергии.

Сталеплавильные электрические печи

Для производства качественной электростали служат дуговые и индукционные электрические печи. Индукционные печи широкого применения для выплавки стали не получили, так как они менее экономичны, чем дуговые.

Дуговыми электрическими печами, получившими широкое распространение для плавки качественных сталей, являются трехфазные дуговые печи с вертикальными электродами и непроводящим подом, в которых ток протекает по цепи: электрод, дуга, шлак, металл, шлак, дуга, электрод. Емкость таких печей достигает 200 *т* и более.

Трехфазная электрическая дуговая печь (рис. 103) представляет собой металлический кожух цилиндрической формы с плоским или сферическим дном, футерованный внутри огнеупорными материалами. В зависимости от технологии производства стали печи футеруют кислыми (динасовыми) или основными (магнезитовыми) огнеупорными изделиями.

Верх печи закрыт сводом, набранным из хромомагнезитового кирпича, в котором имеются три круглых отверстия для установки графитовых электродов. С одной стороны в печи предусмотрено рабочее окно для завалки шихты и присадок, скачивания шлака и наблюдения за работой печи, а с противоположной стороны — окно, по центру которого имеется отверстие для выпуска готовой стали через выпускной желоб в сталеразливочный ковш. Для наклона печи в сторону слива металла и в сторону рабочего окна, а также для скачивания шлака на корпусе печи укреплены опорные секторы, опирающиеся на станину, прикрепленную к фундаменту с помощью анкерных болтов. Поворот печи производится с помощью электродвигателя через редуктор. Питание печи электроэнергией осуществляется через трансформатор соответствующей мощности.

Шихта, состоящая из металлического лома (скрапа), извести и железной руды, при ведении процесса с окислением загружается в печь через рабочее окно с помощью загрузочной машины или бадьей через верх печи при снятом своде с помощью крана.

После расплава шихты и первого скачивания шлака в количестве 60—70% всего количества в печь для удаления остатков фосфора и окисления углерода (которого в расплавленном металле примерно на 0,5% больше, чем в готовой стали) добавляются известь и железная руда. За счет присадок железной руды происходит окисление избыточного углерода и кипение стали, обеспечивающее удаление из металла газов и неметаллических включений. На этом заканчивается окислительный или первый период плавки. Во второй период плавки (восстановительный) происходит раскисление металла и удаление серы. Для образования восстановительных шлаков в печь загружают известь, плавиковый шпат и мелкий коксик. Углерод кокса восстанавливает железо и марганец по реакции $FeO+C=Fe+CO$ (газ), а известь способствует удалению серы из металла в шлак по реакции $FeS+CaO=CaS+FeO$.

В конечном периоде плавки шлаки дополнительно раскисляются ферросилицием или алюминием, что обеспечивает получение готовой продукции требуемого качества.

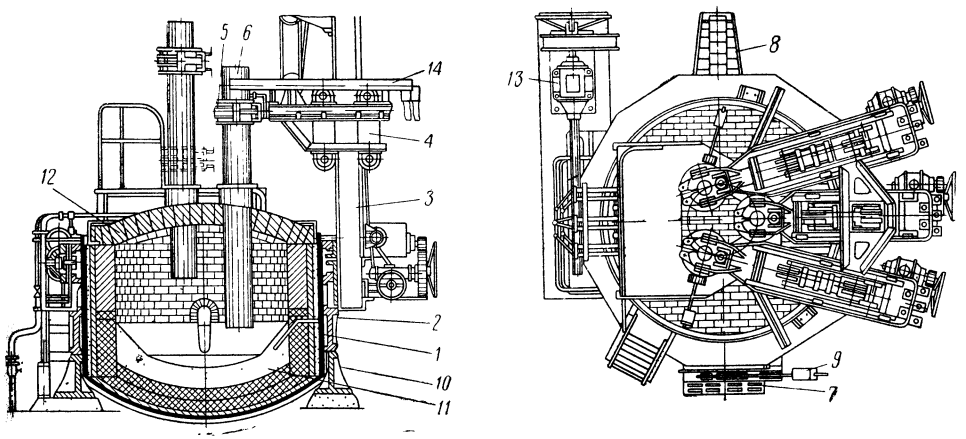


Рис. 103. Дуговая электросталеплавильная печь

1 — кожух; *2* — зубчатый сектор; *3* — стойки; *4* — каретка; *5*—электрододержатели; *6*—электроды; *7* — рама загрузочного окна; *8* — сливной желоб; *9* — механизм подъема загрузочного окна; *10* — станина; *11* — футеровка; *12* — свод; *13* — механизм наклона печи; *14*—медные шины

Плавка стали в электрических печах с кислой футеровкой ведется с кислыми шлаками, при которых из металла почти невозможно удалить серу и фосфор. Поэтому содержание фосфора и серы в шихте должно быть в количествах, не более допустимых в готовой продукции.

Футеровка основных сталеплавильных дуговых электропечей выполняется из асбестового картона толщиной 10—20 *мм*, наклеиваемого на кожух на жидком стекле, одного-двух рядов легковесного или шамотного кирпича и трех рядов магнезитового кирпича, из них два на плашку и один на ребро насухо с заполнением швов магнезитовым порошком.

Кладку откосов, являющихся основанием для стен, выполняют из легковесного шамота и магнезитового кирпича с засыпкой швов магнезитовым порошком. Зазор толщиной 50—70 *мм* между легковесным кирпичом и кожухом заполняют диатомитовым порошком. Стены печи выкладывают из магнезита толщиной в $1\frac{1}{2}$—2 кирпича аналогично откосам.

Для предохранения огнеупорной кладки подины от механи-

ческих повреждений и разъеданий металлом и шлаком производят набивку ее на толщину 150—400 *мм* массой следующего состава (по объему): магнезитового порошка 89%, каменноугольной смолы 10% и кварцевого песка 1%. Своды печи выкладывают в форме шарового сегмента из динасового или в последнее время из магнезито-хромитового кирпича. Распор свода воспринимается металлическим кольцом. Такая конструкция сводов удобна тем, что их можно убирать при завалке печи (в случае если она производится сверху) и быстро менять при выходе из строя. Ориентировочный удельный расход электроэнергии при расплавлении твердой завалки для печей емкостью 100 *т* составляет 420 *кВт·ч/т* и 200 *т* — 410 *кВт·ч/т*. В малых печах емкостью 15—25 *т* удельный расход электроэнергии доходит до 480—500 *кВт·ч/т*.

Электрическая печь для плавки концентратов медных руд

Электрическая печь для плавки концентратов медных руд (рис. 104) является наиболее крупной дуговой электрической печью. Для кладки подины печи, имеющей вид обратного свода, делается подготовка из жаростойкого бетона или огнеупорной подсыпки. Толщина подины 900—1200 *мм*. Ее выкладывают из шамотного или магнезитового кирпича, верхние ряды кладут на торец. В некоторых печах подины выкладывают из углеродистых блоков. Стены печи толщиной 750—920 *мм* внизу и 600—700 *мм* вверху кладут из магнезитового кирпича, причем верхнюю часть стен выше уровня шлака иногда выкладывают из шамота. Свод печи арочного типа толщиной 300—400 *мм* с отверстиями для электродов, загрузки шихты и удаления газов выполняют из шамотного кирпича. Отверстия в сводах, через которые загружается шихта, имеют диаметр 150—200 *мм*, располагаются параллельными рядами вдоль продольных стен печи и находятся на расстоянии 1200—1500 *мм* друг от друга. Они снабжены чугунными или стальными течками, охлаждаемыми водой.

Продукты плавки — штейн и шлак — (более подробно см. § 24) выпускают из печи по мере их накопления. Шлак выпускают через шлаковое окно, расположенное на 700—800 *мм* выше уровня подины в боковой стенке ванны. Для выпуска штейна на уровне пода в одной из боковых стен печи имеются два окна, в которые помещены чугунные или медные плиты, охлаждаемые водой, имеющие небольшие отверстия, куда вставляют чугунные трубки (летки).

Образующиеся в печи газы удаляют по системе газоходов через отверстия, специально для этого оставленные в своде печи. Нагрев и плавление шихты (при температуре 1200—1600° С) в электропечах этого типа осуществляют с помощью трех или шести набивных самообжигающихся угольных электродов диаметром 800—1400 *мм*, концы которых находятся непосредственно в расплавленном шлаке. Опускание электродов осуществляется автоматически управляемыми электрическими лебедками.

Набивку электродной массы производят периодически в металлические формы, прикрепленные к верхней части работающего электрода. Спекание массы происходит в период опускания электродов в печь по мере их сгорания. Электрический ток напряжением 70—250 *В* подают к электродам от печного трансформатора через электрозажимы по гибким медным шинам и мед-

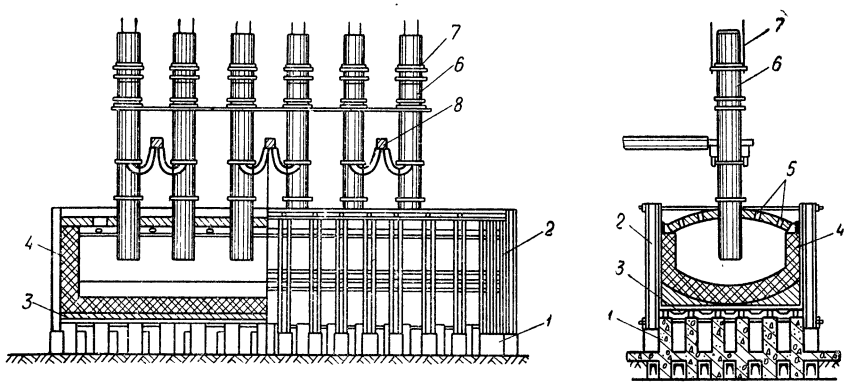


Рис. 104. Электропечь для плавки концентратов медных руд
1 — фундамент; *2* — каркас; *3* — подовые плиты; *4* — футеровка; *5* — отверстия для загрузки шихты; *6* — электроды; *7* — электрододержатели; *8* — шины

ным трубкам, по которым также подводят воду для охлаждения щечек электрозажимов.

В электропечах аналогичной конструкции производят и плавку медно-никелевых концентратов с получением штейна никеля.

Индукционные электрические печи с железным сердечником для плавки цветных металлов и сплавов

Индукционные печи с железным сердечником емкостью 0,3; 0,6; 1,2 и 2 *т* применяют в крупных литейных цехах для плавки меди, латуни, бронзы, никеля и других цветных металлов и сплавов.

На рис. 105 показана индукционная печь с одним железным сердечником и двумя каналами емкостью 0,6 *т*. Рабочее пространство печи заключено в металлический кожух цилиндрической формы. Стены и подину рабочего пространства футеруют шамотным кирпичом, а зазор между огнеупорной футеровкой и кожухом заполняют обожженным диатомитовым порошком. В верхней части печи имеется отверстие для загрузки шихты, закрываемое во время работы металлической крышкой.

Выпуск металла производится при наклоне печи через специальное отверстие, оставленное в огнеупорной кладке рабочего пространства печи и расположенное на расстоянии 0,5 *м* от уровня пода.

Нижняя часть печи (называемая камнем) состоит из металлического кожуха, собираемого из двух половинок, соединенных

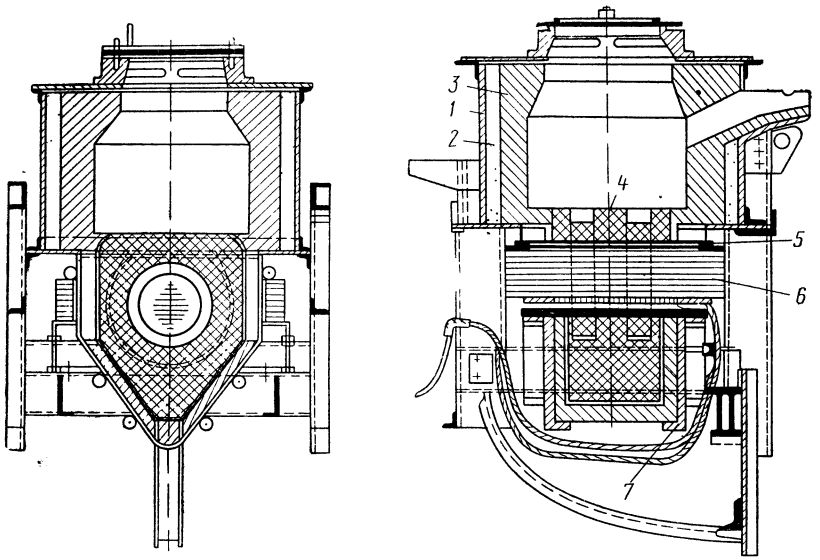


Рис. 105. Индукционная электрическая печь с железным сердечником

1 — кожух; *2* — изоляция; *3* — футеровка; *4* — подовый камень; *5* — первичная катушка; *6* — сердечник; *7* — разъемный каркас

болтами, и крепящегося к общему металлическому каркасу печи. Конусообразную часть нижнего кожуха футеруют огнеупорным кирпичом, на который устанавливают каркас из немагнитного металла, имеющий форму нижнего кожуха, но меньших размеров.

Зазор между кожухом и каркасом на участке, где нет огнеупорной кладки, заполняют теплоизоляционным материалом. Каркас из немагнитного металла для плавки бронзы и латуни набивают массой, состоящей из 96% мелкоизмельченного кварца, 2% буры, 1,5% дробленого стекла и 0,5% глины; для плавки никелевых сплавов — 96,5% магнезита, 3% и 0,5% дробленого стекла.

Сердечники (магнитопроводы) собирают из листов трансформаторной стали. Электрический ток напряжением 220 *В* подается к печи по гибкому медному кабелю. Производительность печи 20 *т* в сутки при трехсменной работе.

Электрическая печь сопротивления для плавки алюминия и магния

Электрические печи сопротивления применяются в небольших литейных цехах для плавки легких металлов, обычно сплавов алюминия и магния. В электрической печи сопротивления тепло получают, пропуская электрический ток через материал с высоким омическим сопротивлением (нихром, силит).

Электрическая тигельная печь сопротивления (рис. 106) состоит из металлического кожуха цилиндрической формы с донышком и съемным колпаком для удаления газов. Внутри кожуха имеется футеровка из нормального и фасонного шамотного кирпича. Зазор, оставляемый между футеровкой и кожухом, заполняют теплоизоляционными материалами. Плавление металла происходит в чугунном тигле, установленном в рабочем пространстве печи. Верхние приливы тигля опираются на металлическую плиту, уложенную на футеровку. Сверху тигель закрывается крышкой, через отверстие в которой пропускается термопара. Металл нагревают в тигле до температуры 850—1000° С с помощью электрических нихромовых нагревателей, уложенных на выступы шамотной футеровки.

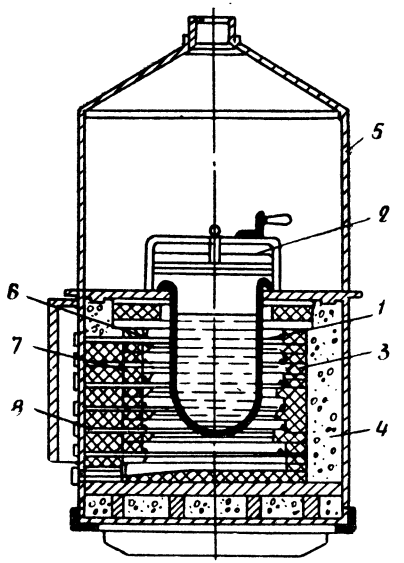


Рис. 106. Тигельная электрическая печь сопротивления

1 — чугунный тигель; *2* — крышка тигля; *3* — футеровка; *4* — теплоизоляция; *5* — колпак; *6* — нагреватели; *7* — подвески; *8* — токоподводящие стержни

В нижней части печи на уровне пода имеется отверстие для выпуска жидкого металла в случае прогара тигля. Емкость этого типа печей 25—150 *кг*.

§ 33. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ

Электрические нагревательные печи сопротивления находят широкое применение в машиностроительной, станкостроительной, автомобилестроительной и других отраслях промышленности, связанных с обработкой углеродистых и легированных сталей и изготовлением изделий из цветных металлов и сплавов.

Электрические печи сопротивления в основном используют для термической обработки стальных изделий и изделий из

цветных металлов и сплавов, т. е. для ведения таких процессов, когда требуется нагревать изделия до строго определенной температуры, что легче осуществлять в электрических автоматизированных печах. Кроме того, печи сопротивления широко применяют для светлого отжига металлических изделий в восстановительной среде без получения окалины. В этом случае в рабочем пространстве находятся газы (водород и др.), обеспечивающие в печи безокислительную атмосферу.

Электропечи сопротивления состоят из рабочего пространства, в котором помещаются нагреваемые изделия и нагревательные элементы, металлического каркаса с кожухом, футеровки, а также загрузочных приспособлений и специальных механизмов (печи с шагающим подом, карусельные и др.). Наиболее важной частью электрических печей сопротивления являются нагревательные устройства (элементы) с регулирующими и измерительными приборами.

Нагревательные устройства делятся на свободноизлучающие, в которых нагревательный элемент расположен открыто в печи, и закрытые, в которых передача тепла изделиям осуществляется через слой электрической изоляции.

К нагревательным устройствам свободного излучения относятся: рамочные нагревательные элементы, состоящие из керамических изоляторов, на которые наматывается проволока или лента; спиральные нагревательные элементы, изготовляемые из проволоки или ленты и подвешиваемые на подвесках или укладываемые на керамические изоляторы, а также спиральные нагревательные элементы на керамических сердечниках; зигзагообразные нагревательные элементы, изготовляемые из ленты, изогнутой зигзагообразно, и крепящиеся непосредственно к стенкам, поду или своду рабочего пространства печи.

К закрытым нагревательным устройствам относятся: запрессованные в слюду элементы, у которых проволоку или ленту наматывают на слюдяную пластинку и с обеих сторон закрывают такими же пластинами; пластинчатые нагревательные элементы, представляющие собой спираль, находящуюся в керамическом изделии и таким образом изолированную от доступа воздуха; трубчатые нагреватели, в которых спираль из проволоки или ленты заключена в металлическую трубу, а свободное пространство между трубой и спиралью заполнено прессованным кристаллическим порошком плавленной окиси магния, хорошо проводящим тепло, обладает жаростойкостью и высоким объемным электрическим сопротивлением.

