666.9
В64

А.А.ВОЗНЕСЕНСКИЙ

ТЕПЛОВЫЕ УСТАНОВКИ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

ГОССТРОЙИЗДАТ · 1958

666.9
В64

А. А. ВОЗНЕСЕНСКИЙ
КАНДИДАТ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ТЕПЛОВЫЕ УСТАНОВКИ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Ц 5 0 5

Допущено
Министерством высшего образования СССР
в качестве учебника
для технологических факультетов
строительных высших учебных заведений

58629.

Библиотека
Павлодарский индустриальный институт

БИБЛИОТЕКА
Всесоюзн. заочн.
инженер.-строит.ин-т

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛИТЕРАТУРЫ ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ, АРХИТЕКТУРЕ
И СТРОИТЕЛЬНЫМ МАТЕРИАЛАМ
Москва — 1958

Рецензенты:

Кафедра технологии вяжущих, бетонов и керамики Московского инженерно-строительного института под руководством действительного члена АСиА СССР докт. техн. наук проф. А. В. Волженского.

Канд. техн. наук *Б. Н. Гак*, канд. техн. наук доц. *В. В. Перегудов*, инж. *М. И. Роговой*, докт. техн. наук проф. *М. Г. Степаненко*, нач. теплотехнической лаборатории НИИЦемента *В. К. Хохлов*.

В книге приведены теоретические основы, методы расчета и описание конструкций тепловых установок в производстве строительных материалов и изделий.

Книга предназначается в качестве учебника по одноименному курсу для технологических факультетов строительных вузов. Она может быть использована студентами в качестве пособия для курсового и дипломного проектирования, а также инженерно-техническими работниками при проектировании и эксплуатации тепловых установок в промышленности строительных материалов.

2х0х2

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 7

1. Основные определения . . . . . —
2. Основные показатели работы тепловых установок 8
3. Требования к конструкции тепловой установки 10
4. Краткий исторический обзор развития теплотехники в производстве строительных материалов и изделий 11
5. Ведущие направления развития тепловых установок в СССР . . 13

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

Топливо, топки, газогенераторы

Глава I. **Топливо** 15

1. Источники тепла и методы сжигания топлива . . . . . —
2. Основные свойства топлива 17
3. Выбор топлива 20
4. Хранение и методы обогащения топлива 21

Глава II. **Понятие о процессах горения топлива** 23

1. Энергия активации . . . . . —
2. Цепные реакции. Индукция 24
3. Виды горения. Скорость и фазы горения 25
4. Температура воспламенения 28
5. Равновесный состав газов 30

Глава III. **Топки** 33

1. Основные характеристики топочных устройств . . . . . —
2. Характеристика и выбор топочных устройств 39

Глава IV. **Процесс газификации и газогенераторы** 50

1. Основные процессы и зоны в газогенераторе . . . . . —
2. Состав и свойства генераторных газов 52
3. Классификация газогенераторов и основные показатели их работы 55
4. Очистка и охлаждение газа 57
5. Методы газификации 59
6. Конструкции газогенераторов 61
7. Техника безопасности при эксплуатации газогенераторных станций 64

Глава V. **Расчеты полного и неполного горения топлива** 65

1. Полное горение . . . . . —
2. Неполное горение топлива 71
3. Процесс с образованием полугаза 73
4. Газогенераторный процесс 74

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

Движение газов и вопросы теплообмена

Глава I. **Движение газов** 77

1. Общие положения . . . . . —
2. Законы о газах, используемые в расчетах тепловых установок . . 78

3. Расчет сопротивлений при движении газов 80
4. Источники преодоления газовых сопротивлений 86
5. Некоторые вопросы движения газов в печах и сушилках 96

Глава II. **Теплообмен** 98

1. Общие положения . . . . . —
2. Передача тепла лучеиспусканием 100
3. Конвекционная теплоотдача 105
4. Теплопроводность 108
5. Комплексный теплообмен 109

Глава III. **Тепловые балансы** 119

1. Общие положения . . . . . —
2. Метод составления теплового баланса (печи) 121
3. Определение из теплового баланса неизвестных показателей . . . 126
4. Графическое изображение теплового баланса 127

РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ

Кладка печей, гарнитура, теплоиспользующие устройства

Глава I. **Кладка** 128
1. Общие положения . . . . . —
2. Основные свойства материалов кладки . . . . . —
3. Некоторые особенности кладки печей 130
Глава II. **Каркасы, гарнитура и арматура** 131
Глава III. **Теплоиспользующие устройства** . . . . . —
1. Технико-экономические обоснования теплоиспользования . . . . —
2. Схемы теплоиспользования и аппаратура 134

РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ

Процессы сушки материалов и изделий и сушильные установки

Глава I. **Теоретические основы сушильного процесса и свойства влажного воздуха** 142

1. Введение . . . . . —
2. Связь влаги с материалом 144
3. Влажность материала 145
4. Свойства влажного воздуха 147
5. Процесс испарения влаги со свободной поверхности 149
6. Материальный и тепловой балансы сушилки 150
7. *Jd*-диаграмма влажного воздуха 155
8. Варианты сушильного процесса 158
9. Характерные периоды процесса сушки 162
10. Законы движения влаги в материале 164
11. Усадка материала и допустимые скорости сушки 166

Глава II. **Классификация и требования к конструкции сушилок** 170

1. Классификация сушилок . . . . . —
2. Требования к конструкции сушилок . . . . . —

Глава III. **Конструкции сушилок для текучих, сыпучих и кусковых материалов** 171

1. Сушилки для текучих материалов . . . . . —
2. Пневматическая сушилка для сыпучих материалов 173
3. Контактные сушилки 175
4. Конвейерные сушилки 176
5. Шахтные сушилки 177
6. Барабанные сушилки . . . . . —

Глава IV. **Сушилки для листовых изделий** 181

Глава V. **Сушилки для кирпича, керамических камней и плит** 185
1. Основные способы сушки . . . . . —
2. Камерные сушилки периодического действия 188
3. Туннельные сушилки непрерывного действия 191
4. Конвейерные сушилки 197
5. Новые способы сушки 199

Глава VI. **Порядок расчета сушилок** 202

Глава VII. **Техника безопасности при эксплуатации сушилок** 203

РАЗДЕЛ ПЯТЫЙ

Процессы обжига строительных материалов и установки для него

Глава I. **Общая классификация тепловых установок для обжига строительных материалов и изделий** 204

Глава II. **Процессы при обжиге вяжущих веществ** 205

Глава III. **Шахтные печи** 210
1. Схемы, принцип работы и теплообмен в печи . . . . . —
2. Производительность и аэродинамическое сопротивление печи . . 215
3. Конструкции шахтных печей 217
4. Порядок расчета шахтных печей 225
5. Пути повышения производительности и экономичности шахтных печей 227

Глава IV. **Вращающиеся печи** 229
1. Основные понятия и определения . . . . . —
2. Процессы обжига материалов во вращающейся печи 231
3. Особенности теплопередачи во вращающейся печи 233
4. Производительность вращающейся печи 235
5. Основные конструкции вращающихся печей 236
6. Особые типы вращающихся печей 239
7. Схема расчета и тепловые балансы вращающихся печей 242
8. Техника безопасности 244

Глава V. **Установки для тепловой обработки гипса** 245
1. Способы тепловой обработки гипса . . . . . —
2. Установки для тепловой обработки гипса 246
3. Расчет варочных котлов и тепловые балансы установок 251

Глава VI. **Спекательные решетки** 253
1. Определение и основные схемы . . . . . —
2. Процессы вспучивания глины на спекательных решетках 256
3. Выполнение отдельных частей ленточной машины 257
4. Производительность агломерационных машин 259

РАЗДЕЛ ШЕСТОЙ

Печи для обжига строительной керамики

Глава I. **Процессы в материале при обжиге керамических изделий** . . . 261

Глава II. **Однокамерные печи** 265
1. Область применения . . . . . —
2. Основные конструкции однокамерных печей 266
3. Расчетные характеристики 267
4. Использование отработавшего тепла камерных печей 271
5. Применение однокамерных печей для обжига фасадной строительной керамики 272

Глава III. **Кольцевые печи** 273
1. Определение и область применения . . . . . —
2. Схема и режимы работы кольцевой печи 274

3. Конструкция кольцевой печи 277
4. Садка 278
5. Расчетные данные и тепловые балансы кольцевых печей 280
6. Способы улучшения работы кольцевых печей 281

Глава IV. **Туннельные печи** 284

1. Принцип работы и основные преимущества . . . . . —
2. Схемы туннельных печей 285
3. Конструктивные элементы туннельных печей 288
4. Способы садки 290
5. Методы сжигания топлива 292
6. Аэродинамические режимы печи . . . . . —
7. Описание некоторых конструкций туннельных печей 293
8. Порядок расчета туннельных печей и их тепловые балансы . . . 305
9. Перспективы развития туннельных печей 313
10. Техника безопасности при обслуживании печей для обжига керамики 314

РАЗДЕЛ СЕДЬМОЙ

Плавильные установки

Глава I. **Вагранки для расплава шлаков и горных пород** 316

1. Определение. Сырье и топливо. Процессы плавки . . . . . —
2. Схема работы вагранки 317
3. Конструкция и основные расчеты вагранок 319
4. Тепловой баланс 321
5. Пути усовершенствования вагранок 323

Глава II. **Ванные и другие плавильные печи для расплава минерального сырья и глазури** 324

Глава III. **Аппараты для плавки органических вяжущих веществ** 327

1. Варочный котел с неогневым обогревом . . . . . —
2. Варочный котел с огневым обогревом 330
3. Трубчатая печь 331
4. Конверторы 332
5. Асфальтоварочные печи . . . . . —
6. Условия обслуживания аппаратов для варки органических вяжущих 333

РАЗДЕЛ ВОСЬМОЙ

Установки для тепловлажностной обработки строительных изделий

Глава I. **Теоретические основы и выбор режима тепловлажностной обработки** 334

Глава II. **Конструкции установок для тепловлажностной обработки** . . . 336

1. Пропарочные камеры периодического действия . . . . . —
2. Стенды 342
3. Камеры непрерывного действия 343
4. Автоклавы 346

Глава III. **Теплотехнические расчеты установок для тепловлажностной обработки** 350

1. Камеры периодического действия . . . . . —
2. Камеры непрерывного действия 353
3. Расчет автоклавов 356
4. Основные показатели прочих методов тепловлажностной обработки 358

Глава IV. **Техника безопасности при эксплуатации установок для тепловлажностной обработки изделий** 359

Глава V. **Установки для подогрева заполнителей бетонов** 360

Литература 365

Приложения 370

ВВЕДЕНИЕ

1. Основные определения

Тепловые установки составляют основную часть технологического оборудования предприятий промышленности строительных материалов и изделий. От их работы в значительной мере зависят производительность заводов и качество выпускаемой продукции. К тепловым установкам, применяемым в производстве строительных материалов и деталей, относятся сушильные и печные установки, установки для тепловлажностной обработки и вспомогательное тепловое оборудование заводов.

Сушильными установками называются тепловые установки, где происходит термический процесс удаления влаги из материала путем ее испарения. В этом основное отличие процесса сушки от других способов отделения влаги от материала (механического, химического и т. д.). В качестве примера сушильной установки можно привести туннельную сушилку для сушки кирпича-сырца. Влажность сырца, поступившего в сушилку, снижается в результате сушки с 15—20% до 5—8%.

Печами называются тепловые установки, где вследствие теплового воздействия на материал при высоких температурах в нем происходят физико-химические процессы, изменяющие свойства материала-сырья в свойства материала-продукта. Примером может служить известеобжигательная печь. В ней при температуре около 1000° происходит разложение $CaCO_3$ на известь CaO, выдаваемую из печи как продукт (вяжущее вещество для строительных целей), и на углекислоту CO_2, уходящую из печи в качестве отхода (в свою очередь часто используемую как продукт для сатурации, как ускоритель твердения и т. д.). Тепловая обработка в печи сырья — известкового камня — придает получаемому продукту — извести — совершенно новые качества, качества вяжущего вещества.

В последнее время широкое распространение получают установки для тепловлажностной обработки изделий из бетона, железобетона, шлакобетона, силикатного кирпича, теплоизоляционных и некоторых других изделий. Такими установками называются установки, где создается паровая среда определенной температуры (и давления), в которой физико-химический процесс

образования гидросиликатов кальция ускоряется и обрабатываемые изделия твердеют до прочности, близкой к стандартной, в десятки раз быстрее, чем при естественном вызревании. Тепловлажностная обработка производится в автоклавах и в камерах пропаривания или твердения.

К вспомогательным тепловым установкам относятся установки для подогрева заполнителей бетона, пароувлажнительные установки для глины и т. д.

Мощными теплоснабжающими установками оборудуются современные заводы по производству строительных материалов и деталей. К ним относятся газогенераторные станции, котельные установки, правильный выбор которых играет большую роль в обеспечении потребителей тепла и создании для них наивыгоднейших тепловых режимов.

Тепловая обработка материалов и изделий может происходить при различных температурах, давлениях и различных состояниях газовой среды в рабочем пространстве установки. Для того чтобы каждому материалу придать заданные качества, необходим определенный тепловой режим.

Тепловым режимом называется совокупность в каждый момент времени основных параметров тепловой обработки: температуры, давления, влажности, состава газов и скорости движения газовой среды в рабочем пространстве установки. Несоблюдение оптимального теплового режима при обработке материалов и изделий приводит к выпуску бракованной продукции, снижению производительности установки и к перерасходу топлива, электроэнергии и других материальных средств, т. е. к повышению себестоимости продукции.

Различные тепловые режимы обеспечивают следующие тепловые способы обработки материалов и изделий: сушка, дегидратация или удаление гидратной влаги, тепловлажностная обработка при нормальном давлении и при давлении, большем атмосферного, обжиг без спекания материала, обжиг с частичным спеканием, плавка, варка.

2. Основные показатели работы тепловых установок

Тепловая обработка строительных материалов и изделий, особенно проходящая при высоких температурах (обжиг цемента при 1400°, расплав горных пород в производстве минеральной ваты при 1600°), обусловливает большие затраты как на тепловое оборудование, так и на топливо, что отражается в себестоимости выпускаемой продукции величиной топливной составляющей. Топливная составляющая в себестоимости продукции является одним из основных показателей работы тепловой установки. При производстве железобетонных изделий она равна 5—7%, гипса — 8—10%, строительного кирпича—12—15%, цементного клинкера—20—25%. Усилия конструкторов и эксплуатационного персонала заводов должны быть направлены на снижение величины топливной

составляющей при одновременном улучшении качества продукции.

Снижение доли затрат на обслуживающий персонал в себестоимости достигается комплексной механизацией и автоматизацией производства вплоть до создания завода-автомата по выпуску данной продукции.

Другим основным показателем работы тепловых установок является удельный расход тепла на обработку материала или изделия, приходящийся на единицу готовой продукции:

$$q = \frac{Q}{G}, \tag{1}$$

где q — удельный расход тепла в *ккал* на единицу продукции;
Q — расход тепла в *ккал/час*;
G — производительность установки в единицах продукции в час.

За единицу продукции принимается в различных случаях: 1 *кг*, 1 000 шт. (кирпича) и т. д. В сушильных установках удельный расход тепла относят к 1 *кг* испаренной влаги. Параллельным показателем является удельный расход $b_у$ условного ($Q^р_н = 7\,000$ *ккал/кг*) топлива на единицу продукции:

$$b_у = \frac{B_у}{G} = \frac{Q}{7\,000G} = \frac{q}{7\,000}\ [кг/кг], \tag{2}$$

где $B_у$ — часовой расход условного топлива в *кг/час*.

Удельные расходы тепла или условного топлива нормируются, значения их приведены ниже в специальных разделах; фактические удельные расходы должны быть ниже нормативных за счет систематической борьбы эксплуатационного персонала за экономию топлива.

Удельные расходы тепла и топлива на единицу продукции связаны с таким показателем, как коэффициент полезного действия тепловой установки (η).

Коэффициентом полезного действия тепловой установки называется отношение полезного, необходимого для придания новых свойств материалу, расхода тепла ($Q_{пол}$) ко всему количеству тепла (Q), затраченного на тепловую обработку:

$$\eta = \frac{Q_{пол}}{Q}. \tag{3}$$

Так, например, идеальная шахтная печь для обжига известняка потребовала бы только затраты тепла на необходимый эндотермический процесс диссоциации:

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 - Q_{энд}.$$

Это тепло и считается полезным $Q_{пол} = Q_{энд}$. Процесс обжига извести в реальных шахтных печах сопровождается рядом тепловых потерь: потери тепла в окружающую среду, с уходящими при высоких температурах из печи газами и т. д. (см. раздел II, главу 3 — Тепловые балансы), в результате чего к. п. д. тепловой установки всегда ниже единицы.

Третьим основным показателем работы тепловых установок является удельный съем продукции с единицы рабочей площади или с единицы объема тепловой установки. Он характеризует интенсивность работы установки. Удельный съем продукции с 1 $м^2$ расчетной площади теплового агрегата (например, площади сечения в свету шахтной печи для цемента или извести) вычисляется по формуле

$$g_f = \frac{G}{F} \; [кг/м^2 час], \qquad (4)$$

где g_f — удельный съем продукции в *кг/м² час* или *т/м² сутки*;
G — выход продукции в *кг/час* или *т/сутки*;
F — площадь рабочего сечения агрегата в $м^2$.

Удельный съем продукции с 1 $м^3$ рабочего объема установки (например, шахтной печи, варочного котла и т. д.) определяется по формуле

$$g_v = \frac{G}{V} \; [кг/м^3 час], \qquad (5)$$

где V — рабочий объем установки в $м^3$.

Для анализа работы кольцевых печей, обжигающих строительный кирпич, служит тот же показатель в форме месячного съема в штуках кирпича с 1 $м^3$ рабочего объема обжигательного канала кольцевой печи ($g_v = m$, *шт/м³ месяц*).

3. Требования к конструкции тепловой установки

Требования к конструкции тепловой установки после ознакомления с основными показателями работы установок могут быть сформулированы следующим образом.

1. Обеспечение заданной производительности при высоком качестве продукции.

2. Высокий к.п.д. установки, малые удельные расходы тепла и условного топлива на единицу продукции.

3. Малогабаритность установки. Высокий съем продукции с 1 $м^2$ расчетной и производственной площадей или с 1 $м^3$ расчетного и производственного объемов.

4. Выполнение установки из недефицитных материалов, невысокий расход специальных сталей и дорогих огнеупоров. Сборность конструкций.

5. Непрерывность действия, механизация и автоматизация процессов тепловой обработки. Удобный и быстрый контроль, а также эффективное регулирование процесса.

6. Техническая безопасность работы обслуживающего персонала.

7. Доступность, быстрота и удобство ремонта с применением запасных узлов и деталей установки.

8. Небольшие капитальные вложения на сооружение тепловой установки; долговечность, малый процент годового износа (амортизации).

4. Краткий исторический обзор развития теплотехники в производстве строительных материалов и изделий

Тепловая обработка строительных материалов и изделий возникла еще в древности в связи со строительством сооружений из искусственных камней и с необходимостью изготовления вяжущих веществ. Первые печи по схеме и экономичности были далеки от совершенства, но удовлетворяли примитивным потребностям в обжиге. В России строительство храмов, теремов и других сложных и оригинальных архитектурных сооружений обусловило широкое применение керамических обожженных изделий.

Первые научные основы промышленной, так же как и теоретической, теплотехники дал М. В. Ломоносов (1711—1765 гг). В 1763 г. в работе «Первые основания металлургии или рудных дел» и в специальном приложении «О вольном движении воздуха в рудниках примеченном» Ломоносов сформулировал положения для создания теории печей. Вместе с теорией Даниила Бернулли (1738 г.) о превращении напоров («Гидродинамика») учение М. В. Ломоносова явилось впоследствии основой гидравлической теории печей, развитой проф. В. Е. Грум-Гржимайло (1864—1928 гг.), которая имела большое прогрессивное значение для развития науки о печах и их элементах, работающих при естественном побуждении движения газов.

Желание интенсифицировать работу печи привело Григория Махотина (1743 г.) к созданию двухфурменной системы дутья в шахтных печах.

В 1829 г. в Англии на заводе в Клайде было впервые введено горячее дутье, что привело к перевороту в печном деле, показав пути к резкому повышению температур и к дальнейшей интенсификации работы печи. Это достижение уже к 1833 г. было эффективно освоено в России, на Кушвинском заводе.

В 1816 г. русский механик И. Штегер для обжига кирпича предложил оригинальную конструкцию напольной печи, где отсутствовали топки для сжигания топлива. В этой печи дрова сжигались непосредственно между садкой сырца, как это стало характерно впоследствии для современных кольцевых печей. Им же впервые предложен способ использования тепла остывающей печи для сушки сырца.

В результате большой научно-исследовательской работы русский профессор А. Больман (в 1850—1854 гг.) сконструировал непрерывно действующую печь для обжига кирпича, извести и керамических изделий. Печь состояла из 6 камер, в каждой из которых проходил свой цикл обжига. Выходящие из камеры, находящейся на обжиге, дымовые газы направлялись на подготовку свежепосаженного сырца в соседние камеры по специально устроенным дымовым каналам.

Спустя несколько лет, в 1858 г. Ф. Гофман (Германия) изобрел кольцевую печь, использовавшую те же принципы, что были в печи Больмана. В 1871 г. на газообразном топливе были пущены в эксплуатацию многокамерные печи Мендгейма.

Автоклавный способ производства силикатного кирпича в сосудах под давлением пара 7 ÷ 8 *ати* был предложен в 1880 г. Михаэлисом (Германия). В России на силикатных заводах применялись немецкие автоклавы длиной 9 *м* и диаметром 2 *м*.

Для сушки глиняного кирпича слесарь Артемкин предложил конструкцию туннельной сушилки, а Поляков и Ковтунов — комбинированного агрегата, состоящего из обжигательной кольцевой печи и туннельной сушилки. В дореволюционной России даже замечательные идеи отдельных ученых не могли быть претворены в жизнь из-за крайней отсталости материально-производственной базы и ориентировки правительства на постоянную экономическую зависимость от иностранного капитала. Многие тепловые установки и даже огнеупоры, необходимые для сооружения печей, в значительной мере ввозились из-за границы.

Великая Октябрьская революция совершила коренной переворот и в науке, и в технике.

Отличительными особенностями развития техники тепловых установок при Советской власти являются: во-первых, удовлетворение требованиям важных задач, поставленных партией и правительством в деле быстрого роста строительства в нашей стране на базе высшей техники; во-вторых, вовлечение в движение за прогрессивную науку и технику не только отдельных ученых и специально созданных в СССР научно-исследовательских институтов, но и целой массы рабочих-новаторов и изобретателей.

В настоящее время в СССР созданы передовые теории в области тепловой обработки различных строительных материалов и изделий, использующие все лучшее в отечественной и зарубежной науке, разработаны прогрессивные конструкции и методы эксплуатации тепловых установок.

Теория теплообмена развита в трудах М. В. Кирпичева, А. А. Гухмана, М. А. Михеева, В. Н. Тимофеева, Г. П. Иванцова, Б. И. Китаева и других советских ученых. Вопросы горения топлива разработаны Н. Н. Семеновым, Д. А. Франк-Каменецким, Г. Ф. Кнорре, А. С. Предводителевым. В решении вопросов газификации различных топлив большую роль сыграли работы Н. Н. Доброхотова, Д. Б. Гинзбурга, З. Ф. Чуханова. Труды Л. К. Рамзина, М. Ю. Лурье, А. В. Лыкова и специальные работы научно-исследовательских институтов СССР (ВТИ, РОСНИИМС, ЦНИИСМ УССР и др.) посвящены теории сушки. Теория печей создана трудами В. Е. Грум-Гржимайло, М. А. Павлова, Н. Н. Доброхотова и других ученых. Новая теория тепловлажностной обработки бетонных, железобетонных, силикатных и других изделий разрабатывается трудами А. В. Волженского, Н. А. Попова. Конструкции тепловых установок успешно создаются проектными

институтами Росстромпроект, Гипростройматериалы, Теплопроект и рядом других организаций.

5. Ведущие направления развития тепловых установок в СССР

Контрольными цифрами развития народного хозяйства СССР на 1959—1965 гг., изложенными в тезисах доклада Н. С. Хрущева на XXI съезде КПСС, предусмотрен дальнейший мощный подъем всех отраслей народного хозяйства на основе преимущественного роста тяжелой промышленности. Так, производство чугуна в 1965 г. по сравнению с 1958 г. возрастет на 65—77%, стали на 56—65%, проката на 52—64%.

Предстоящее семилетие будет периодом небывалого развертывания строительства. Объем государственных капиталовложений увеличится в 1,8 раза по сравнению с предыдущим семилетием и будет почти равен объему капиталовложений в народное хозяйство за все годы Советской власти.

Увеличение размеров промышленного и гражданского строительства обусловливает необходимость значительного увеличения производства строительных материалов и изделий, в частности цемента в 2,2—2,4 раза, сборных железобетонных конструкций и деталей в 2,5 раза.

Чтобы обеспечить высокие темпы производства и одновременно снизить себестоимость выпускаемой продукции, должны быть проведены все мероприятия по внедрению новой техники в производство и по правильной его организации.

Все это полностью относится и к тепловым установкам. Морально устаревшие агрегаты должны быть заменены новыми или реконструированы в механизированные и автоматизированные агрегаты с полным оснащением контрольно-измерительными приборами с использованием для этих целей в отдельных случаях атомной энергии. Должно быть расширено применение горячего дутья и дутья, обогащенного кислородом, в печах, что резко увеличивает съем с 1 $м^3$ печи и снижает удельные расходы топлива. Повышение температурного уровня в печах для интенсификации теплообмена потребует большей выработки и применения высокостойких огнеупоров. Должно быть расширено применение высокоэффективных схем сушки и обжига во взвешенном и полувзвешенном состояниях (в «кипящем слое»). Печи периодического действия должны заменяться туннельными, конвейерными и другими механизированными печами непрерывного действия.

От автоматизации отдельных установок необходимо переходить к созданию заводов-автоматов.

В области использования топлива должны выполняться указания В. И. Ленина о рациональном использовании местных топлив, для чего в соответствии с характеристикой сжигаемого топлива следует конструировать несложные, недорогие топки.

Если в 1946 г. в топливном балансе СССР около 80% всего ко-

личества условного топлива, сжигаемого в нашей стране, составлял уголь и только 20% нефть, то в новой структуре топливного баланса, изложенной Н. С. Хрущевым в докладе на юбилейной сессии Верховного Совета СССР, соотношение обратное. За ближайшие 15 лет, к 1972 г., добыча угля будет доведена до 650—750 млн. *т*, нефти — до 350—400 млн. *т*, газа — до 270—320 млрд. $м^3$ в год.