В качестве нагревателей в большинстве случаев применяют проволоку или ленту из нихромовых сплавов, допускающих использование их до температуры 1100—1200° С, хромоникелевых (1000° С), железохромоалюминиевых и др. Кроме нагревателей из сплавов в электронагревательных печах применяют силит в виде стержней с температурой использования до 1400° С. При

Рис. 107. Камерная высокотемпературная электропечь

1 — кожух; *2* — футеровка; *3* — нагревательные элементы; *4* — дверца; *5* — гляделка; *6* — механизм открывания дверцы; *7* — рабочее пространство печи

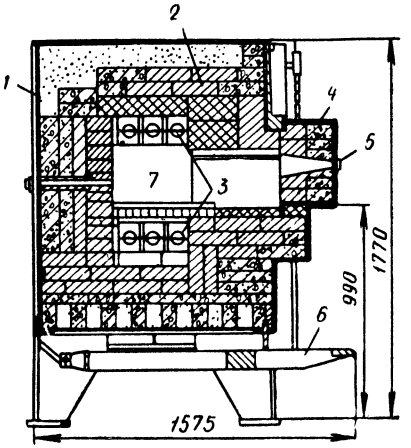
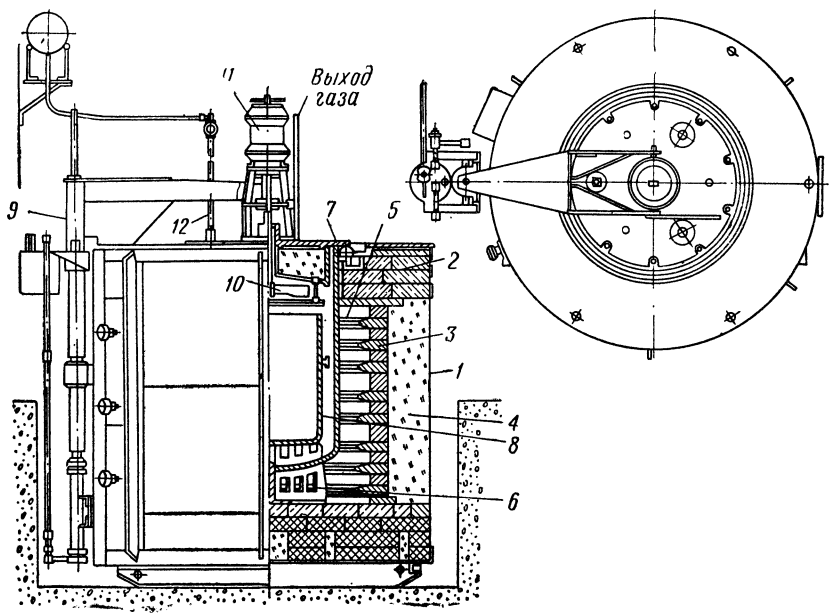


Рис. 108. Шахтная печь для газовой цементации

1 — кожух; *2* — футеровка; *3* — подвески; *4* — теплоизоляция; *5*—нагреватели; *6*—подставки для реторты; *7* — жароупорная реторта; *8* — корзина для деталей; *9* — гидроподъемник для подъема крышки; *10* — вентилятор; *11* — электродвигатель; *12* — капельник



температуре 1800° С применяют графитовые нагреватели, которые используются в атмосферах с отсутствием кислорода, чаще в вакууме. Нагреватели крепят к стенам или сводам электронагревательных печей с помощью подвесок из нихрома или других жаропрочных сталей, закладываемых в кладку. Фасонные огнеупорные изделия, на которые укладывают или навешивают нагреватели, изготовляют обычно из высокоглиноземистого шамота.

На рис. 107 показана камерная высокотемпературная электропечь сопротивления, предназначенная для нагрева изделий из высоколегированных сталей до температуры 850—1300°С. Нагревательные элементы, выполненные в виде трех стержней (из силита), расположены горизонтально по три штуки на поду и на своде рабочей камеры. Подовые нагревательные элементы перекрываются плитой из карборунда, на которую укладываются нагреваемые детали. Нагревательные элементы питаются электроэнергией через понизительный трансформатор (330/220 *В*). Температура в печи регулируется автоматическим самопишущим потенциометром посредством платина-платинородиевой термопары, установленной в рабочем пространстве печи.

Каркас печи состоит из профильной и листовой стали. На передней стенке его укреплена чугунная литая плита с заслонкой. Подъем заслонки осуществляется ножным педальным механизмом при помощи цепей и звездочек, соединенных с двумя противовесами. На рис. 108 показана шахтная электропечь, предназначенная для газовой цементации стальных изделий. Максимальная рабочая температура в печи 950° С. В рабочую камеру печи на подставки устанавливают жароупорную реторту, в которую загружают обрабатываемые детали. Если обработке подлежат мелкие детали, то их загружают в специальную корзину из жаропрочной стали. Рабочее пространство печи сверху закрывают металлической крышкой, которую при загрузке печи или удалении из нее обработанной продукции открывают с помощью гидравлического приспособления.

Цементирующая жидкость (керосин, бензол, пиробензол) подается в реторту через капельник. Для непрерывного перемешивания газовой смеси в реторте на крышке печи укреплен вентилятор с электродвигателем. Температура в рабочей камере регулируется при помощи термопары, соединенной с приборами теплового контроля. Нагревательные элементы получают электроэнергию от понизительных трансформаторов (350/220 *В*).

Каркас печи сварен из уголков и обшит листовой сталью. Футеровка печи состоит из легковесного шамота, нормального шамотного кирпича и фасонных высокоглиноземистых изделий, на которых располагаются нагревательные элементы из высокоомного сплава в виде ленты или проволоки. Пространство между кожухом и огнеупорной кладкой заполнено обожженным диатомитовым порошком.

Шахтные электропечи для газовой цементации выпускают

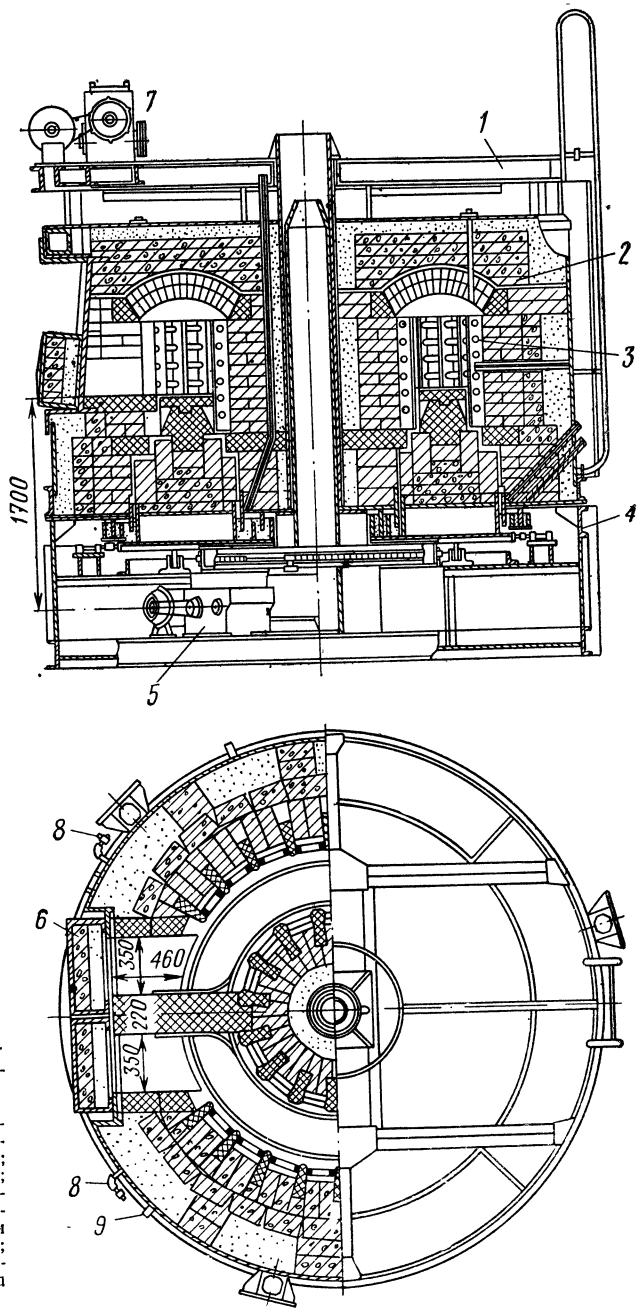


Рис. 109. Карусельная электропечь сопротивления

1 — каркас; *2* — футеровка; *3* — нагревательные элементы; *4* — опорный стол; *5* — механизм вращения пода; *6* — заслонки; *7* — механизм подъема заслонок; *8* — подвод газа к горелкам; *9* — подвод защитного газа

с диаметром корзины 300—450 и 600 *мм* и высотой от низа приямка до крышки 1397—2440 *мм*.

На рис. 109 показана карусельная электропечь сопротивления с кольцевым подом для нагрева изделий из жаропрочных сплавов под штамповку и закалку с максимальной рабочей температурой в рабочем пространстве печи 1270° С. Основными узлами печи являются: каркас из профильного металла с кожухом из листовой стали, футеровка, нагревательные элементы, опорный стол, вращающийся под и механизмы вращения пода и подъема заслонок.

Нагревательные элементы выполнены в виде спиралей и подвешены на керамических патрубках, размещенных на боковых стенках рабочего пространства печи. Нагревательные элементы подключены к сети через понизительный печной трансформатор (380 *В*).

Для подвода в печь защитного газа (если печь работает с защитной атмосферой) имеются два патрубка. Чтобы предотвратить выход защитного газа из печи и подсос холодного воздуха, под подом установлены песочные затворы.

Изделия загружают на вращающийся под через загрузочный оконный проем. Под вращается со скоростью 0,2—3,7 оборота в час — время одного оборота соответствует времени нагрева заготовки. Когда изделия, находящиеся на поде, повернутся почти на 360°, их вытаскивают через разгрузочный оконный проем. Оконные проемы для загрузки и выгрузки готовой продукции расположены рядом.

Механические приводы для раздельного подъема заслонок установлены на каркасе печи. Включение электродвигателей подъема и опускания заслонок производят ножной педалью — выключателем. Наружные стены печи в виде кольца, а внутренние в виде круга футеруют шамотным и диатомитовым кирпичом. Зазор между кладкой и металлическим кожухом заполняется обожженным диатомитовым порошком. По своду печи, выполненному из шамотного кирпича, уложена изоляция из диатомитового кирпича и сделана засыпка диатомитовой обожженной крошкой.

Вращающийся под печи (в виде кольца) футеруют диатомитовым и шамотным кирпичом. Верхняя часть пода футеруется фасонными изделиями из карборунда, на которые укладываются подлежащие обработке изделия. Под опирается на опорный стол, а также механизм вращения, состоящий из храпового колеса, толкателя, редуктора, вариатора (для регулирования скорости вращения пода) и электродвигателя.

Регулирование и контроль температуры в печи автоматические, осуществляемые отдельно в каждой зоне печи.

На рис. 110 приведена барабанная муфельная электропечь для закалки стальных шариков и роликов, в которой нагреватели в виде проволочных спиралей из высокоомного сплава расположены в рабочей камере из специальных керамических фасонных изделий, закладываемых в огнеупорную кладку боковых стен и подовых плит. В рабочей камере печи расположен горизонтальный вращающийся барабан — муфель из жаропрочной стали со спиральными лопастями внутри. Концы муфеля, выступающие из торцовых стен печи, опираются на ролики. Муфель приводится во вращение двигателем, расположенным со сторо-

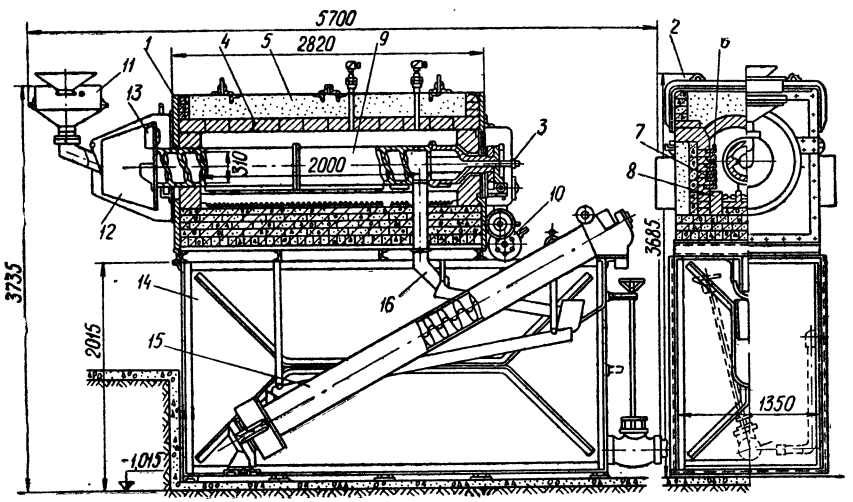


Рис. 110. Электрическая муфельная печь для закалки роликов

1 — каркас; *2* — крышка; *3* — трубка для подачи газа; *4* — футеровка; *5* — изоляция; *6* — нагреватели; *7* — полочки; *8* — плиты пода; *9* — муфель; *10* — механизм вращения муфеля; *11* — бункер; *12* — приемный барабан; *13* — ковш; *14* — закалочный бак; *15* — шнек; *16* — лоток

ны разгрузки, через цепную, зубчатую и червячную передачи и вариатор для регулировки скорости.

Загрузочное устройство состоит из бункера, барабана и ковша. Шарики или ролики при открывании заслонки падают из загрузочного бункера в барабан, где находится ковш. При вращении барабана ковш захватывает находящиеся внизу барабана шарики или ролики и подает их в приемный лоток муфеля, в лопастях и спиралях которого шарики или ролики перекатываются, продвигаясь от загрузочного к разгрузочному отверстию, откуда через люк печи попадают в шнек, установленный в закалочном баке. При вращении шнека шарики или ролики поднимаются вверх и сбрасываются через носок шнека в ящики. Вращение шнека осуществляется электродвигателем через зубчатую и червячную передачи. Закалочный бак снабжен патрубками для присоединения к охладительной установке и аварийного спуска жидкости, применяемой для закалки. Максимальная

температура в печи 920° С. Питание электронагревателей производится от сети с напряжением 350—220 *В*.

Каркас печи из профильного металла и сварного герметического листового кожуха. Торцовые стенки печи из чугунных литых плит. Защитный газ подается через трубку, расположенную по оси печи. Свод, стены и под рабочего пространства печи выполнены из легковесного шамотного кирпича. Пространство между огнеупорной кладкой и кожухом заполнено кладкой из диатомитового кирпича и засыпкой из обожженного диатомитового порошка. Регулирование и контроль температуры в печи автоматические. Удельный расход электроэнергии в печах сопротивления составляет 800—1400 *кВт/ч* на 1 *т* нагреваемых заготовок.

Электрические индукционные нагревательные установки

Индукционные нагревательные установки применяют для нагрева заготовок, труб и деталей из углеродистой стали перед обработкой давлением и термообработкой. Применяются два вида принципиально различных варианта нагрева: сквозной, когда заготовка прогревается на всю толщину с разницей температур между поверхностью и сердцевиной 50—100°, и поверхностный, когда требуется нагреть только относительно небольшой слой металла на определенную глубину.

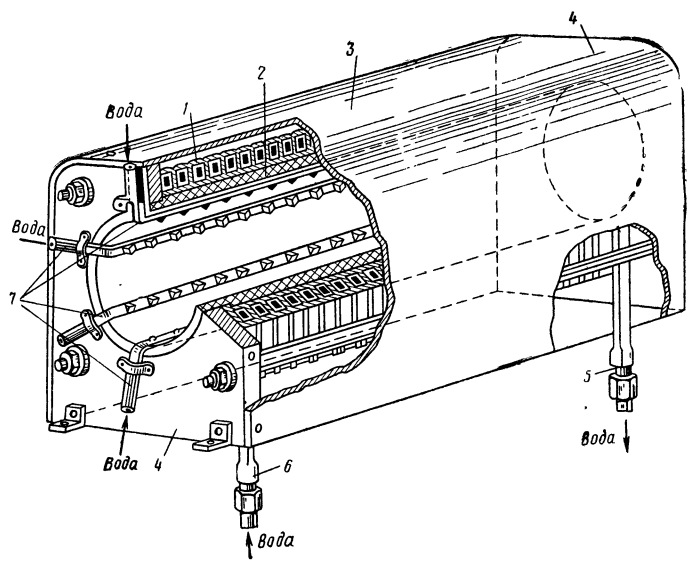


Рис. 111. Индукционная установка для сквозного нагрева цилиндрических заготовок

1 — многовитковая профилированная медная водоохлаждаемая катушка; *2* — керамическая теплоизоляция; *3* — кожух; *4* — асбестоцементная плита; *5, 6* — патрубки для входа и выхода воды; *7* — водоохлаждаемые направляющие из жаропрочной стали

Перед обработкой давлением применяют сквозной индукционный нагрев, обеспечивающий бóльшую скорость нагрева при меньшем окислении металла, легко поддающийся автоматизации и механизации и отличающийся более высокой производительностью на единицу площади цеха, чем пламенные печи и печи сопротивления. В связи с этим установки сквозного индукционного нагрева получили широкое распространение в кузнечных, прессовых и прокатных цехах. Для термообработки применяют поверхностный индукционный нагрев. На рис. 111 показана индукционная установка для сквозного нагрева цилиндрических заготовок.

Удельный расход электроэнергии в индукционных нагревательных установках составляет 400—600 *кВт/ч* на 1 *т* нагреваемых заготовок.

ГЛАВА XI

ФАБРИЧНО-ЗАВОДСКИЕ ТРУБЫ

Дымовые трубы предназначаются для отвода продуктов горения в верхние слои атмосферы, а также для создания разрежения в агрегатах, работающих на естественной тяге. В настоящее время возводят трубы высотой от 20 до 320 *м*. В ближайшие годы намечается строительство труб высотой до 400 *м*. Трубы высотой до 80 *м* возводят преимущественно из кирпича, а более высокие — из железобетона, за исключением труб для отвода газов с температурой выше 500° С. Последние сооружают из кирпича или металлические футерованные, так как обычный бетон для таких труб непригоден, а жаростойкий пока широкого применения не нашел.

§ 34. КИРПИЧНЫЕ ТРУБЫ

Дымовая труба состоит из фундамента, ствола с футеровкой и теплоизоляцией и гарнитуры. В последнюю входят ходовые скобы или лестницы, стяжные кольца (только у кирпичных труб), светофорные площадки и молниезащита (рис. 112). Нижняя часть ствола высотой 3—8 *м* называется цоколем, а верхняя — головкой. На трубах высотой до 50 *м* светофорных площадок не устанавливают.

Фундаменты дымовых труб проектируют в виде усеченного конуса или цилиндра (стакана), опирающегося на круглую или многоугольную плиту (рис. 113). Стакан и плиту выполняют из бетона или железобетона. Бетонные фундаменты делают из бетона марки не ниже 100, а железобетонные — марки не ниже 150.

Стакан в трубах с надземным вводом боровов заполняют шлаком или боем кирпича, поверх которых устанавливают бе-

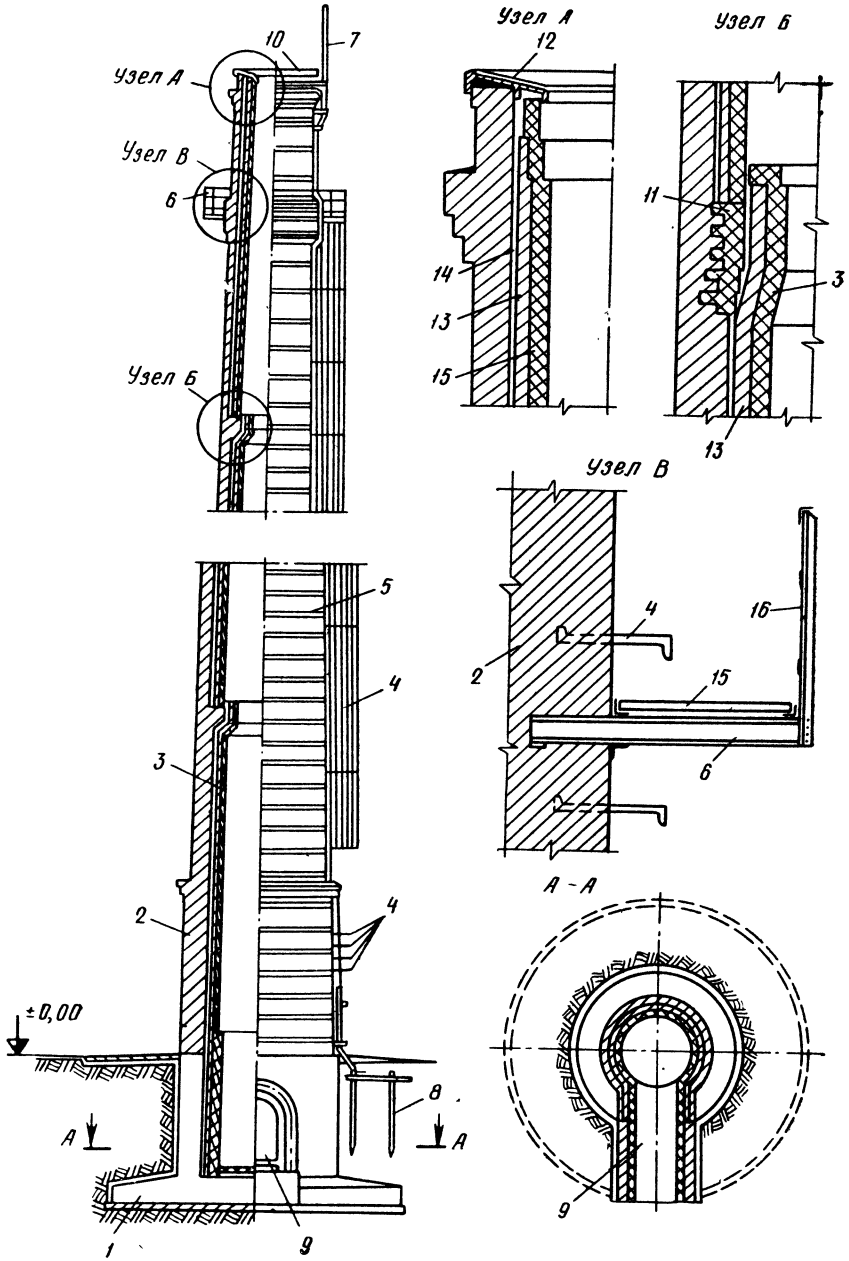


Рис. 112. Кирпичная дымовая труба

1 — фундамент; *2* — ствол; *3* — футеровка; *4* — ходовые скобы с ограждением; *5* — стяжные кольца; *6* — балки светофорной площадки; *7* — молниеотвод; *8* — заземление молниеотвода; *9* — ввод борова; *10* — головка; *11* — уступ под футеровку; *12* — чугунный колпак; *13* — диатомитовый кирпич; *14* — воздушный зазор; *15* — настил; *16* — ограждение

тонное покрытие (рис. 113, *а*). При подземном вводе боровов предусматривают проемы для их ввода, а стакан защищают от воздействия температуры футеровкой толщиной не менее 1 кирпича; выстилку дна стакана заглубляют на 250—500 *мм* ниже отметки выстилки боровов, создавая углубление для сбора золы (рис. 113, *б*). При температурах отходящих газов до 300° С между стенкой стакана и футеровкой оставляют воздушный зазор 50 *мм*, а при более высоких температурах — до 100—150 *мм*,

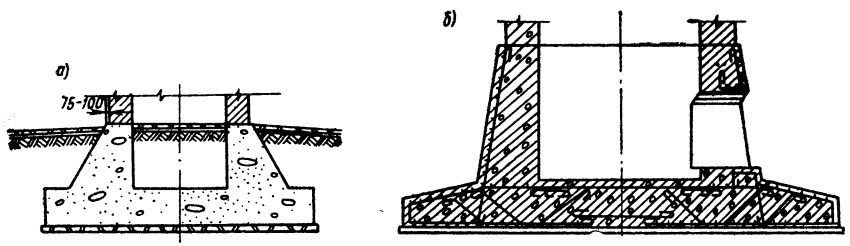


Рис. 113. Фундаменты кирпичных дымовых труб

а — бетонный; *б* — железобетонный

заполняемый теплоизоляционным материалом. Верхний обрез стакана выступает над уровнем планировки не менее чем на 150 *мм*.

Толщину стенок стакана вверху делают на 50—100 *мм* больше толщины стенки ствола трубы, а при опирании на стакан футеровки — на 50—100 *мм* больше суммарной толщины ствола, теплоизоляции и футеровки.

Плиту фундаментов армируют сетками из стержней круглого или периодического профиля, расположенными в верхней и нижней зонах плиты. При температуре выше 300° С стакан фундамента также армируют сеткой, которая располагается у внешней поверхности стакана. При толщине стенки стакана более 1 *м* арматуру устанавливают и по внутренней стороне стенки. Вертикальная арматура стакана заводится в плиту. При наличии условий для образования внутри трубы конденсата внизу трубы предусматривают устройство для его сбора и отвода.

Ствол трубы обычно представляет собой усеченный конус с уклоном наружных граней в пределах 0,02—0,03. Цоколь ствола часто делают цилиндрической формы.

У труб небольшой высоты (до 40—50 *м*) ствол бывает иногда цилиндрической формы. Ствол трубы по высоте разбивается на пояса с толщиной стен, постепенно уменьшающейся кверху. Переход от одного пояса к другому осуществляется за счет внутренних уступов кладки, величина которых для труб нормального кирпича составляет полкирпича. Высоту поясов при-

нимают по расчету в зависимости от собственной массы и внешних нагрузок, обычно 10—15 *м*.

Толщина верхнего пояса ствола при диаметре устья до 3 *м* должна быть не менее 1 кирпича и при диаметре более 3 *м* — не менее 1,5 кирпича, а высота при толщине в 1 кирпич — не более 12 *м*. Трубы высотой 100 *м* имеют толщину стен внизу около 1000 *мм*.

Высоту цоколя выбирают с учетом архитектурных соображений и отметки ввода надземных боровов. В верхней части цоколь заканчивается ступенчатым карнизом с отливом из цементного раствора. При надземных боровах в цоколе оставляют проемы для их ввода, которые перекрывают полуциркульной аркой или железобетонной перемычкой. Между конструкцией подводящего борова и кладкой ствола оставляют зазор 20 *мм*, заполняемый асбестом, смоченным в глиняном растворе.

Для сбора золы в цоколе трубы часто предусматривают бункер. Зола удаляется через затвор, расположенный внизу бункера. При вводе двух или трех боровов, для того чтобы газы, выходящие из одного борова, не перебивали тягу в других, в трубе устраивают разделительную стенку до отметки выше верха проема примерно на половину его высоты. Головку ствола трубы архитектурно украшают, для чего на ней выпускают карниз, горизонтальные пояса с нишами и т. п. Для стока дождевой воды на верхнем обрезе ствола и карниза делают цементный отлив. На трубах диаметром более 2 *м* кладка головки сверху защищается колпаком, состоящим из чугунных сегментов.

При возведении труб в сейсмических районах предусматривается армирование ствола трубы путем закладки в швы кладки вертикальной и горизонтальной арматуры. Стержни вертикальной арматуры изготовляют длиной не более 3 *м* и устанавливают в вертикальные швы кладки равномерно по окружности ствола с шагом не менее чем в 1 кирпич (260 *мм*) и на расстоянии не менее полкирпича (125 *мм*) от наружной поверхности кладки. При арматуре диаметром 10—12 *мм* швы в местах установки арматуры разрешается утолщать до 14 *мм*; при большем диаметре арматуры в местах установки стержней кирпич прикалывают.

Стыкование вертикальной арматуры осуществляют путем нахлестки не менее 30 диаметров стыкуемых стержней. Крюки в арматуре отгибают под прямым углом и при установке обращают к внутренней поверхности ствола. Стыки располагают вразбивку — в одном горизонтальном сечении должно находиться не более 50% общего числа стыков вертикальных стержней. Кольцевая арматура выполняется из составных стержней диаметром 8 *мм*, закладываемых в горизонтальные швы кладки через четыре ряда кладки по высоте ствола трубы.

Футеровку ствола трубы выполняют также отдельными поясами, опирающимися на уступы нижерасположенного пояса

ствола. При температурах до 300° С между футеровкой и кладкой ствола оставляют зазор в 50 *мм*, при температурах выше 300° С и больших толщинах стен ствола между футеровкой и кладкой прокладывается слой изоляции (чаще всего минераловатные маты). Для кладки ствола трубы применяют обыкновенный глиняный кирпич пластичного прессования нормальный или лекальный марки не ниже 100.

Кладку ведут на сложном растворе марки 25—100 (по расчету). Футеровку при температуре до 500° С выполняют из

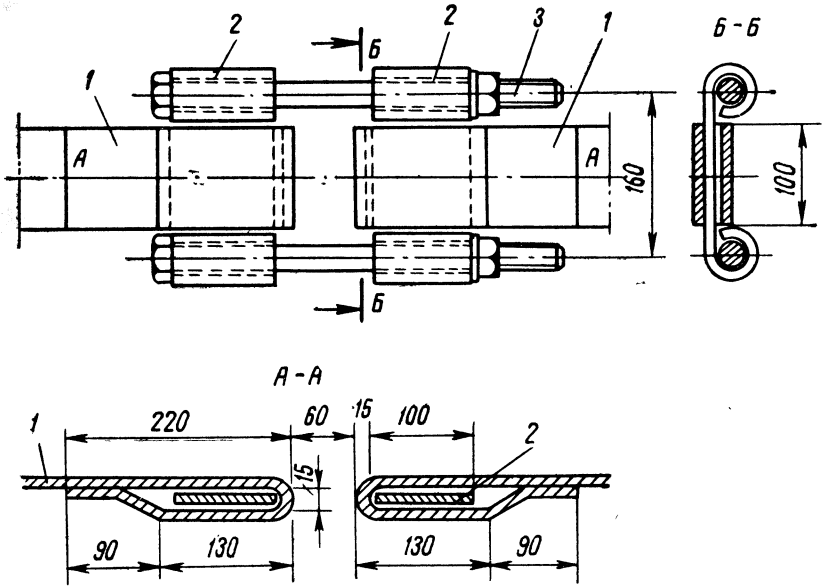


Рис. 114. Замок стяжного кольца

1 — звено кольца; *2* — серьга; *3* — стяжной болт

обыкновенного глиняного кирпича: до 350° С на сложном растворе и выше — на шамотно-цементном, а при температуре выше 500° С — из шамотного кирпича на шамотно-цементном растворе. При наличии агрессивных газов в трубах предусматривают антикоррозионную защиту.

Гарнитура. Для восприятия температурных напряжений, возникающих при нагревании ствола отходящими газами, его снаружи охватывают стяжными кольцами. Кольца выполняют в виде отдельных звеньев из стальной полосы толщиной 6—10 *мм*, соединяемых между собой стяжными замками (рис. 114). Расстояние между кольцами принимается по расчету, однако оно должно находиться в пределах 0,5—1,5 *м*.

В местах примыкания подводящих боровов и монтажных проемов стяжные кольца заменяют тремя—пятью круглыми

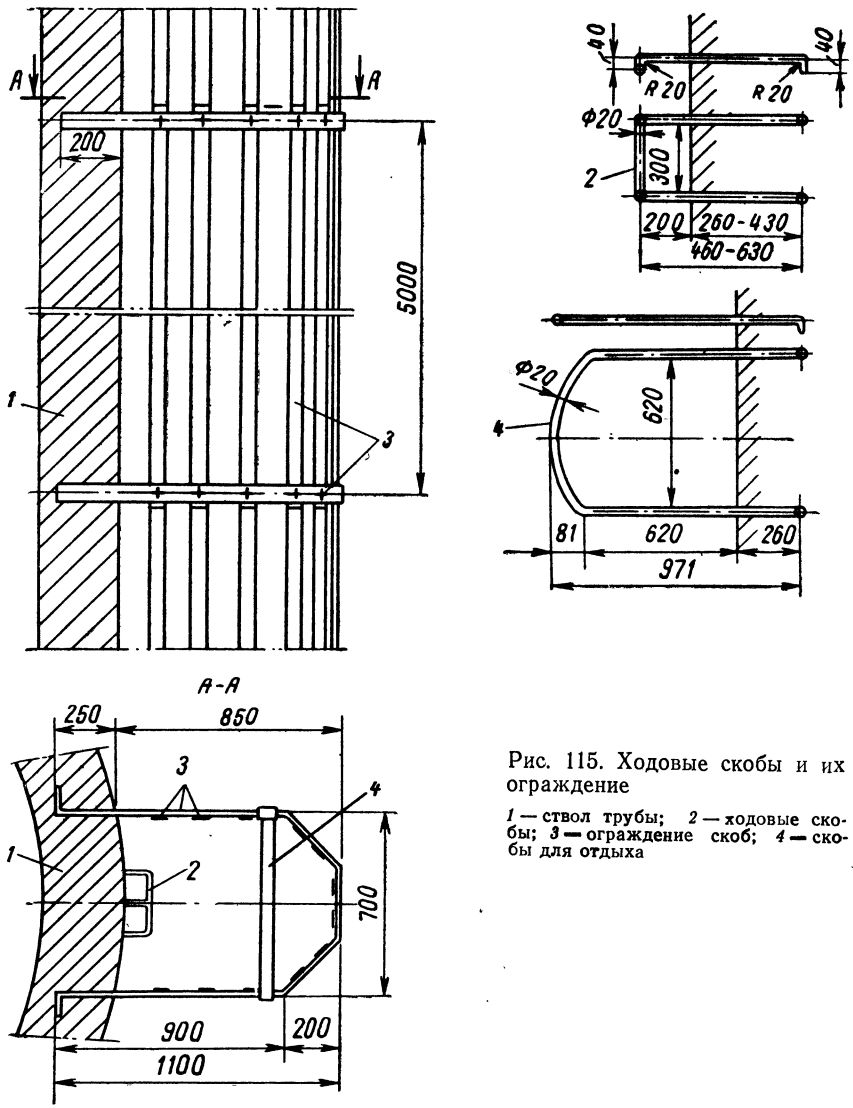


Рис. 115. Ходовые скобы и их ограждение

1 — ствол трубы; *2* — ходовые скобы; *3* — ограждение скоб; *4* — скобы для отдыха

стержнями диаметром 8 *мм* в одном шве, уложенными ближе к внешней поверхности кладки через 2—4 ряда (по расчету). По бокам проема в кладку ствола закладывают вертикальные стержни диаметром 8 *мм* с заделкой концов стержней на глубину не менее 30 диаметров.

Для подъема людей на трубу в кладку ствола по мере его возведения закладывают снаружи ходовые скобы, выполненные из круглой стали диаметром 20—25 *мм* (рис. 115). Через каждые 10 *м* делают скобу большего размера с откидной планкой, которая используется для отдыха при подъеме рабочих на трубу. Иногда скобы устраивают и с внутренней стороны ствола для закрепления в них стойки крана-укосины во время возведения трубы. На трубах высотой более 50 *м* наружные скобы ограждают металлической сеткой.

На всех трубах высотой 50 *м* и более для предупреждения самолетов устраивают светофорные площадки, которые опираются на металлические кронштейны, заделанные в кладку ствола (см. узел *В* на рис. 112). На трубах, являющихся линейным препятствием, светофорные площадки устраивают через 50 *м* по высоте ствола. На трубах, являющихся аэродромным препятствием, светофорные площадки устраивают через 30 *м*. Верхняя светофорная площадка устраивается на 5 *м* ниже верхнего обреза ствола. На каждой светофорной площадке устанавливают 4 светильника с рубиновыми стеклами. Отнесение труб к линейному или аэродромному препятствию уточняется в местном управлении гражданского воздушного флота.

Грозозащита дымовой трубы состоит из молниеприемника — газовых труб, закрепленных на головке трубы и соединенных между собой стальной полосой или тросом, токоотводящего провода из оцинкованного троса или круглой стали и заземления — газовых труб, заглубленных в землю и объединенных полосовой сталью (см. рис. 112).

§ 35. ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ ТРУБЫ

Железобетонные трубы по сравнению с кирпичными имеют ряд преимуществ: у них значительно более тонкие стены ствола, в связи с чем масса его почти вдвое меньше массы ствола кирпичных труб, что в свою очередь позволяет уменьшить размеры фундамента, а следовательно облегчить его; работы по сооружению железобетонного ствола можно почти полностью механизировать, в то время как при возведении кирпичных труб всегда остается трудоемкая кладка из штучного кирпича. Экономически выгодны железобетонные трубы высотой более 60—80 *м*. Более низкие железобетонные трубы стоят дешевле кирпичных только при цилиндрической форме ствола.