Как видно из этих цифр, доля эффективных и экономичных топлив, нефти и газа возрастает с 20 до 63%, в то время как доля твердого топлива снижается до 37%. Ориентация на добычу и сжигание в первую очередь нефти и газа приведет к экономии огромных средств, составляющих за 1958—1972 гг. сумму в 240 млрд. руб.

Основная часть тепловых установок в ближайшее время будет переведена на сжигание природного газа и мазута. При переводе на эти топлива, как правило, не только снижается топливная составляющая в себестоимости продукции, но и повышается производительность установки. Установки, работающие на жидком и газообразном топливе, значительно проще автоматизировать, чем установки на твердом топливе. Если заводы строительных изделий расположены близ теплоэлектроцентралей, они должны быть теплофицированы для использования дешевого пара от ТЭЦ.

В связи с этим на местных видах топлива должны работать только те тепловые установки, для которых технико-экономические расчеты показывают рентабельность использования этих топлив.

Раздел первый

ТОПЛИВО, ТОПКИ, ГАЗОГЕНЕРАТОРЫ

ГЛАВА I

ТОПЛИВО

1. Источники тепла и методы сжигания топлива

Источниками тепла в установках для тепловой обработки строительных материалов и изделий являются: теплота сгорания топлива, тепло пара, горячей воды или масла, электроэнергии, а в некоторых случаях и теплота экзотермических реакций, развивающихся в процессе обработки материалов. Принципиальные схемы использования тепла от этих источников показаны на рис. 1.

Применение электрического тока для тепловой обработки строительных материалов и изделий пока относительно невелико, однако быстрый рост в СССР мощных тепловых и гидроэлектростанций, их дешевая энергия и удобство использования электрической энергии для создания разных тепловых режимов приведет к расширению использования электрической энергии (для сушки, обжига, плавки) (рис. 1,*1*).

Паровой обогрев распространен в сушилках, в установках тепловлажностной обработки и т. п. (рис. 1,*2*).

В настоящее время более 90% расходуемого тепла получают сжиганием различных видов топлива непосредственно на заводских технологических установках.

Методы сжигания топлива таковы.

Если материал обрабатывается при невысоких в среднем температурах, топливо сжигается в топках полного сгорания. В этом случае передача тепла в рабочем пространстве от газов к материалу происходит только за счет отдачи физического тепла газов и поэтому тепловой режим здесь характеризуется резким падением температуры газов от высоких при входе в рабочее пространство (800—1600°) до сильно пониженных при выходе из него (100—300°). Так работают шахтные печи (при невысокой температуре обжига, например, гипса), сушильные барабаны (рис. 1,*3*) и т. д. С топками полного сгорания также работают вертикальные обжигательные и сушильные трубы, где тепловая обработка материала происходит во взвешенном состоянии (рис. 1,*4*). Здесь при прямотоке дымовые газы служат не только теплоносителем, но и транс-

портирующим агентом. Топками полного сгорания оборудуются установки, обрабатывающие материал при вихревом его движении (рис. 1,*5*), и вращающиеся печи (рис. 1,*6*).

Топки неполного сгорания применяются в периодических печах для керамических изделий. Тепловой режим в них требует высокой

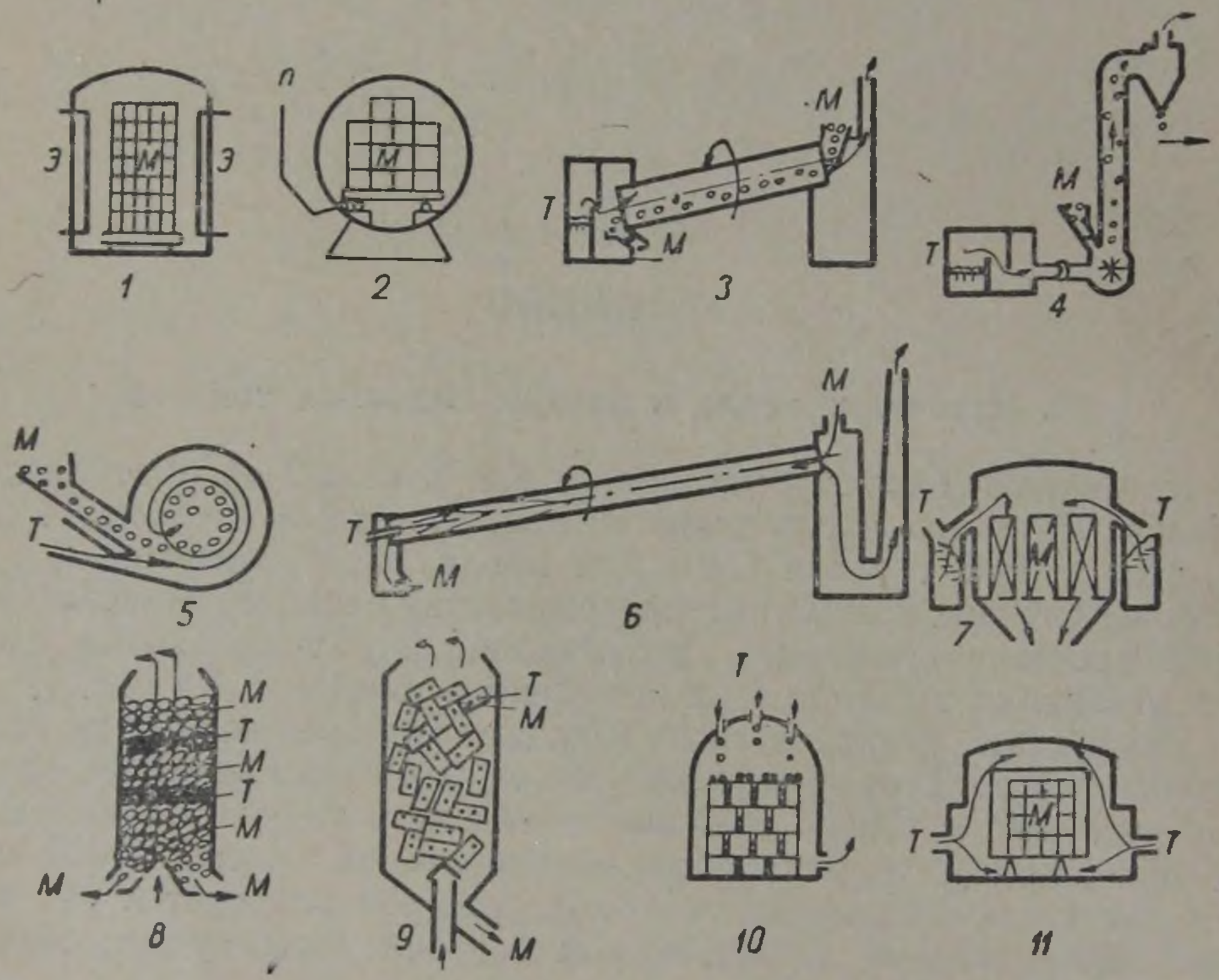


Рис. 1. Принципиальные схемы способов нагрева материалов и изделий

Э — электроды; *Т* — топливо; *П* — пар; *М* — материал

и равномерно распределенной температуры во всем рабочем пространстве печи. В этом случае, наоборот, разница температур греющих газов в печи на входе и на выходе должна быть минимальной (20—50°), и передача тепла здесь только за счет падения температуры (теплосодержания) дымовых газов экономически нецелесообразна. Равномерность обжига в таких печах достигается тем, что рабочее пространство заполняется горючим газом, сгорание которого происходит вблизи самих изделий. При печах (рис. 1, 7) строятся специальные технологические полугазовые топки для твердого топлива. Из них выходит полугаз с теплотой сгорания $Q_н^с = 500 — 600$ *ккал/нм*³ и температурой $t = 800—1000$°С. При сгорании в рабочем пространстве печи используется и физическое и химическое тепло полугаза.

Топливо может сжигаться в самой печи пересыпным методом (рис. 1,*8*), при котором горение топлива происходит непосредствен-

но между слоями обжигаемого материала. Такой метод применяется в шахтных известеобжигательных печах, вагранках и т. д.

Желание создать наибольшую равномерность обжига материала или изделий привело к созданию метода запрессовки мелкого топлива в сырьевые брикеты, например обжиг цементного клинкера в шахтных печах (рис. 1,*9*), или в массу, идущую на формовку, а затем на обжиг керамических изделий.

Обжиг изделий может происходить и таким образом, что топливо, как твердое (рис. 1, *10*), так газообразное и жидкое, сгорает между садкой изделий, как это имеет место в кольцевых и туннельных печах.

Изделия, особо чувствительные к газовой среде, обжигаются в муфельных печах, не соприкасаясь с дымовыми газами. Теплопередача от газов к изделиям происходит через стенки муфеля (рис. 1,*11*).

Таким образом, поскольку условия тепловой обработки строительных материалов и изделий весьма сложны и разнообразны, требования к технологическим топливосжигающим устройствам в различных случаях таковы: чистота газов (при обжиге архитектурной керамики), равномерное распределение температур в рабочем пространстве и создание восстановительной, окислительной и нейтральной среды по периодам (в периодических печах для керамических изделий), особо высокая температура процесса (в плавильных печах), обеспечение мягкого режима при невысоких температурах и повышенной влажности (при сушке фасонной керамики) и т. д. Удовлетворение этих требований достигается правильным выбором источников тепла и методов сжигания топлива.

58429

2. Основные свойства топлива

Общие понятия о топливе известны из курса теплотехники. В табл. 1 приведены основные характеристики топлив, применяющихся в промышленности строительных материалов и изделий. Одной из главных характеристик топлива является его низшая теплота сгорания ($Q_н^р$ *ккал/кг*), определяемая на калориметрической установке в лаборатории. Для сравнения топлив по этой характеристике введен коэффициент условного топлива (для условного топлива $Q_и^р = 7\,000$ *ккал/кг*), который определяется по формуле

$$k_у = \frac{Q_н^р}{7\,000}. \qquad (I\text{-}1)$$

Топливо характеризуется также калориметрической температурой горения $t_к$:

$$t_к = \frac{Q_н^р}{V_г^0 c_г} \text{ [град.]}. \qquad (I\text{-}2)$$

Библиотека Павлодарского индустриального института
Библиотека Всесоюзн. заочн. машиностроит. ин-та

Здесь $V_г^0$ — объем продуктов полного сгорания топлива при избытке воздуха, равном единице, в *нм³/кг*, см. раздел первый, гл. V;

$c_г$ — удельная теплоемкость продуктов сгорания при температуре $t_к$ в *ккал/нм³ град*.

Высокая температура $t_к$ достигается при высококалорийных топливах ($Q_н^р$) и при малых объемах продуктов сгорания ($V_г^0$). В практических процессах большое значение имеет действительная температура сгорания (см. ниже), которая зависит также и от коэффициента избытка воздуха, его подогрева и других факторов.

Влажность топлива. Повышенная влажность топлива вызывает перегрузку транспорта, затруднения при топливоподаче, в зимнее время смерзание, а следовательно, поломки механизмов. Влажное топливо требует увеличенной затраты электроэнергии на помол, понижает температуру горения и интенсивность газификации. Влажные продукты сгорания вызывают коррозию металлических частей установки. Так как важна относительная влажность топлива, то пользуются понятием приведенной влажности топлива или количеством влаги на каждые 1 000 *ккал* его теплоты сгорания $W^п = \frac{1\,000\,W^р}{Q_н^р}$. Основные и приведенные характеристики некоторых топлив приведены в табл. 1.

Зольность топлива. Зольность оценивается по химическому составу, по приведенной величине $A^п = \frac{1\,000\,A^р}{Q_н^р}$ и по температурам: t_1 — начала деформации, t_2 — начала размягчения и t_3 — жидкоплавкого состояния (см. табл. 1). Химические свойства золы должны быть известны при сжигании топлива в контакте с материалом, а также при выборе футеровки печей, так как зола может активно разрушать материалы. Если температура t_3 выше 1425°, зола считается тугоплавкой, в интервале 1425—1200° — среднеплавкой и ниже 1200° — легкоплавкой. Зола удорожает перевозки, увеличивает трудоемкость работ по золо- и шлакоудалению. Легкоплавкая зола заливает решетки топок и газогенераторов, затрудняя равномерный проход воздуха, идущего на горение. Откладывающаяся в дымоходах, рекуператорах и т. д. зола нарушает аэродинамический режим и снижает производительность установок. Зола быстро изнашивает металлические поверхности, эродируя и корродируя их.

Сера. Сера вместе с водяными парами образует сернистую кислоту, быстро разрушающую металлические поверхности тепловых установок. При работе установок с положительным давлением в газовом тракте сернистые газы, выбиваясь наружу, вызывают отравления в цехах.

Летучие вещества топлива состоят из горючих газов CO, H_2, $H_п$ и не горючих N_2, O_2, CO_2, а также паров воды. Выход летучих зависит от вида топлива и условий, при которых этот выход происходит. Чем больше выход летучих, тем ниже температура воспламенения легче зажигание и больше объем пламени. Такое топ-

Таблица 1

Основные и приведенные характеристики некоторых топлив

Топливо	Низшая теплота сгорания $Q^{р}_{н}$ в *ккал/кг*	Выход летучих $V^{г}$ в %	Калориметрическая температура горения $t_{к}$ в град.	Температура жидкоплавкого состояния золы $t_{з}$ в град.	Коэффициент условного топлива $k_{у}$	Приведенные			Насыпной вес топлива $\gamma_{ср}$ в *кг/м³*
						стоимость $Ц^{п*}$ в руб./млн. *ккал*	влажность $W^{п}$ в %/тыс. *ккал*	зольность $A^{п}$ в %/тыс. *ккал*	
Донецкие									
Каменный уголь марки Г . . .	5 900	39	2 100	1 220	0,843	19,8	1,19	2,59	900
Антрацит АМ .	6 500	4	2 170	1 200	0,929	18,2	0,77	2,05	950
„ АРШ .	6 100	4	2 170	1 250	0,871	15	0,99	2,77	1 000
„ АШ .	6 010	4	2 170	1 250	0,859	11,8	1,17	2,78	1 200
Подмосковный Б	2 510	45	1 730	1 500	0,358	23,3	13,15	9,35	850
УССР, правобережный Б . . .	1 650	60	1 400	1 320	0,236	18,2	32,1	8,55	670
Урал, Кизеловский Г	4 910	44	2 070	1 450	0,702	18,3	1,12	5,96	950
ЭССР, сланец . .	2 720	90	1 900	1 430	0,389	16,3	5,22	13,74	1 050
Торф кусковой . .	2 560	70	1 650	1 260	0,366	18,7	15,62	2,58	420
Дрова	2 440	85	1 630	—	0,348	20,5	16,4	0,25	400
Мазут малосернистый	9 310	—	2 100	—	1,3	33,1	0,32	0,03	998
Газ природный ставропольский	11 700 / 8 600***	100	2 050	—	1,67 / 1,22***	9,4	0	0	0,73

* Стоимость 1 млн. *ккал* в топливе принята по ценам 1956 г. на топливо франко-место добычи.

** Насыпной вес твердого топлива $\gamma_{ср}$ в *кг/м³* взят усредненный. Для газообразного и жидкого топлива указан удельный вес соответственно в *кг нм³* и *кг/м³*.

*** В знаменателе – отнесено к 1 *нм³* газа.

ливо поэтому требует большого топочного пространства, оно неприменимо при пересыпном способе сжигания топлива.

Кокс состоит из оставшихся после выхода летучих углерода и серы, а также золы. Спекающиеся угли типа коксовых, ПЖ дают сплавленный плотный кокс. Неспекающиеся топлива — торф, бурые угли, антрацит, каменные угли Т, Д — оставляют кокс в виде порошка. Слабоспекающиеся угли — СС, ПС, Г — дают непрочно слипшийся кокс.

Реакционная способность топлива характеризует способность топлива восстанавливать углекислоту при пропускании ее через слой разогретого топлива в окись углерода. Реакционная способность зависит от условий протекания процесса и от вида топлива. Она незначительна при невысоких (900°) температурах и быстро возрастает с повышением температуры. Так, например, если при 1000° за 10 сек. восстанавливается в CO только 20% CO_2, то при 1100° CO — 75%, а при 1200° уже больше 95%. При увеличении давления интенсивность восстановления уменьшается. При одних и тех же условиях разные виды топлива восстанавливают различ-

ные количества углекислоты; в течение 5 сек. при температуре 1100° древесный уголь почти полностью восстанавливает CO_2 в CO, кокс 50% и антрацит около 40%. Выбор топлива по реакционной способности имеет большое значение при газификации и сжигании топлива в толстом слое.

3. Выбор топлива

При выборе топлива для определенных условий его сжигания, помимо технических характеристик, надо знать стоимость топлива как в месте добычи, так и с учетом стоимости перевозок, на месте потребления. В табл. 1 указана стоимость 1 000 *ккал* основных видов топлива в месте добычи. Одновременно надо учитывать стоимость подготовки различных топлив к сжиганию и топочных устройств.

В первую очередь должны быть рассмотрены возможности использования местного топлива (выбор недорогих, но рациональных топок, обогащение топлива и т. п.), что обеспечивает бесперебойность работы предприятия и независимость его от дальнего снабжения. Практически любые виды топлива могут быть использованы в топках полного сгорания сушилок, гипсоварочных котлов.

Наиболее рациональным является использование природных горючих газов. Природный газ отвечает всем требованиям технологии: он высококалориен, чист, не содержит балласта (воды, золы) и смол. Сжигание его может быть полным, регулирование тепловых режимов легко и удобно. Он не требует дорогих сооружений при сжигании.

Твердое топливо может сжигаться в установках после предварительной газификации. Полученный искусственный газ имеет меньшую теплоту сгорания и стоит дороже природного. Однако высокие качества газа как топлива оставляют и для генераторного газа широкие области применения (туннельные печи для керамики и т. п.).

Во вращающихся печах, где требуются высокие температуры и основная доля тепла передается лучеиспусканием, чаще всего применяется сжигание топлива в виде угольной пыли. Топливом служат газовые, тощие угли и антрациты, обычно их смесь. Используются природные и искусственные газы при теплоте сгорания выше 3 500—4 000 *ккал/нм*^{3}. Мазут весьма пригоден для вращающихся печей из-за высокой лучеиспускательной способности его факела.

Шахтные печи при пересыпном способе требуют сортированных топлив с высокой механической и термической стойкостью, незначительной (до 25%) реакционной способностью, с малым (до 5%) выходом летучих, с малой зольностью (антрациты, каменные угли *СС*, Т; для вагранок — кокс). Для газификации, наоборот, наиболее пригодны топлива с высокой реакционной способностью, не выделяющие смолы, с малой влажностью, что облегчает очистку генераторных газов. Шахтные печи с полугазовыми топками работают на топливах с большим выходом летучих.

Кольцевые печи наименее требовательны к топливу. Однако многозольные топлива с легкоплавкой золой нежелательны, так как вызывают оплавление ножек садки. В этих печах широко используются топливные отходы (паровозная изгарь, опилки и т. д.).

4. Хранение и методы обогащения топлива

Для обеспечения бесперебойной работы каждое предприятие оборудуется топливным складом с 30—45-дневным запасом топлива. Полуторамесячный запас принимается при дальности перевозки топлива свыше 500—600 *км*. Топливный склад должен быть так организован, чтобы потери топлива по весу и снижение его качества при хранении были бы минимальны и, во всяком случае, ниже потерь, допускаемых нормами. Степень совершенства склада ($\eta_{ск}$) топлива может быть выражена так:

$$\eta_{ск} = \frac{B_м}{B_м'} \cdot \frac{Q_н^р}{Q_н^{р'}} = \beta_{ск} q_{ск}, \qquad (I\text{-}3)$$

где $B_м$ — месячный расход топлива потребителями в *кг/месяц*;

$Q_н^р$ — теплота сгорания топлива при поступлении со склада в газогенераторную, в печное, в сушильное отделения или к другим потребителям, в *ккал/кг*;

$Q_н^{р'}$ и $B_м'$ — те же показатели, но по состоянию в момент прибытия топлива на склад.

На хорошо оборудованном и правильно эксплуатируемом складе величина $\eta_{ск}$ близка к единице. Потеря в весе ($\beta_{ск} < 1$) является следствием уноса мелких фракций ветром с поверхностей штабеля и развеивания при неудачно выполняемых перегрузках (падение топлива с большой высоты, частые переброски его и т. д.). Так, например, если разгрузка топлива с высоты 2,3 *м* дает процент потерь: для антрацита 0,5%, для газового 1%, для бурого 1,5%, то одно только увеличение высоты падения до 3,5 *м* увеличивает потери топлива соответственно до 2,6—4,7—7,3%, или почти в 5 раз. Потери в весе происходят и при втаптывании топлива в землю, если площадь склада не уплотнена. Относительное снижение теплоты сгорания топлива ($q_{ск}$) происходит при загрязнении топлива золой, выветривании и частичном возгорании из-за отсутствия надлежащего послойного уплотнения штабеля, при обильном насыщении топлива влагой (для твердого за счет атмосферных осадков, для жидкого за счет неплотности подогревателей, когда конденсат греющего пара проникает в топливо).

Площадь склада для каждого сорта твердого топлива определяется по формуле

$$F_{ск} = \frac{B_у^{год} n k_0 k_р}{12 H \gamma_н k_у}, \qquad (I\text{-}4)$$

где $F_{ск}$ — площадь склада под данный сорт топлива в $м^2$;

$B_у^{год}$ — годовой расход данного сорта топлива (по условному) в *т/год*;

n — кратность запаса топлива по отношению к среднемесячному с учетом максимума расхода в отдельные месяцы;

k_0 — коэффициент, равный 1,68—1,07 и зависящий от угла естественного откоса топлива. Он учитывает отклонение объема штабеля от объема правильного параллелепипеда при той же площади основания. В пределах угла естественного откоса $\alpha = 25°—50°$ и величины отношения a/H верхней стороны трапеции a к высоте штабеля H от 1 до 10 k_0 равен:

Угол α в град.	a H				
	1	2	3	5	10
25	1,68	1,52	1,41	1,29	1,17
30	1,63	1,46	1,37	1,25	1,15
40	1,54	1,37	1,28	1,19	1,10
50	1,46	1,29	1,22	1,14	1,07

$k_р$ — коэффициент, учитывающий разрывы между штабелями для проезда и обслуживания k_1 принимается для тощих углей и антрацитов 1,5; для торфа 1,55, для бурых углей 1,65. Разрывы между штабелями зависят от высоты штабеля и соответствуют требованиям противопожарной охраны.

H — расчетная высота штабеля в *м*. Она зависит от допустимой высоты по условиям самовозгорания топлив и степени механизации склада. Так, например, если при хранении бурых углей более двух месяцев высота штабеля при ручном обслуживании ограничивается всего 1,5—2 *м*, то при наличии современных быстро работающих разгрузочных механизмов при послойном трамбовании (с давлением катков 3—4 *кг/см²*) высота складов даже для таких склонных к самовозгоранию топлив, как бурый уголь, в настоящее время не ограничивается, что обеспечивает лучшее использование складской территории;

$\gamma_н$ — насыпной вес топлива в *т/м³*;

$k_у$ — коэффициент условного топлива.

Жидкое топливо хранится в надземных или подземных резервуарах. Мазут имеет бо́льшую вязкость и повышенную температуру застывания, поэтому обязательно оборудование резервуаров и транспортирующих лотков и трубопроводов приспособлениями для обогрева паром или горячей водой. Необходимое полное освобождение мазута от воды и механических примесей достигается подогревом мазута до 60—80° (без создания конвекционных токов) и спокойной выдержкой его в течение 12 час. без добавления новых порций. Определение необходимой поверхности подогревателей делается с учетом коэффициента теплопередачи в пределах 100—150 *ккал/м² час град*.

Природный газ очищается от механических примесей, водяных паров и освобождается от тяжелых углеводородов на месте добычи, поступая на заводы уже очищенным и обезвоженным. Перед распределительными заводскими сетями давление снижается до величины, близкой к атмосферному (3 000—150 *мм* вод. ст.).

Топливо, поступившее на склад завода, должно быть подготовлено и при необходимости обогащено для сжигания его с максимальным эффектом. Подготовка топлива заключается в дроблении

крупных кусков до оптимального размера, в отсеве мелочи, в сортировке и составлении, при необходимости, нужных топливных смесей. Так как предварительная подсушка топлива имеет чрезвычайно большое значение для интенсификации работы газогенераторов, топок и для улучшения работы пылеприготовительных устройств, необходимо организовать естественную или искусственную подсушку топлива. Последняя делается, например, за счет теплоты уходящих газов печей, отработавшего пара и т. д. При сжигании топлива в пересыпных шахтных печах и газогенераторах следует готовить однородное по фракционному составу топливо так, чтобы максимальный диаметр куска не превышал минимальный более чем в 2 раза. Отсеянная мелочь сжигается в специальных топках и газогенераторах, запрессовывается после помола в обжигаемый материал или забрасывается в садку и горит между изделиями. При большом количестве мелочи топлива она может брикетироваться, что повышает теплоту сгорания: для брикетов из древесины до $Q_н^р = 6\,000$ *ккал/кг*, для антрацитов до 7 800 *ккал/кг* и т. д. Для образования прочных брикетов необходимо прессование (200—2 000 *ати*), подогрев (100—400°), иногда добавка органических вяжущих (2—15%) — смолы, битума или мазута.

ГЛАВА II

ПОНЯТИЕ О ПРОЦЕССАХ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

1. Энергия активации

Горение топлива представляет собой сложный процесс химических реакций быстрого окисления горючих, приводящий к выделению тепла и резкому росту температуры реагентов, участвующих в процессе. Сложным процесс горения является потому, что условия его возникновения и характер протекания связаны с целым рядом физических явлений (теплообмен, диффузия и т. д.), которые могут в сильной степени влиять на ход и результаты горения. Особенно сказывается это влияние в промышленных топках. Процесс горения — нестационарный процесс, но сложность его заставляет упрощать схемы исследования и рассматривать прежде всего стационарный тепловой режим горения. К настоящему времени трудами таких ученых, как Н. А. Меншуткин, Вант Гофф, Аррениус, Освальд, Н. Н. Семенов, Д. А. Франк-Каменецкий, Г. Ф. Кнорре, А. С. Предводителев, В. А. Михельсон, Л. А. Вулис и др., создано ясное представление об основных факторах и характере протекания процесса горения топлива в определенных условиях.

Как показано выше, в условиях производства строительных материалов и изделий твердое топливо сжигается: кусками в слое, во взвешенном состоянии, в виде пыли, запрессованным в обжигаемом материале и между изделиями. Жидкое топливо сжигается после его раздробления на мелкие капли, при этом увеличивается по-

верхность его соприкосновения с кислородом воздуха, поступающим на горение, что, естественно, интенсифицирует процесс горения. Горючими составляющими топлив и продуктов их пирогенетического разложения являются: углерод — С, водород — Н, окись углерода — СО, метан — CH_4 и другие углеводороды. Современное представление о кинетике горения исходит из следующего: чтобы реакция между молекулами реагирующих веществ могла бы произойти, необходимо, чтобы молекулы при своем движении столкнулись. Чем чаще это происходит и чем большей энергией обладают молекулы, тем быстрее и полнее происходит реакция горения. Существует некоторый энергетический предел и, если энергия реагирующих молекул ниже его, то реакции вообще не будет, так как при столкновении молекул для перегруппировки их атомов и для завершения реакции необходимо предварительное ослабление и разрушение молекулярных связей.

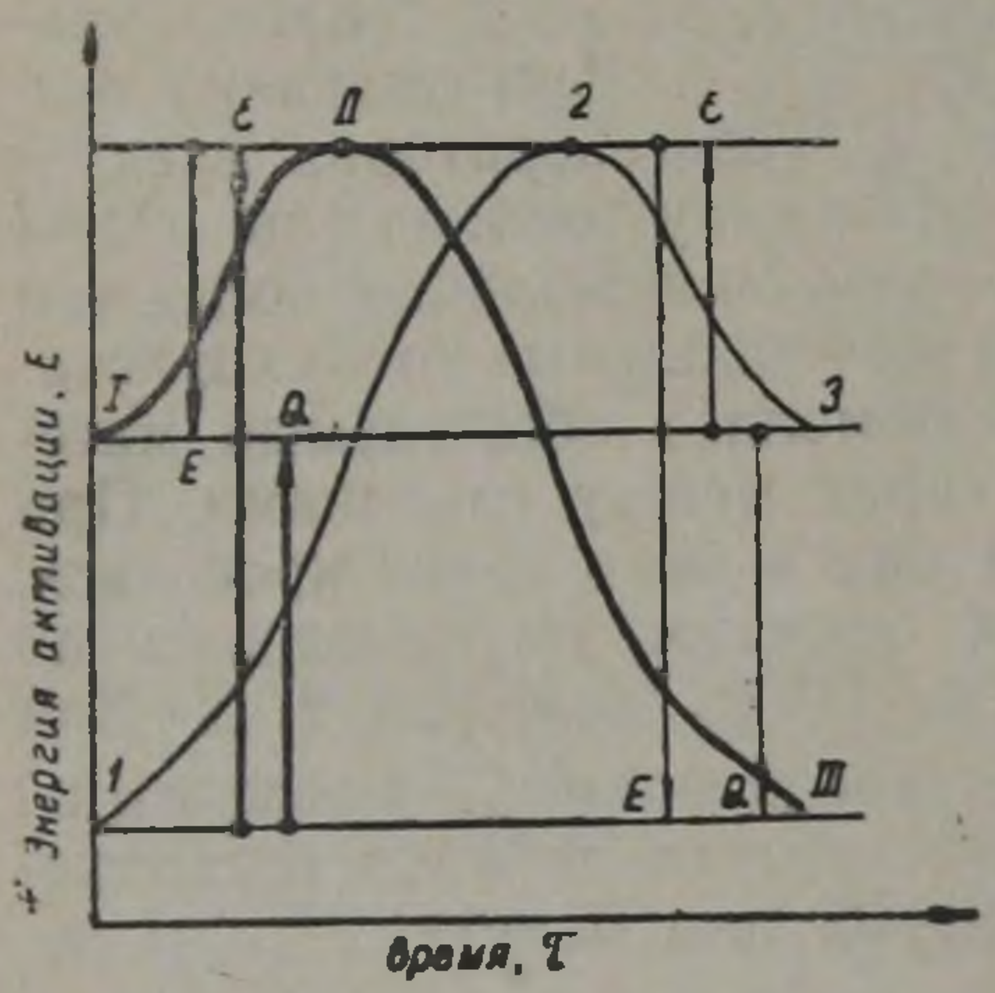


Рис. 2. График зависимости энергии активации E от времени τ

Это предварительное разрушение будет обеспечено только в случае, если молекула обладает запасом энергии не ниже «энергии активации». Как видно из рис. 2, при экзотермической реакции (*I—II—III*) энергия активации $E=E_{II}-E_{II}$, необходимая для перевода системы в активное состояние, меньше, чем выделенная затем энергия $\varepsilon=E_{II}-E_{III}$, и тепловой эффект реакции $Q=E_{I}-E_{III}$ положителен. При эндотермической реакции (*1—2—3*) тепловой эффект реакции отрицателен. Энергия активации, по данным Х. И. Колодцева, Н. А. Каржавиной и др., для характерных процессов горения составляет: $C+0{,}5O_2=CO$ 41 000 *ккал/моль*; $C+O_2=CO_2$ 29 000 *ккал/моль*; $C+CO_2=2CO$ 40 000 *ккал/моль*; $CO+0{,}5O_2=CO_2$ 15 000—34 000 *ккал/моль* (большие цифры для бедных смесей и для высоких температур).

Отсюда практически важный вывод — реакция окисления углерода в CO_2 происходит быстрее, чем реакция восстановления CO_2 в СО. Энергия активации при горении водорода 18 000 *ккал/моль*.

2. Цепные реакции. Индукция

В настоящее время понятия о горении базируются на теории цепных реакций, разработанной акад. Н. Н. Семеновым. Согласно этой теории, горение представляет собой цепную реакцию с раз-

ветвляющимися цепями, когда каждая активная молекула быстро порождает несколько новых активных центров, что приводит к воспламенению и сгоранию в короткое время. Так, например, горение водорода, конечное стехиометрическое уравнение которого $2H_2+O_2=2H_2O$, происходит в действительности по сложной цепной реакции так: молекула водорода H_2 сталкивается с какой-либо активной молекулой М. Это приводит к разрушению связей и образованию высокоактивного неустойчивого атомарного водорода: $H_2+M=2H+M$. Цепная реакция с разветвляющимися цепями приводит к возникновению новых активных центров — О, Н, ОН, а также H_2O:

$$H + O_2 = OH + O;$$

$$O + H_2 = OH + H;$$

$$OH + H_2 = H_2O + H \text{ и т. д.}$$

Эти неустойчивые промежуточные продукты реакции являются активизаторами быстрого разветвления и завершения реакции. Реакция горения водорода происходит лишь при температуре более 500°, при меньших температурах окисление водорода идет без воспламенения. Горение CO, CH_4, C_mH_n также идет по схемам с разветвляющимися цепями. Окись углерода при температуре ниже 700° не горит, если отсутствуют такие активные центры, как Н и H_2O. Углеводороды начинают окисляться уже при 100—200°. После 600° медленное окисление переходит в воспламенение. Недостаточное количество окислителя приводит к выделению из газов углерода в виде сажи. Сажа — прямая потеря топлива, если она не догорает в рабочем пространстве печи и уходит с дымовыми газами в окружающую среду. Напротив, догорая в рабочем пространстве печи, она как светящееся тело обусловливает передачу тепла лучеиспусканием.

Реакции с разветвляющимися цепями обладают некоторым периодом разгона, который носит название периода индукции. В этот период происходит накапливание активных центров реакции без заметного теплового эффекта. Период индукции зависит, помимо степени накапливания активных центров: О, Н, H_2O, H_2O_2, и от температуры — он укорачивается при ее повышении. Так, для каменного угля период индукции при воспламенении падает от 0,25 сек. (500°) до 0,01 сек. (800°), что позволяет практически сокращать его повышением температуры процесса.

3. Виды горения. Скорость и фазы горения

Горение твердого и жидкого топлива, когда горючее и окислитель находятся в различных агрегатных состояниях и окисление происходит на поверхности их раздела, относится к гетерогенному виду горения. Горение газообразного топлива относится к гомогенному виду горения. Скорость гомогенной реакции или количество реагирующего в единице объема в единицу време-

ни вещества W ($кг/м^3\ сек$) зависит от его концентрации c_0 ($кг/м^3$), поскольку с увеличением концентрации растет вероятность столкновений молекул, и от температуры T (° К), так как с повышением температуры, согласно кинетической теории газов, энергия движения молекул возрастает. Таким образом, скорость реакции

$$W = f(c_0 T) = W_{c_0} W_т. \qquad (I\text{-}5)$$

Зависимость W от c_0 менее значительна, чем от T:

$$W_{c_0} = c_0^n = (\gamma c)^n, \qquad (I\text{-}6)$$

где n — показатель степени, равный порядку реакций, обычно 1—2;
γ — удельный вес в $кг/м^3$;
c — относительная весовая концентрация вещества в $кг/кг$.

Зависимость скорости реакции от температуры устанавливается как экспоненциальная по закону Аррениуса:

$$W_т = k_0 e^{-\frac{E}{RT}}, \qquad (I\text{-}7)$$

где k_0 — полное число столкновений одной молекулы;

$e^{-\frac{E}{RT}}$ — множитель, представляющий собой долю активных столкновений, т. е. при энергии, большей энергии активации;

E — энергия активации в $ккал/моль$;
R — универсальная газовая постоянная, равная 1,986 $ккал/моль$ ° K.

Насколько значительно влияние температуры на скорость реакции видно из того, что увеличение температуры только с 300 до 800°С уже ускоряет реакцию в миллионы раз. Напротив, даже местное понижение температуры (прорывы холодного воздуха в зону горения и т. п.) резко ухудшает все показатели горения. На использовании этой зависимости основана современная практика высокого подогрева воздуха, идущего на горение, а также и низкокалорийных газов. Рециркуляция дымовых газов к месту горения вследствие обеднения среды по окислителю при равных температурах замедляет реакцию горения. Однако, если рециркулирующие газы имеют высокую температуру, приносят с собой добавочное тепло и температурный уровень процесса за счет этого может быть повышен, то реакция горения в этом случае ускоряется пропорционально комплексу $e^{-\frac{E}{RT}}$.

Подобной рециркуляцией горячих дымовых газов пользуются, например, при конструировании топок, подводя газы от раскаленного заднего свода топки к слою подготавливаемого на решетке топлива для ускорения его воспламенения. Таким образом, вновь подтверждается определяющая роль высокой температуры при горении. Однако следует отметить, что повышение температуры газов выше 1700—1800° приводит к неполному использованию горючих топлива, так как при высоких температурах происходит диссоциация молекул CO_2 и H_2O с устойчивым выделением C, CO, H,

и реакция горения идти до конца не может. Поэтому применение столь повышенных температурных режимов при тепловой обработке должно иметь место лишь в отдельных допускаемых технологией случаях, например при расплавлении в производстве минеральной ваты, некоторых тугоплавких горных пород (известняк 1700°, мергели 1800°), при варке тугоплавкого стекла (1600 ÷ 1700°) и т. д.

Степень диссоциации зависит от температуры и от парциального давления этих газов.

Горение твердого топлива, как сказано выше, является гетерогенным. Здесь общее время завершения реакции будет зависеть не только от времени, необходимого на химическую реакцию $\tau_к$, но и от времени, затрачиваемого на подвод окислителя к горючему $\tau_д$, т. е. будет равно их сумме:

$$\tau = \tau_к + \tau_д. \qquad (I\text{-}8)$$

Если $\tau_к \gg \tau_д$, то горение происходит в кинетической фазе. Если $\tau_к \ll \tau_д$, то горение диффузионное и скорость сгорания зависит главным образом от скорости подвода окислителя и замены им продуктов сгорания у поверхности горючего. Между этими двумя характерными областями горения находится промежуточная область, когда скорости диффузии и протекания реакции характеризуются соизмеримыми величинами.

При низких температурах и давлениях имеет место кинетическая фаза, и реакция окисления горючего на его поверхности протекает медленно; $\tau_к$ относительно велико, влияние $\tau_д$ незначительно и поэтому следует для интенсификации процесса основное внимание обратить на развитие факторов, сокращающих время химических реакций $\tau_к$: повысить температуру (горячее дутье) и концентрацию активных реагентов, а если возможно и давление среды; применять топливо с большей реакционной способностью и при этом быстро удалять продукты реакции из ее зоны. Изучение кинетической области горения топлива имеет большее значение в практике газификации и в работе шахтных печей, так как верхняя часть слоя топлива в них находится при низких температурах. Если весь процесс горения находится в кинетической области горения, то скорость сгорания не лимитируется недостатком кислорода, и форсирование холодным дутьем не оказывает решающего действия на ускорение процесса.

При высоких температурах реакция окисления происходит настолько быстро, что общее время горения зависит уже от скорости подвода окислителя к поверхности горючего и от активности контакта с ним. Горение при этом переходит в диффузионную область, характерную для многих топливосжигающих устройств: слоевые топки полного сгорания, нижние слои топлива в газогенераторах и т. д.

При горении твердого топлива основные реакции происходят на его поверхности, и характер горения в значительной мере зави-

сит от диффузии окислителя к поверхности и от степени ее развития. На поверхности топлива находится малоподвижный пограничный слой газов, представляющий сопротивление для диффузии, поэтому усиление дутья и повышение скорости прохождения воздуха около кусков в слое топлива приводит к уменьшению толщины инертной пленки газов, ускорению реакций на поверхности горящего топлива и к интенсификации процесса в целом. Практически активное воздействие окислителя на горючее зависит и от состояния поверхности горючего, от его пористости, от степени оплавления шлаками. Очевидно также, что чем мельче топливо (капли мазута, частицы пылевидного топлива), тем больше его поверхность на единицу веса и тем легче подвод окислителя. Поэтому во вращающихся и других печах, сжигающих в факеле угольную пыль и мазут, переход в диффузионное горение совершается значительно позже ($\sim$ 1800°), чем в слоевых топках ($\sim$ 1100°).

Характерным диффузионным процессом является и горение топлива, запрессованного в массу материала, как это имеет место в процессах обжига черного брикета при производстве цемента или при современном способе обжига кирпича. Скорость сгорания топлива зависит от условий проникновения кислорода к топливу через сырьевую массу.

При горении на свободной поверхности углерода одновременно образуются и CO и CO_2 как продукты распада промежуточного углеродно-кислородного комплекса, возникающего из углерода в начальный период окисления при повышении его температуры. В зависимости от количества окислителя и изменения температуры состав газов по мере удаления от поверхности различен. При высокой температуре зона горения сокращена и содержание CO быстро падает по мере удаления газов от поверхности. При горении же в толстом слое и подаче воздуха снизу в нижних слоях при избытке воздуха развивается высокая температура, а в составе газов преобладают углекислота и свободный кислород. По мере удаления вверх от этой интенсивной окислительной зоны горения содержание углекислоты падает в результате восстановления при прохождении ее между кусками топлива в окись углерода. Этот процесс благоприятен для получения генераторного газа или полугаза, но является органическим недостатком обычных пересыпных шахтных печей, так как восстановленная окись углерода не сгорает при низких температурах в верхней части шахты и уходит в окружающую среду, вызывая значительные потери тепла.

4. Температура воспламенения

Воспламенение горючей смеси хорошо объясняется теорией «теплового взрыва», разработанной Н. Н. Семеновым. При горении в замкнутом объеме выделяющееся тепло $Q_{тв}$ идет как на повышение температуры сгорания T, так и на отдачу во внешнюю

среду $Q_{тс}$. Как видно из рис. 3, тепловыделение при повышении температуры растет пропорционально комплексу $e^{-\frac{E}{RT}}$, в то время как кривая зависимости теплоотдачи во внешнюю среду имеет значительно меньшую кривизну и может быть принята за прямую, наклонную к оси T. Точки *1, 2, 3* пересечения кривых тепловыделения $Q_{тв}$ и теплоотдачи $Q_{то}$ во внешнюю среду, очевидно, соответствуют равенству прихода и расхода тепла $Q_{тв} = Q_{то}$ и равновесию системы. Однако характер равновесия в каждой из них различен. Равновесие устойчиво только в точке *1*. Здесь происходит процесс медленного окисления горючего. Точка *2* характеризует неустойчивое равновесие. Действительно, если температура системы несколько повысилась и стала больше T_2, то тепловыделение (по кривой $Q_{тв}$) сейчас же начнет резко превышать теплоотдачу (по линии A), что приведет к росту температуры, т. е. к дальнейшему нарушению равновесия. При первом же, даже небольшом, охлаждении ниже T_2 тепловыделение начнет быстро отставать от теплоотдачи, что приведет к падению температуры, пока не установится устойчивое равновесие в точке *1*. Если теплоотдача идет по кривой C, то тепловыделение избыточно, температура топлива высока и оно горит. Касание в одной точке *3* кривых $Q_{тв}$ и $Q_{то}$ (режим теплоотдачи по линии B) характеризует критическое состояние системы, когда после постепенного повышения в точке *3* температуры T процесс резко переходит в стадию прогрессирующего превышения тепловыделения над теплоотдачей. Это явление названо тепловым взрывом, а критическая температура в точке *3* — температурой воспламенения.

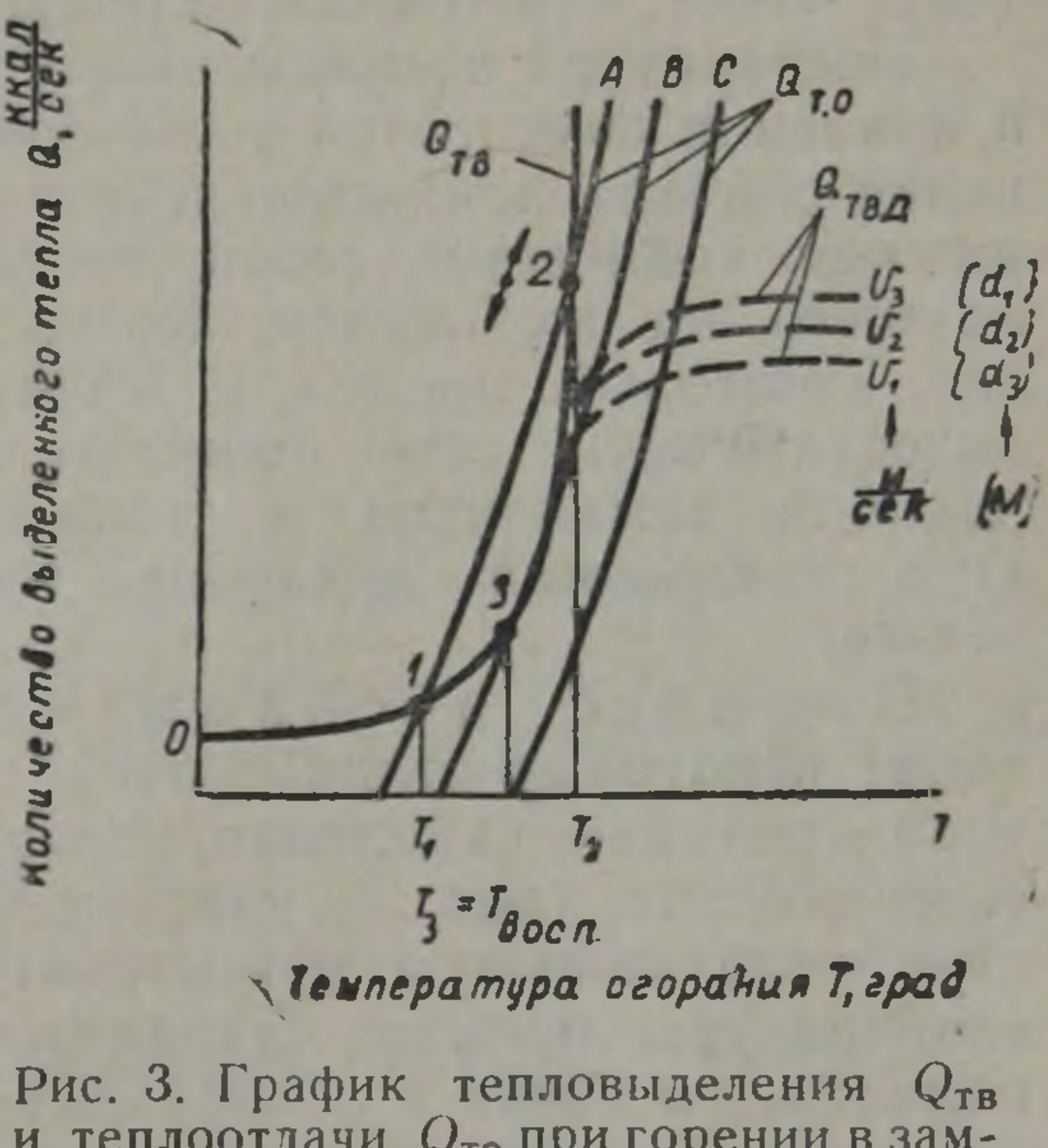


Рис. 3. График тепловыделения $Q_{тв}$ и теплоотдачи $Q_{то}$ при горении в замкнутом объеме

Как видно из вышеизложенного, температура воспламенения зависит от многих факторов, поэтому нельзя считать эту температуру постоянной физико-химической характеристикой горючих, и приводимые ниже данные надо считать в известной степени лишь ориентировочными, однако весьма важными для практического использования.

Температуры воспламенения для газов:

Водорода (H_2) . . . 600°,
Окиси углерода (CO) 700°
Метана (CH_4) . . . . 650°—750°

Для твердого топлива температуры воспламенения равны:

Древесина (V^r=85%)	250°—300°
Торф (V^r=70%)	225°—250°
Бурые угли (V^r=60÷40%)	250°—450°
Каменный уголь (V^r=40÷30%)	400°—500°
Тощий уголь (V^r=13%)	650°—700°
Кокс (V^r=6%)	600°—700°
Антрацит (V^r=4%)	650°—700°

Топлива, характеризующиеся меньшим выходом летучих (V^r=4—13%), имеют более высокую температуру воспламенения (600—700°), чем топлива с большим выходом летучих.

Температура воспламенения зависит от концентрации горючего и давления смеси. При росте концентрации температура воспламенения сначала понижается. Это объясняется относительным уменьшением количества газов, не участвующих в реакции, и тепла, идущего на их нагрев. Когда же количество горючего превысит некоторый предел и количество окислителя уже окажется недостаточным для полного окисления топлива, то скорость реакции замедлится и температура воспламенения повысится. При повышении давления температура воспламенения понижается.

Процесс воспламенения твердого топлива имеет некоторые отличительные особенности. При низких температурах реакция окисления поверхности топлива идет в кинетической области (рис. 3, участок *0—1*), скорость реакции и количество выделившегося тепла растут медленно. По мере увеличения температуры процесс становится переходным в диффузионную область и в точке *3* происходит воспламенение топлива. В диффузионной области скорость горения уже почти не зависит от температуры поверхности (рис. 3, пунктирные линии $Q_{твд}$), но увеличивается с ускорением подвода кислорода v *м/сек* и уменьшением размера частиц топлива d *м*, так как при этом увеличивается относительная величина поверхности, где происходит реакция. Поскольку большинство процессов горения в производственных условиях проходят в диффузионной области, интенсификация процессов горения достигается уменьшением размеров частиц (угольной пыли, мазута в топках, топлива в сырьевых брикетах и т. д.) и увеличением в определенных пределах скорости дутья. По мере нагревания твердое топливо начинает выделять летучие, которые сгорают над слоем топлива. Как сказано выше, чем больше выход летучих, тем ниже температура воспламенения, тем легче и более бурно протекает процесс горения топлива. При температурах среды 800—1000° все топлива воспламеняются почти мгновенно.

5. Равновесный состав газов

При горении топлива некоторые реакции являются обратимыми, идут не до конца и при росте концентраций продуктов реакции они могут получить обратное направление. При определенных ус-

ловиях (температура и давление) скорости прямой и обратной реакции становятся равными и, несмотря на продолжающийся процесс реакции, устанавливается химическое равновесие, называемое подвижным, или динамическим. В общем виде уравнение обратимой реакции может быть написано следующим образом:

$$bB + dD \rightleftarrows gG + lL, \qquad \text{(I-9)}$$

где B, D, G, L — реагирующие молекулы, а b, d, g, l — число их.

Скорости реакции выражаются уравнениями:

$$W_{\text{I}} = k_{\text{I}}\, p_B^b\ p_D^d; \qquad \text{(I-10)}$$

$$W_{\text{II}} = k_{\text{II}}\, p_G^g\, p_L^l. \qquad \text{(I-11)}$$

При равновесии $W_{\text{I}} = W_{\text{II}}$ и, следовательно:

$$\frac{k_{\text{I}}}{k_{\text{II}}} = k_{\text{p}} = \frac{p_G^g\, p_L^l}{p_B^b\ p_D^d}, \qquad \text{(I-12)}$$

где p — парциальные давления реагирующих газов;
k_{I} и k_{II} — коэффициенты в формулах скорости прямой и обратной реакции;

k_{p} — константа равновесия обратимой реакции, зависящая только от температуры. Например, для реакции восстановления углекислоты $CO_2 + C \rightleftarrows 2\ CO$

$$\text{константа } k_{\text{p}} = \frac{p_{CO}^2}{p_{CO_2}}. \qquad \text{(I-13)}$$

Для реакции процесса получения водяного газа $CO_2 + H_2 \rightleftarrows CO + H_2O$

$$\text{константа } k_{\text{p}} = \frac{p_{CO}\ p_{H_2O}}{p_{CO_2}\, p_{H_2}}. \qquad \text{(I-14)}$$

В табл. 2 приведены логарифмы константы равновесия для использования в расчетах состава газов при горении и газификации топлива.

Зная уравнение реакции и константу равновесия, можно для каждой температуры рассчитать равновесный состав газов. Для этого задаются долей (x) общего количества газов, прореагировавшей к моменту достижения равновесия, и составляют с этой неизвестной выражения для парциальных давлений отдельных газов, считая, что парциальные давления пропорциональны объемной доле каждого газа в смеси. Из формулы (I-12) константы равновесия после подстановки в нее выражения парциальных давлений с неизвестной x определяется x и, значит, состав газа при данной температуре.

На рис. 4 показан график зависимости расчетного равновесного состава водяного газа от температуры при давлении 1 *ата*. Увеличение давления в зоне реакции смещает равновесие в сторону образования многоатомных молекул. Так, если на реакцию: $CO + H_2O \rightleftarrows CO_2 + H_2$ изменение давления не оказывает влияния,

Таблица 2

Логарифмы константы равновесия

Реакция	Константа k_p	Абсолютная температура в °К			
		500	1000	1500	2000
$C+O_2 \rightleftarrows CO_2$	$\frac{p_{CO_2}}{p_{O_2}}$	41,040	20,418	13,545	10,106
$2C+O_2 \rightleftarrows 2\,CO$	$\frac{p^2_{CO}}{p_{O_2}}$	32,063	20,673	16,815	14,830
$2\,CO+O_2 \rightleftarrows 2\,CO_2$	$\frac{p^2_{CO_2}}{p_{O_2}\ p^2_{CO}}$	50,017	20,163	10,275	5,382
$C+CO_2 \rightleftarrows 2\,CO$	$\frac{p^2_{CO}}{p_{CO_2}}$	−8,977	0,255	3,270	4,724
$C+H_2O \rightleftarrows CO+H_2$	$\frac{p_{CO}\ p_{H_2}}{p_{H_2O}}$	−6,790	0,335	2,755	3,954
$C+2\,H_2O \rightleftarrows CO_2+2\,H_2$	$\frac{p_{CO_2}\ p^2_{H_2}}{p^2_{H_2O}}$	−4,603	0,415	2,240	3,183
$CO_2+H_2 \rightleftarrows CO+H_2O$	$\frac{p_{CO}\ p_{H_2O}}{p_{CO_2}\ p_{H_2}}$	−2,310	0,200	0,400	0,620
$2\,H_2+O_2 \rightleftarrows 2\,H_2O$	$\frac{p^2_{H_2O}}{p^2_{H_2}\ p_{O_2}}$	46,643	20,003	11,305	6,923
$C+2\,H_2 \rightleftarrows CH_4$	$\frac{p_{CH_4}}{p^2_{H_2}}$	3,312	−0,982	−2,351	−2,918

поскольку слева и справа в уравнении находится одинаковое число молекул, то для реакции $2CO+2H_2 \rightarrow CH_4+CO_2$ увеличение давления изменит равновесный состав в сторону дополнительного образования многоатомных продуктов (CH_4, CO_2) с уменьшением двухатомных (H_2 и CO). График зависимости равновесного состава от давления по этой реакции представлен на рис. 5.