Железобетонные трубы бывают монолитные и сборные и состоят из тех же элементов, что и кирпичные (рис. 116). Конст-

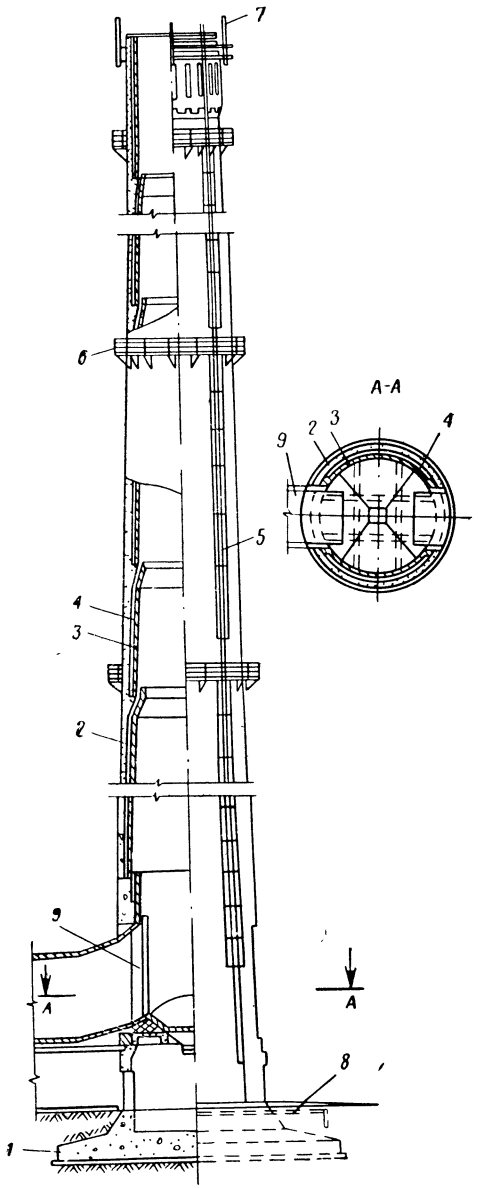


Рис. 116. Железобетонная дымовая труба

1 — фундамент; *2* — ствол; *3* — футеровка; *4* — теплоизоляция; *5* — ходовая лестница; *6* — светофорная площадка; *7* — молниеотвод; *8* — заземление молниеотвода; *9*—ввод борова

рукция фундаментов железобетонных труб аналогична фундаментам кирпичных труб, за исключением того, что в них вводится вертикальная арматура ствола. Стволы конических монолитных железобетонных труб сооружают в переставной или

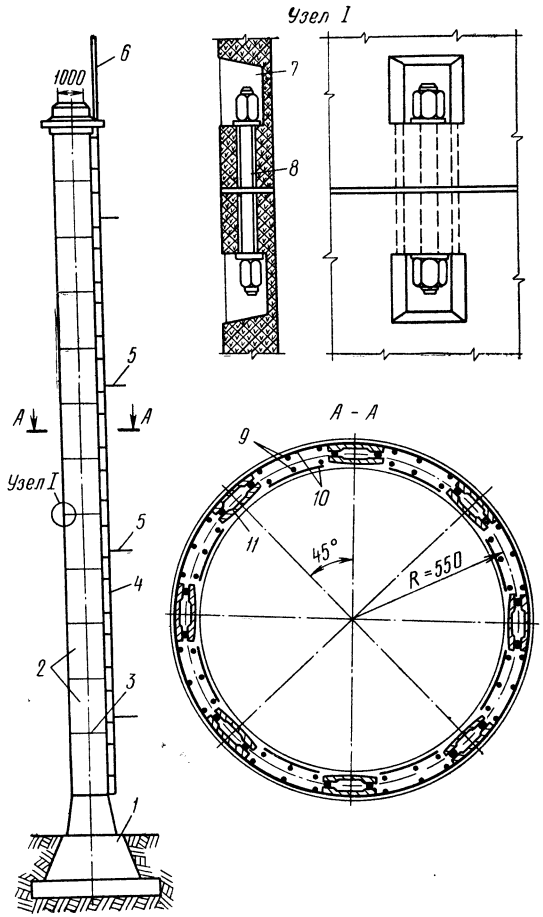


Рис. 117. Сборная железобетонная труба

1 — фундаменты; *2* — царги ствола; *3* — стык царг; *4* — ходовая лестница; *5* — скобы для отдыха; *6* — молниеприемник; *7* — ниша; *8* — стяжной болт; *9* — вертикальная арматура; *10* — горизонтальная арматура; *11* — закладные детали

скользящей опалубке, позволяющей постепенно уменьшать толщину стен без уступов. В связи с этим для опирания футеровки с внутренней стороны ствола делают специальные консоли.

У цилиндрических труб толщина стен уменьшается уступами, как и у кирпичных. Толщина стен ствола внизу у конических

труб высотой 120—150 *м* составляет 40—50 *см*, а в верхней части ствола — 15 *см* (более тонкую стенку было бы трудно бетонировать). Минимальная толщина стен у цилиндрических труб 12 *см*. Наружный уклон конического ствола делают от 0,01 до 0,03. Стволы армируют вертикальной и кольцевой горизонтальной арматурой круглого или периодического профиля. Арматуру располагают у наружной поверхности с защитным слоем 20—40 *мм*.

При температуре отходящих газов выше 100° С трубы футеруют. Футеровку выполняют обычно в $^1/_2$ кирпича с воздушным зазором между бетоном и футеровкой при низких температурах 30—50 *мм* и при высоких — 100—150 *мм* с заполнением зазора изоляционным материалом.

Кладка ствола и футеровки дымовых труб требует большой затраты ручного труда, в связи с этим занимающиеся строительством труб тресты Тепломонтаж и Союзтеплострой и проектирующий трубы институт Теплопроект пошли по пути внедрения сборных железобетонных труб. Пока разработаны проекты и осуществляется строительство сборных железобетонных труб высотой 30—60 *м*. На рис. 117 показана конструкция такой трубы высотой 3 *м* и диаметром в свету 1 *м*. Труба запроектирована из отдельных цилиндрических царг, изготовляемых на заводе из жаростойкого бетона. Царги изготовляются высотой 1800—3000 *мм* с толщиной стенки в нижней части трубы 180 *мм* и в верхней 90 *мм*. Царги армированы кольцевой и вертикальной арматурой. Стыковка царг между собой осуществляется болтами. Для этой цели в царгах предусмотрены ниши, после стыковки заделываемые жаростойким бетоном, и закладные элементы, привариваемые к арматуре. На блоках предусмотрены привариваемые к арматуре дюбели для установки ходовых лестниц и молниеприемников; через каждые 5—6 *м* по высоте устраивают скобы для отдыха. Монтаж труб из сборных царг осуществляется при помощи самоходных кранов или специальными самоподъемными кранами, закрепляемыми за ствол трубы.

Аналогичные цилиндрические трубы можно выполнять из монолитного жаростойкого бетона в скользящей опалубке, поднимаемой специальными домкратами по мере роста трубы.

ГЛАВА XII

ОСНОВЫ РАСЧЕТА И КОНСТРУИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ И ДЫМОВЫХ ТРУБ

§ 36. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПЕЧИ

Получаемое в печи тепло: от сгорания топлива или превращения электрической энергии в тепловую, за счет физического тепла, вносимого подогретым воздухом, идущим для горения

топлива, а также за счет экзотермических реакций, происходящих в печи, — расходуется на нагревание и плавление материалов, эндотермические реакции[1], потери тепла с отходящими из печи газами и в окружающую среду (через кладку, отверстия и т. п.).

Помимо этого, часть теплотворности топлива теряется в связи с неполным химическим сгоранием топлива, а также в связи с механической потерей части топлива (с золой у твердого топлива, утечка газа или мазута через неплотности газомазутопроводов, топки). У плавильных печей тепло расходуется также на нагрев и плавление шлаков.

Расход тепла на нагрев и плавление материалов и шлаков и эндотермические реакции называют полезным расходом тепла. Отношение полезного расхода тепла Q_1 к химическому теплу топлива, выраженное в процентах, называется коэффициентом полезного действия печи (к. п. д.) или коэффициентом полезного топливоиспользования (к. п. т.) $\mu = \frac{Q_1}{BQ^р_н} 100\%$.

К. п. д. печей колеблется от 10 до 80% в зависимости от назначения и конструкции печи, температуры отходящих газов и вида топлива.

Тепловой баланс печи может быть выражен равенством

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \; Вт \; (ккал/ч), \qquad (49)$$

где Q — общий приход тепла;
Q_1 — полезно израсходованное тепло;
Q_2 — потери тепла с отходящими из печи газами;
Q_3 — потери тепла от химической неполноты сгорания;
Q_4 — потери тепла от механической неполноты сгорания;
Q_5 — потери тепла в окружающую среду.

а) **Приход тепла** складывается из тепла, получаемого от сгорания топлива, тепла, вносимого подогретым воздухом и топливом, и тепла экзотермических реакций

$$Q = BQ^р_н + Bc_в t_в L_0 + Bc_т t_т + Q_{экз} \; Вт \; [ккал/ч]*, \qquad (50)$$

где B — часовой расход топлива в *кг/ч* или $м^3/ч$;
$Q^р_н$ — теплота сгорания топлива в *кДж/кг* [*ккал/кг*] или *кДж/м*^{3} [*ккал/м*^{3}];
$c_в$ и $c_т$ — средние теплоемкости воздуха и топлива в интервале температур от 0° С до температуры подогрева $t_в$ и $t_т$ в *кДж/(м*^{3}·*град*) [*ккал/(м*^{3}·*град*)];

[1] Экзотермическими называются химические реакции, происходящие с выделением тепла; эндотермическими — с поглощением тепла.

* Так как количество тепла (теплота сгорания топлива, теплоемкость и т. п.) имеет размерность *кДж/кг*, *кДж/м*^{3}, *кДж/(м*^{3}·*град*), *кДж/(кг·град)* и т. д., то полученные в *кДж/ч* величины для получения часового прихода или расхода тепла в *Вт* следует делить на 3,6 (1 *Вт*=3,6 *кДж/ч*).

$t_в$ и $t_т$ — температура подогрева воздуха и топлива в °С;
$Q_{экз}$ — тепло всех экзотермических реакций;
L_0 — количество воздуха, теоретически необходимого для сжигания единицы топлива в *м³/кг* или *м³/м³*.

Для непрерывно работающих печей тепловой баланс составляется за 1 *ч* работы, для периодически работающих печей — за весь период работы.

б) **Полезный расход тепла**

$$Q_1 = Gc_м t_м + G_{шл} c_{шл} t_{шл} + Q_{т.п} + Q_{энд}\ Вт\ [ккал/ч], \qquad (51)$$

где G и $G_{шл}$ — количество материалов и шлака в *кг/ч*;
$c_м$ и $c_{шл}$ — средние теплоемкости материалов и шлака в *кДж/(кг·град)* [*ккал/(кг·град)*];
$t_м$ и $t_{шл}$ — температуры нагрева материалов и шлака в *град*;
$Q_{т.п}$ — скрытая теплота плавления в *Вт* [*ккал/ч*];
$Q_{э\ нд}$ — тепло эндотермических реакций в *Вт* [*ккал/ч*].

в) **Потери тепла с отходящими газами**

$$Q_2 = BV_{ух} c_{ух} t_{ух}\ Вт\ [ккал/ч], \qquad (52)$$

где $c_{ух}$ — средняя теплоемкость уходящих из печи газов в *кДж/(кг·град)* [*ккал/(кг·град)*];
$t_{ух}$ — температура уходящих газов в °С.

Как видно из уравнения, потеря с отходящими газами тем больше, чем выше их температура и чем больше объем отходящих газов от сгорания 1 *кг* или 1 *м³* топлива (т. е. чем больше коэффициент избытка воздуха). Если в печи имеет место потеря газов через окно, то

$$Q_2 = (BV_п - V_{выб})\, c_{ух} t_{ух}\ Вт\ [ккал/ч], \qquad (53)$$

где $V_{выб}$ — количество газов, выбивающихся через окна, в *м³/ч* (см. ниже расчет Q_5^3).

г) **Потери тепла от химической неполноты сгорания**, если топливо сжигается беспламенным способом, практически отсутствуют. При пламенном сжигании топлива их принимают

$$Q_3 = (0{,}01 - 0{,}03)\, BQ_н^р\ Вт\ [ккал/ч]. \qquad (54)$$

д) **Потери от механической неполноты сгорания** принимаются:

$$Q_4 = KBQ_н^р\ Вт\ [ккал/ч], \qquad (55)$$

где K — для твердого топлива 0,03—0,05;
для жидкого топлива 0,01;
для газообразного топлива 0,02—0,03.

е) **Потери тепла в окружающую среду**

$$Q_5 = Q_5^1 + Q_5^2 + Q_5^3 + Q_5^4\ Вт\ [ккал/ч], \qquad (56)$$

где Q_5^1 — потери тепла через кладку и закрытые заслонки печи;
Q_5^2 — потери тепла лучеиспусканием через открытые окна;
Q_5^3 — потери тепла с выбивающимися через окна газами;
Q_5^4 — потери тепла на охлаждаемые водой поверхности.

1) **Потери тепла через кладку и закрытые заслонки теплопроводностью**

Потери тепла теплопроводностью подсчитываются отдельно для различных участков кладки и заслонок в зависимости от температуры внутренней поверхности их и термического сопротивления кладки по формулам

$$Q^1_{5_{кл}} = \frac{t_{кл} - t_в}{\frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + 0{,}06} F_{кл}\ Вт\ [ккал/ч], \qquad (57)$$

$$Q^1_{5_{засл}} = \frac{t_{кл} - t_в}{\frac{S}{\lambda} + 0{,}06} F(1 - \psi)\ Вт\ [ккал/ч], \qquad (58)$$

где $Q^1_{5_{кл}}$ и $Q^1_{5_{засл}}$ — потери тепла теплопроводностью через кладку и заслонку в *Вт* [*ккал/ч*];
$t_{кл}$ и $t_в$ — температуры нагрева внутренней поверхности кладки и воздуха в °С;
S, S_1, S_2, λ, λ_1, λ_2 — толщина (в *м*) и теплопроводность в *Вт/(м·град)* [в *ккал/(м·ч·град)*] соответствующего участка кладки или заслонки;
0,06 — тепловое сопротивление от стенки к воздуху при коэффициенте теплоотдачи $\alpha = 20$ *Вт/(м²·град)* [17 *ккал/(м²·ч·град)*];
ψ — доля времени в течение часа, когда заслонка открыта.

Потери тепла через закрытые заслонки без охлаждения водой окон методических нагревательных печей приближенно можно принять равными 4650 *Вт/м²* [4000 *ккал/(м²·ч)*]. В этом случае формула (58) принимает вид

$$Q^1_{5_{засл}} = 4650F(1 - \psi)\ Вт\ [4000F(1 - \psi)\ ккал/ч]. \qquad (59)$$

Температуру внутренней поверхности кладки принимают по расчету или приближенно на 80—50° ниже температуры газов в печи. За поверхность кладки принимают для больших печей — наружную, а для малых — среднюю геометрическую:

$$F_{ср} = \sqrt{F_{нар} F_{вн}},$$

где $F_{нар}$ и $F_{вн}$ — площадь наружной и внутренней поверхности кладки в *м²*.

Общая потеря тепла кладкой и заслонками теплопроводностью равна сумме потерь тепла всеми участками кладки и заслонками

$$Q_5^1 = \Sigma Q_{5_{кл}}^1 + \Sigma Q_{5_{засл}}^1 \; Вт \; [ккал/ч]. \qquad (60)$$

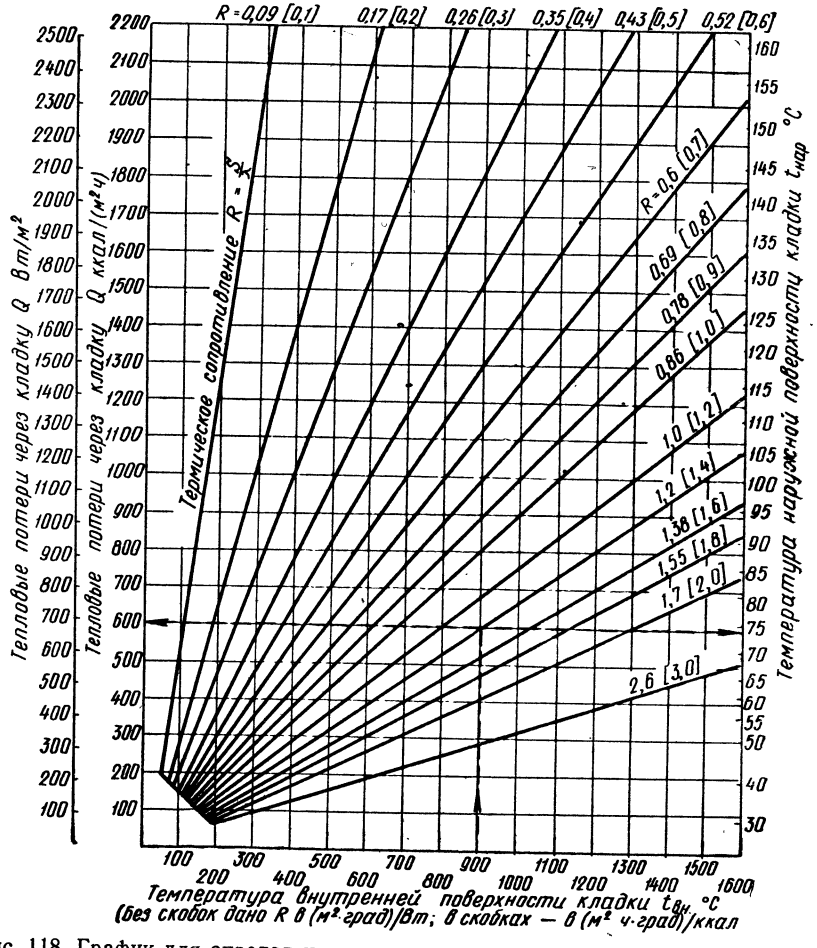


Рис. 118. График для определения потерь тепла через стены и температуры наружной поверхности стен у непрерывно действующих печей

Потерю тепла различными участками кладки, а также температуру наружной поверхности можно определять по графику, приведенному на рис. 118 и построенному на основании формулы (57).

Пример. Определить потерю тепла через 1 $м^2$ стены толщиной: шамот — 345 *мм* и пенодиатомитовый кирпич марки 400—230 *мм* при температуре

нагрева внутренней поверхности $t_{вн}=1050°$ С (температура нагрева металла 1000° С). Задаемся температурой в плоскости соприкосновения шамота с пенодиатомитовым кирпичом $t_2=900°$ С и температурой наружной поверхности стены $t_п=75°$ С. Тогда средняя температура шамотной стены $t_{шам}=\frac{1050+900}{2}=$ $=975°$ С и пенодиатомитовой $t_{пд}=\frac{900+75}{2}=487°$ С.

Теплопроводность кладки с учетом газопроницаемости швов принимают обычно на 15—20% больше теплопроводности материала кладки. В связи с этим для получения теплопроводности кладки приведенные на рис. 1—3 коэффициенты теплопроводности материалов умножаются на 1,15—1,2. Исходя из этого, коэффициенты теплопроводности шамотной и пенодиатомитовой кладок при указанных выше температурах будут равны: $\lambda_{шам}=1{,}34\cdot1{,}2=1{,}605$ *Вт/(м××град)* [1,38 *ккал/(м·ч град)*]; $\lambda_{пд}=0{,}162\cdot1{,}2=0{,}195$ *Вт/(м·град)* [0,168 *ккал/(м·ч·град)*].

Суммарное термическое сопротивление кладки

$$\sum\frac{S}{\lambda}=\frac{0{,}23}{0{,}195}+\frac{0{,}345}{1{,}605}=1{,}18+0{,}215=$$

$$=1{,}395\;(м\cdot град)/Вт\;[1{,}62\;(м\cdot ч\cdot град)/ккал].$$

По кривым рис. 118 температура нагрева наружной поверхности стены $t_{нар}=74°$ С и потеря тепла через кладку $q=698$ *Вт/м²* [600 *ккал/(м²·ч)*]. Температура t_2 в плоскости соприкосновения шамотного и диатомитового слоев определяется исходя из того, что при стационарном потоке количество тепла, проходящего через слой шамотного кирпича, равно количеству тепла, проходящего через слой пенодиатомитового кирпича

$$q=\frac{\lambda_ш}{S_ш}(t_{кл}-t_2)\;\text{и}\;q=\frac{\lambda_{пд}}{S_{пд}}(t_2-t_{нар})\;\text{или}\;t_2=t_{кл}-$$

$$-q\frac{S_ш}{\lambda_ш}=1050-698\cdot0{,}215=900°\text{ С}. \qquad (61)$$

Так как найденные температуры нагрева наружной поверхности стены и в плоскости соприкосновения шамотной и пенодиатомитовой кладок близки к принятой, то расчет правилен. В противном случае следовало бы произвести перерасчет, задавшись другими средними температурами шамота и пенодиатомита. Температуру t_2 можно определять и по графику рис. 118. Для этого необходимо провести линии параллельно оси абсцисс от точки с теплопотерей 698 *Вт/м²* [600 *ккал/(м²·ч)*] до пересечения с кривой $r=\frac{S_{пд}}{\lambda_{пд}}=1{,}18$ [1,02] и от точки пересечения параллельно оси ординат. Получаем $t_2=900°$ С.

2) Потеря тепла излучением через открытые окна

$$Q_5^2=\Sigma qF\theta\psi\;Вт\;[ккал/ч], \qquad (62)$$

где q — излучение через 1 $м^2$ открытого окна при температуре печи в $Вт/м^2$ [$ккал/(м^2 \cdot ч)$];

F — площадь открытого окна в $м^2$;

θ — коэффициент диафрагмирования, определяемый по кривым рис. 119 в зависимости от соотношения ширины и высоты окна и толщины кладки;

ψ — время, в течение которого открыто окно, в $ч$.

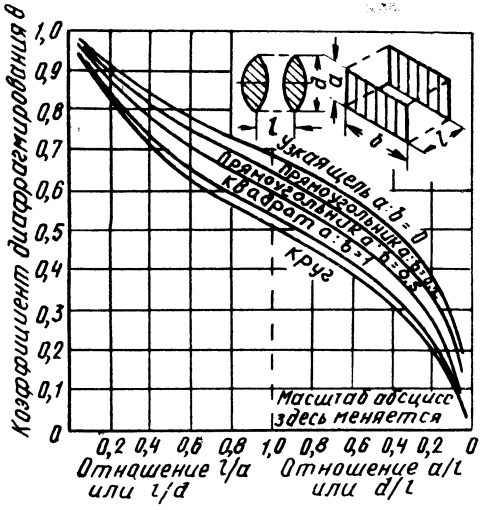


Рис. 119. Коэффициент диафрагмирования θ при излучении через отверстие

Излучение через 1 $м^2$ окна подсчитывается по формуле (45), причем коэффициент излучения принимают равным $C=5{,}7$ $Вт/(м^2 \cdot град)$ [4,9 $ккал/(м^2 \cdot ч \cdot град)$], а температуру окружающей среды — равной 0° С, так как она практически влияния на величину излучения не оказывает

$$q = 5{,}7\left(\frac{T}{100}\right)^4 Вт/м^2 \left[4{,}9\left(\frac{T}{100}\right)^4 ккал/(м^2 \cdot ч)\right],$$

где T — средняя температура в печи в °К.

3) **Потеря тепла с выбивающимися через окна газами**

$$Q_5^3 = \Sigma V_{выб} c_г t_г \; Вт \; [ккал/ч], \qquad (63)$$

где $V_{выб}$ — количество выбивающихся газов при 0° С в $м^3/ч$ (если окно открыто не все время, то величину берут соответственно меньше);

$c_г$ — теплоемкость выбивающихся газов в $Вт/(м^2 \cdot град)$ [$ккал/(м^2 \cdot град)$]*;

$t_г$ — температура выбивающихся газов в °С;

$$V_0 = \frac{V_t + V_t'}{1 + \beta t} 3600 \; м^3/ч,$$

где V_t — количество выбивающихся газов через открытые окна или через вертикальные щели закрытого окна в $м^3/сек$;

V_t' — количество выбивающихся газов через верхнюю горизонтальную щель в $м^3/сек$;

$$V_t \approx \frac{2}{3} \mu H b \sqrt{\frac{2gH(\gamma_в - \gamma_г)}{\gamma_г}} \; м^3/сек;$$

$$V_t' = \mu H b \sqrt{\frac{2gH(\gamma_в - \gamma_г)}{\gamma_г}} \; м^3/сек,$$

где H — высота окна или щели в $м$;

b — ширина окна или щели в $м$;

μ — коэффициент расхода, равный 0,82 для тонких стенок и 0,62 для толстых;

$\gamma_в$ и $\gamma_г$ — плотность воздуха при 0° С и выбивающихся газов при данной температуре в $кг/м^3$.

4) **Потери тепла на охлаждаемые водой поверхности**

Потери тепла на охлаждение Q_5^4 $Вт$ [$ккал/ч$] обычно берутся по практическим данным. Для методических нагревательных печей с глиссажными охлаждаемыми водой трубами потери тепла на охлаждаемые водой поверхности составляют от 125 600 до 210 000 $кДж$ [от 30 000 до 50 000 $ккал$] на 1 $т$ нагреваемого металла

$$Q_5^4 = \left(\frac{12\,560 \div 21\,000}{3{,}6}\right) G \; Вт \; [(30\,000 \div 50\,000) \cdot 9 \; ккал/ч]. \qquad (64)$$

Определение часового расхода топлива

Если в уравнение теплового баланса

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$$

подставить вместо условных обозначений соответствующие величины из формул (51)—(64), то оно примет вид уравнения с одним неизвестным B, равным часовому расходу топлива в $кг$ или $м^3$.

$$BQ_н^р + B c_в t_в n L_0^в + B c_т t_т + Q_{экз} = J c_м t_м + J_{шл} c_{шл} t_{шл} + Q_{т.п} + Q_{энд} + (BV_{ух} - V_{выб}) c_{ух} t_{ух} + (0{,}01 \div 0{,}03) Q_н^р B + (0{,}01 \div 0{,}05) Q_н^р B + \Sigma Q_5. \qquad (65)$$

Решая это уравнение относительно B, получают часовой расход топлива в $кг$ или $м^3$. Полученную величину расхода топлива увеличивают на 10—20% для покрытия неучтенных в расчете потерь.

* Теплоемкости воздуха и дымовых газов могут быть взяты из приложения 4.

Расчет и конструирование печей производят в соответствии с заданием, в котором указываются: производительность печи; температура нагрева (и режим нагрева, если печь периодическая или термическая); габариты изделий и свойства нагреваемого материала; вид топлива; режим работы печи — непрерывная или периодическая работа; особые пожелания (метод выгрузки и погрузки, желательное расположение окон и т. д.).

Выбор типа печи. Тип печи выбирают в зависимости от требований, предъявляемых к ней, вида технологического процесса, производительности, топлива, режима работы и т. п. В тех случаях когда могут быть применены печи различных типов, производят технико-экономический расчет и выбирают наиболее экономичную для данного случая печь.

Определение размеров рабочего пространства печи. Площадь пода печи (или площадь поперечного сечения шахтной печи) определяют исходя из удельного съема продукции с 1 $м^2$ рабочей площади пода (или поперечного сечения рабочего пространства шахтной печи), называемого также напряжением площади пода (или напряжением поперечного сечения) печи

$$F = \frac{J}{g_f}\ м^2, \tag{66}$$

где G — часовая производительность печи в $кг/ч$;

g_f — удельный съем продукции с единицы площади пода (или поперечного сечения рабочего пространства) печи в $кг/(м^2 \cdot ч)$.

У печей для нагрева металла различают напряженность полезной площади пода $g_{f\text{пол}}$, где F — вся площадь пода от загрузочного конца печи до оси окна выдачи, и активной площади пода $g_{f\text{ акт}}$, где F — площадь пода, занятого металлом.

Ширину пода определяют по конструктивным соображениям, исходя из габаритов и метода укладки нагреваемого материала. Длина печи получается как частное от деления площади пода на ширину $l = \frac{F}{b}$ $м$. Высота свода над подом принимается из конструктивных соображений.

М. А. Глинков рекомендует определять высоту свода над нагреваемой поверхностью по формуле

$$H = (A + 0{,}05B)\, t_г \cdot 10^{-3}\ м, \tag{67}$$

где A — коэффициент, равный 0,5—0,55 для частей печи с температурой газов меньше 900° С и 0,65 — при температуре больше 1500° С (промежуточные значения определяют интерполяцией);

B — ширина печи в $м$;

$t_г$ — температура той части печи, для которой определяют высоту, в °С.

Для некоторых печей характерным является удельный съем продукции с 1 $м^3$ объема рабочего пространства печи (туннельные печи, барабанные сушила, вращающиеся печи для обжига цементного клинкера, доменные печи и ряд других). В этом случае объем рабочего пространства печи определяют по формуле

$$V = \frac{J}{g_v}\ м^3, \tag{68}$$

где g_v — удельный съем продукции с 1 $м^3$ объема рабочего пространства печи в $кг/(м^3 \cdot ч)$.

Задаваясь по конструктивным соображениям шириной пода и высотой рабочего сечения печи h (или размерами горизонтального сечения рабочего пространства), длину пода (высоту печи) получают как частное от деления объема рабочего пространства на площадь поперечного сечения его

$$l = \frac{V}{bh}\ м \text{ или } h = \frac{V}{bl}\ м.$$

Величины удельного съема продукции ряда печей приведены в табл. 19.

Определение метода передвижения материала по печи. Метод передвижения материала по печи (печь камерная, методическая, конвейерная и т. п.) выбирается из условий производительности печи, габаритов и конфигурации нагреваемых изделий, метода работы в цехе и прочих условий. Во всех случаях следует предпочитать механизированное продвижение материалов по печи.

Выбор системы сжигания топлива и расчет горения его. Система сжигания топлива выбирается в соответствии с видом топлива, необходимой температурой и атмосферой в печи. Определение потребного для горения количества воздуха $L_п$, количества продуктов горения $V_п$ и температуры горения топлива производят по формулам, приведенным в § 6.

Определение предварительного расхода топлива и размеров топки. Предварительный расход топлива получают, задаваясь расходом тепла на нагрев 1 $кг$ материала:

$$B = \frac{Gq}{Q_н^р}\ кг/ч, \tag{69}$$

где q — расход тепла на нагрев (или плавление) материала в $кДж/кг$ [$ккал/кг$], принимаемый по практическим данным (табл. 19).

Получив примерный расход топлива в час, определяют приближенные размеры топки, горелок или форсунок. Площадь колосниковой решетки для твердого топлива R в $м^2$ определяется по количеству топлива, которое может быть сожжено за 1 $ч$ на

Таблица 19

Примерный расход тепла на нагрев (или плавление) 1 *кг* материала

Тип печи	Процесс	Расход тепла на 1 *кг* материала в		Удельный съем продукции (напряженность полезной площади пода) в *кг/(м²·ч)*
		Дж/кг	*ккал/кг*	
Нагревательные печи				
Малые камерные	Нагрев стальных заготовок	4185—6700	1000—1600	300—600
Большие камерные и полуметодические	То же	2100—2930	500—700	300—600
Методические с утилизацией тепла отходящих газов	»	1465—2100	350—500	300—650
То же, без утилизации тепла отходящих газов	»	1885—2510	450—600	350—700
Нагревательные колодцы (горячая садка)	То же, слитков	1260—1380[1]	300—330	500—750
Нагревательные колодцы (холодная садка)	Нагрев стальных слитков	2095—3350	500—800	250—500
Печи с выдвижным подом	То же	2930—5025	700—1200	200—300
Термические печи				
Малые камерные	Отпуск	1675—2510	400—600	80—120
То же	Закалка или нормализация	2095—3350	500—800	150—200
Ямные, с выдвижным подом или вертикальные	Отжиг, нормализация	2510—4605	600—1100	45—120
Проходные	Отжиг, нормализация или закалка	1885—3560	450—850	120—300
Обжиговые печи				
Кольцевая	Обжиг обыкновенного глиняного кирпича	1090—1170	260—280	2000—2500[8]

Продолжение табл. 19

Тип печи	Процесс	Расход тепла на 1 *кг* материала в		Удельный съем продукции (напряженность полезной площади пода) в *кг/(м²·ч)*
		Дж/кг	*ккал/кг*	
Туннельная	Обжиг шамотных изделий	4185—4605	1000—1100	—
»	Обжиг обыкновенного глиняного кирпича	1255—1465	300—350	3300—4000[7]
Шахтная	Обжиг портландцементного клинкера	4186—5860	1000—1400	700—1000[5]
Вращающаяся барабанная	То же	6280—7535	1500—1800	—
Плавильные печи				
Мартеновские	Плавка стали	5025—8375	1200—2000	8000—12000[4]
Вагранки	Плавка чугуна	2930—5860	700—1400	7000—9000[5]
Ванная стекловаренная	Варка натриево-кальциевого стекла	1885[2]	450[2]	—
Ванная стекловаренная	Плавка сульфатного стекла	2720[2]	650[2]	—
Сушила				
Камерные	Сушка форм	15490—18840[3]	3700—4500[3]	—
Вертикальные и горизонтальные конвейерные	Сушка стержней	835—1255	200—300	—
Туннельные	Сушка керамических материалов	4185—5025[3]	1000—1200[3]	—
Барабанные	Сушка глины	3770—4185	400—1000[3]	50—100[6]

[1] При 80% горячего посада слитков с температурой 600—800° С.
[2] На 1 *кг* стекломассы.
[3] На 1 *кг* удаляемой влаги.
[4] Съем стали с 1 *м²* пода.
[5] Съем материала с 1 *м²* поперечного сечения рабочего пространства.
[6] Напряжение объема по испарению влаги в *кг/(м³·ч)*.
[7] Съем продукции с 1 *м³* рабочего пространства печи в сутки.
[8] Съем годной продукции с 1 *м³* печи в месяц в *шт/м³*.

1 $м^2$ решетки, называемому напряжением колосниковой решетки $P_р$, и часовому расходу топлива B ($кг/ч$)

$$R = \frac{B}{P_р}, \qquad (70)$$

где $P_р$ — допускаемое напряжение колосниковой решетки в $кг/(м^2 \cdot ч)$; для каменных углей оно лежит в пределах 100—300 $кг/(м^2 \cdot ч)$ (чем больше летучих веществ содержит топливо, тем большее значение $P_р$ можно принимать).

Разработка эскиза печи. По полученным размерам рабочего пространства и топки, выбранному методу передвижения материала по печи, способу сжигания топлива и выбранному типу рекуператора или регенератора составляют эскиз печи.

Составление теплового баланса и определение расхода топлива. Приход и расход тепла, а также часовой расход топлива определяют согласно приведенным в этом параграфе формулам. Подставляя в формулы (50)—(55) полученную величину часового расхода топлива, получают численные значения Q_2, Q_3 и Q_4. Для наглядности тепловой баланс представляют в виде табл. 20. Для периодически работающих печей тепловой баланс составляют на весь период работы, при этом подсчитывают также затраты тепла на аккумуляцию тепла кладкой. Этот расчет связан с нестационарным потоком тепла и в данном курсе не рассматривается [1].

Расчет рекуператоров и регенераторов. Выбирают тип рекуператоров или регенераторов и определяют поверхность нагрева

Таблица 20

Форма теплового баланса печи

Статьи прихода	в $Вт$	в %	Статьи расхода	в $Вт$	в %
Тепло сгорания топлива			Полезный расход тепла		
Физическое тепло воздуха			Потери тепла с отходящими газами		
Физическое тепло топлива			Потеря тепла от химической неполноты горения		
Тепло экзотермических реакций			Потеря тепла в окружающую среду		
			Неучтенные потери		
Итого			Итого		

[1] Методика расчета аккумуляции тепла кладкой при нестационарном тепловом режиме изложена в ряде специальных руководств, в том числе в книге Кривандина В. А., Молчанова Н. Г. и Соломенцева С. А. [10].

воздушного и газового рекуператоров или регенераторов, необходимую для нагрева $L_п B$ $м^3/ч$ воздуха до температуры $t_в$ и B $м^3/ч$ газа до температуры $t_г$. В соответствии с полученной поверхностью нагрева определяют габариты и конфигурацию рекуперативных или регенеративных камер.

Поверхность нагрева рекуператора F определяется из уравнения

$$F = \frac{q_в}{K\tau_{ср}} м^2, \qquad (71)$$

где $q_в$ — количество тепла, переданного в рекуператоре от дымовых газов нагреваемому воздуху (или газу), в $Вт$ [$ккал/ч$];

K — коэффициент теплопередачи рекуператора в $Вт/(м^2 \times \times град)$ [$ккал/м^2 \cdot ч \cdot град$)];

$\tau_{ср}$ — средняя логарифмическая разность температур дымовых газов и воздуха;

$$q_в = Bc_в t_в L_п \ Вт \ [ккал/ч]$$

или в случае подогрева газа

$$q_в = Bc_г t_г \ Вт \ [ккал/ч],$$

где B — часовой расход топлива в $кг/ч$ или $м^3/ч$;

$t_в$ и $t_г$ — температура нагрева воздуха или газа в °С;

$c_в$ и $c_г$ — теплоемкости воздуха и газа при температурах $t_в$ и $t_г$ в $кДж/(м^3 \cdot град)$ [$ккал/(м^3 \cdot град)$];

$L_п$ — действительное количество воздуха, потребное для горения 1 $кг$ или 1 $м^3$ топлива, в $м^3/кг$ или $м^3/м^3$.