Приведенные здесь закономерности используются при регулировании состава генераторного газа. Например, повышение температуры до 1000° и далее сводит (см. рис. 4) содержание CO_2 и CH_4 почти до нуля, при этом содержание горючих в газе CO и H_2 растет до наивысших значений (по 50%). Увеличение давления

(25 *ати* и выше) используется в газогенераторах высокого давления для получения высококалорийного газа, в основе которого ле-

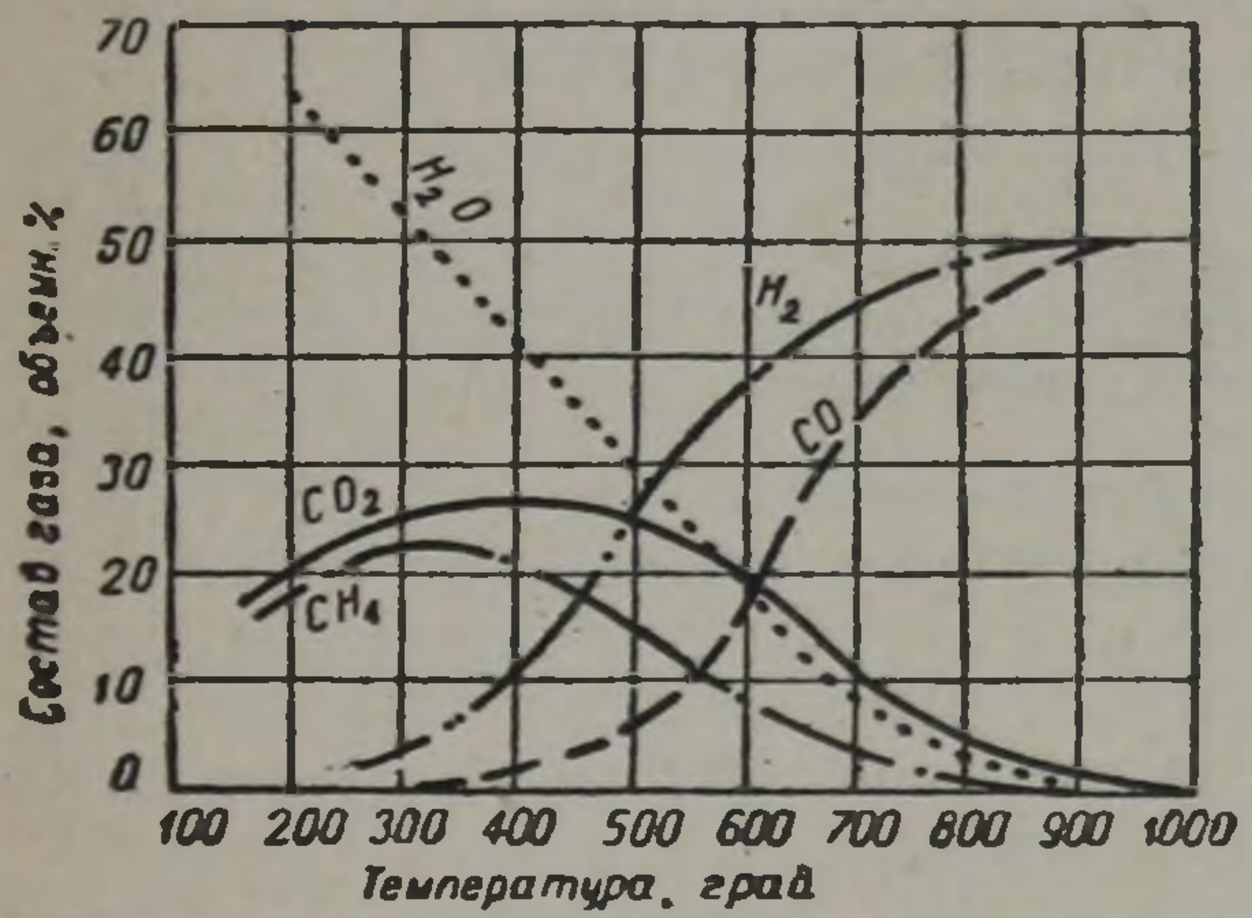


Рис. 4. График зависимости равновесного состава водяного газа от температуры при давлении 1 *ата*

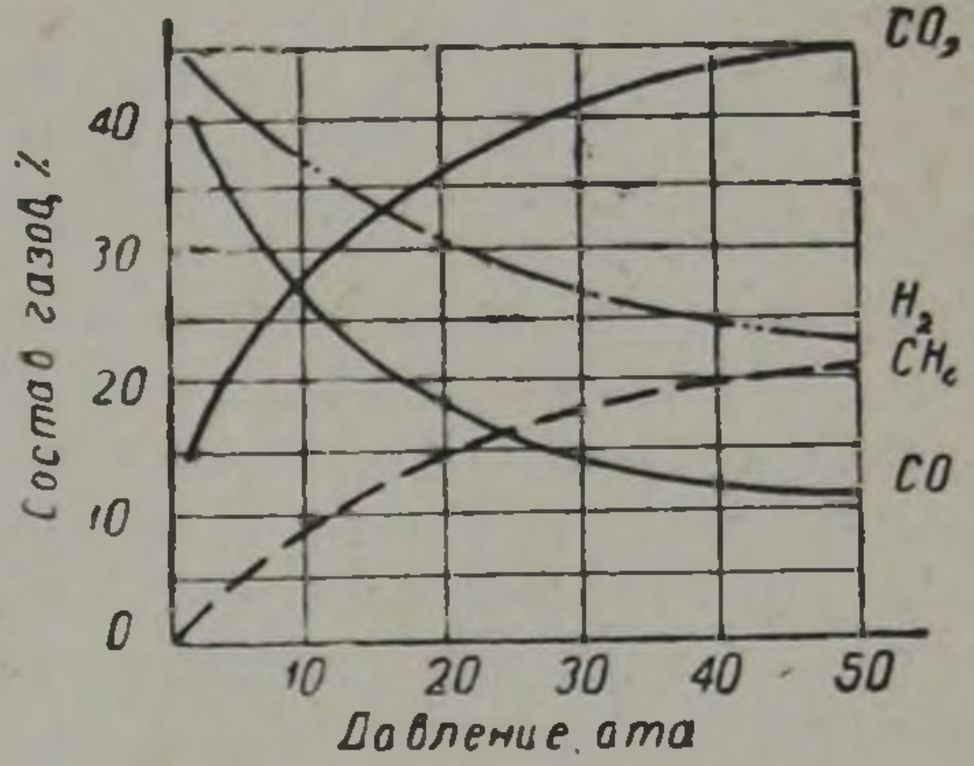


Рис. 5. График зависимости равновесного состава генераторного газа от давления

жит главным образом метан, поскольку вышедший генераторный газ в дальнейшей стадии отмывается от образовавшейся одновременно углекислоты, являющейся балластом.

ГЛАВА III

ТОПКИ

1. Основные характеристики топочных устройств

Одной из основных характеристик топочных устройств является тепловая мощность топки. Она вычисляется по формуле

$$Q = Q_р^р B = \left(Q_н^р + Q_в + Q_т - Q_к\right) B \,[ккал/час], \qquad (I\text{-}15)$$

где B — расход топлива в *кг/час*;

$Q_р^р$ — количество располагаемого тепла на 1 *кг* топлива в *ккал/кг*;

$Q_в$ и $Q_т$ — количество тепла, принесенное соответственно воздухом и газообразным топливом, подогретыми посторонним источником тепла в *ккал/кг*;

$Q_к$ — тепло, затраченное на разложение карбонатов при сжигании сланцев: $Q_к = A(CO_2)_к^р$. Коэффициент A при слоевом сжигании равен 6,8; при факельном 9,7; $(CO_2)_к^р$ — содержание CO_2 в рабочей массе сланцев (6—15%).

В расчетах тепловых балансов обязательно оговаривается, по какой базе $Q_и^р$ или $Q_р^р$ сделаны расчеты. Подогрев воздуха увеличивает тепловую мощность топки на 20—25%, а подогрев газа — топлива еще на 15—20%. В печах для обжига необходимый подогрев воздуха создается или при его прохождении через раска-

ленную готовую продукцию, выходящую из зоны обжига, или в рекуператорах и регенераторах за счет тепла уходящих газов.

Коэффициент полезного действия топки полного сгорания определяется по формуле

$$\eta_т = 1 - q_х - q_м - q^т_{ос} = q^т_{ух}, \qquad (I\text{-}16)$$

где $q_х$ — химическая неполнота сгорания топлива*;
$q_м$ — механическая неполнота сгорания с горючим в провале, шлаке и уносе;
$q^т_{ос}$ — потери тепла топкой в окружающую среду;
$q^т_{ух}$ — теплосодержание газов, уходящих из топки.

Из топок неполного сгорания выходит полугаз, унося с собой не только теплосодержание или физическую теплоту $Q_ф$, но и химическую теплоту, или теплоту сгорания полугаза $Q_х$.

Коэффициент полезного действия полугазовой топки вычисляется по формуле

$$\eta_т = 1 - q_м - q^т_{ос} = q_х + q^т_{ух}. \qquad (I\text{-}17)$$

В полезное тепло входит и $Q_х$ и $Q_ф$. К.п.д. полугазовой топки равен 0,8—0,9. Предварительная подсушка топлива повышает к.п.д. топки.

Теоретическая и действительная температуры горения топлива. Всякое устройство для сжигания топлива должно обеспечить необходимую температуру обжига. Различают теоретическую и действительную температуру горения топлива.

Действительная температура должна быть, по крайней мере, на 20—100° выше максимально требующейся для обжига материала температуры.

Теоретическая расчетная температура $t_т$ учитывает как поддающиеся расчету фактические потери тепла при сгорании топлива, так и то, что горение происходит при действительном количестве воздуха при $\alpha \leqslant 1$:

$$t_т = \frac{Q^р_н + \alpha V^0_в c_в t_в + c_т t_т + W_{пд} i_{пд} + Q_{рец} - Q_х - Q_м - Q_{дис} - Q^т_{ос}}{V_г c_г}, \qquad (I\text{-}18)$$

где $V^0_в$ — теоретическое количество воздуха для сгорания 1 *кг* топлива в *нм³/кг*;
$c_в$ и $t_в$ — удельная теплоемкость и температура воздуха в *ккал/нм³ град* и град.;
$c_т$ и $t_т$ — удельная теплоемкость и температура топлива;
$W_{пд}$ — количество дутьевого пара на 1 *кг* топлива в *кг/кг*;
$i_{пд}$ — теплосодержание этого пара в *ккал/кг*;
$Q_{рец}$ — тепло рециркулирующих газов (взятых не из топки) в *ккал/кг*;
$Q_х$ — химическая неполнота сгорания топлива в *ккал/кг*;
$Q_м$ — механическая неполнота сгорания топлива в *ккал/кг*;
$Q^т_{ос}$ — тепловые потери участка, где происходит горение в окружающую среду (сюда включаются и потери тепла, если они имеются, в водяную рубашку), в *ккал/кг*;

---

* Все величины взяты в долях единицы по отношению к теплоте сгорания топлива.

$Q_{дис}$ — теплота диссоциации CO_2 и H_2O при высоких (выше 1600°) температурах и карбонатов при сжигании сланцев в *ккал/кг*;

$V_г$ — действительный объем продуктов сгорания в *нм³/кг*;

$c_г$ — удельная теплоемкость продуктов сгорания при температуре $t_г$ в *ккал/нм³ град*.

В действительном процессе сгорания топлива теоретическая температура не может быть достигнута из-за перехода части тепла непосредственно на окружающий материал (куски материала в шахтной печи, изделия в туннельной печи) без нагрева продуктов сгорания. Эту часть тепла рассчитать невозможно, поэтому для определения действительной температуры горения $t_д$ вводится пирометрический коэффициент $\eta_п$:

$$t_д = \eta_п t_т. \qquad (I\text{-}19)$$

Для приведенных выше расчетов пирометрический коэффициент $\eta_п$ равен 0,65—0,75 для шахтных печей и вагранок, 0,72—0,77 для вращающихся печей, 0,85—0,9 для туннельных и камерных печей. Для простых поверхностей «прямая отдача топки» может быть определена по методике расчета котельных агрегатов, и действительная температура горения совпадает с расчетной теоретической (гипсоварочные котлы, закрытые топки и т. д.).

Габариты топки. Объем топочного пространства вычисляется по формуле

$$V_т = \frac{Q}{\frac{Q}{V_т}} [м^3], \qquad (I\text{-}20)$$

где Q — тепловая мощность топки в *ккал/час*;

$\frac{Q}{V_т}$ — нормативное тепловое напряжение топочного объема в *ккал/м³ час* (оно выбирается в зависимости от вида топочных устройств по табл. 3, 4, 5, 6).

Площадь зеркала горения R при слоевом сжигании топлива равна

$$R = \frac{Q}{\frac{Q}{R}} [м^2], \qquad (I\text{-}21)$$

где $\frac{Q}{R}$ — нормативное тепловое напряжение в *ккал/м² час* (см. табл. 3, 4, 5).

Высота топочного пространства (условная) определяется по формуле

$$H_у = V_т : R [м]. \qquad (I\text{-}22)$$

Фактическая же высота H — непосредственным измерением, например от уровня горизонтальной колосниковой решетки до свода топки. Средняя высота слоевых топок небольшой мощности 1,5—3 *м*. Она выбирается тем больше, чем форсированнее подается под слой топлива дутье и чем мельче топливо.

Таблица 3

Основные показатели работы ручных топок

Виды топлива	α	$\frac{Q}{R}$ в тыс. *ккал/м²час*	$\frac{Q}{V_т}$ в тыс. *ккал/м³час*	$q_х+q_м$ в %	Содержание углерода $С_{шл+пр}+С_{ун}$ в %	Доля золы в шлаках, провале и уносе $a_{шл+пр}+a_{ун}$	Давление дутья под решеткой p в *мм* вод. ст.
Каменные угли типа Д, Г, П, Ж, ПС с приведенной зольностью, $A^п$=4%	1,4	800	250÷300	5+7	15+25	0,8+0,2	80
Тощие каменные угли, $A^п$=2,5 % .	1,4	700	250÷300	3+6	10+45	0,75+0,25	80
Антрациты: АС и АМ, $A^п$=2 %	1,3	900	300	2+7	20+50	0,7+0,3	100
АРШ	1,4	800	300	2+12	20+50	0,65+0,35	100
Бурые угли рядовые типа челябинских с умеренными $A^р$ и $W^р$, $A^п$=6,5 %	1,4	800	250÷300	2+7	12+15	0,8+0,2	100
То же, с повышенными $A^р$ и $W^р$, $A^п$=10 %	1,4	700	250÷300	3+11	12+15	0,8+0,2	100
То же, сортированные, типа подмосковных, $A^п$=8 %	1,35	900	250÷300	2+8	10+15	0,8+0,2	100

Режим работы технологических топок. Топки непрерывно действующих тепловых установок, таких, например, как туннельные печи и сушилки, имеют равномерный по времени (τ) график тепловой мощности $Q=\varphi(\tau)$, так как хорошо налаженный технологический процесс не требует каких-либо резких изменений Q. У топок периодических печей регулируется как тепловая мощность по периодам обжига, так и состав выходящих из топок газов путем изменения высоты слоя топлива и количества дутьевого воздуха. Отношение максимального часового расхода топлива $B_{макс}$ в таких топках к среднему за цикл часовому расходу $B_{ср}$ доходит до 200—300%, а в отдельных случаях и выше. Отношение минимального часового расхода $B_{мин}$ (первого периода) к среднему за цикл $B_{ср}$ составляет иногда 20%. Таким образом, относительное изменение расхода топлива в топках периодических печей

Таблица 4

Основные показатели работы полумеханических и механических топок

Виды топлива	α	$\frac{Q}{R}$ в тыс. *ккал/м² час*	$\frac{Q}{V_т}$ в тыс. *ккал/м³ час*	$q_х+q_м$ в %	Содержание углерода $C_{шл}+_{пр}+C_{ун}$ в %	Доля золы в шлаках, провале и уносе $a_{шл}+_{пр}+a_{ун}$	Давление и температура дутья p и t в *мм* вод. ст. и град.
Топки с неподвижным слоем и забрасывателями							
Топки с шурующей планкой							
Бурые угли типа подмосковных, $A^п$=10 %	1,4	900	250	0+11	10+20	0,75+0,25	60 и 200°
	1,35	830	250	2+8	6+20	0,80+0,20	100 и 200°
Бурые угли типа челябинских, $A^п$=6,5%	1,4	900	250	0+7	10+20	0,75+0,25	60 и 200°
	1,35	900	250	1+6	6+20	0,80+0,20	100 и 200°
Каменные угли типа воркутинского ПЛС и Г, $A^п$=4 %	1,4	900	250	0+7	15+30	0,75+0,25	60 и 200°
	1,35	900	250	2+7	15+25	0,80+0,20	100 и 200°
Антрациты АРШ, $A^п$=3% . .	1,5	900	300	0+12	25+50	0,7+0,3	100 и 25°
Топки с цепной решеткой и забрасывателями							
Бурые угли: $A^п$=10 %	1,3	1 000	250	0,5+7	6+20	0,75+0,25	80 и 250°
$A^п$=6,5 %	1,3	1 500	250	0,5+6	6+20	0,75+0,25	80 и 250°
Каменные угли Г и Д, $A^п$=4 %	1,3	1 500	250	0,5+5	10+25	0,75+0,25	80 и 200°
Топки с цепной решеткой							
$A^п$= 2 АС	1,3	1 000	300	0+7	20+50	0,75+0,25	100 и 200°
$A^п$= 3 АРШ	1,5	800	300	0+12	25+50	0,70+0,30	100 и 200°

Таблица 5

Основные показатели работы топок для торфа и древесных отходов

Виды топлива	Тип топки	α	$\frac{Q}{R}$ в тыс. *ккал/м² час*	$\frac{Q}{V_т}$ в тыс. *ккал/м³ час*	$q_х + q_м$ в %	p в *мм* вод. ст.	t в град.
Кусковой торф, $W^р$=45—50%	Шахтно-цепная	1,3	2 000	250—350	1+2	80	250
То же, $W^р$=40%, $A^с$=10%	Шахтная	1,4	1 100	250	1+2	60	25—200
Древесные отходы и опилки	С наклонной решеткой	1,45	550	250—300	4	—	25
То же	Скоростная Померанцева	1,25	4 000	350—450	4	100	250
Рубленая щепа, $W^р$=40—50 %	То же	1,2	8 000	350—450	3	70	250

Таблица 6

Основные показатели работы камерных топок

Тип топки	Виды топлива	α	$\frac{Q}{V_т}$ в тыс. *ккал/м³ час*	R_{89} в %	$q_х$ в %	$q_м$ в %
Факельная	Мазут, газ	1,15	300—500	—	1,5	0
Пылеугольная	Антрацит АШ	1,25	125—300	6—7	0	5—6
	Тощий уголь	1,25	160—350	9	0	2—3
	Каменные угли ($V^г$<25 %)	1,2	160—350	11—13	0	2—3
	Каменные угли ($V^г$>25 %)	1,2	160—350	20—30	0,5	1,5—2,5
	Бурые угли	1,2	200—400	30—40	0,5	0,5—1
Шахтно-мельничная	Каменные угли	1,25	130—300	25—35	0,5	4—6
	Бурые угли	1,25	150—320	45—65	0,5	1—2
	Сланцы	1,25	120—250	60	0,5—1	1—3
	Фрезерный торф	1,25	120—200	—	0,5—1	2—4
Вихревые	То же	1,25	120—200	—	1—2	2—4
Беспламенное сжигание	Газ	1,05—1,15	800—1 000	—	1	0

доходит до 1 : 15. Полугазовые топки в отдельные периоды обжига должны создавать пламя нейтральное, восстановительное, окислительное. С этой целью топки работают по периодам цикла с разными величинами избытка воздуха ($\alpha \gtrless 1$), приводящими к разному составу топочных газов: от газов полного сгорания до полугаза, который, как указано выше, сгорает среди изделий.

Вытеснение периодических печей непрерывно действующими сокращает применение топок с резко изменяющимся и поэтому малоэкономичным режимом работы.

2. Характеристика и выбор топочных устройств

Топки полного сгорания работают на твердом топливе, мазуте и газе. Газ и мазут сжигаются в факеле.

Топки для твердого топлива выполняются слоевыми, факельными и вихревыми (рис. 6, табл. 7). Ручные слоевые топки

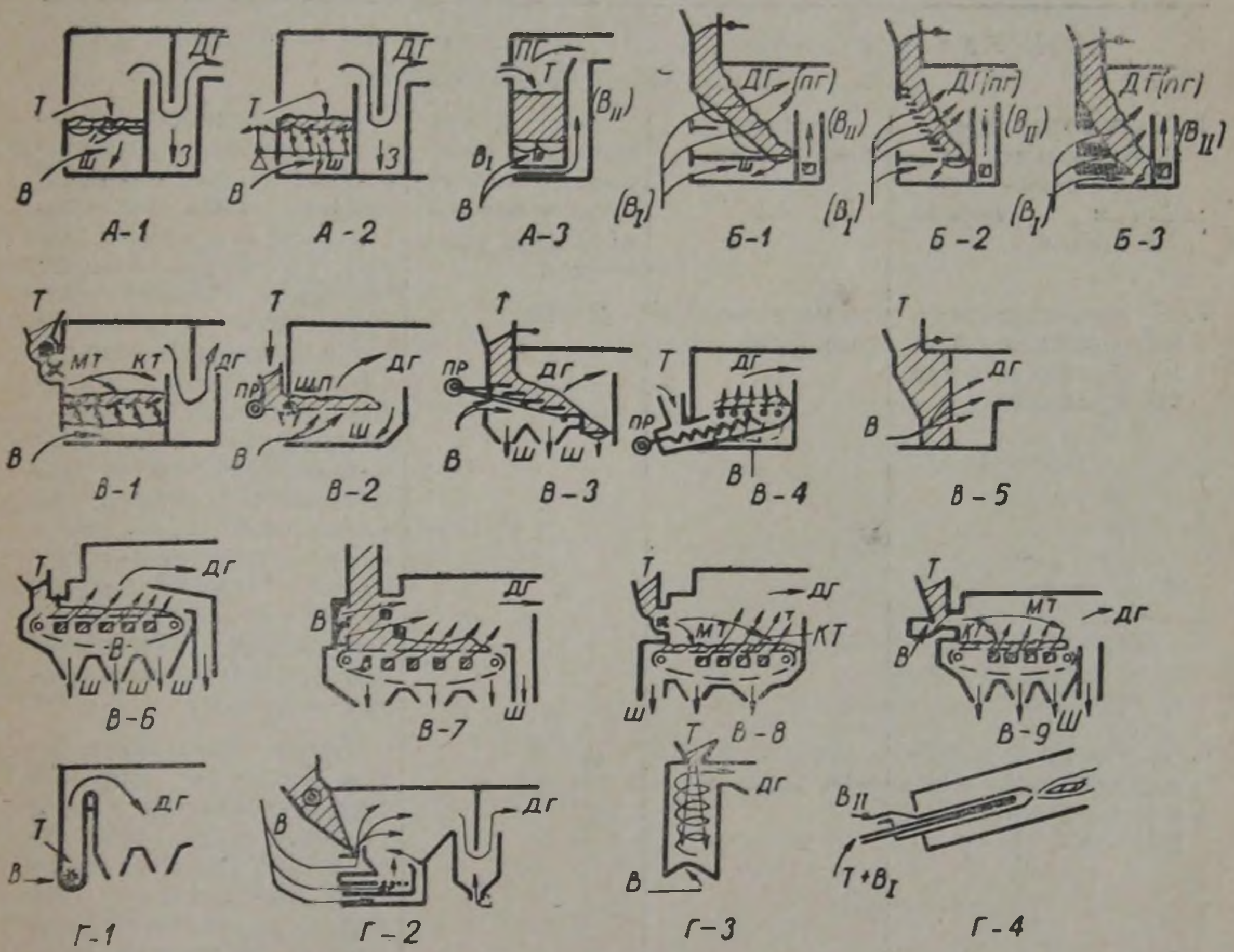


Рис. 6. Схемы топок для сжигания твердого топлива

Т — топливо; *В* — воздух; *ДГ* — дымовые газы; *Ш* — шлак; *З* — зола; *ПГ* — полугаз; B_I — первичный воздух; B_{II} — вторичный воздух; *Пр* — привод; *МТ* — мелкое топливо; *КТ* — крупное топливо; *ШП* — шурующая планка. Обозначения схем даны в табл. 7

(табл. 7, А) могут использоваться только для временных или небольших тепловых установок, так как обслуживание таких топок требует тяжелого физического труда. При увеличении слоя топлива на решетке и устройстве подвода вторичного воздуха (А-3) они работают как полугазовые.

Топки с горизонтальной колосниковой решеткой для облегчения удаления шлака делаются с поворотными колосниками (А-1). При неспекающихся топливах употребляются топки с качающимися колосниками (А-2).