Для приближенного определения поверхности нагрева рекуператора можно пользоваться нижеприведенными величинами коэффициентов теплопередачи K:

рекуператор из гладких труб 18—23 $Вт/(м^2 \cdot град)$ [15—20 $ккал/(м^2 \cdot ч \cdot град)$];

рекуператор игольчатый без наружных игл 23—46* $Вт/(м^2 \times \times град)$ [20—40* $ккал/(м^2 \cdot ч \cdot град)$];

рекуператор с наружными иглами 58—93* $Вт/(м^2 \cdot град)$ [50—80* $ккал/(м^2 \cdot ч \cdot град)$];

рекуператор термоблок 18—46 $Вт/(м^2 \cdot град)$ [15—20 $ккал/(м^2 \cdot ч \cdot град)$];

рекуператор радиационный 35—58 $Вт/(м^2 \cdot град)$ [30—50 $ккал/(м^2 \cdot ч \cdot град)$];

рекуператор керамический 2,5—7 $Вт/(м^2 \cdot град)$ [2—6 $ккал/(м^2 \cdot ч \cdot град)$].

Величина коэффициента теплопередачи зависит главным образом от разности температур отходящих газов и нагревае-

* На условную гладкую (расчетную) поверхность нагрева (см. приложение 3).

мого воздуха или газа и их скорости — чем больше разность температур и скорость, тем больше коэффициент теплопередачи.

Величину $\tau_{ср}$ можно определить по диаграмме приложения 2, на которой при параллельном токе

$$\tau_н = t'_д - t'_в; \quad \tau_к = t''_д - t''_в;$$

при противотоке

$$\tau_н = t'_д - t''_в; \quad \tau_к = t''_д - t'_в,$$

где $t'_д$ и $t''_д$ — температура дымовых газов при входе в рекуператор и выходе из него в °С;

$t'_в$ и $t''_в$ — температура воздуха в °С при входе в рекуператор и выходе из него.

Расчет регенератора связан с нестационарным потоком тепла, теоретически очень сложен и поэтому в данном учебном пособии не рассматривается.

Пример расчета двухзонной методической печи.

Исходные данные:

1. Производительность печи $G = 10\,000$ *кг/ч*.
2. Нагреваемый металл — заготовки квадратного сечения 150×150 *мм*, длиной $l = 2$ *м*, материал заготовок — сталь марки Ст3.
3. Конечная температура нагрева металла $t_{м.к} = 1150°$ С.
4. Топливо — природный газ $Q^р_н = 36\,065$ *кДж/м³* [8600 *ккал/м³*].
5. Температура подогрева воздуха 250° С.
6. Температура отходящих из печи газов 1050° С.
7. Печь работает непрерывно.
8. Выдача нагретых заготовок боковая.

а) Выбор типа печи

Так как заготовки имеют правильную форму, удобную для проталкивания их по поду печи толкателем, и производительность печи сравнительно небольшая, то выбираем полуметодическую печь с толкателем и боковой выдачей заготовок. В связи с небольшим сечением заготовок, позволяющим достаточно быстро греть их при одностороннем нагреве, принимаем сплошной под с заделанными в методической зоне стелюгами.

б) Определение размеров пода

Принимаем напряженность полезной площади пода $P = G/F = 350$ *кг/(м²·ч)* (см. табл. 19). Более низкое значение P принимается с учетом того, что нагрев заготовки односторонний, т. е. более медленный по сравнению с двусторонним.

Тогда площадь пода [см. формулу (66)]

$$F = \frac{G}{P} = \frac{10\,000}{350} = 28{,}6 \text{ м}^2.$$

Ширину пода принимаем равной $b = l + 2\delta$,

где l — длина заготовки в *м*;

δ — зазор между заготовкой и стенами печи в *м*, лежащий обычно в пределах 250—300 *мм*;

$$b = 2 + 2 \cdot 0{,}25 = 2{,}5 \text{ м}.$$

Длина пода (полезная) до оси окна выдачи

$$L = \frac{F}{b} = \frac{28{,}6}{2{,}5} = 11{,}5 \text{ м}.$$

в) Выбор системы сжигания топлива и расчет его горения. Принимаем средний расход тепла 2300 *кДж/кг* [550 *ккал/кг*]. Расход топлива при этом будет

$$B = \frac{2300 \cdot 10\,000}{36\,065} = 635 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Выбираем горелки низкого давления типа, показанного на рис. 10, с принудительной подачей воздуха и газа. Устанавливаем пять горелок производительностью по 125 *м³/ч* — три в торцовой стене и две на границе сварочной и методической зон. Избыток воздуха принимаем $n = 1{,}1$. По формулам

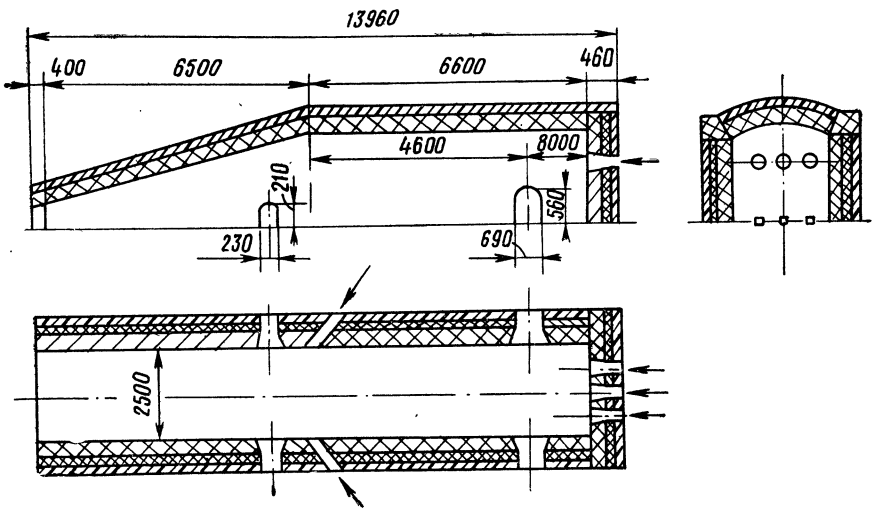


Рис. 120. Эскиз печи для расчета

табл. 17 определяем теоретическое количество воздуха, потребного для горения 1 *м³* топлива, и количество получающихся продуктов горения от 1 *м³* топлива

$$L_0 = \frac{1{,}09}{4187} Q^р_н - 0{,}25 = \frac{1{,}09}{4187} 36\,065 - 0{,}25 = 9{,}15 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_0 = \frac{1{,}14}{4187} Q^р_н + 0{,}25 = \frac{1{,}14}{4187} 36\,065 + 0{,}25 = 10{,}05 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Практическое количество воздуха и продуктов горения при избытке воздуха, равном 1,1, будет:

$$L_п = L_0 n = 9{,}15 \cdot 1{,}1 = 10{,}05 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_п = V_0 + L_0 (n - 1) = 10{,}05 + 9{,}15 \cdot 0{,}1 = 10{,}97 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

г) Составление эскиза печи (рис. 120).

Принимаем длину сварочной части по практическим данным 40% полезной длины пода $L_{св} = 11{,}5 \cdot 0{,}4 = 4{,}6$ *м* и длину от оси окна выдачи до торцовой стены 2 *м*. Длина методической части $L_{мет} = L - L_{св} = 11{,}5 - 4{,}6 = 6{,}9$ *м*. Размеры загрузочного окна принимаем 2385×560 *мм*, окна выдачи 690×560 *мм* и смотровых окон 230×210 *мм*. Принимаем толщину стен 460 *мм* (230 *мм* шамотная кладка, 115 *мм* из легковесного шамота БЛ-1,0 и 115 *мм*

пенодиатомитовая из кирпича марки 350; толщину свода 345 *мм* (230 *мм* шамот и 115 *мм* диатомит марки 600).

д) Составление теплового баланса и определение расхода топлива

1. Приход тепла [формула (50)]

$$Q = BQ_{\text{н}}^{\text{р}} + Bc_{\text{в}}\, t_{\text{в}}\, L_{\text{п}} + Q_{\text{экз}} \quad Вт \ [ккал/ч];$$

$$Q = \text{В}\cdot 36\,065 + B\cdot 1{,}315\cdot 250\cdot 10{,}05 + 5650\cdot 10\,000\cdot 0{,}01 = \frac{B\cdot 39\,415 + 565\,000}{3{,}6} =$$

$$= B\cdot 10\,940 + 157\,000 \ Вт \ [B\cdot 9400 + 135\,000 \ ккал/ч],$$

где 250 — температура подогрева воздуха в °С (см. ниже расчет рекуператора);

1,315 — теплоемкость воздуха при 250° С в *кДж/м*³ по приложению 4;

5650 — тепло от окисления железа в *кДж/кг*;

0,01 — принятый угар металла (1%).

2. Полезный расход тепла [формула (51)]

$$Q_1 = Gc_{\text{м}}\, t_{\text{м}} = 10\,000\cdot 841 = \frac{8\,410\,000}{3{,}6} = 2\,340\,000 \ Вт \ [2\,010\,000 \ ккал/ч],$$

где $841 = c_{\text{м}} t_{\text{м}}$ — теплосодержание стали при температуре 1150° С *кДж/кг* (см. приложение 1).

3. Потеря тепла с отходящими газами [формула (53)]

$$Q_2 = (BV_{\text{п}} - V_{\text{выб}})\, c_{\text{ух}}\, t_{\text{ух}} = (B\cdot 10{,}97 - 620)\, 1{,}55\cdot 1050 =$$

$$= \frac{B\cdot 17\,700 - 1\,005\,000}{3{,}6} = B\cdot 4910 - 280\,000 \ Вт \ [B\cdot 4250 - 242\,000 \ ккал/ч],$$

где $V_{\text{выб}} = 620$ — количество выбивающихся из печи газов в *м*³/*ч* (см. ниже);

1,55 — теплоемкость продуктов горения при 1050° С в *кДж/(м*³ × *град)*.

4. Потеря тепла от химической неполноты горения [формула (54)].

$$Q_3 = B\cdot 0{,}02\, Q_{\text{н}}^{\text{р}} = \text{В}\cdot 0{,}02\cdot 36\,065 = B\frac{720}{3.6} = B\cdot 200 \ Вт \ [172 \ ккал/ч].$$

5. Потеря тепла от механической неполноты горения [формула (55)] (принимаем $K = 0{,}02$)

$$Q_4 = B\cdot 0{,}02 Q_{\text{н}}^{\text{р}} = B\cdot 0{,}02\cdot 36\,065 = \frac{720}{3{,}6} = 200 \ Вт \ [172 \ ккал/ч].$$

6. Потери тепла в окружающую среду

1) *Потеря тепла через кладку*

Принимаем температуру внутренней поверхности стен и свода сварочной зоны на 50° выше температуры нагрева металла $t_{\text{св}} = 1150 + 50 = 1200°$ С, а в конце печи на 100° ниже температуры отходящих газов 1050—100 = 950° С; тогда средняя температура внутренней поверхности стен и свода в методической зоне будет $t_{\text{мет}} = \frac{1200+950}{2} = 1075°$ С. Принимаем в стенах сварочной зоны температуру в плоскости соприкосновения шамотной кладки с легковесным шамотом 1050° С, легковесного шамота с пенодиатомитовой кладкой 900° С и наружной поверхности 90° С; в стенах методической зоны соответственно: 925° С, 775° С и 85° С; температуру в плоскости соприкосновения шамотной кладки с диатомитовой в своде сварочной зоны 900° С и методической зоны 815° С, температуру наружной поверхности свода соответственно 150 и 125° С. Исходя из этих предпосылок, средняя температура шамотной кладки стен в сварочной зоне $t_{\text{ср.ш}} = \frac{1200+1050}{2} = 1125°$ С, кладки из легковесного шамота $t_{\text{ср.л.ш}} = \frac{1050+900}{2} = 975°$ С и пенодиатомитовой кладки $t_{\text{ср.пд}} = \frac{900+90}{2} = 495°$ С. Средние коэффициенты теплопроводности по рис. 1—3 соответственно равны: $\lambda = 1{,}42\cdot 1{,}15 = 1{,}63$ *Вт/(м·град)* [1,40 *ккал/(м·ч·град)*], $\lambda_{\text{л:ш}} = 0{,}65\cdot 1{,}15 = 0{,}75$ *Вт/(м·град)* [0,64 *ккал/(м·ч·град)*]; $\lambda_{\text{пд}} = 0{,}143\cdot 1{,}15 = 0{,}163$ *Вт/(м·град)* [0,14 *ккал/(м·ч·град)*] (1,15 — коэффициент, учитывающий неплотность кладки). Суммарное термическое сопротивление стены $\sum \frac{S}{\lambda} = \frac{0{,}230}{1{,}63} + \frac{0{,}115}{0{,}75} + \frac{0{,}115}{0{,}163} = 0{,}14 + 0{,}15 + 0{,}71 = 1$ *(м²·град)/Вт* [1,163 *(м²·ч·град)/ккал*]. По кривым рис. 118 теплопотеря $q = 1128$ *Вт/м²* [970 *ккал/(м²·ч)*] и температура наружной поверхности $t_{\text{нар}} = 96°$ С. Проверяем по формуле (61) температуры в плоскостях соприкосновения шамотной кладки с легковесным шамотным и легковесного шамота с пенодиатомитовой кладкой: $t_2 = 1200 - 1128\cdot 0{,}14 = 1040°$ С; $t_3 = 1200 - 1128\ (0{,}14 + 0{,}15) = 874°$ С. Температуры близко подходят к принятым, поэтому перерасчет производить не требуется. Площадь стен сварочной части за вычетом площади окон (по наружному габариту) $7{,}06\cdot 2{,}12\cdot 2 - 0{,}69\cdot 0{,}56\cdot 2 = 29{,}3$ *м²*. Потеря тепла стенами сварочной зоны составит $1128\cdot 29{,}3 = 33\,600$ *Вт* [28 900 *ккал/ч*]. Средняя температура кладок стен в методической зоне $t_{\text{ср.ш}} = \frac{1075+925}{2} = 1000°$ С; $t_{\text{ср.л.ш}} = \frac{925+775}{2} = 850°$ С; $t_{\text{ср.пд}} = \frac{775+85}{2} = 430°$ С. Отсюда $\lambda_{\text{ш}} = 1{,}3\cdot 1{,}15 = 1{,}49$ *Вт/(м·град)* [1,27 *ккал/(м·ч·град)*]; $\lambda_{\text{л.ш}} = 0{,}605\cdot 1{,}15 = 0{,}7$ *Вт/(м·град)* [0,6 *ккал/(м·ч·град)*]; $\lambda_{\text{пд}} = 0{,}131\cdot 1{,}15 = 0{,}15$ *Вт/(м·град)* [0,129 *ккал/(м·ч·град)*]. Суммарное термическое сопротивление стены $\sum \frac{S}{\lambda} = \frac{0{,}23}{1{,}49} + \frac{0{,}115}{0{,}7} + \frac{0{,}115}{0{,}15} = 0{,}155 + 0{,}164 + 0{,}77 = 1{,}09$ *(м·град)/Вт* [1,27 *(м·ч·град)/ккал*]. По кривым рис. 118 теплопотери $q = 872$ *Вт/м²* [750 *ккал/(м²·ч)*] и $t_{\text{нар}} = 88°$ С. Проверяем по формуле (61) температуры в плоскостях соприкосновения кладок: $t_2 = 1075 - 872\cdot 0{,}155 = 935°$ С; $t_3 = 1075 - 872\ (0{,}155 + 0{,}164) = 785°$ С. Площадь стен методической зоны $6{,}5\cdot 1{,}5 \times 2 - 2\cdot 0{,}23\cdot 0{,}21 = 19{,}5$ *м²*. Потеря тепла стенами методической зоны составит $872\cdot 19{,}5 = 17\,000$ *Вт* [14 600 *ккал/ч*]. Средняя температура кладок свода сварочной зоны $t_{\text{ср.ш}} = \frac{1200+900}{2} = 1050°$ С; $t_{\text{ср.д}} = \frac{900+150}{2} = 525°$ С; $\lambda_{\text{ш}} = 1{,}37 \times 1{,}15 = 1{,}58$ *Вт/(м·град)* [1,36 *ккал/(м·ч·град)*]; $\lambda_{\text{д}} = 0{,}25\cdot 1{,}15 = 0{,}288$ *Вт/(м × × град)* [0,25 *ккал/(м·ч·град)*]. Суммарное термическое сопротивление $\sum \frac{S}{\lambda} = \frac{0{,}230}{1{,}58} + \frac{0{,}115}{0{,}288} = 0{,}146 + 0{,}404 = 0{,}55$ *(м·град)/Вт* [0,64 *(м·ч·град)/ккал*]. По кривым рис. 118 теплопотери $q = 1980$ *Вт/м²* [1700 *ккал/м²·ч*)]; $t_{\text{нар}} = 138°$ С. Проверяем температуру в плоскости соприкосновения шамотной и диатомитовой кладок $t_2 = 1200 - 1980\cdot 0{,}146 = 910°$ С. Площадь свода сварочной зоны $7{,}06\cdot 3{,}42 = 24{,}2$ *м²*. Потеря тепла сводом сварочной зоны $1980\cdot 24{,}2 = 48\,000$ *Вт* [41 300 *ккал/ч*]. Средняя температура кладки свода методической зоны $t_{\text{ср.ш}} = \frac{1075+835}{2} = 950°$ С; $t_{\text{ср.д}} = \frac{835+125}{2} = 475°$ С; $\lambda_{\text{ш}} = 1{,}3\cdot 1{,}15 = 1{,}5$ *Вт/(м·град)* [1,28 *ккал/(м·ч·град)*]; $\lambda_{\text{д}} = 0{,}226\cdot 1{,}15 = 0{,}26$ *Вт/(м·град)* · [0,233 *ккал/(м·ч·град)*]. Термическое сопротивление $\sum \frac{S}{\lambda} = \frac{0{,}230}{1{,}5} + \frac{0{,}115}{0{,}26} = 0{,}154 + 0{,}44 = 0{,}594$ *(м·град)/Вт* [0,690 *(м·ч·град)/ккал*]. По кривым рис. 118 теплопотери $q = 1570$ *Вт/м²* [1350 *ккал/(м²·ч)*]; $t_{\text{нар}} = 130°$ С. Прове-

ряем температуру в плоскости соприкосновения шамотной и диатомитовой кладок $t_2 = 1075 - 1570 \cdot 0{,}154 = 833°$ С. Площадь свода методической зоны $6{,}5 \cdot 3{,}42 = 22{,}2$ $м^2$. Потеря тепла сводом методической зоны $1570 \cdot 22{,}2 = 34\,800$ $Вт$ [29 800 $ккал/ч$]. Как видно из расчета, температура наружной поверхности кладки стен печи достигает в сварочной зоне 96° С и в методической 88° С, против допустимой по санитарным нормам температуры 60° С. Уменьшение температуры наружной поверхности кладки за счет увеличения теплосопротивления кладки потребовало бы значительного увеличения толщины стен, что не всегда целесообразно. В связи с этим обычно предусматривают устройство защитных экранов (панелей) из листовой стали с изоляцией из асбестового картона, размещаемых на расстоянии 100 $мм$ от наружной поверхности кожуха печи (см. рис. 42). Экраны уменьшают теплоотдачу излучением почти вдвое и температура на поверхности щита меньше температуры поверхности кожуха примерно на 25%.