Шахтные топки с наклонным зеркалом горения (*Б*) относятся к полумеханическим, так как топливо в них передвигается вниз

Таблица 7

Классификация и области применения топок для твердого топлива

Тип топки	Виды топлива	Тепловая мощность в млн. *ккал/час*	Характеристика и область применения
А. Топки с плоской колосниковой решеткой и ручным обслуживанием			
1. С поворотными колосниками. Длина решетки 1,6—2,67 *м*, ширина 1,6—3,5 *м*	Антрациты, тощие угли	2—10. Топки меньшей мощности могут быть и без поворотных колосников	Топки полного сгорания с широким ассортиментом применяемого топлива. Простота конструкций и ремонта. Малая стоимость. Имеют крупные недостатки: трудоемкие и тяжелые ручные операции подачи топлива, шуровки, шлакозолоудаления из топки, повышенные тепловые потери. Допускается применение в основном для временных установок, а также для установок малой производительности: сушилок варочных котлов, шахтных печей при низкой температуре процесса
2. С качающимися колосниками. Длина и ширина в тех же пределах	Каменные, бурые угли	2—10	
3. То же, но с углубленным расположением колосниковой решетки	Дрова, кусковой торф	До 6	Топки полугазовые. Изменение в широких пределах высоты слоя и давления дутья позволяет менять режим топки как по составу газа вплоть до полного сгорания, так и по мощности. Применяются для небольших периодических печей временного характера
Б. Шахтные топки с ручным обслуживанием			
1. С наклонными колосниками. Площадь зеркала горения для торфа 2,34—6,9 $м^2$ при ширине 0,9—2,3 *м*, для дров 2,16—4,95 $м^2$ при ширине 0,9—1,65 *м*. Вне стандарта размеры по ширине до 3,5 *м*	Дрова, кусковой торф	2,5—8 1,2—3 Мощность при отклонении размеров зеркала горения изменяется от 0,2 до 15	Топки полумеханизированные, поскольку естественное сполза ие топлива облегчает обслуживание топки. Работает как полугазовая и с полным сгоранием топлива. Имеет большую равномерность и экономичность топочного режима, так как прорывы холодного воздуха при шуровках снижены. Недостаток — обслуживание

Продолжение табл. 7

Тип топки	Виды топлива	Тепловая мощность в млн. *ккал/час*	Характеристика и область применения
2. Со ступенчатыми колосниками	Древесные отходы, опилки, бурый уголь, торф	До 15	с двух уровней: при загрузке топлива и при выгрузке шлаков. Применение — для периодических печей для известеобжигательных печей, работающих на полугазе, и т. п.
3. Со ступенчатыми колосниками из керамики	Каменный уголь	До 8	
В. Механические слоевые топки			
1. С забрасывателем на неподвижный слой топлива — механическим, паровым, воздушным. Длина решетки увеличивается до 3,5 *м*	Бурые, каменные угли, антрациты АРШ, АС, АМ	2—15	Механизирован процесс заброса топлива при постоянно закрытом фронте, что улучшает процесс горения и снижает потери тепла. Шуровка и удаление шлака остаются ручными. Топка полного сгорания, но при углублении решетки может работать как полугазовая. Должна иметь распространение взамен ручных топок для установок средней и малой мощности
2. С шурующей планкой длина решетки 3—4,5 *м*	Бурые и спекающиеся каменные угли	3—15	Механизированы все процессы. Обеспечиваются хорошее перемешивание и воспламенение топлива. Топка полного сгорания
3. С наклонно переталкивающей решеткой длиной до 5 *м* (обычно). За рубежом имеются решетки до 100 $м^2$, длиной 8—10 *м*	Бурые угли, сланцы	4—20 и выше	Топка полного сгорания для установок средней и большой мощности. Имеет повышенный к.п.д. при сжигании влажных топлив с низкой теплотой сгорания
4. Топка с нижней подачей (в СССР применяется мало)	Каменные угли Г, ПЖ и подобные им	2—10 и выше	Топка полного сгорания с высокой отдачей тепла лучеиспусканием от горящего слоя

Продолжение табл. 7

Тип топки	Виды топлива	Тепловая мощность в млн. *ккал/час*	Характеристика и область применения
5. Топка с „зажатым слоем"	Щепа, опилки	1 – 20 и выше (для щепы)	Топка полного сгорания с высоким теплонапряжением зеркала горения при уменьшенном уносе топлива
6. С цепной решеткой. Площадь от 1,5×5,5 до 4,46×7,9 *мм*	Бурые угли, неспекающиеся и слабоспекающиеся каменные угли, антрациты	6—30 и выше	Топка полного сгорания средней и большой мощности. Хорошая регулировка производительности. Для влажных топлив требуется предварительная подсушка топлива.
7. Шахтно-цепная	Кусковой торф	15—50	Топка большой мощности для торфа влажностью до 50 %
8. С механическим забрасывателем и цепной решеткой обратного хода	Несортированные угли с повышенной влажностью	6—30	Топка полного сгорания с комбинированным сжиганием в слое и частично во взвешенном состоянии
9. С пневмозабрасывателем и цепной решеткой прямого хода	Спекающиеся низкосортные угли	6—30	Установка средней и большой мощности
Г. Камерные топки			
1. Шахтно-мельничная	Фрезерный торф, бурые угли, сланцы, каменные угли с выходом летучих более 25—30%	6—30 и выше	Топка полного сгорания. Удобно комбинирует сжигание твердого и газообразного топлива. Малогабаритна
2. Вихревая (пневматическая)	Фрезерный торф повышенной влажности (до 55%)	1—15 и выше	Топка полного сгорания с пониженной высотой, что важно при размещении ее в некоторых условиях
3. Циклонная	Топливная мелочь, лузга, опилки	1—15	Топка полного сгорания для использования топливных отходов с высоким к.п.д.

Продолжение табл. 7

Тип топки	Виды топлива	Тепловая мощность в млн. *ккал/час*	Характеристика и область применения
4. Пылеугольная	Антрацитовый штыб, тощий уголь, каменные угли, отходы углеобогащения, бурые угли	Любая мощность, чаще применяется для средних и больших мощностей	Топка полного сгорания для широкого ассортимента топлив. Применяется для вращающихся печей и реже для других; обеспечивает высокие температуры в рабочем пространстве. Факел длинный. Высокая лучеиспускательная способность

за счет собственного веса. Топки со ступенчатыми колосниками характеризуются тем, что на их ступеньках создаются развитые очаги горения, что ускоряет подготовку влажного топлива.

Современные слоевые топки (В) для устранения ручного труда по загрузке выпускаются с приспособлениями для забрасывания механическим путем (вращающийся или лопастной метатель), паровой или воздушной струей (В-1). При плохо отсортированных топливах механические забрасыватели отбрасывают крупные куски к концу, а мелочь к началу решетки, пневматические забрасыватели, наоборот; поэтому сконструированы цепные топки с обратным ходом и механическим забросом, что позволяет хорошо дожигать куски топлива разной величины. Топки с горизонтальной решеткой и шурующими планками (В-2) передвигают топливо и шлак, а также перемешивают слой. Несколько планок в одной топке ставятся для уменьшения хода передвигающего механизма. Цепные механические решетки (В-6) широко применяются при больших расходах неспекающихся топлив: бурых, каменных углей, антрацитов АС и АРШ.

Для эстонских и гдовских сланцев, а также бурых углей типа подмосковного рационально применение наклонно переталкивающих топок (В-3). Для пламенных и жирных углей применяются топки с нижней подачей (В-4), в которых горящий слой находится постоянно сверху и летучие горят коротким пламенем, проходя через раскаленное топливо.

Механические топки должны применяться для сушилок, варочных котлов и других установок с топками полного и неполного сгорания вместо ручных.

Твердое топливо, измельченное до пылевидного состояния с частицами 60—100 *мк*, сжигается в факеле (Г-4) во вращающихся печах и реже в других установках. Тонкость помола обозначается специальным символом, например $R_{88}=10\%$ означает, что такая пыль оставляет на сите № 70 с 4 900 ячейками на 1 $см^2$ каждая

в свету 88 *мк* остаток в 10%. Обычно $R_{88}=5—12\%$. Чем меньше выход летучих у данного топлива и больше зольность, тем тоньше должен быть помол. Расход энергии в зависимости от тонкости помола составляет от 10 до 25 *квт-ч/т*. Схемы пылеприготовления аналогичны таковым для энергетических установок. Горелка для угольной пыли во вращающихся печах представляет собой две трубы (одна внутри другой) (рис. 7). По внутренней трубе проходит пыль с первичным воздухом (15—30% от общего расхода), а по кольцевому каналу — вторичный воздух (85—70%). Расчетная скорость выхода из горелки 60—80 *м/сек*, напор вентилятора

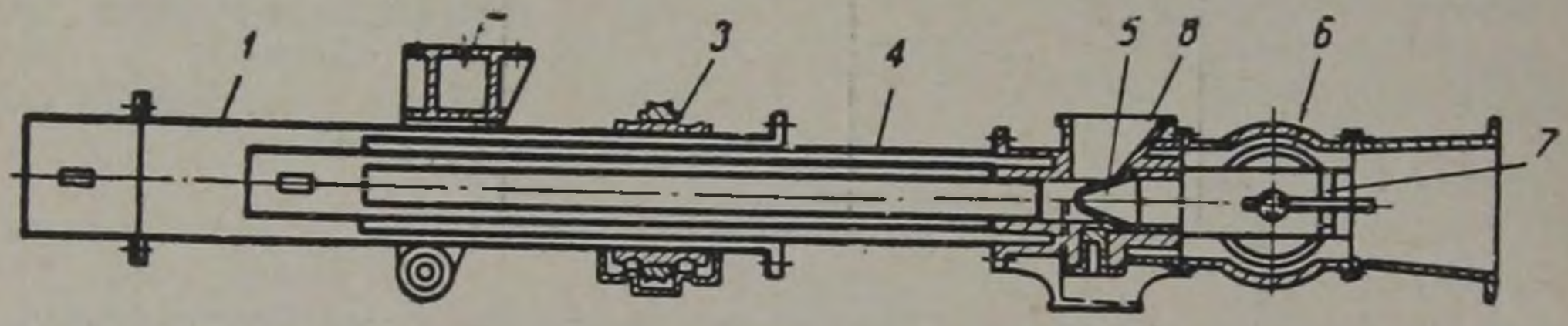


Рис. 7. Подвижная пылеугольная горелка для вращающихся печей

1 — подвижная часть горелки; *2* — направляющий ролик подвижной части; *3* — механизм передвижения; *4* — неподвижная часть; *5* — инжектор; *6* — сферический шибер; *7* — труба для подачи угольной пыли с первичным воздухом; *8* — отверстие для подачи вторичного воздуха

500—700 *мм* вод. ст. Длина факела регулируется подвижной частью горелки.

К факельному процессу сгорания твердого топлива относится сжигание топлива с $V^r>25\%$ в шахтно-мельничных топках (Г-1), которые могут использоваться в сушильных и печных установках при невысокой температуре обжига. Затраты на помол в них меньше, чем для пылеугольных топок.

Оригинальный метод сжигания в «зажатом слое» (В-5) делает топки ЦКТИ—Померанцева малогабаритными из-за допускаемых высоких теплонапряжений при сжигании древесных отходов. Метод «зажатого слоя» характеризуется тем, что топливо (древесные отходы) потоком дутьевого воздуха прижимается к экрану, находящемуся перед выходом из топки и составленному из водогрейных труб или керамической решетки. Экран устраивается так, что его щели достаточно малы, чтобы топливо не уносилось через него из топки в рабочее пространство установки.

Горение зажатого слоя происходит даже при относительно увеличенной толщине слоя весьма активно и равномерно, и поэтому тепловое напряжение такой топки значительно выше, чем в обычных топках, достигая нескольких млн. *ккал/м³ час*.

Фрезерный торф без предварительной подсушки сжигается новым вихревым способом (Г-2) в топках системы Колобанова (ЭНИН АН БССР) при $B\geqslant 0{,}5$ *т/час*.

В циклонных топках (Г-3) Кнорре эффективно сжигается лузга. В США в вихревой топке Колюмет ($D=2{,}44$ *м*; $L=3{,}35$ *м*) сжигается в час 8,2 *т* угольной мелочи с $V^r=47\%$ и $W^p=15\%$ при

$\frac{Q}{V_т}$ = 3 700 тыс. *ккал/м³ час*. Потери $q_х + q_м = 1\%$, т. е. очень малы. Шлакоудаление жидкое.

Для получения полугаза используются топки с несколько углубленной горизонтальной решеткой, топки с наклонным зеркалом горения, топки с кипящим слоем (для угольной мелочи $\delta = 2—10$ *мм*). Высота слоя для полугазовых топок в 2—3 раза больше, чем для топок полного сгорания. Под слой подается первичный воздух $\alpha_I = 0{,}4—0{,}5$; по выходе полугаза из топки по отдельным каналам добавляется вторичный $\alpha_{II} = 0{,}7—0{,}75$, так что общий избыток воздуха составляет $\alpha = \alpha_I + \alpha_{II} = 1{,}1—1{,}25$. Вторичный воздух для хорошего перемешивания с полугазом подводится через сопла со скоростью 20—40 *м/сек*. Напряжение $\frac{Q}{R}$ для кускового топлива при дутье (60 *мм* вод. ст.) доходит до 1 200 тыс. *ккал/м² час*, для древесных опилок без дутья—600 тыс. *ккал/м² час*. Полугазовая топка с кипящим слоем работает при давлении дутья 500 *мм* вод. ст., поэтому высота слоя топлива (спокойного 500 *мм*) увеличивается от продувания вдвое. $\frac{Q}{R}$ доходит до 7 000 тыс. *ккал/м² час*. Опытные топки еще имеют повышенный унос мелочи ($\delta \leqslant 1$ *мм*) — до 20—30% от всего расхода топлива, и для уноса требуются мощные уловители. В качестве средних цифр для полугаза из дров, торфа и бурого угля можно привести следующие. Состав полугаза: $CO_2 = 10—14\%$; $CO = 10—13\%$; $H_2 = 10—12\%$; $N_2 = 62—68\%$. Выход полугаза: $V = 2{,}5—3$ *нм³/кг*; теплота сгорания $Q_н^с = 500—600$ *ккал/нм³*; температура полугаза $t = 850—1000°$; физическая теплота полугаза $Q_ф = 325—400$ *ккал/нм³*. Для антрацита выход достигает 4,5 *нм³/кг*; $Q_н^с = 800—900$ *ккал/нм³*; температура — до 1100°.

Очистка топочных газов от искр и золы требуется перед подачей газов в рабочее пространство печей и сушилок при тепловой обработке декоративных или при сушке возгорающихся изделий. С этой целью сразу за топкой устраиваются осадительные камеры, иногда соединенные с кирпичными циклонами, что позволяет снизить вынос золы в 4 раза и более.

Удаление шлака из топок должно быть механизировано по опыту работы котельных топок. Предварительно шлак спускается в герметически закрытую водяную ванну, где охлаждается, а вредные пары и сернистые газы оттягиваются в топку. Холодный шлак выносится скребками или гидравлическим транспортером за пределы помещения топки.

Форсунки для жидкого топлива и мазутные топки (рис. 8). Для эффективного диффузионного сжигания жидкое топливо должно пройти предварительную стадию испарения без пирогенетического разложения. С этой целью жидкое топливо перед выходом в топку дробится в форсунках на мелкие капли паром, сжатым воздухом или распыляется под давлением насосов при

истечении через специальные насадки. Соответственно различают форсунки паровые, воздушные и механические. Паровые форсунки Шухова (рис. 8,*а*) требуют расхода 0,3—0,5 *кг* пара на 1 *кг* мазута при давлении пара 3—5 *атм* и выше. В зависимости от размера диаметра выходного сечения форсунки сконструированы на расход мазута от 3 до 400 *кг/час*.

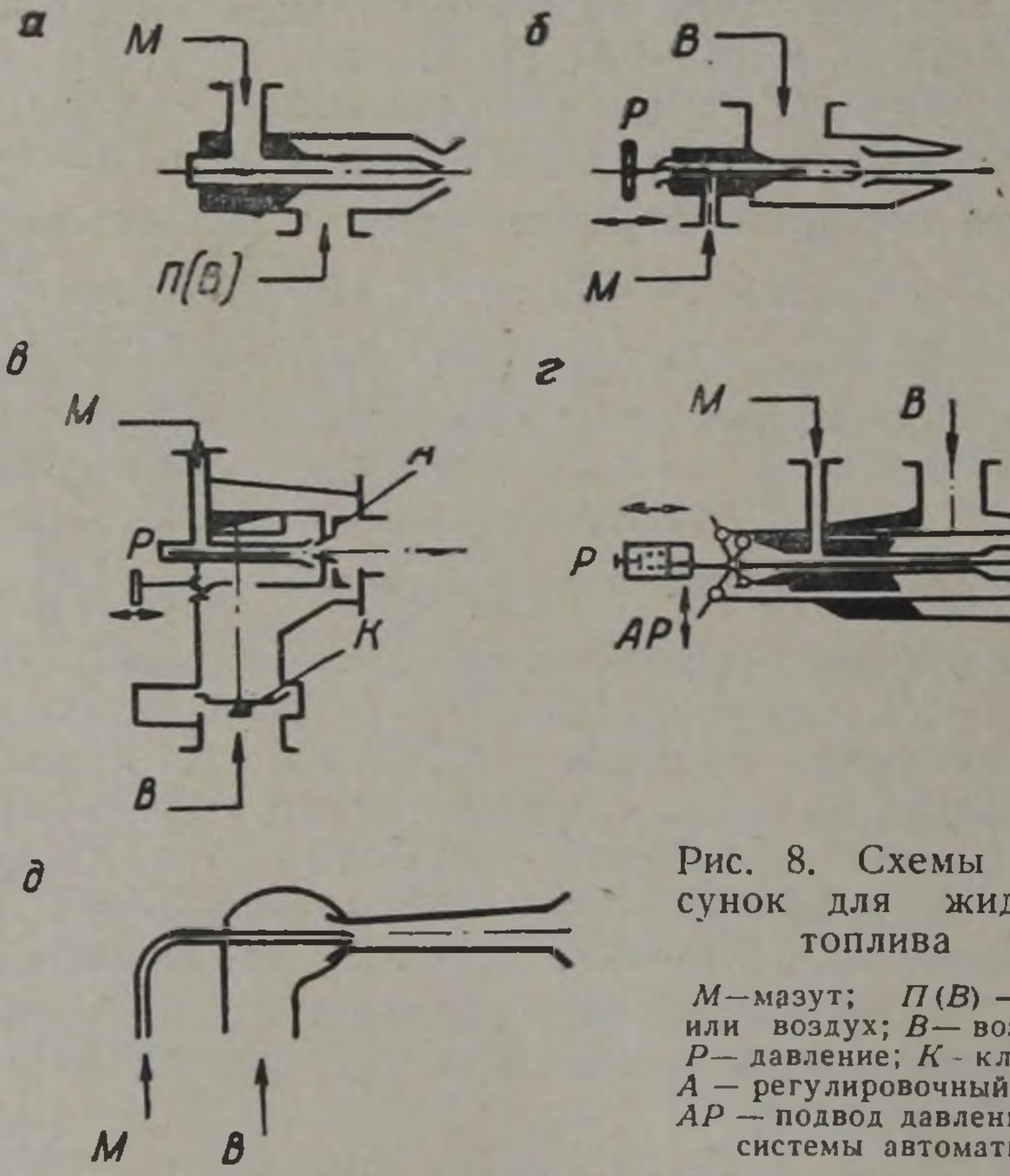


Рис. 8. Схемы форсунок для жидкого топлива

М—мазут; *П* (*В*) — пар или воздух; *В*— воздух; *Р*— давление; *К* - клапан; *А* — регулировочный диск; *АР* — подвод давления от системы автоматки

Воздушные форсунки низкого давления (рис. 8,*б*) работают под давлением вентилятора 300—700 *мм* вод. ст. и пропускают 75—100% воздуха, идущего на горение, скорость которого на выходе 50—75 *м/сек*. Давление мазута в форсунках конструкции Союзтеплостроя (рис. 8,*в*) до 2 *ати*. Новая форсунка конструкции Карабина (рис. 8,*г*) позволяет с помощью сервомотора по импульсу первичного датчика изменять расход мазута от 10 до 35 *кг/час* без ухудшения распыливания, что важно для топок с переменным режимом. Форсунки Стальпроекта выполняются различных диаметров для расходов мазута от 3,5 до 205 *кг/час*, Союзтеплостроя от 5 до 95 *кг/час*. Воздушные форсунки высокого давления (рис. 8,*д*) Шухова, Доброхотова и т. д. работают на компрессорном воздухе 2—8 *ати*. Удельный расход воздуха в них 1—1,5 *кг/кг*.

Механические форсунки распыливают мазут при 75—100° и давлении насосов 10—25 *ати*. Их целесообразно применять при

больших расходах мазута (во вращающихся печах и т. д.), так как их малые отверстия для истечения легко засоряются.

В механических форсунках вращающихся печей для обжига цементного клинкера (рис. 9) (конструкции Закрытного и др.) первичный воздух (30—35%) со скоростью 15—20 *м/сек* подается по кольцевому каналу вокруг форсунки. Мазут сгорает длинным

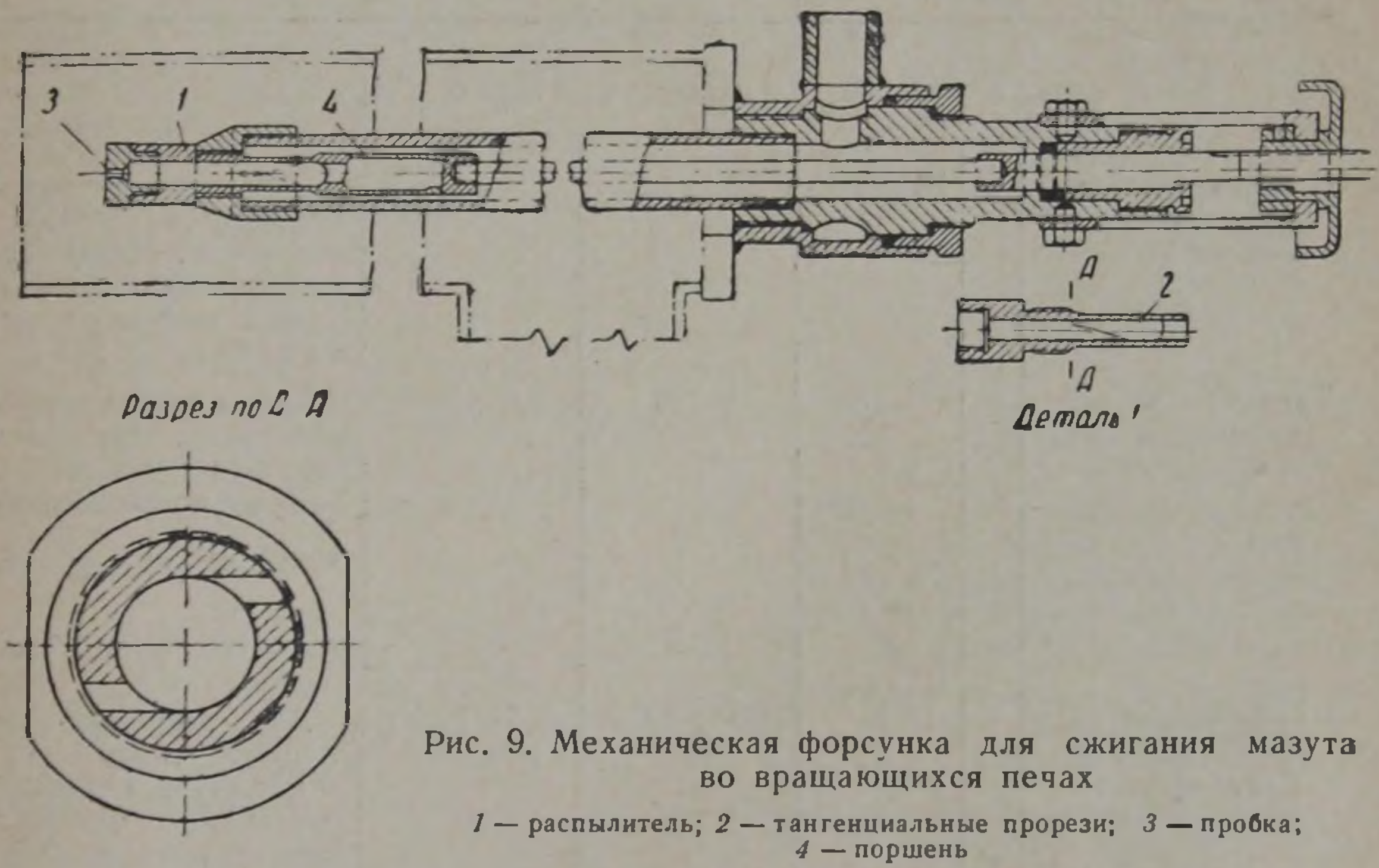


Рис. 9. Механическая форсунка для сжигания мазута во вращающихся печах

1 — распылитель; *2* — тангенциальные прорези; *3* — пробка; *4* — поршень

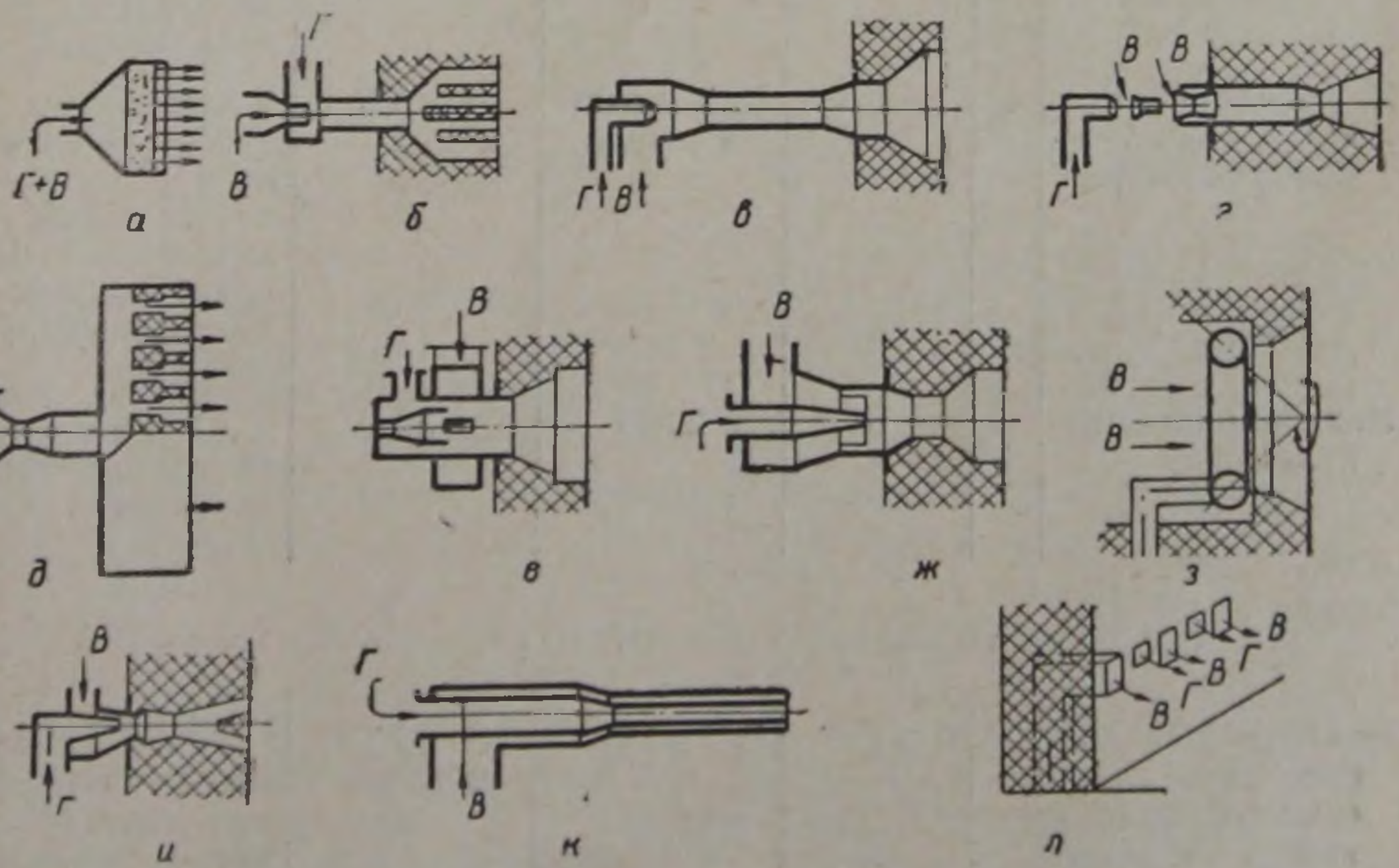


Рис. 10. Схемы газовых горелок

Г — газ; В — воздух. Обозначения схем даны в табл. 8

Таблица 8

Схемы и основные характеристики газовых горелок

Тип горелки	Эскиз горелки, рис. 10	Давление в *мм* вод. ст.		Расход газа в *нм*³/*час*	Области применения
		воздуха	газа		
Беспламенные, кинетического горения *Б*					
С пористой диафрагмой и близкие ей	*а*	250÷500	250÷500	⩽5	Для хорошо очищенного газа. Малая мощность. Низкотемпературные процессы. Сушка инфракрасными лучами (⩽200°)
Туннельные перчаточного типа	*б*	⩾100	⩾100	1 000÷10 000	Для низкокалорийных газов. Средняя и большая мощность. Топки с сокращенным объемом при $\frac{Q}{V_т}$ = =750 тыс. *ккал*/*м*³ *час*
Инжекционные одноступенчатые Стальпроекта	*в*	0	3 000÷10 000	0,5÷1 000 и выше	Для хорошо очищенных газов всех видов. При чугунных смесителях температура газов не выше 300÷400°. Широко применяемая горелка
Инжекционные двухступенчатые Союзтеплостроя	*г*	0	1 000÷3 000 и выше	4÷200	Аналогична предыдущей, но более сложна и реже применяема. Давление газа может быть несколько ниже из-за использования энергии первого сопла
Инжекционная панельная	*д*	0	2 000	50	Для распределенной по поверхности печи теплотдачи
Короткопламенные, смешанного горения *К*					
Турбулентная низкого давления с газовой кольцевой щелью Стальпроекта	*е*	⩾150	⩾100	30÷1 100 и выше	Для холодного очищенного генераторного газа. Печи с развитым топочным пространством

Продолжение табл. 8

Тип горелки	Эскиз горелки, рис. 10	Давление в *мм* вод. ст.		Расход газа в *нм³/час*	Области применения
		воздуха	газа		
Турбулентная низкого давления с воздушным завихрителем Союзтеплостроя	*ж*	⩾200	⩾80	5÷200	Для холодного очищенного генераторного газа. Печи с развитым топочным пространством
Кольцевая с завихрением при истечении	*з*	20÷60	150÷400	50÷4 000	Для богатых очищенных газов: природного, крекинг-газа в промышленных печах
Длиннопламенные, диффузионного горения Д					
Щелевая низкого давления Союзтеплостроя	*и*	70÷110	50÷85	5÷300	Промышленные печи камерные, туннельные, располагающие объемом для факела длиной более 2 *м*
Труба в трубе двухканальная	*к*	200÷300	300÷500 и выше	5 000÷15 000	Для вращающихся печей, требующих длинный факел
Щелевая стеновая	*л*	5÷10	20	50÷150	Для сжигания газа в рабочем пространстве печи между изделиями. Большой путь догорания. Простейшее устройство. Малые давления газа

факелом, имея скорость на выходе 60 *м/сек*. Механические форсунки обеспечивают высокую температуру горения. При использовании малых механических форсунок («Атом», «Эрит» и др.) необходимо устанавливать резервные, для того чтобы иметь возможность очищать засорившиеся форсунки.

Топки для газообразного топлива. В зависимости от требований к виду пламени топки для газа конструируются с длинным, коротким пламенем и беспламенные. На рис. 10 и в табл. 8 приведены схемы и основные характеристики газовых горелок. Материалом для изготовления горелок служат сталь, чугун и керамика. В газокамерных печах газ и воздух подводятся в рабочее пространство просто чередующимися щелями в стенах печи без особых горелок (рис. 10, *л*). Пламя газовых горелок будет тем короче, чем полнее перемешаны газ и воздух до выхода в топку. Гомогенная смесь создает условия кинетического сгорания при α, близком к единице. Почти без пламени работают горелки бесла-

менного горения (*Б*) с пористой диафрагмой, туннельные перчаточного типа (Арсеева), инжекционные Стальпроекта, Союзтеплостроя и панельные.

Предварительное смешение в них обеспечивается при инжекции газом воздуха или при пропуске смеси через раскаленный туннель. Чтобы предотвратить проникновение пламени в горелку, скорость газа в ней должна быть не менее 30—50 *м/сек*. Горелки диффузионного горения (*Д*) не имеют предварительного смешения и факел их длинен. Газовые горелки работают при $\frac{Q}{V_т}$ = 500—800 тыс. *ккал/м³ час*; $\alpha = 1—1{,}1$; $q_х + q_м = 1\%$. Все показатели для беспламенных горелок лучше. Расчет форсунок для мазута, горелок и инжекторов для газа делается на основе известных формул гидро- и аэродинамики.

ГЛАВА IV

ПРОЦЕСС ГАЗИФИКАЦИИ И ГАЗОГЕНЕРАТОРЫ

1. Основные процессы и зоны в газогенераторе

Прямой процесс газификации в слое угля можно представить по следующей схеме (рис. 11). Топливо в кусках мало отличающихся размеров (для каменных углей, например, 20—50 *мм*) загружается сверху и по мере сгорания слоя на решетке газогенератора опускается вниз. Образующийся шлак постоянно выгружается из вращающейся водяной чаши наружу. Для газификации снизу подается воздух. Полученный в газогенераторе газ направляется к потребителям, пройдя при необходимости через аппаратуру очистки его от пыли, смол и от большого количества влаги. По высоте, снизу вверх, газогенератор может быть разделен на следующие зоны.

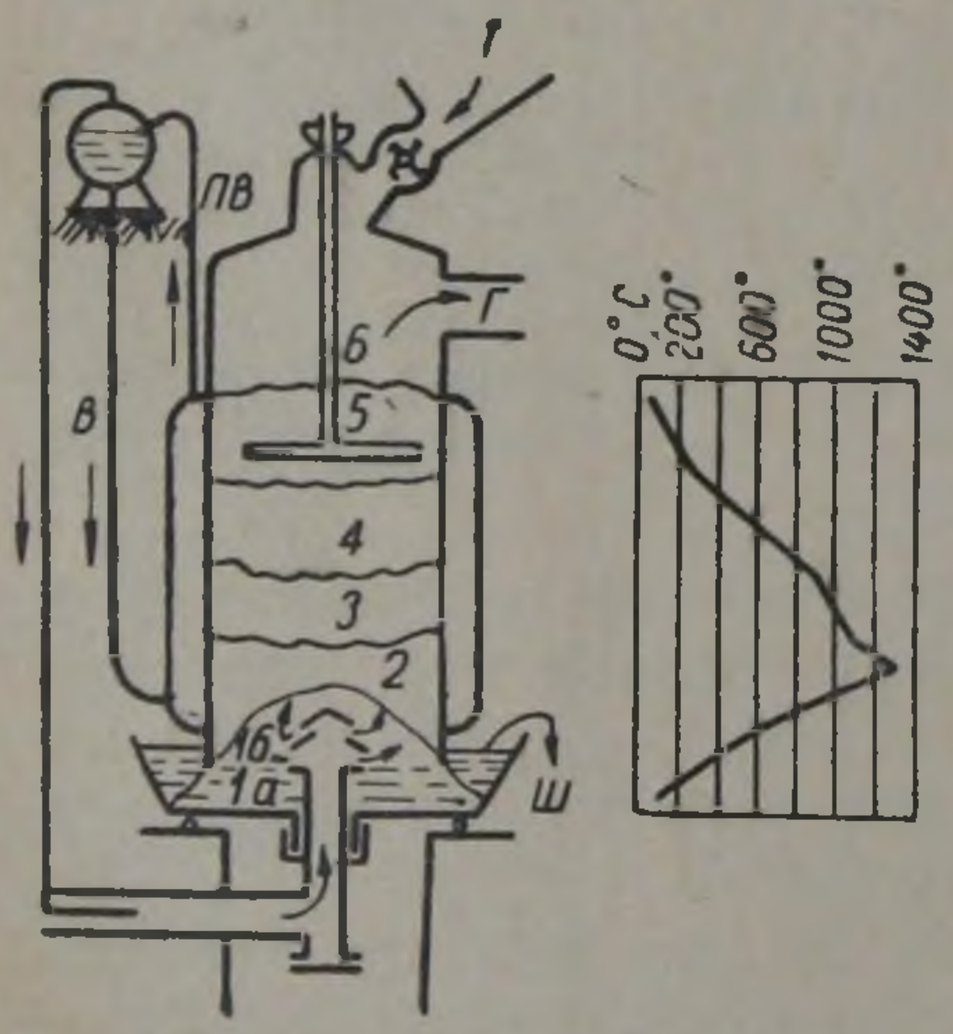


Рис. 11. Схема прямого процесса газификации в слое

Т — подача топлива; *ПВ* — пароводяная смесь из водяной рубашки; *В* — вода из паросборника в рубашку; *Г* — отвод генераторного газа; *Ш* — выгрузка шлака
1 — 6 — зоны

1. Зона очаговых остатков (шлака и золы). Топливо в шахте поддерживается колосниковой решеткой и слоем шлака. Через этот слой шлака проходит воздух и, распределяясь по сечению, подогревается за счет охлаждения шлака в зоне *1б*. Зона *1а* служит для быстрого охлаждения выгружаемого шлака водой, ее высота зависит от напора дутья. В соответствии

с принятой высотой водяного затвора общая высота зоны *1* находится в пределах 200—400 *мм*, в том числе под дутьем над решеткой 50—250 *мм*. Верхняя температурная граница 900—1000°. Шлак охлаждается воздухом до температуры 300—500°. Остальное охлаждение шлака до 80 ÷ 100° производится при наличии гидравлического затвора водой. Пары воды засасываются частично в газогенератор, примешиваясь к дутью. Каких-либо химических реакций в зоне *1* не происходит.

2. Зона горения (окислительная). В зоне высокая температура: внизу 900÷1000°, в середине 1300÷1500°, вверху 1000÷1200°, большое количество кислорода при гетерогенном характере горения приводит к быстрому завершению реакции горения углерода топлива, причем в комплексе его продуктов горения mCO_2+nCO явное преобладание получает CO_2. По мере удаления от решетки количество CO_2 падает, а CO возрастает. В этой зоне количество водяных паров максимально. Высота собственно окислительной зоны не более 100 *мм*. В зоне совершается экзотермическая реакция, в результате которой выделяется основное количество тепла, обеспечивающее устойчивость процесса:

$$C + O_2 + 3{,}76N_2 = CO_2 + 3{,}76\,N_2 + 93\,980. \qquad (I\text{-}23)$$

3. Зона восстановления. Углекислота и водяные пары, поднимаясь из зоны горения, встречают на пути углерод кокса и вступают с ним в реакцию в зоне восстановления. Температурные ее границы внизу 1000—1200°, вверху порядка 900°.

Основные химические реакции зоны:

$$CO_2 + C = 2CO - 41\,345; \qquad (I\text{-}24)$$

$$H_2O + C = CO + H_2 - 30\,044; \qquad (I\text{-}25)$$

$$2H_2O + C = CO_2 + 2H_2 - 20\,195. \qquad (I\text{-}26)$$

Помимо основных реакций, совершаются и менее характерные (образование углеводородов). Зона восстановления — зона эндотермических реакций с поглощением тепла извне (из зоны горения), без чего процессы восстановления невозможны. Тепло газов зоны горения идет на эти реакции и на нагрев всей вышерасположенной шихты.

Зоны горения и восстановления называются вместе з о н о й г а з и ф и к а ц и и, так как именно здесь происходят реакции образования генераторного газа. Общая высота этих зон 300 ÷ 450 *мм*. Исследования процессов газификации показали, что необходимая высота зоны газификации невелика и составляет 5—10 диаметров куска газифицируемого топлива. Чем выше реакционная способность топлива, тем быстрее проходит реакция восстановления CO_2 в CO.

4. Зона сухой перегонки. Температурные границы: внизу порядка 900°, вверху 200 ÷ 300°. Подогрев шихты происходит за счет охлаждения идущего из зоны восстановления генераторного газа. Топливо при указанных температурах подвергается пирогенетическому разложению: выделяются углекислота, пары воды, угле-

водороды, водород, пары смол и другие газы, остается кокс. Выделившиеся газы сухой перегонки присоединяются к газам из зоны газификации.

Кокс опускается в зону восстановления подогретым в зависимости от степени подготовки топлива до 700 ÷ 850°. Повышение температуры увеличивает его реакционную способность.

5. Зона сушки и подогрева. Температура поступающего в генератор топлива должна быть возможно выше, а влажность возможно ниже, что позволит повысить температуру верхней границы зоны и уменьшить ее общую высоту. Температура нижней границы зоны 200 ÷ 300°. В этой зоне протекают главным образом процесс нагрева топлива и сушка его с выделением основной массы влаги топлива. Зоны сушки и сухой перегонки вместе составляют зону подготовки топлива, общая высота которой определяется условиями теплообмена и величиной влажности топлива. Так, по Д. Б. Гинзбургу, высота зоны подготовки зависит от размера кусков топлива и интенсивности газификации (табл. 9).

Таблица 9

Зависимость высоты зоны подготовки от интенсивности газификации

Топливо	Размер куска в *мм*	Интенсивность газификации в *кг/м² час*	
		100	400
Богословский уголь . .	50	1 300	1 750
Подмосковный и челябинский бурый уголь	50	750	1 150
Каменный уголь	50	350	400
Коксик	20	100	200
Антрацит	20	70	100

С повышением интенсивности газификации увеличивается высота зоны подготовки.

6. Верхний свободный объем определяется в основном конструкцией газогенератора: способом загрузки углем, расположением газоотводящего патрубка и т. д. В свободном объеме происходят выравнивание состава смеси газов и химические реакции второстепенного значения. Общая расчетная высота газогенератора учитывает необходимые высоты отдельных зон.

2. Состав и свойства генераторных газов

К генераторным газам, используемым в печах, относятся следующие.

Воздушный газ. Он получается при продувании сухого воздуха через слой углерода. Главная горючая часть его — окись углерода.

Расчетная схема идеального процесса такова:

$$2C + O_2 + 3{,}76N_2 = 2CO + 3{,}76N_2 + 52\,680. \qquad (I\text{-}27)$$

В полученной смеси (в процентах) содержание CO и N_2 составляет:

$$CO = \frac{2 \cdot 100}{2 + 3{,}76} = 34{,}7\,\%,$$

$$N_2 = 100 - 34{,}7 = 65{,}3\,\%.$$

Выход газа на 1 *кг* углерода по реакции (I-27)

$$V = \frac{22{,}4 \cdot (2 + 3{,}76)}{2 \cdot 12} = 5{,}37\ нм^3/кг.$$

К.п.д. газификации (при теплоте сгорания углерода $Q_c = 7\,825$ *ккал/кг* и теплоте сгорания газа $Q_н^c = 0{,}347 \cdot 3\,018 = 1\,030$ *ккал/нм*^{3}) будет

$$\eta = \frac{1\,030 \cdot 5{,}37 \cdot 100}{7\,825} = 71\,\%.$$

В практических условиях в газогенераторе воздушного газа при газификации топлива происходят и другие химические реакции, а к.п.д. за счет потерь тепла значительно ниже. Выход газа составляет 4—5 *нм*^{3}*/кг* при температуре до 900°. Очень высокая температура в зоне горения (выше 1500°) приводит фактически к быстрому расплавлению золы, к шлакованию и нарушению снабжения слоя кислородом, к большим механическим потерям, к разгару футеровки и металлических газопроводов и частым простоям в работе. Работа по такой же схеме нецелесообразна.

Водяной газ. Для получения водяного газа в идеальном процессе через слой углерода продуваются водяные пары. Водяной газ в качестве горючих содержит водород и окись углерода. Так как реакция эндотермична, для устойчивости процесса и удержания его температуры на высоком уровне необходимо к слою топлива подводить тепло извне. Практически для организации процесса через слой топлива попеременно продувают: воздух для разогрева слоя за счет полного сгорания нижних слоев топлива [экзотермическая реакция по формуле (I-23)], а затем водяной пар для получения водяного газа [эндотермическая реакция по формуле (I-25)].

Продукты воздушной продувки отводятся отдельно для использования, например, в паровом котле для производства дутьевого пара и т. д. Газы воздушной продувки при полном сгорании углерода будут иметь 21% CO_2 и 79% N_2.

Водяной газ будет состоять из 50% CO и 50% H_2. Выход обоих газов на все количество углерода составит (по расчету, аналогично сделанному выше); водяного газа 2,9 *нм*^{3}*/кг*, или 59%, газа воздушной продувки 2 *нм*^{3}*/кг*, или 41%.

В практическом процессе требуется очень частая перекидка клапанов для перехода от одного процесса к другому (каждые

2—3 мин.). Четкое разделение газов невозможно, поэтому газы воздушной продувки содержат, помимо CO_2 и N_2, также и CO, а водяной газ — балластные газы, и его теплота сгорания (2 500 ÷ 2 600 *ккал/нм*³) всегда ниже теоретической, равной 0,5 · 3 018 + 0,5 · 2 557 = 2 787 *ккал/нм*³. К. п. д. практического процесса зависит как от конструкции генератора, так и от вида топлива. Он равен от 40% (для бурых углей) до 70% (для антрацита). Сложность оборудования и управления процессом ограничивает область применения водяного газа.

Смешанный (паровоздушный) газ. Этот газ получается комбинированием схем получения воздушного и водяного газов в непрерывном процессе. При этом целесообразно снижается температура газификации, поднимается теплоценность газа по сравнению с этими показателями для воздушного газа и устраняется неравномерность работы, характерная для схемы получения водяного газа. В газогенераторах паровоздушного газа к воздушному дутью непрерывно добавляют водяной пар в небольшом количестве (0,2—0,3 *кг/кг* топлива при тугоплавкой золе и 0,4—0,6 *кг/кг* при легкоплавкой) и получают газ с теплотой сгорания 1 150—1 550 *ккал/нм*³. Ход генератора благодаря охлаждению шлакового слоя паром равномерен и устойчив, оборудование сравнительно просто и стоимость газа невысока. Поэтому паровоздушный газ получил наибольшее распространение из всех видов генераторных газов для сжигания в печах. Смешанный паровоздушный газ содержит: CO = 25—30%; H_2 = 12,5—16%; CO_2 = 5—8%; CH_4 = 0,3—3%; H_2S = 0,1—1,2%; C_mH_n = 0—0,40%; O_2 = 0,2%; влаги 40—500 *г/нм*³ (меньше для газа из антрацита, больше — из торфа и дров). Количество добавляемого в дутье пара контролируют по температуре вдуваемой смеси пара и воздуха. Для повышения теплоты сгорания паровоздушного газа в последнее время вводится подогрев паровоздушного дутья до 300—600°. Подогрев дутья на каждый градус увеличивает теплоту сгорания газа в среднем на 0,4—0,5 *ккал/нм*³. Несколько увеличивается и выход газа. Подогрев паровоздушного дутья производится в игольчатых или трубчатых рекуператорах за счет тепла отходящих от печей газов или при более высоком подогреве (до 500—600°) газами из специального подтопка.

Одновременно с подогревом дутья увеличивают против обычного и добавку пара к воздушному дутью (до 0,8—0,9 *кг/кг* топлива).

Меньшее распространение имеют газы: п а р о к и с л о р о д н ы й (оксигаз), получаемый при высоком давлении (20—25 *ати*) и при кислородном дутье, он имеет $Q^c_н$ = 5 000 *ккал/нм*³; р е г е н е р а т и в н ы й, получаемый продувкой через слой топлива углекислоты; к а р б ю р и р о в а н н ы й — обогащенный продуктами разложения нефтяных остатков и смол, и д в о й н о й и т р о й н о й водяной газ, обогащенный продуктами сухой перегонки газифицируемого топлива.

3. Классификация газогенераторов и основные показатели их работы

Типы и конструкции газогенераторов весьма разнообразны. Их можно классифицировать по следующим признакам: 1) по составу получаемого газа: воздушный, водяной и т. д.; 2) по методу газификации: прямой процесс в спокойном слое, во взвешенном состоянии и т. д.; 3) по степени механизации: механизированный, полумеханизированный; 4) по способу удаления шлака: с сухим, с мокрым, с жидким шлакоудалением; 5) по давлению: работающие под разрежением, под небольшим давлением (от газодувки) или под высоким давлением (5—25 *атм*). Помимо этого, газогенераторы одного типа, но предназначенные для различных топлив, отличаются отдельными узлами: наличие швельшахты, число патрубков для отвода газа и т. д. Газостанция в целом дополнительно характеризуется способом очистки газа, выдавая газ: неочищенный, холодный очищенный и т. д.

Газогенератор по своей конструкции представляет собой шахтную печь или трубу с круглым или прямоугольным сечением. Это сечение в свету F $м^2$ дает основную габаритную характеристику газогенератора, по которой определяются интенсивность работы (тепловая и весовая) и общая производительность газогенератора.

Тепловая интенсивность, или напряжение сечения шахты, равна

$$И_т = \frac{Q_н^р B}{F} \; [ккал/м^2час]. \qquad (I\text{-}28)$$

Весовая интенсивность выражается формулой

$$И = \frac{B}{F} \; [кг/м^2час]. \qquad (1\text{-}29)$$

Весовая интенсивность для полумеханизированных газогенераторов смешанного газа может быть принята (в $кг/м^2$ *час*): 250 ÷ 350 (антрацит и кокс), 300 ÷ 400 (спекающиеся каменные угли), 350 ÷ 500 (неспекающиеся бурые угли и торф), 500 ÷ 600 древесная щепа. Для генераторов кипящего слоя 1 000 ÷ 1 800 и для генератора ВТИ (горнового процесса под давлением 4 ÷ 7 *ати*) 1 600 ÷ 2 500.

Общая производительность газогенератора

$$B = И\, F \; [кг/час]. \qquad (I\text{-}30)$$

Площадь сечения шахты в современных газогенераторах доходит до $F = 10$ $м^2$.

Полученный из газогенератора газ несет с собой теплоту сгорания горючих ($Q_н^с$ *ккал/нм*^{3}) и физическое тепло генераторного газа ($Q_ф$ *ккал/нм*^{3}). Последнее не может быть использовано, если газ по-

дается в печь охлажденным, поэтому полезным при холодном газе считается лишь тепло $Q_н^с$. На каждый килограмм газифицируемого топлива получается определенное количество газа в *нм*³. Отсюда следующим показателем работы газогенератора является выход газа V *нм*³/*кг*. Выход сухого смешанного генераторного газа на 1 *кг* топлива в среднем составляет: для антрацита 4—4,8; для кокса 3,5—4; для буроугольных брикетов 2,5—3,2; для торфа 1,3—1,8; для древесины 1,3—1,6; для каменных углей 2,8—4; для бурых углей 1,4—2.

Тепло топлива, перешедшее в газ, оценивается коэффициентом полезного действия газогенератора η. Коэффициент полезного действия при использовании горячего газа

$$\eta_1^г = \frac{Q_н^с + Q_ф}{Q_н^р} V. \qquad (I\text{-}31)$$

То же, при использовании холодного газа

$$\eta = \frac{Q_н^с V}{Q_н^р}. \qquad (I\text{-}32)$$

Обычно в среднем $\eta = 0{,}7 \div 0{,}8$.

Теплота сгорания газа определяется по формуле

$$Q_н^с = \Sigma Q_i V_i. \qquad (1\text{-}33)$$

Здесь V_i — объемная доля отдельных газов в смеси в долях единицы, Q_i — теплота сгорания этих газов в *ккал*/*нм*³:

Окись углерода (CO)	3018	Бензол (C_6H_6)	33530
Водород (H_2)	2557	Метиацетилен (C_3H_4)	19720
Метан (CH_4)	8555	Ацетилен (C_2H_2)	13390
Этан (C_2H_6)	15230	Этилен (C_2H_4)	14110
Пропан (C_3H_8)	21800	Пропилен (C_3H_6)	20550
Бутан (C_4H_{10})	28350	Бутилен (C_4H_8)	27120
Пентан (C_5H_{12})	34900	Пентилен (C_5H_{10})	33660
Гексан (C_6H_{14})	41230	Циклогексан (C_6H_{12})	39350
Сероводород (H_2S)	4800		

Все виды топлива, за исключением антрацитов и кокса, при газификации выделяют смолы, обладающие своей теплотой сгорания: 6 500—6 800 *ккал*/*кг* из древесины, 8 000 *ккал*/*кг* из торфа, 8 500—8 700 *ккал*/*кг* из каменного угля. Количество смолы на 1 *кг* газифицируемого топлива, в *кг*: для бурого угля 0,025—0,03; для каменного угля 0,03—0,04; для торфа 0,04—0,1; для древесины 0,06—0,12.

Необходимой и отличительной особенностью современного газогенератора является высокая степень механизации трудоемких работ: по загрузке его топливом, шуровке слоя и выгрузке очаговых остатков. Обязательным требованием являются легкость контроля за ходом процесса и гибкость регулирования его. Предварительная сортировка топлива, равномерная загрузка, своевременная шуровка слоя, равномерная выгрузка очаговых остатков,

оптимально форсированное дутье под слой топлива позволяют повысить интенсивность работы современного механизированного газогенератора в 5 раз и более по сравнению с бездутьевым немеханизированным.

4. Очистка и охлаждение газа

Газ, выходящий из газогенератора, имеет повышенную до $200 \div 600°$ температуру, содержит пыль до $10 \div 30$ *г/нм*^{3}, водяные пары до $100 \div 500$ *г/нм*^{3}, а если топлива битуминозные и сернистые, то и смолы, уксусную кислоту, сернистые соединения. Между тем в печах и других установках часто не может использоваться газ такого качества, к ним в разных случаях следует подавать газ с определенной степенью очистки. Передача горячего неочищенного газа связана с рядом затруднений. Высокая температура генераторного газа быстро вызывает выход из строя металлических газопроводов, а применение огнеупорной футеровки утяжеляет их. Объем горячего газа в 2—4 раза больше объема холодного газа, что приводит к повышенным скоростям газа в газопроводе, к потере энергии на транспортирование газа или к увеличению сечений и, следовательно, удорожанию газопровода. Большая поверхность газопроводов быстро снижает температуру горячего газа из-за больших тепловых потерь.