Принимаем долю времени открытия окон выдачи и смотровых $\psi = 0{,}4$ и окна посадки $\psi = 1$. Тогда тепловые потери через заслонки закрытых окон составят по формуле (59) $Q'_{5_{засл}} = 4650 F (1 - \psi) = 4650 (0{,}69 \cdot 0{,}56 \cdot 2 + 0{,}23 \times 0{,}21 \cdot 2) 0{,}6 = 2300$ $Вт$ [1980 $ккал/ч$]. Суммарные тепловые потери через кладку $Q'_5 = [33\,600 + 17\,000 + 48\,000 + 34\,800 + 2300] 1{,}2 = 135\,700$ $Вт$ [116 500 $ккал/ч$]. Коэффициент 1,2 принимаем для покрытия неучтенных потерь через под и металлическую гарнитуру печи.

2. Потеря тепла излучением через открытые окна [формула (62)]

$$Q_5^2 = \Sigma q \theta \psi \quad ккал/ч.$$

По кривым рис. 119 для смотровых окон $\theta = 0{,}33$, окон выдачи — 0,6 и окна посадки — 0,7.

Потеря тепла излучением через окна:

в сварочной зоне

$$5{,}7 \left(\frac{1473}{100}\right)^4 (0{,}69 \cdot 0{,}56 \cdot 2)\, 0{,}6 \cdot 0{,}4 = 50\,000 \text{ } Вт \text{ [43 000 } ккал/ч];$$

в методической зоне

$$5{,}7 \left(\frac{1348}{100}\right)^4 (0{,}23 \cdot 0{,}21 \cdot 2)\, 0{,}33 \cdot 0{,}4 + 5{,}7 \left(\frac{1123}{100}\right)^4 (0{,}8 \cdot 2{,}5)\, 0{,}7 \cdot 1 =$$

$$= 33200 \text{ } Вт \text{ [28 500 } ккал/ч];$$

$$Q_5^2 = 50\,000 + 33\,200 = 83\,200 \text{ } Вт \text{ [71 500 } ккал/ч].$$

Потеря тепла с выбивающимися из печи газами [формула (37)]

$$Q_5^3 = \Sigma V_{выб} c_2 t_2 \psi \quad Вт \text{ [} ккал/ч].$$

Учитываем только выбивающиеся из открытых окон газы и принимаем среднюю температуру $t_г = 1250°$ С. Из окон выдачи выбивается газов

$$V_{t_{выб}} = \frac{2}{3} 0{,}62 \cdot 0{,}69 \cdot 0{,}56 \sqrt{\frac{2 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}69 \left(1{,}29 - \dfrac{1{,}33}{1 + \beta \cdot 1250}\right)}{\dfrac{1{,}33}{1 + \beta \cdot 1250}}} 2 \approx$$

$$\approx 2{,}3 \text{ } м^3/сек;$$

из смотровых окон выбивается газов

$$V_{t_{см}} = \frac{2}{3} 0{,}62 \cdot 0{,}23 \cdot 0{,}21 \sqrt{\frac{2 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}21 \left(1{,}29 - \dfrac{1{,}33}{1 + \beta \cdot 1250}\right)}{\dfrac{1{,}33}{1 + \beta \cdot 1250}}} 2 \approx$$

$$\approx 0{,}124 \text{ } м^3/сек;$$

$$V_t = 2{,}3 + 0{,}124 = 2{,}424 \text{ } м^3/сек;$$

$$V'_0 = 3600 \frac{V_t}{1 + \beta t} = 3600 \frac{2{,}424}{1 + \beta \cdot 1250} = 1560 \text{ } м^3/ч;$$

с учетом $\psi = 0{,}4$;

$$V_{выб} = 1560 \cdot 0{,}4 = 620 \text{ } м^3/ч;$$

$$Q_5^3 = 620 \cdot 1{,}58 \cdot 1250 = \frac{1\,225\,000}{3{,}6} = 340\,000 \text{ } Вт \text{ [292 000 } ккал/ч].$$

Суммарная потеря тепла в окружающую среду будет

$$Q_5 = 135\,700 + 83\,200 + 340\,000 = 558\,900 \text{ } Вт \text{ [480 000 } ккал/ч].$$

Определяем часовой расход топлива, составляя уравнение теплового баланса [формула (65)]:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5;$$

$B \cdot 10\,940 + 157\,000 = 2\,340\,000 + B \cdot 4910 - 280\,000 + B \cdot 200 + B \cdot 200 + 558\,900$, откуда

$$B = \frac{2\,461\,900}{5630} = 440 \text{ } м^3/ч.$$

Вносится тепла топливом $36\,065 \cdot 440 = \dfrac{15850\,000}{3{,}6} = 4\,500\,000$ $Вт$ [3 780 000 $ккал/ч$]. Принимаем дополнительный расход тепла на неучтенные потери $Q_6 = 20\%$ этой величины: $Q_6 = 4\,500\,000 \cdot 0{,}2 = 900\,000$ $Вт$

Таблица 21

Тепловой баланс печи

Статьи прихода	в $Вт$	в %	Статьи расхода	в $Вт$	в %
Тепло сгорания топлива	5 950 000	89,5	Полезный расход тепла	2 340 000	35,1
			Потеря тепла с отходящими из печи газами	2 620 000	39,4
Физическое тепло воздуха	545 000	8,2			
Тепло окисления железа	157 000	2,3	Потеря тепла от химической неполноты сгорания	118 000	1,8
			Потеря тепла от механической неполноты горения	118 000	1,8
Всего	6 652 000	100,0	Потеря тепла в окружающую среду	558 900	8,4
			Неучтенные потери	456 000	13,2
			Итого	6 434 900	97,7
			Невязка	217 100	0,3
			Всего	6 652 000	100,0

[755 000 *ккал/ч*]. Включаем 900 000 *Вт* в правую часть уравнения теплового баланса и снова вычисляем B: $B=\frac{3\,361\,900}{5630}=595$ *м³/ч*. Подставляя численное значение $B=595$ в полученные выше статьи прихода и расхода тепла, составляем тепловой баланс печи (табл. 21).

Удельный расход топлива на нагрев металла равен:

$$q=\frac{36\,065\cdot 595}{10\,000}\approx 2150\ кДж/кг\ [515\ ккал/кг].$$

Так как он близко подходит к принятому предварительно, то оставляем без изменения выбранное ранее количество горелок и их производительность.

3) Расчет рекуператора

Принимаем потерю воздуха в воздухопроводе от рекуператора до горелок 10%; потерю дымовых газов между местом отбора их и рекуператором — 15% и падение температуры их на этом пути — 50°; падение температуры в воздухопроводе от рекуператора до горелок $t=20°$ и температуру поступающего в рекуператор воздуха $t_в=0°$ С.

Объем дымовых газов и воздуха с учетом потерь

$$V_{дым}=(BV_п-620)\,0{,}85=(595\cdot 10{,}97-620)\,0{,}85=5025\ м^3/ч;$$

$$V_{воз}=BL_п\cdot 1{,}1=595\cdot 10{,}05\cdot 1{,}1=6550\ м^3/ч.$$

Подогрев воздуха в рекуператоре

$$t''_в=t_{зад}+\Delta t=250+20=270°С;$$

теплосодержание воздуха

$$q_в=V_{воз}c_в t_в=6550\cdot 1{,}31\cdot 270=\frac{2\,320\,000}{3{,}6}=645\,000\ Вт\ [551\,000\ ккал/ч].$$

Принимая потери тепла рекуператором в окружающую среду в размере 10%, определяем количество тепла, которое должны отдать дымовые газы в рекуператоре:

$$q_{отд}=\frac{645\,000}{0{,}9}=717\,500\ Вт\ [615\,000\ ккал/ч].$$

Температура поступающих в рекуператор дымовых газов $t'_д=1050-50=1000°$ С. Часовое теплосодержание дымовых газов, входящих в рекуператор:

$$q'_д=V_{дым}c_д t'_д=5025\cdot 1{,}7\cdot 1000=\frac{8\,550\,000}{3{,}6}=$$

$$=2\,380\,000\ Вт\ [2\,040\,000\ ккал/ч];$$

часовое теплосодержание уходящих из рекуператора дымовых газов

$$q''_д=q'_д-q_{отд}=2\,380\,000-717\,500=1\,662\,500\ Вт\ [1\,430\,000\ ккал/ч].$$

Принимая предварительно температуру уходящих из рекуператора дымовых газов $t''_д=700°$ С, получаем по приложению $1\lambda^c_д=1{,}51$ *кДж/м³* [0,360 *ккал/(м³·град)*]. Температура уходящих из рекуператора газов

$$t''_д=\frac{q_д}{V_д c_д}=\frac{1\,662\,500}{5025\cdot 1{,}51}3{,}6=790°С,$$

где 3,6 — коэффициент перевода теплосодержания газа из *кДж/м³* в *Вт*. Выбирая рекуператор с противотоком, получаем:

$$\tau_н=t'_д-t''_в=1000-270=730°\ С;$$

$$\tau_к=t''_д-t'_в=790-0=790°\ С.$$

По кривой приложения 2 находим $\tau_{ср}=750°$ С. Выбираем игольчатый рекуператор с трубами без наружных игл.

Принимаем коэффициент теплопередачи $K=40$ *Вт/(м²·град)* [35 *ккал/(м²·ч·град)*] (см. стр. 283). Поверхность нагрева рекуператора

$$F=\frac{q_в}{K\tau_{ср}}=\frac{645\,000}{40\cdot 650}=24{,}8\ м^2.$$

Выбираем трубу рекуператора длиной 1640 *мм*; расчетная поверхность нагрева одной трубы по приложению 3 равна 0,5 *м²*.

Потребное количество труб

$$n=\frac{24{,}8}{0{,}5}\approx 50\ шт.$$

§ 38. ОСНОВЫ РАСЧЕТА ДЫМОВЫХ ТРУБ

Расчет дымовых труб состоит из теплотехнического расчета ствола, статического расчета ствола и фундамента, а для кирпичных труб расчета стяжных колец. Расчет дымовых труб выполняется в соответствии с «Инструкцией по проектированию кирпичных дымовых труб» $\frac{\text{МСН 58-64}}{\text{ГМСС СССР}}$.

Теплотехнический расчет труб

Теплотехнический расчет труб выполняется для определения диаметра трубы и ее высоты.

Для теплотехнического расчета трубы должны быть заданы: температура и количество отходящих газов, а также необходимое разрежение, которое должна создавать труба. Диаметр устья трубы в свету d_0 определяют исходя из скорости газов в устье $w_0=2{,}5\div 3$ *м/сек* (при 0° С и 760 *мм рт. ст.*)

$$F_0=\frac{V_0}{w_0}\ м;\qquad (72)$$

$$d_0=\sqrt{\frac{4F_0}{\pi}}\ м,\qquad (73)$$

где F_0 — сечение выходного отверстия трубы в *м²*;

V_0 — количество отходящих газов при 0° С и 760 *мм рт. ст.* в *м³/сек*.

Внутренний диаметр устья трубы из условий удобства кладки делают не менее 800 *мм*. Необходимую высоту трубы H (в *м*) для создания естественной тяги h (в *мм вод. ст.*) определяют из формулы

$$h=H(\gamma_в-\gamma_{ср})-\frac{(w_0)_2^2-(w_0)_1^2}{2}\gamma_0(1+\beta t_{ср})-$$

$$-\mu\frac{(w_0^2)_{ср}}{2g}\gamma_0(1+\beta t_{ср})\frac{H}{d_{ср}},\qquad (74)$$

где $\gamma_в$ — объемная масса воздуха при 760 *мм рт. ст.* и наивысшей летней температуре в данной местности в *кг/м*³;

$\gamma_{ср}$ — объемная масса дымовых газов при 760 *мм рт. ст.* и средней температуре в трубе в *кг/м*³;

γ_0 — объемная масса дымовых газов при 0° С и 760 *мм рт. ст.* в *кг/м*³;

$(w_0)_2^2 - (w_0)_1^2$ — разность квадратов скоростей движения дымовых газов в устье и у основания трубы при 0° С и 760 *мм рт. ст.* [(*м/сек*)² — (*м/сек*)²];

$(w_0^2)_{ср}$ — квадрат средней скорости дымовых газов в трубе при 0° С и 760 *мм рт. ст.* (*м/сек*)²;

$t_{ср}$ — средняя температура газов в трубе, подсчитываемая приближенно из расчета падения температуры газов на 1 *м* высоты трубы, 1° С.

μ — коэффициент трения, может быть принят 0,05;

$\beta = \frac{1}{273}$ — коэффициент объемного температурного расширения газа.

Первый член правой части уравнения обозначает полное разрежение (геометрический напор с отрицательным знаком), создаваемое столбом горячих газов высотой H, второй член — потерю напора на создание разности скоростей у устья и основания трубы и третий — потерю напора на трение газов о стены трубы.

В трубах с искусственной тягой высоту определяют исходя из санитарно-гигиенических условий в зависимости от содержания вредных примесей в отводимых газах: чем больше вредных примесей в газе, тем выше строится труба.

Статический расчет ствола трубы

Статический расчет стволов дымовых труб производят по специальным инструкциям. Расчету подвергаются:

а) горизонтальные сечения ствола на воздействие вертикальной нагрузки от собственной массы и ветрового момента. Из этого расчета определяется толщина стенок, а для железобетонных труб также и количество вертикальной арматуры;

б) вертикальные сечения ствола на воздействие температурных усилий, возникающих от разницы температур на внутренней и наружной поверхностях стенки ствола. Из этого расчета определяется сечение стяжных колец у кирпичных труб и количество горизонтальной арматуры в железобетонных трубах;

в) фундамент дымовой трубы. Глубина заложения фундамента выбирается в зависимости от грунтовой обстановки и отметки пода борова. Затем в зависимости от расчетного сопротивления грунта $R_р$ определяется диаметр фундамента и производится расчет арматуры фундаментной плиты.

Все расчеты производят методом подбора. Сначала, задаваясь на основе имеющегося опыта высотами поясов ствола трубы и толщинами стенок, диаметром фундамента и толщиной его плиты, количеством стяжных колец и арматуры, определяют усилия в расчетных сечениях, а затем напряжения, которые не должны превышать допустимых. Расчетная ветровая нагрузка q на 1 *м*² вертикальной проекции ствола определяется по СНиП II-А.11-62

$$q = \beta K Q_р \ т/м^2, \tag{75}$$

где β — динамический коэффициент, зависящий от периода собственных колебаний трубы. В среднем этот коэффициент равен 1,5—1,6;

K — коэффициент обтекания, для труб кольцевого сечения принимается равным 0,6;

$Q_р$ — расчетный скоростной напор ветра, определяемый для середины расчетного звена ствола в зависимости от географического района постройки по таблице, помещенной в главе СНиП II-А.11-62.

Равнодействующая давления ветра на поле трубы P равна:

$$P = qf \ тс, \tag{76}$$

где f — площадь вертикальной проекции пояса в *м*², определяемая умножением высоты пояса на средний наружный диаметр.

Ветровой момент в сечении определяется по формуле

$$M_в = P_1 h_1 + P_2 h_2 + \ldots + P_n h_n \ т/м, \tag{77}$$

где $h_1, h_2, h_3, \ldots, h_n$ — расстояния от середины поясов до расчетного сечения.

Горизонтальные сечения ствола кирпичной трубы ориентировочно могут быть рассчитаны по формуле

$$\delta = \frac{N}{F\varphi} + \frac{M_в}{W} \leqslant \frac{R_{кл}}{K}, \tag{78}$$

где N — масса ствола в *кг*;

$F = 0{,}785(D_н^2 - d_в^2)$ — площадь расчетного горизонтального сечения в *см*²;

$D_н$ и $d_в$ — наружный и внутренний диаметр ствола в расчетном сечении в *см*;

$W = \frac{0{,}098\left(D_н^2 + d_в^2\right)\left(D_н^2 - d_в^2\right)}{D_н}$ — момент сопротивления сечения в *см*³;

φ — коэффициент продольного изгиба для кладки, берется по табл. 22 в зависимости от приведен-

ной гибкости $m=\frac{H_1}{D_н}$, где H_1 — высота ствола трубы над расчетным сечением в *м*;

$R_{кл}$ — нормативное сопротивление кладки при сжатии, берется по табл. 23 в *кгс/см²*;

K — коэффициент запаса, принимаемый равным 2,5.

Так как растягивающие усилия в кладке кирпичных дымовых труб не допускаются, должно быть выдержано условие

Таблица 22

Коэффициент продольного изгиба

Приведенная гибкость	Коэффициент продольного изгиба	Приведенная гибкость	Коэффициент продольного изгиба	Приведенная гибкость	Коэффициент продольного изгиба
4	0,99	8	0,92	12	0,84
5	0,98	9	0,9	13	0,81
6	0,96	10	0,88	14	0,79
7	0,94	11	0,86	15	0,77

Таблица 23

Нормативное сопротивление кладки при сжатии в *кгс/см²*

Марка кирпича	Марка раствора		
	100	50	25
150	45	35	30
100	35	30	25
75	30	25	20

$$\frac{N}{F\varphi}-\frac{M_в}{W}<0. \qquad (79)$$

Для определения давления на грунт P задаются диаметром плиты фундамента $D_ф$ и определяют вертикальную нагрузку на грунт по формуле

$$N_ф = Q_с + Q_ф + Q_{гр}, \qquad (80)$$

где $Q_с$ — полная масса ствола и футеровки в *кг*;

$Q_ф$ — масса фундамента и футеровки стакана в *кг*;

$Q_{гр}$ — масса грунта на консолях фундамента в *кг*.

Затем определяют ветровой момент относительно подошвы фундамента $M_ф$ по формуле

$$M_ф = M_с + h_ф \Sigma P, \qquad (81)$$

где $M_с$ — ветровой момент в нижнем сечении ствола в *кгс·см*;

ΣP — сумма равнодействующих давления ветра на пояса в *кгс*;

$h_ф$ — высота фундамента в *см*.

Давление на грунт определяют по формуле

$$P=\frac{N_ф}{F_ф}\pm\frac{M_ф}{W_ф}\leqslant R_{гр}, \qquad (82)$$

где $F_ф$ и $W_ф$ — площадь и момент сопротивления подошвы фундамента в *см²* и *см³*.