Пыль, содержащаяся в газе, при передаче на значительные расстояния оседает в газопроводе и забивает его, требуя частой очистки и устройства многочисленных пылевых мешков на пути.

Горелки лучших конструкций с малыми отверстиями для хорошего перемешивания газа с воздухом, дающие наибольший к.п.д. сгорания, не могут длительно работать на неочищенном газе, остановка же печи для их очистки снижает ее годовую производительность. Газы, содержащие смолы и охладившиеся до температуры 400°, интенсивно выделяют смолу, что резко увеличивает трудности транспортирования неочищенного газа, требует периодического выжигания отложений в газопроводах, поэтому снижение температуры неочищенного газа ниже 400—300° при его передаче по газопроводу недопустимо. Применение горячего неочищенного газа в настоящее время по всем этим причинам ограничивается только случаем печей с простыми горелками, расположенными в непосредственной близости от газогенераторов. Горячий газ может очищаться от пыли методом сухой очистки без большой потери температуры и физического тепла. Сухая очистка позволяет избежать установки дорогостоящего смолоудаляющего устройства, а также появления в результате очистки большого количества загрязненных вредными веществами (фенолами и т. д.) сточных вод. Степень очистки сухим путем от мелкой пыли невелика, смолы же остаются при температуре выше 400° в парообразном состоянии и используются в дальнейшем при сжигании газа.

Транспортирование газа от центральной газогенераторной станции на расстояние более 100 *м* и по разветвленным сетям к ряду

печей, работающих на большом числе горелок небольшой мощности (как это имеет место, например, в туннельных печах), и необходимость установки измерителей расхода и состава газов требуют применения только холодного очищенного газа. Холодный обезвоженный газ необходим и для высокотемпературных процессов.

Мокрая очистка газа (водяной промывкой) приводит к охлаждению газа, к снижению его влажности, к отделению также и мелкой пыли, к конденсации смол и частичному растворению некоторых составных частей его (аммиака, сероводорода).

Если газ бессмольный, то очистка проходит по схеме: газогенератор, стояк-охладитель, скруббер, коллектор, вентилятор,

Рис. 12. Схема очистки смолистого газа

1 — газогенератор; *2* — стояк; *3* — коллектор неочищенного газа; *4*—газопровод к электрофильтру; *5* — электрофильтр; *6* — газопровод к скрубберам; *7* — трехступенчатый скруббер; *8* — коллектор очищенного газа; *9* — газовый вентилятор; *10* —каплеуловитель; *11* — газопровод к потребителю; *12* — воздушный вентилятор; *13* — воздухопровод к газогенератору; *14* — паропровод низкого давления; *15* — паросборник; *16* — паровое сопло

каплеуловитель и газопровод к потребителю. Охлажденный в стояке до 100÷150° и в скруббере до 30÷40° газ не может удержать влагу, большую, чем это соответствует полному насыщению при данной температуре, и поэтому его влагосодержание падает до 30—60 *г/нм*^{3} — газ осушается. Вынесенные капли укрупняются в вентиляторе и отделяются в каплеуловителе. Содержание пыли снижается до 0,5—1 *г/нм*^{3}. Скруббер представляет собой башню, куда подается вода для промывки и охлаждения газа: форсунками, если скруббер безнасадочный, под давлением 3—5 *ати* или без большого давления, если скруббер имеет насадку из керамических колец, деревянных реек или из кусков кокса. Каплеуловитель — башня с насадкой, как у скруббера, работает без подачи воды. Если газ смолистый и смолы должны улавливаться, то после стояка-охладителя, снижающего температуру газа до наивыгоднейшей для смолоочистки (80—90° С), устанавливаются электрофильт-

ры или дезинтеграторы. Схема в остальном аналогична схеме очистки бессмольного газа (рис. 12).

Электрофильтр — камера, где установлены несколько пар коронирующих и осадительных электродов. Коронирующие питаются от отрицательного полюса постоянным пульсирующим током высокого напряжения (40—75 *кв*), осадительные — заземлены. Взвешенные частицы проходящего через фильтр газа заряжаются отрицательно и оседают на заземленных электродах, затем или стекают по нему, или автоматически сбрасываются по мере накопления в приемник. Дезинтеграторы — машины, где под действием ударов и центробежной силы, создаваемых вращающимися дисками с лопатками, капли смолы отлетают на корпус машины и стекают по нему в приемник. Степень улавливания в электрофильтрах 95—98%, в дезинтеграторах несколько ниже.

Сточные воды газостанций, содержащие фенолы, отравляют большую территорию их сброса. Очистка фенольных вод требует значительных капиталовложений. Чтобы избежать сброса фенольных вод, рекомендуется подсушивать влажное топливо (торф, дрова) до влажности 25—30% или переводить газогенераторы на топливо с малым содержанием влаги (антрациты, кокс).

5. Методы газификации

Описанный подробно (см. рис. 11 и 13,*а*) прямой процесс газификации в слое в настоящее время получил наибольшее распространение. Если топливо влажное и битуминозное, то используются газогенераторы прямого процесса со швельшахтой. Смолы, выделяющиеся в швельшахте, на больших газостанциях улавливаются в смолоочистителях, стоимость которых относительно высока, и используются. Когда же смолы неэкономично использовать отдельно, их вводят в газогенератор в зону горения или топливо газифицируют в обращенном процессе (рис. 13,*б*) или в двухзонных газогенераторах (рис. 13,*в*).

В последнее время сконструированы специальные газогенераторы, интенсифицирующие процесс газификации и сжигающие низкосортные топлива и их отходы. Так, например, применяется схема газификации в кипящем слое (рис. 13,*д*), которая состоит в следующем: топливо размером менее 0,5 *мм* (50%) и 0,5—3 *мм* (50%) после предварительной подсушки до W^{p}=10% ложится слоем 1 500—2 000 *мм* на решетку. Дутье подается через решетку под напором 4 000 *мм* вод. ст., в самом генераторе 2 500 *мм* вод. ст. Воздух в количестве 20% подается через сопла над слоем как вторичное дутье для снижения уноса топлива. Первичное дутье обогащено кислородом, инжектируемым паром (кислорода 0,3 *нм*^{3}/*нм*^{3}, пара 0,6 *кг*/*нм*^{3}). Температура парокислородной смеси 100°. Температура газа на выходе 900°, теплота сгорания газа до 2 000 *ккал*/*нм*^{3}. Средняя интенсивность по сечению шахты до 1 800 *кг*/*м*^{2} *час* буроугольной мелочи. Газогенераторы с кипящим слоем высокопроизводительны, но еще имеют повышенные (до

30%) потери топлива от механического недожога, громоздки и расходуют много кислорода.

Газификация во взвешенном состоянии (рис. 13,*е*) разработана Всесоюзным научно-исследовательским институтом горючих ископаемых (ВНИГИ) для фрезерного торфа. В верхней части топливо подсушивается на тарелках со скребками. Затем сбрасывается в шахту для газификации. Унос возвращается через циклон снова в шахту. Паровоздушное дутье дается снизу. Хотя теплота сгорания газа из такого генератора получена ниже, чем при слоевой газификации кускового торфа, однако интенсивность возрастает до 5 раз, достигая здесь 1 250 *кг/м²час*. Кроме того, малое содержание в газе смол, уксусной кислоты и фенолов уменьшает затраты на последующую очистку.

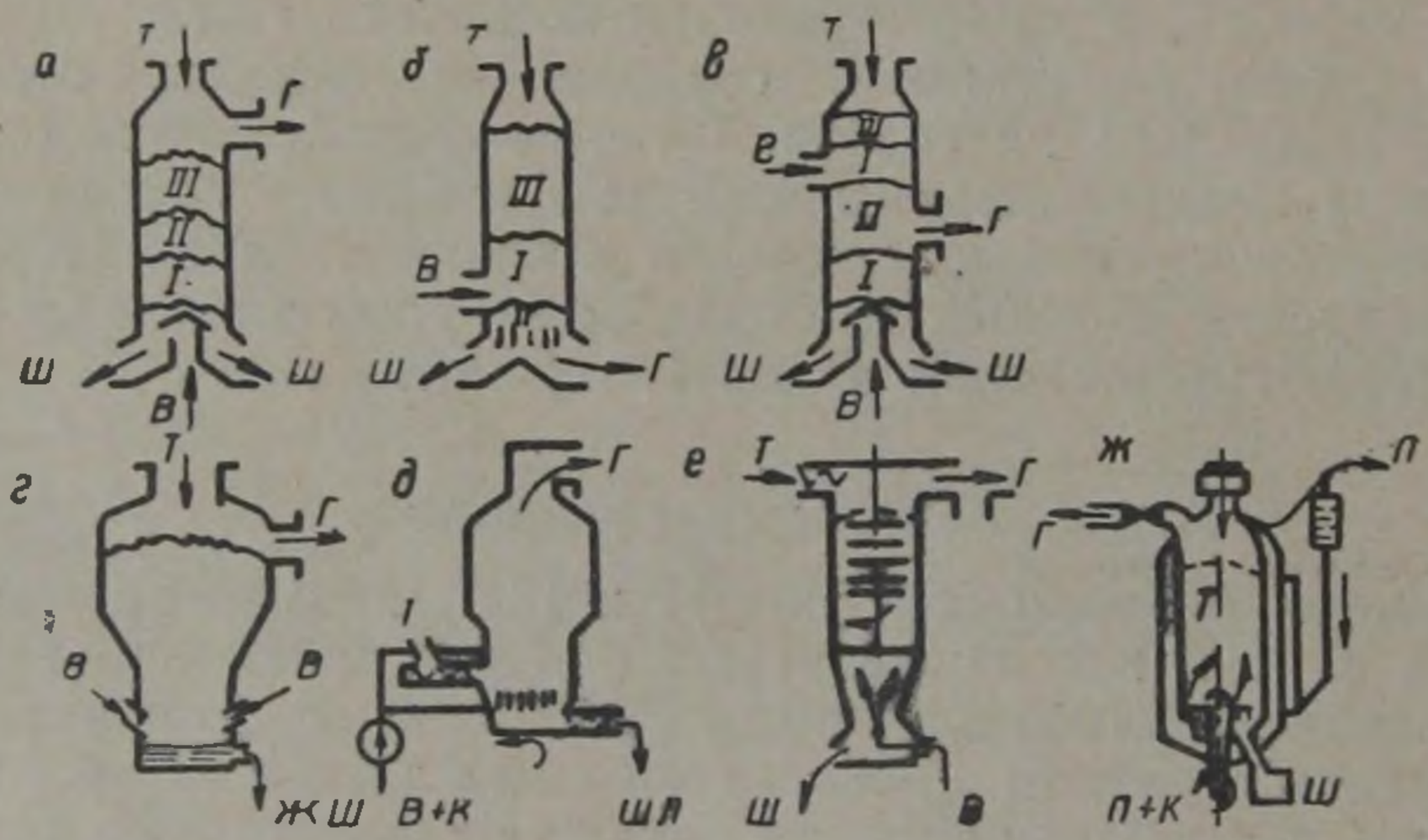


Рис. 13. Схемы газификации. Зоны: *I* — окисления, *II* — восстановления, *III* — подготовки

а — прямой процесс; *б* — обращенный; *в* — двухзонный; *г* — с жидким шлакоудалением; *д* — в кипящем слое; *е* — во взвешенном состоянии; *ж* — под высоким давлением; *Г* — отвод газа; *Т* — подача топлива; *В* — подача воздуха; *Ш* — выход шлака; *ЖШ* — жидкий шлакоотвод; *П* — пар; *К* — кислород; *П+К* — смесь пара и кислорода; *В+К* — воздух, обогащенный кислородом

Генераторы с жидким шлакоудалением (рис. 13,*г*) имеют некоторые преимущества: высокая температура, поддерживаемая в процессе газификации, ускоряет его, обусловливая интенсивность, бóльшую, чем в газогенераторах без жидкого шлакоудаления, что ведет к сокращению числа газогенераторов при той же отдаче газа потребителям. В газогенераторах с жидким шлакоудалением можно газифицировать топлива с легкоплавкой золой, в то время как в газогенераторах с решетками легкоплавкость золы приводит к их шлакованию и нарушению хода газогенератора; чтобы избежать застывания шлака, в шихту добавляют плавни (известняк, доменный шлак и т. д.), понижающие температуру плавления шлака, или применяют горячее дутье, используя для нагрева воздуха теплоту горячего генераторного газа.

Типы и конструкции газогенераторов различаются по давлению,

с которым они работают. Простейшие кирпичные газогенераторы, расположенные близ печей, работают под разрежением, создаваемым тяговыми устройствами самой печи. Весовая интенсивность работы таких газогенераторов невысока, так как газовое сопротивление слоя топлива в них требует резкого увеличения разрежения в сети при повышении интенсивности газификации, а это связано с возрастанием присосов в газовый тракт, опасностью образования взрывчатой смеси, обеднением газа. Подавляющее же большинство газогенераторов для печей работает под дутьем вентиляторов с положительным давлением в газовой сети. Как указывалось выше, газогенераторы для парокислородного газа работают под давлением (рис. 13,*ж*), значительно превышающим атмосферное (20—25 *ати*). В промышленных образцах диаметр их доходит до 2 500 *мм*. Они снабжены парообразующей рубашкой, вращающейся решеткой, давление под которой создается компрессором.

Подземная газификация была предложена Д. И. Менделеевым и горячо одобрена В. И. Лениным*. Она позволяет использовать уголь в природных пластах без выемки его на поверхность. В 1934 г. в Углехимическом институте (Донбасс) был разработан метод газификации целика без искусственного раздробления или поточный метод газификации, а в 1935 г. вступила в строй первая промышленная станция подземной газификации в Горловке. Бесшахтный способ внедрен впервые в 1941 г. на подмосковной станции. Подземный газ выходит из скважин при температуре около 500° с теплотой сгорания 800 *ккал/нм*^{3} и выше. На Кузбасской станции с применением воздушного дутья получен газ 1 300 *ккал/нм*^{3}. Метод подземного полукоксования, испытанный на Горловской станции с периодической продувкой пласта, дал газ с содержанием CO=11—19%, H_2=46—57% и с теплотой сгорания 2 000 *ккал/нм*^{3}. Бесшахтный способ совершенно устранил подземную подготовку процесса газификации, так как скважины, дутьевые и отводные, бурятся с поверхности, а соединительные каналы в пласте для газификации его или огневые забои образуются путем прожога угольного пласта сжатым воздухом или тепловым пробоем с помощью электрического тока высокого напряжения. Выходящий газ собирается в коллекторы и направляется на охлаждение и очистку. Успешная газификация углей под землей, впервые проведенная в СССР, заставила и зарубежные страны в послевоенные годы приступить к постановке таких опытов.

6. Конструкции газогенераторов

В механизированном газогенераторе все тяжелые операции: загрузка топлива, шуровка слоя, выгрузка очаговых остатков — выполняются механизмами (рис. 14). Загрузка топлива производится из бункера по течке, на которой установлен двухбарабанный питатель. Число оборотов питателей меняется в зависимости от нагруз-

---

* Газета «Правда» от 21/IV (4/V) 1913 г.

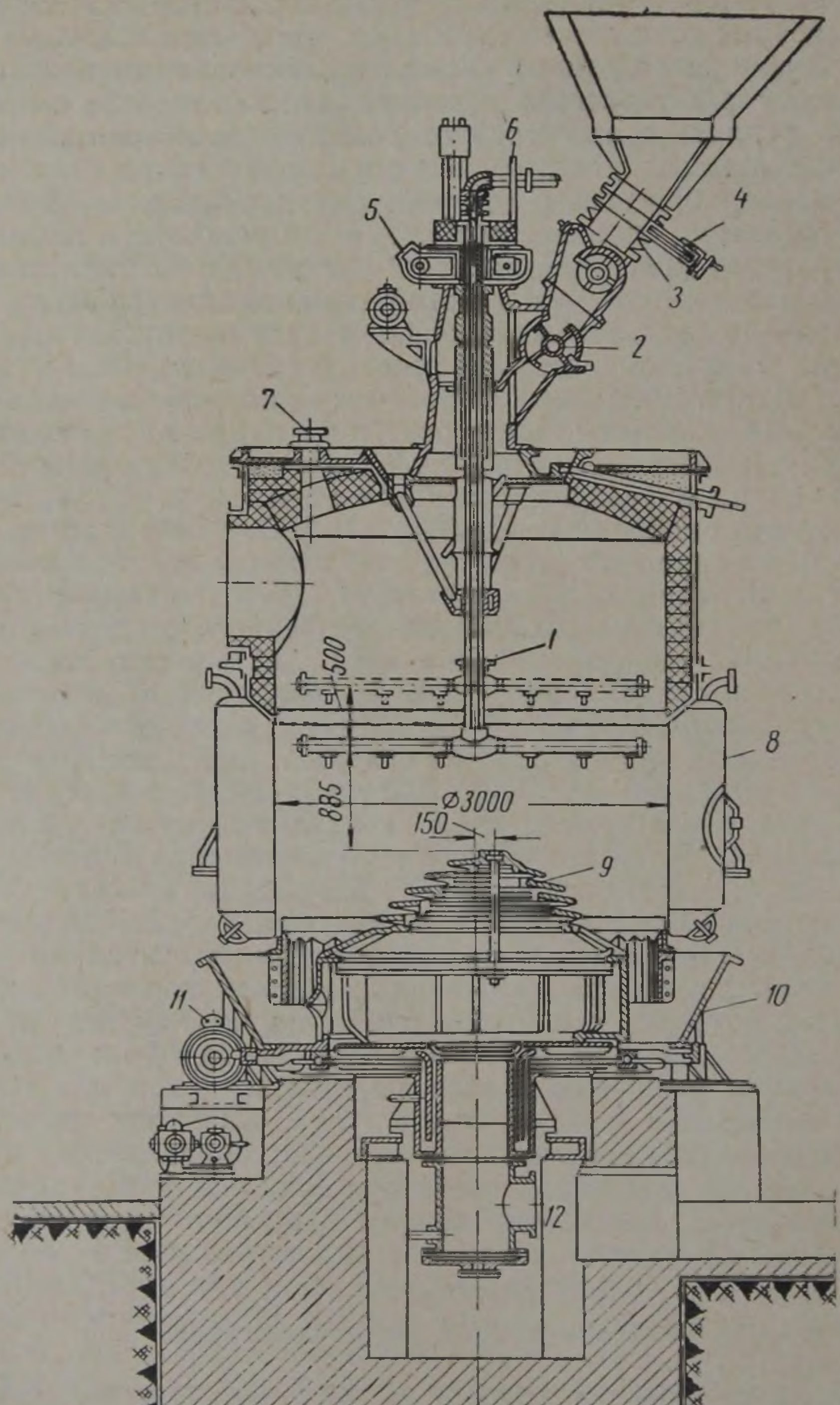


Рис. 14. Механизированный газогенератор

1 — мешалка; *2* — барабанный питатель топлива; *3* — компенсатор; *4* — регулирующий шибер; *5* — привод мешалки; *6* — труба, подводящая охлаждающую воду к мешалке; *7* — шуровочное отверстие; *8* — водяная рубашка; *9* — колосниковая решетка; *10* — чаша; *11* — привод чаши; *12* — подвод воздуха

ки газогенератора, например от 0,2 до 1,5 об/мин; привод от электромотора небольшой мощности (1—3 *квт*). Два барабана создают достаточную плотность от прорыва в помещение вредных для человека газов. В некоторых конструкциях загрузок с двойными конусами для уплотнения у открывающихся загрузочных отверстий вводят воздушные или паровые завесы. Выходящие под давлением около 5 *ати* струи препятствуют выходу газа наружу. Операция шуровки механизируется устройством или качающегося лома при вращающейся шахте, или вращающейся (около 10 об/час) мешалки, напоминающей грабли. Оба приспособления предназначены для выравнивания слоя и для предупреждения спекания склонных к нему топлив. Мешалка автоматически располагается на необходимой высоте шахты и имеет возможность передвигаться по высоте на 0,5 *м*. От перегорания она предохраняется охлаждением проточной водой (с расходом воды 2—3 $м^3/час$). Механизация шлакоудаления достигается или постоянным удалением шлака вращающимися решетками, или поддержанием в нижней части специальных газогенераторов повышенной температуры, достаточной для расплавления шлака и выпуска его в жидком виде. Вращающиеся решетки выполняют одновременно функцию подвода воздуха в топливный слой таким образом, чтобы он был равномерно снабжен кислородом. Так как сопротивление слоя около относительно гладких стенок генератора значительно меньше, чем в центральной части, современные решетки подводят воздух в центр, откуда он растекается по всему сечению. Для удаления золы и шлака поддон чаши снабжается ребрами, которые подрезают шлак

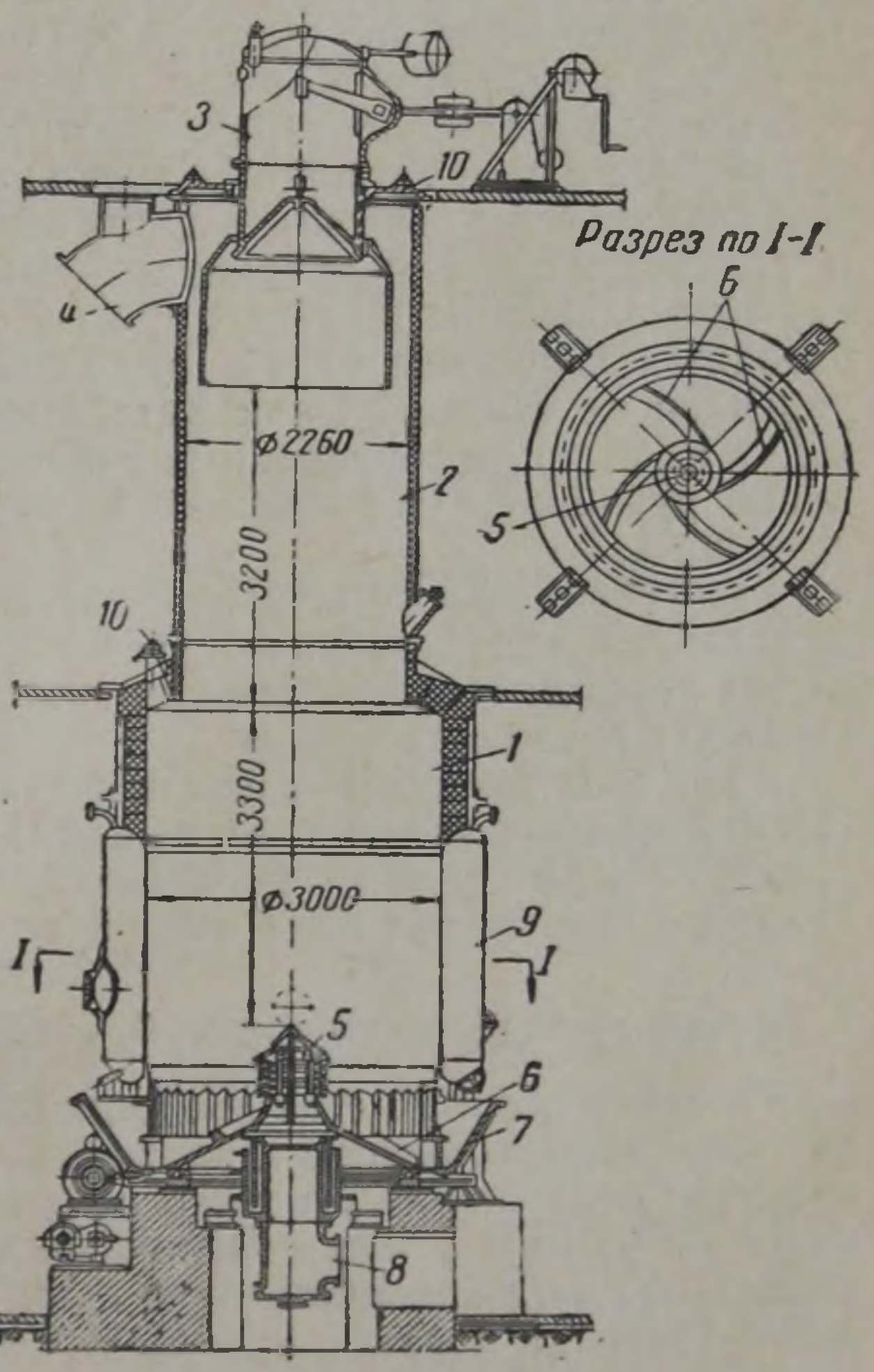


Рис. 15. Полумеханизированный газогенератор со швельшахтой

1 — основная шахта; *2* — швельшахта; *3* — загрузочная коробка; *4* — отвод газа; *5* — колосниковая решетка; *6* — фрезы чаши; *7* — чаша; *8* — подвод воздуха; *9* — водяная рубашка; *10* — шуровочные отверстия

и равномерно выгружают его наружу. Равномерное опускание слоя топлива в шахте имеет большое значение для повышения экономичности и интенсивности процесса газификации. Оно зависит от правильности работы шлакоразгрузочных устройств газогенератора. Если давление дутья в газогенераторе невысокое, то устраивается мокрое шлакоудаление: в чашу подается вода, которая образует гидравлический затвор высотой 300÷450 *мм* вод. ст. в зависимости от напора дутья. При высоком давлении устройство гидравлического затвора нецелесообразно с конструктивной стороны и поэтому он заменяется сухим затвором. Сухое шлакоудаление выполняется и в том случае, если очаговые остатки обладают вяжущими свойствами и образуют с водой трудноудаляемые массы. Чаши генераторов перекатываются на шаровых или роликовых опорах. Вращение производится червячной парой от электромотора. Зубчатый венец укреплен на чаше. Так как футеровка в горячих зонах быстро выходит из строя, в современных газогенераторах она заменяется водяной рубашкой. Образующийся пар используется в качестве дутьевого.

Газогенераторы со швельшахтой. На рис. 15 показана конструкция полумеханизированного газогенератора со швельшахтой и одним отбором газа для газификации торфа и древесины, имеющих большую влажность.

Если топливо сухое и швельшахта может разогреться до высоких температур, устраивают не один, а два отбора газа на разных уровнях. Через нижний пропускают часть газа с тем, чтобы температура газа из верхнего отбора не превышала 100—120°.