При круглой плите $F_ф=0{,}785\,D_ф^2$; $W_ф=0{,}098\,D_ф^3$. При слабых грунтах крен фундамента не должен превосходить 0,004.

Приложения

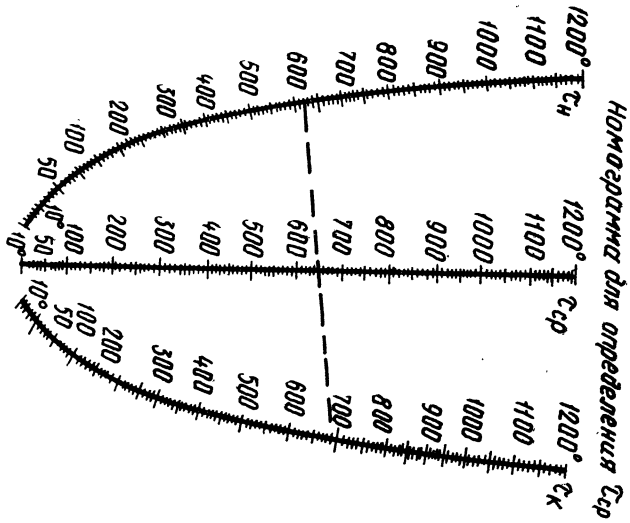
ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Теплосодержание углеродистых сталей

Температура в °С	Содержание углерода в %										
	0,09		0,234		0,32		0,54		0,61		0,795
	кДж/кг	*ккал/кг*	*кДж/кг*	*ккал/кг*	*кДж/кг*	*ккал/кг*	*кДж/кг*	*ккал/кг*	*кДж/кг*	*ккал/кг*	*кДж/кг*
100	46,4	11,1	46,4	11,1	46,8	11,2	47,2	11,3	47,6	11,4	48,1
200	55,5	22,8	95,6	22,9	95,6	22,9	95,6	22,9	96,1	23	96,5
300	148,2	35,4	150,0	35,8	151,5	36	151,6	36,2	153,0	36,5	154,2
400	205	49	206	49,2	207	49,3	209	49,9	210	50,1	211
500	266	63,4	267	63,7	268	63,9	269	64,1	270	64,3	272
600	239	81	340	81,2	342	81,4	343	82	344	82,1	345
700	419	100,1	420	100,2	421	100,5	423	101	424	101,2	425
800	530	127	541	129,6	549	131,5	548	130,8	540	129,5	549
900	630	150,3	632	150,8	627	150	620	148,1	614	147,3	610
1000	705	168,3	700	167,6	698	166,9	689	164,6	685	164	678
1100	780	186,5	771	184,5	767	183,5	760	181,7	757	180,9	749
1200	850	203,1	841	201,7	840	201	830	198,6	828	198	820
1250	885	211,5	880	210,2	875	209,6	867	207,5	862	206,9	852

Продолжение

Температура в °С	Содержание углерода в %										
	0,795	0,92		0,994		1,235		1,41		1,545	
	ккал/кг	*кДж/кг*	*ккал/кг*	*кДж/кг*	*ккал/кг*	*кДж/кг*	*ккал/кг*	*кДж/кг*	*ккал/кг*	*кДж/кг*	*ккал/кг*
100	11,5	50,1	12	48,5	11,6	49,3	11,8	48,5	11,6	50,1	12
200	23,1	100,5	24	99,0	23,7	100,0	23,9	98,8	23,6	100,4	24,1
300	36,9	155,5	37,2	154,2	36,9	155,4	37	154,5	36,9	157	37,5
400	50,2	218	51	212	50,4	216	50,9	211	50,3	214	51,1
500	64,8	276	65,9	274	65	275	65,5	274	65	277	66,1
600	82,3	346	83,5	347	82,7	348	83	345	82,5	352	83,9
700	101,4	428	102,1	423	101	429	102,2	426	101,6	431	103
800	131,4	549	131,4	542	130	548	131	543	130	552	132,8
900	145,9	603	144	605	144,5	603	144	613	144,7	612	146,6
1000	162,2	653	156,1	671	160,2	659	157,9	701	160,8	669	160
1100	179	724	173,1	741	177	731	174,9	745	177,9	719	172
1200	196,1	780	189	802	192,1	795	190	812	194,2	782	187
1250	204,5	824	197	840	201	831	199	848	202,9	815	195,3



ПРИЛОЖЕНИЕ II

ПРИЛОЖЕНИЕ III

Характеристика труб игольчатых рекуператоров

Характеристика	Тип											
	17,5				28				без наружных игл			
Длина труб в *мм*	880	1135	1385	1640	880	1135	1385	1640	880	1135	1385	1640
Сечение для прохода воздуха в $м^2$	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,00
Сечение для прохода дымовых газов в $м^2$	0,06	0,08	0,1	0,12	0,07	0,092	0,114	0,13	0,042	0.055	0,067	0,08
Количество игл на воздушной стороне в шт.	636	852	1068	1284	636	852	1068	1284	636	852	1068	1284
Количество игл на дымовой стороне в шт.	558	740	922	1118	298	396	496	594	—	—	—	—
Поверхность, омываемая воздухом, в $м^2$	0,83	1,12	1,41	1,7	0,83	1,12	1,41	1,7	0,83	1,12	1,41	1,7
Поверхность, омываемая дымовыми газами, в $м^2$	1,34	1,81	2,27	2,64	0,95	1,26	1,6	1,9	0,4	0,53	0,66	0,79
Условная (расчетная) поверхность нагрева, в $м^2$	0,25	0,33	0,425	0,5	0,25	0,33	0,425	0,5	0,25	0,33	0,425	0,5
Масса труб в *кг*	45	55	66	80	41	52	63	76	31	39	47	55
Длина трубы между фланцами (длина дымового канала) в *мм*	790	1045	1295	1550	790	1045	1295	1550	790	1045	1295	1550

Средние теплоемкости для воздуха и газов

Температура в °С	Теплоемкости в *ккал/(м³·град)*											
	RO_2	N_2	O_2	H_2O	сухого воздуха	влажного воздуха	CO	H_2	H_2S	CH_4	C_2H_4	дымовых газов
0	0,387	0,3103	0,3123	0,3562	0,3107	0,3164	0,311	0,305	0,362	0,374	0,422	0,34
100	0,4108	0,3108	0,3151	0,3587	0,3117	0,3174	0,311	0,308	0,368	0,395	0,503	
200	0,4318	0,3112	0,3193	0,3624	0,3128	0,3186	0,313	0,310	0,076	0,422	0,556	0,34
300	0,4492	0,3124	0,3244	0,3673	0,3148	0,3207	0,315	0,311	0,384	0,452	0,604	—
400	0,4642	0,3146	0,3295	0,3624	0,3177	0,3237	0,318	0,311	0,393	0,483	0,65	0,348
500	0,4885	0,3175	0,3345	0,3781	0,321	0,3271	0,321	0,312	0,402	0,512	0,691	
600	0,4918	0,3205	0,339	0,384	0,3244	0,3305	0,325	0,313	0,411	0,542	0,723	0,356
700	0,5034	0,3237	0,3432	0,3902	0,3278	0,334	0,328	0,314	0,42	0,569	0,762	
800	0,5139	0,3268	0,347	0,3965	0,3311	0,3374	0,332	0,315	0,429	0,596	0,798	0,363
900	0,5234	0,33	0,3502	0,4028	0,3342	0,3406	0,3356	0,316	0,437	0,62	0,824	
1000	0,5318	0,3329	0,3535	0,4092	0,3372	0,3437	0,338	0,317	0,445	0,644	0,852	0,369
1100	0,5396	0,3357	0,3563	0,4155	0,34	0,3466	0,341	0,319	0,452	0,665	—	
1200	0,5466	0,3383	0,3588	0,4217	0,3426	0,3493	0,344	0,321	0,459	0,686	—	0,374
1300	0,5531	0,3413	0,3612	0,4277	0,3452	0,352	0,346	0,323	0,465	—	—	
1400	0,559	0,3433	0,3635	0,4335	0,3475	0,3544	0,349	0,325	0,471	—	—	0,38
1500	0,5645	0,3456	0,3657	0,4392	0,3497	0,3567	0,351	0,327	0,477	—	—	
1600	0,5696	0,3476	0,3678	0,4447	0,3518	0,3589	0,353	0,329	—	—	—	0,386
1700	0,5742	0,3493	0,3698	0,45	0,3537	0,3609	0,355	0,331	—	—	—	
1800	0,5786	0,3512	0,3716	0,4551	0,3556	0,3629	0,357	0,333	—	—	—	
1900	0,5826	0,353	0,3735	0,4598	0,3573	0,3647	0,358	0,334	—	—	—	0,392
2000	0,5864	0,3547	0,3753	0,4645	0,359	0,3664	0,36	0,336	—	—	—	0,398
2100	0,5899	0,3562	0,377	0,4789	0,3605	0,368	0,361	0,338	—	—	—	
2200	0,5932	0,3578	0,3786	0,4732	0,3624	0,3697	0,363	0,340	—	—	—	0,404
2300	0,5964	0,359	0,3803	0,4773	0,3635	0,3711	0,364	0,342	—	—	—	
2400	0,5994	0,3603	0,3819	0,4812	0,3648	0,3725	0,365	0,344	—	—	—	0,41
2500	0,6022	0,3617	0,3835	0,485	0,3664	0,374	0,367	0,346	—	—	—	

Примечания: 1. Данными последней колонки можно пользоваться только для отыскания отправных температур, необходимых для интерполяции.

2. Для получения средних теплоемкостей в *кДж/(м³·град)* данные таблицы следует умножить на 4,187.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бельский В. И., Гора А. П., Молчанов Н. Г., Чернов А. В. Строительство и ремонт металлургических печей. Металлургиздат, 1959.
2. Бельский В. И. и Солодянников Л. Д. Руководство по кладке промышленных печей. Госстройиздат, 1959.
3. Бельский В. И. и Чернов А. В. Кладка и монтаж промышленных печей и заводских труб. Стройиздат, 1964.
4. Металлургические печи. Под редакцией Глинкова М. А. Металлургиздат, 1963 (I том), 1964 (II том).
5. Гинзбург Д. Б. Стекловаренные печи. Стройиздат, 1967.
6. Гинзбург Д. Б., Дейнека В. К., Нохратян К. Л. Печи и сушила в силикатной промышленности. Гизлегпром, 1940.
7. Диомидовский Д. А. Металлургические печи цветной металлургии. «Металлургия», 1970.
8. Долотов Г. П., Кондаков Е. Д. Конструкция и расчет заводских печей и сушил. «Машиностроение», 1965.
9. Константинов А. Н., Самсонов Н. А., Вейцман М. А., Иванец К. Я. Аппараты и оборудование нефтеперегонных заводов. Гостоптехиздат, 1960.
10. Кривандин В. А., Молчанов Н. Г., Соломенцев С. А. Металлургические печи. «Металлургия», 1969.
11. Мамыкин П. С., Стрелов К. К. Технология огнеупоров. «Металлургия», 1970.
12. Севрюгин Н. Н., Кузьмин Б. А., Челищев Е. В. Общая металлургия. Металлургиздат, 1954.
13. Тебеньков Б. П. Рекуператоры для промышленных печей. «Металлургия», 1967.
14. Чернов А. В., Волынцев В. А. Кирпичные дымовые трубы. Госстройиздат, 1955.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Введение 3

Глава I. Материалы и изделия, применяемые при кладке промышленных печей и дымовых труб 6

§ 1. Огнеупорные материалы и изделия 6
§ 2. Теплоизоляционные огнеупорные изделия 45
§ 3. Теплоизоляционные материалы и изделия 49
§ 4. Растворы 51

Глава II. Топливо и процессы горения 54

§ 5. Топливо 54
§ 6. Расчеты горения топлива 64

Глава III. Основы печной теплотехники 72

§ 7. Основные законы механики газов 72
§ 8. Теплопередача 79
§ 9. Нагрев металла 83

Глава IV. Конструктивные элементы печей и оборудование 84

§ 10. Топливосжигающие устройства 84
§ 11. Конструктивные элементы печей 90
§ 12. Каркасы промышленных печей 93
§ 13. Гарнитура, механизмы и оборудование печей 95
§ 14. Устройства для экономии топлива 109

Глава V. Нагревательные и термические печи и сушила 118

§ 15. Классификация печей 118
§ 16. Нагревательные печи 121
§ 17. Термические печи 142
§ 18. Сушила 153

Глава VI. Плавильные печи черной металлургии 165

§ 19. Доменные печи 165
§ 20. Мартеновские печи 177
§ 21. Конверторы 188
§ 22. Миксеры 192
§ 23. Вагранки 195

Глава VII. Печи цветной металлургии 198

§ 24. Отражательные и шахтные печи 199
§ 25. Специальные печи цветной металлургии 204

Глава VIII. Печи промышленных строительных материалов . . . 209

§ 26. Печи для обжига строительных материалов 209
§ 27. Вращающиеся цилиндрические печи 218
§ 28. Стекловаренные печи 224

Глава IX. Печи нефтеперерабатывающей и химической промышленности 234

Стр.

§ 29. Трубчатые печи нефтеперерабатывающей промышленности 234
§ 30. Печи химической промышленности 239

Глава X. Электрические плавильные и нагревательные печи 246

§ 31. Классификация электрических печей 246
§ 32. Электрические плавильные печи 248
§ 33. Электрические нагревательные печи 253

Глава XI. Фабрично-заводские трубы 261

§ 34. Кирпичные трубы 261
§ 35. Железобетонные трубы 267

Глава XII. Основы расчета и конструирования промышленных печей и дымовых труб 270

§ 36. Тепловой баланс печи 270
§ 37. Расчет и конструирование печей 278
§ 38. Основы расчета дымовых труб 291

Приложения 295

Литература 299

ВИКТОР ИСЕНОВИЧ БЕЛЬСКИЙ
БОРИС ВЛАДИМИРОВИЧ СЕРГЕЕВ
ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПЕЧИ И ТРУБЫ
2-е издание

* * *

Редактор издательства *Т. М. Лаврентьева*
Технический редактор *И. В. Панова*
Корректор *Г. А. Кравченко*

Сдано в набор 20.IV 1973 г. Подписано к печати 2.X 1973 г. Т-15825 Формат 84×108¹/₃₂. Бумага типографская № 2. 15,96 усл. печ. л. (уч.-изд. 19,9 л.). Тираж 22 000 экз. Изд. № AIII—3445. Зак. № 294. Цена 77 коп.

Стройиздат
103777, Москва, Кузнецкий мост, 9
Владимирская типография Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
Гор. Владимир, ул. Победы, д. 18-б.

Таблица соотношений между некоторыми единицами физических величин, подлежащих изъятию, и единицами СИ

Наименование величины	Единица: подлежащая изъятию: наименование	Единица: подлежащая изъятию: обозначение	Единица: СИ: наименование	Единица: СИ: обозначение	Соотношение единиц
Сила; нагрузка; вес	килограмм-сила тонна-сила грамм-сила	кгс тс гс	ньютон	Н	**1 кгс~9,8 Н~10 Н** **1 тс~9,8·10³ Н~10 кН** **1 гс~9,8·10⁻³ Н~10 мН**
Линейная нагрузка	Килограмм-сила на метр	кгс/м	ньютон на метр	Н/м	**1 кгс/м~10 Н/м**
Поверхностная нагрузка	Килограмм-сила на квадратный метр	кгс/м²	ньютон на квадратный метр	Н/м²	**1 кгс/м²~10 Н/м²**
Давление	килограмм-сила на квадратный сантиметр миллиметр водяного столба миллиметр ртутного столба	кгс/см² мм вод. ст. мм рт. ст.	паскаль	Па	**1 кгс/см² ~9,8·10⁴ Па ~ 10⁵ Па ~0,1 МПа** **1 мм вод.ст.~9,8 Па~ 10 Па** **1 мм рт. ст.~133,3 Па**
Механическое напряжение **Модуль продольной упругости; модуль сдвига; модуль объемного сжатия**	килограмм-сила на квадратный миллиметр килограмм-сила на квадратный сантиметр	кгс/мм² кгс/см²	паскаль	Па	**1 кгс/мм²~9,8·10⁶ Па ~ ~10⁷ Па~10 МПа** **1 кгс/см²~9,8·10⁴ Па~ ~10⁵ Па~0,1 МПа**
Момент силы; момент пары сил	килограмм-сила-метр	кгс·м	ньютон-метр	Н·м	**1 кгс·м ~9,8 Н·м~10 Н·м**

Продолжение

Наименование величины	Единица				Соотношение единиц
	подлежащих изъятию		СИ		
	наименование	обозначение	наименование	обозначение	
Работа (энергия)	килограмм-сила-метр	кгс·м	джоуль	Дж	1 кгс · м≈9,8 Дж≈10 Дж
Количество теплоты	калория килокалория	кал ккал	джоуль	Дж	1 кал≈4,2 Дж 1 ккал≈4,2 кДж
Мощность	килограмм-сила-метр в секунду лошадиная сила калория в секунду килокалория в час	кгс·м/с л. с. кал/с ккал/ч	ватт	Вт	1 кгс · м/с≈9,8 Вт≈10 Вт 1 л. с.≈735,5 Вт 1 кал/с≈4,2 Вт 1 ккал/ч≈1,16 Вт
Удельная теплоемкость	калория на грамм-градус Цельсия килокалория на килограмм-градус Цельсия	кал/(г·°С) ккал/(кг·°С	джоуль на килограмм-кельвин	Дж/(кг·К)	1 кал/(г·°С) ≈4,2·10³ Дж/(кг · К) 1 ккал/(кг·°С)≈4,2 кДж/(кг·К)
Теплопроводность	калория в секунду на сантиметр-градус Цельсия калория в час на метр-градус Цельсия	кал/(с·см·°С) ккал/(ч·м·°С)	ватт на метр-кельвин	Вт/(м·К)	1 кал/(с · см · °С)≈ ≈420 Вт/(м · К) 1 ккал/(ч · м · °С)≈ ≈1,16 Вт/(м · К)
Коэффициент теплообмена (теплоотдачи); коэффициент теплопередачи	калория в секунду на квадратный сантиметр-градус Цельсия килокалория в час на квадратный метр-градус Цельсия	кал/(с·см²·°С) ккал/(ч·м²·°С)	ватт на квадратный метр-кельвин	Вт/(м²·К)	1 кал/(с · см² · °С)≈ ≈42 кВт/(м² · К) 1 ккал/(ч · м² · °С)≈ ≈1,16 кВт/(м² · К)

ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
71	4 снизу	2750 дин + стат — стат — дин	1750 дин + стат — стат = дин
75	1 снизу	9 *м/сек*	9 *мин.-см*
83	11 снизу	3 *м*	30 *м*
270	21 сверху		

Зак. 294