7. Техника безопасности при эксплуатации газогенераторных станций

Газогенераторные станции вырабатывают горючий газ, который является взрывоопасным и ядовитым. В паровоздушном генераторном газе содержание угарного газа доходит до 30%, в водяном — более 40%, между тем содержание его в атмосфере помещения свыше 0,03 *мг/л* недопустимо по санитарным нормам, а содержание окиси углерода порядка 0,1—0,3% и выше является уже смертельным для людей, работающих в этом помещении. Отравляющими являются и водород и тяжелые углеводороды (H_2, C_mH_n). Для предотвращения отравлений персонала необходимо на каждой станции выполнить мероприятия по абсолютному уплотнению всех участков, находящихся под давлением газа. Современные механизированные газогенераторы закрыты и уплотнены лучше, чем старые с ручным обслуживанием и кирпичные газогенераторы. Уплотнение обеспечивается отличной пригонкой стыкующихся деталей, употреблением хороших прокладок, газонепроницаемыми обмазками, гидравлическими затворами. За уплотнениями устанавливается систематический контроль. Газогенераторная станция обеспечивается мощной вентиляцией. Так как через уплотнения может просочиться газ при повышении давления в газопроводе, то на нем устанавливаются надежно работающие предохранительные клапа-

ны, выводящие в атмосферу свечи высотой 12 ÷ 15 *м* и диаметром 250 ÷ 300 *мм*, и регуляторы давления. Осмотры и чистки газопроводов производятся не менее чем двумя рабочими в предохранительных костюмах.

Генераторный газ в смеси с воздухом взрывоопасен при содержании его в воздухе в пределах от 45 до 70%. Воздух проникает в газопровод при снижении в нем давления, что и приводит к образованию взрывчатой смеси. Для предотвращения взрыва устанавливаются регуляторы давления и предупредительная сигнализация. Устраняется всякая возможность соприкосновения газовоздушной смеси с источниками воспламенения. Такими источниками могут быть горячие (500° и выше) поверхности, открытый огонь, искры и т. д. При наличии катализаторов воспламенения (сажа, раскаленный огнеупор, водяные пары) температура воспламенения горючей смеси может быть и ниже 500°, что заставляет особенно тщательно следить за устранением всех подобных причин взрыва газа.

Каждая газогенераторная установка должна иметь спасательную станцию с необходимым оборудованием по действующим нормам.

ГЛАВА V

РАСЧЕТЫ ПОЛНОГО И НЕПОЛНОГО ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

1. Полное горение

В процессе горения окислителем служит или кислород атмосферного воздуха, или кислород, искусственно полученный и направляемый на горение в качестве обогатителя. Обогащение дутья кислородом является прогрессивным методом повышения интенсивности высокотемпературных процессов плавки и обжига.

При обогащении кислородом содержание его в дутье поднимается с 21% (чистый воздух) до 40% и более, что влечет за собой уменьшение балластного азота в продуктах сгорания (рис. 16) и резкое повышение температуры горения. Однако после 1600—1700° темп роста температуры замедляется из-за начинающейся диссоциации CO_2 и H_2O.

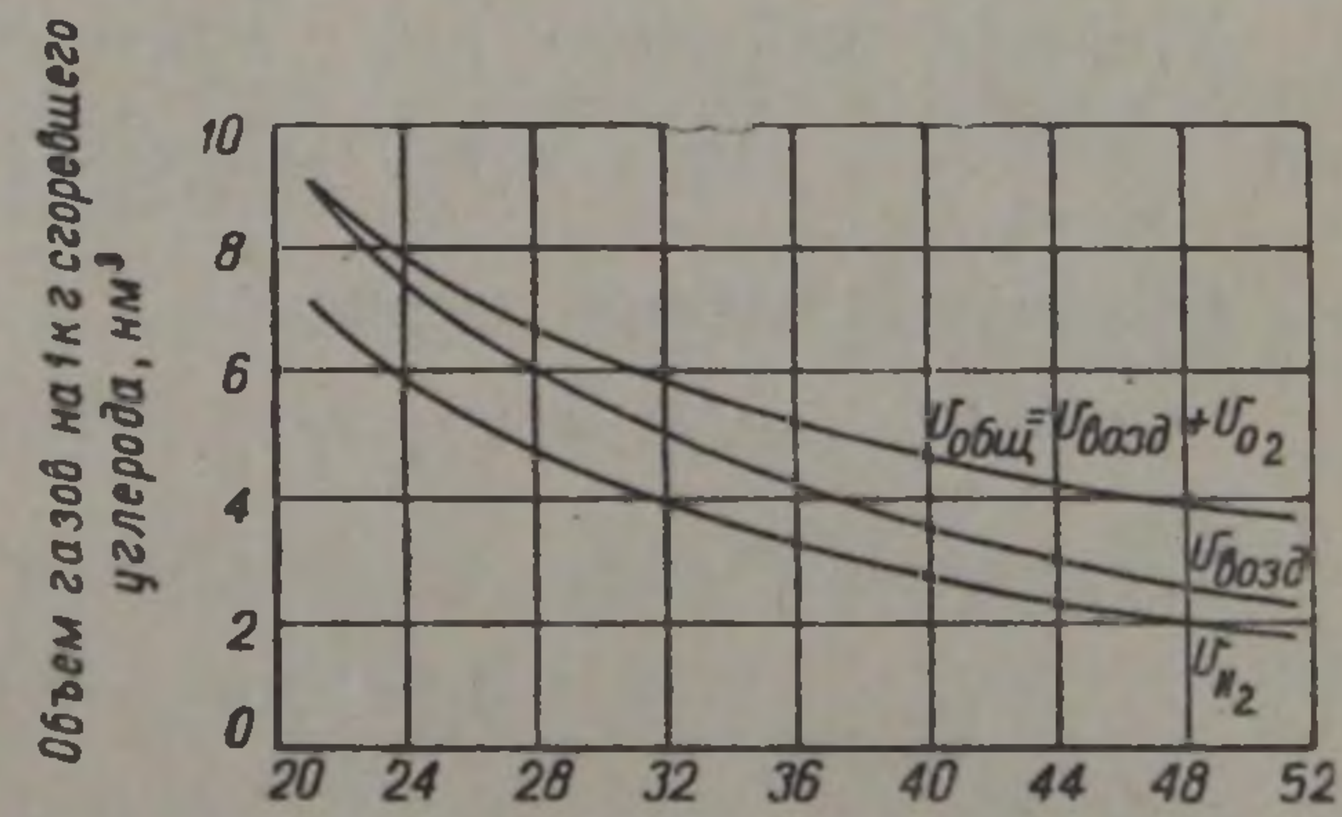


Рис. 16. Снижение общего количества дутья ($V_{общ}$) и балластного азота (VN_2) в зависимости от содержания кислорода в дутье

Расчеты горения производятся по конечным теплохимическим формулам окисления горючих топлива. Они сводятся к определению количества кислорода и воздуха, потребных для горения, состава и теплосодержания продуктов горения и действительной температуры горения.

Вначале устанавливается процент потерь топлива от механической неполноты сгорания $q_м$ (%) на основе нормативных данных (см. главу III,1). Действительные количества газов получаются умножением теоретических на коэффициент $\frac{100-q_м}{100}$.

Теоретическое количество кислорода, потребное для полного сгорания 1 *кг* топлива:

$$V^0_{O_2} = 0{,}0187\,(C^р + 0{,}375S^р) + 0{,}056H^р - 0{,}007O^р\ [нм^3/кг]. \quad (I\text{-}34)$$

Теоретическое количество воздуха-кислородоносителя зависит от степени его обогащения кислородом:

$$V^0 = \frac{V^0_{O_2}}{a_{O_2}}, \quad (I\text{-}35)$$

где a_{O_2} — объемная доля кислорода в воздухе, идущем на горение.

Если воздух атмосферный, то $a_{O_2} = 0{,}21$ и теоретическое количество воздуха по объему

$$V^0 = 0{,}0889\,(C^р + 0{,}375S^р) + 0{,}265H^р - 0{,}0333O^р\ [нм^3/кг]. \quad (I\text{-}36)$$

Или по весу

$$L^0 = 0{,}115\,(C^р + 0{,}375S^р + 0{,}342H^р - 0{,}0431O^р\ [кг/кг]. \quad (I\text{-}37)$$

Теоретический объем азота в продуктах сгорания

$$V^0_{N_2} = 0{,}79V^0 + 0{,}8\frac{N^р}{100}\ [нм^3/кг]. \quad (I\text{-}38)$$

Объем трехатомных газов

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2} = 1{,}866\frac{C^р + 0{,}375S^р}{100}\ [нм^3/кг]. \quad (I\text{-}39)$$

Теоретический объем водяного пара

$$V^0_{H_2O} = \frac{8{,}94H^р + W^р + 100\,W_{п.д} + 0{,}1dV^0}{80{,}4}\ [нм^3/кг]. \quad (I\text{-}40)$$

Здесь $W_{п.д}$ — количество пара, вводимого с дутьем, в *кг/кг*.
d — влагосодержание атмосферного воздуха в *г/нм*^{3}.

Если пара в дутье нет, а $d = 10$ *г/кг*, или $d = 13$ *г/нм*^{3}, как это принимается в расчетах, то

$$V^0_{H_2O} = \frac{8{,}94H^р + W^р}{80{,}4} + 0{,}016V^0\ [нм^3/кг]. \quad (I\text{-}41)$$

Теоретический объем сухих газов

$$V^0_{\text{с.г}} = V_{RO_2} + V^0_{H_2} \; [нм^3/кг]. \qquad \text{(I-42)}$$

Теоретический объем газов

$$V^0_{\text{г}} = V^0_{\text{с.г}} + V^0_{H_2O} \; [нм^3/кг]. \qquad \text{(I-43)}$$

Теоретический вес продуктов сгорания

$$G^0_{\text{г}} = 1{,}96V_{RO_2} + 1{,}25V^0_{N_2} + 0{,}804V^0_{H_2O} \; [кг/кг]. \qquad \text{(I-44)}$$

Теоретический удельный вес продуктов сгорания

$$\gamma^0_{\text{г}} = \frac{G^0_{\text{г}}}{V^0_{\text{г}}} \; [кг/нм^3]. \qquad \text{(I-45)}$$

На основании нормативных или опытных данных выбираются по ходу газов в проектируемой установке величины избытка воздуха в топке и присосов через ограждения. При экспериментах избыток воздуха определяется на основе анализа продуктов сгорания (на CO_2, O_2, CO и т. д.) по формуле

$$\alpha = \frac{1}{1 - 3{,}76\,\dfrac{O_2 - 0{,}5CO - 2CH_4 - 0{,}5H_2}{N_2}}. \qquad \text{(I-46)}$$

Расчетные величины при выбранных избытках воздуха (на участках I, II и т. д.) представляются в виде табл. 10.

Концентрация золы в дымовых газах

$$\mu = 10\,\frac{A^{\text{р}}a_{\text{ун}}}{V_{\text{г}}} \; [г/нм^3]. \qquad \text{(I-47)}$$

Здесь $a_{\text{ун}}$ — доля золы топлива, уносимая дымовыми газами: для камерного сжигания $a_{\text{ун}} = 0{,}85 \div 0{,}9$ (для сланцев 0,65), для слоевого $a_{\text{ун}} = 0{,}2 \div 0{,}25$ (для антрацита 0,35).

При сжигании газообразного топлива теоретический объем воздуха ($\alpha = 1$)

$$V^0 = 0{,}0476\left[0{,}5H_2 + 0{,}5CO + 2CH_4 + \left(m + \frac{n}{4}\right)C_mH_n + 1{,}5H_2S - O_2\right] \; [нм^3/нм^3], \qquad \text{(I-48)}$$

при отсутствии данных о составе непредельных углеводородов они принимаются состоящими из этилена C_2H_4.

Теоретический объем азота

$$V^0_{N_2} = 0{,}79V^0 + \frac{N^{\text{р}}}{100}. \qquad \text{(I-49)}$$

Объем трехатомных газов (сухих)

$$V_{RO_2} = 0{,}01\left[CO_2 + CO + H_2S + CH_4 + \Sigma\, mC_mH_n\right]. \qquad \text{(I-50)}$$

Таблица 10

Расчеты состава продуктов полного горения твердого и жидкого топлив

№ п/п	Расчетные формулы	Единица измерения	При избытках воздуха на участках			
			I	II	III	IV
			$\alpha_I =$	$\alpha_{II} =$	$\alpha_{III} =$	$\alpha_{IV} =$
1	Объем избыточного воздуха $\Delta V = (\alpha - 1) V^0$	*нм³/кг*				
2	Объем азота $V_{N_2} = V^0_{N_2} + 0,79\Delta V$	"				
3	Объем кислорода $V_{O_2} = 0,21\Delta V$	"				
4	Объем сухих продуктов горения $V_{с.г} = V^0_{с.г} + \Delta V = V_{RO_2} + V_{N_2} + V_{O_2}$	"				
5	Объем водяных паров $V_{H_2O} = V^0_{H_2O} + 0,00124 d \Delta V$	"				
6	Полный объем продуктов горения $V_г = V_{с.г} + V_{H_2O}$	"				
7	Удельный вес продуктов горения $\gamma = \frac{G^0_г + 1,293\Delta V}{V_г}$	*кг/нм³*				
8	Парциальное давление сухих трехатомных газов $p_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_г}$	*ата*				
9	Парциальное давление водяных паров $p_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_г}$	"				

Теоретический объем водяного пара

$$V^0_{H_2O} = 0,01\left[H_2S + H_2 + 2CH_4 + 0,124 d_г + \sum \frac{n}{2} C_m H_n\right] + 0,00124 d V^0. \quad (I\text{-}51)$$

Здесь $d_г$ — влагосодержание газового топлива на 1 *нм³* сухого газа.

В дальнейших расчетах горения газа также используется табл. 10, где записывается процентное содержание каждого газа

в сухих и влажных продуктах сгорания. Применяемые в экспериментах газоанализаторы показывают процентное содержание по сухому дымовому газу.

Удельный вес газообразного топлива (сухого)

$$\gamma_{\text{г}}^{\text{с}} = 0{,}01\,[1{,}96\text{RO}_2 + 1{,}52\text{H}_2\text{S} + 1{,}25\text{N}_2 + 1{,}43\text{O}_2 + 1{,}25\text{CO} + 0{,}0899\text{H}_2 + \Sigma\,(0{,}536m + 0{,}045n)\,\text{C}_m\text{H}_n]\ [кг/нм^3]. \quad \text{(I-52)}$$

Удельный вес газа с влагосодержанием $d_{\text{г}}$

$$\gamma_{\text{г}} = \frac{\gamma_{\text{г}}^{\text{с}} + \frac{d_{\text{г}}}{1\,000}}{1 + \frac{d_{\text{г}}}{804}}\ [кг/нм^3]. \quad \text{(I-53)}$$

Вес дымовых газов от 1 $нм^3$ газообразного топлива

$$G_{\text{г}} = \gamma_{\text{г}}^{\text{с}} + 0{,}001d_{\text{г}} + 1{,}293\alpha V^0\ [кг/нм^3]. \quad \text{(I-54)}$$

Важнейшей характеристикой газов является их теплосодержание (энтальпия), отнесенное к единице топлива *ккал/кг* или *ккал/нм*^{3}:

$$J = \Sigma\, V_i c_i t = \Sigma\, V_i (c_i t), \quad \text{(I-55)}$$

где V_i — объемы составляющих газов в *нм*^{3}*/кг* или *нм*^{3}*/нм*^{3};
c_i — их теплоемкости (табл. 11).

Таблица 11

Средние теплоемкости газов от 0° до $t°$
$(c \cdot 10^4)$ в *ккал/нм*^{3} *град*

t в град.	CO_2	N_2	O_2	H_2O	Воздух		CO	H_2	CH_4
					сухой	влажный, $d=10г/кг$			
0	3 805	3 092	3 119	3 569	3 098	3 150	3 090	3 070	3 810
200	4 290	3 106	3 190	3 635	3 123	3 181	3 110	3 085	4 220
400	4 628	3 143	3 291	3 739	3 175	3 235	3 180	3 095	4 780
600	4 895	3 201	3 385	3 856	3 241	3 303	3 240	3 110	5 400
800	5 110	3 264	3 464	3 985	3 307	3 371	3 300	3 130	5 940
1 000	5 296	3 325	3 529	4 115	3 367	3 433	3 360	3 160	6 410
1 200	5 433	3 380	3 584	4 244	3 422	3 490	—	—	—
1 400	5 553	3 430	3 631	4 367	3 472	3 542	—	—	—
1 600	5 655	3 471	3 673	4 482	3 515	3 587	—	—	—
1 800	5 744	3 509	3 712	4 590	3 552	3 625	—	—	—
2 000	5 820	3 543	3 747	4 689	3 586	3 661	—	—	—
2 200	5 887	3 574	3 781	4 780	3 616	3 693	—	—	—
2 400	5 943	3 598	3 813	4 864	3 644	3 722	—	—	—

Для теоретического количества газов

$$J_{\text{г}}^0 = (V_{RO_2} c_{RO_2} + V_{N_2} c_{N_2} + V_{H_2O} c_{H_2O})t. \quad \text{(I-56)}$$

Для теоретического количества воздуха

$$J^0 = V^0 c_в t. \qquad \text{(I-57)}$$

Если приведенная величина уноса золы

$$\frac{1\,000 A^р a_{ун}}{Q^р_н} > 6, \qquad \text{(I-58)}$$

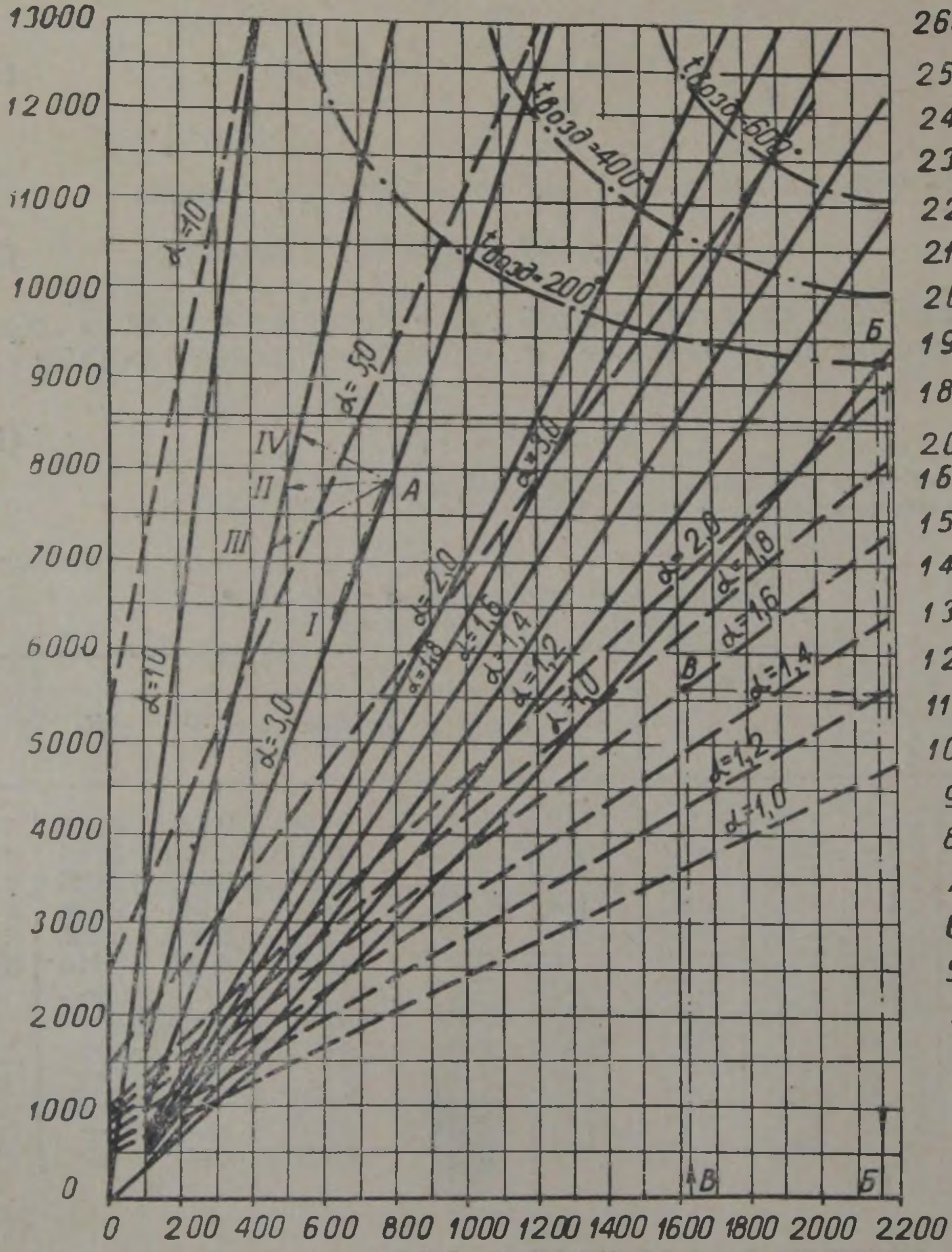


Рис. 17. *JtV*-диаграмма для ставропольского газа

то к теплосодержанию газов надо прибавлять теплосодержание золы

$$J_з = c_з \frac{A^р}{100} a_{ун} t. \qquad \text{(I-59)}$$

$c_з$=0,18÷0,25 *ккал/кг град* в пределах температур 0—1200°.

Теплосодержание газов при заданных избытках воздуха получится по формуле

$$J = J_г^0 + (\alpha - 1) J^0. \qquad \text{(I-60)}$$

Если необходимо сделать большое количество расчетов, для экономии времени для каждого вида топлива составляется *JtV*-диаграмма, которая сразу дает соотношение между теплосодержанием, температурой, объемом газов и избытком воздуха. Пример такой *JtV*-диаграммы для ставропольского газа представлен на рис. 17. Диаграмма позволяет быстро и с необходимой точностью решать ряд задач:

а) определение падения температуры Δt газов при заданной потере теплосодержания ΔJ (линия *А—I* на *JtV*-диаграмме) и при постоянном избытке воздуха α=const;

б) определение падения температуры Δt дымовых газов за счет смешения с холодным (0°С) воздухом при постоянном теплосодержании *J* газов (линия *А—II*);

в) то же, при смешении с воздухом при температуре его ниже 0° (линия *А—III*) и выше 0° (линия *А—IV*), как это имеет место при специальном добавлении воздуха перед сушильными устройствами или за счет присосов воздуха через неплотности печи и теплоиспользующих устройств;

г) определение температуры горения по сумме теплоты сгорания $Q_н^р$ и теплосодержания подогретого воздуха (линия *Б—Б*), а при низкой калорийности газообразного топлива — и теплосодержания его после подогрева;

д) определение объема дымовых газов при заданных α и t (линия *В—В*).

2. Неполное горение топлива

Если неполнота сгорания сводится только к появлению небольшого процента CO (до 3%), а процесс направлен к максимальной полноте горения, то расчеты ведутся по приведенным выше формулам. Однако при сгорании топлива с большой неполнотой и образованием, помимо окиси углерода, метана, водорода и других горючих газов, как это имеет место в полугазовых топках и в шахтных печах пересыпного типа, необходимо учитывать отличие состава полученных газов от дымовых газов полного сгорания.

Так как каждый *нм*³ горючих газов уносит с собой теплоту сгорания: $CO = 3\,018$ *ккал/нм*³; $CH_4 = 8\,555$ *ккал/нм*³; $H_2 = 2\,557$ *ккал/нм*³, то общая потеря тепла от химической неполноты составит

$$Q_x = V_{сг}\,(30{,}18CO + 25{,}57H_2 + 85{,}55CH_4)\ [ккал/кг]; \qquad (I\text{-}61)$$

$$q_x = \frac{Q_x}{Q_н^р}\,100\ [\%]. \qquad (I\text{-}62)$$

Если относительная величина CH_4 и H_2 по сравнению с величиной CO невелика, то всю химическую неполноту сгорания можно отнести в расчетах только на окись углерода, несколько увеличивая ее содержание в продуктах сгорания. Тогда процентное содержание CO при заданной общей химической неполноте сгорания Q_x:

$$V_{CO} = \frac{Q_x}{30{,}18V_{сг}}\ [\%]. \qquad (I\text{-}63)$$

Степень неполноты сгорания углерода

$$У_н = \frac{Q_x}{78C^р} = \frac{q_x\,Q_н^р}{7\,800\cdot C^р}. \qquad (I\text{-}64)$$

Расчетные формулы при сгорании углерода не только в CO_2, но и CO:

$$V^0_{O_2} = 0{,}0187\,[(1 - У_н)\,C^р + 0{,}375S^р] + 0{,}00935У_нC^р + \\ + 0{,}056H^р - 0{,}007O^р\ [нм^3/кг]; \qquad (I\text{-}65)$$

$$V^0 = 0{,}0889\,[(1 - У_н)\,C^р + 0{,}375S^р] + 0{,}04445У_нC^р + \\ + 0{,}265H^р - 0{,}0333O^р\ [нм^3/кг]; \qquad (I\text{-}66)$$

$$V_{RO_2} = 0{,}0187[(1 - У_н)\,C^р + 0{,}375S^р]\ [нм^3/кг]; \qquad (I\text{-}67)$$

$$V_{CO} = 0{,}0187У_нC^р\ [нм^3/кг]; \qquad (I\text{-}68)$$

$$V^0_{сг} = V_{RO_2} + V_{CO} + V^0_{N_2}\ [нм^3/кг]; \qquad (I\text{-}69)$$

$$V^0_г = V^0_{сг} + V^0_{H_2O}\ [нм^3/кг]; \qquad (I\text{-}70)$$

$$G^0_г = 1{,}96V_{RO_2} + 1{,}25\,(V^0_{N_2} + V_{CO}) + 0{,}804V^0_{H_2O}\ [кг/кг]. \qquad (I\text{-}71)$$

При испытаниях тепловых установок с помощью газоанализаторов находят величины RO_2 и O_2, а по ним процентное содержание CO

$$CO = \frac{(21 + \beta RO_2) - (RO_2 + O_2)}{\beta + 0{,}6}, \qquad (I\text{-}72)$$

где

$$\beta = 2{,}35\,\frac{H^р - 0{,}125O^р + 0{,}04N^р}{C^р + 0{,}375S^р}. \qquad (I\text{-}73)$$

Для газового топлива, когда $C_mH_n < (CO + H_2 + CH_4)$:

$$\beta_{газ} = \frac{N_2 - 0{,}79(100 - 0{,}5CO - 2CH_4 - 1{,}5H_2)}{RO_2 + CO + CH_4}. \qquad (I\text{-}74)$$

Максимальное содержание $RO_2 = CO_2 + SO_2$:

$$RO_2^{макс} = \frac{21}{1+\beta}; \qquad (I\text{-}75)$$

содержание сухих продуктов сгорания с учетом механической неполноты горения $q_м$ в %:

$$V_{сг} = \frac{1{,}866(C^р + 0{,}375S^р)\left(1 - \frac{q_м}{100}\right)}{100(RO_2 + CO + CH_4)}. \qquad (I\text{-}76)$$

Если в печи происходит разложение $CaCO_3$ и $MgCO_3$ сырья, содержание в газах CO_2 увеличено. Для пользования формулами надо предварительно вычесть углекислоту разложения. Если дутье обогащено кислородом ($O_2^0 > 21\%$), то максимальное содержание RO_2 возрастает пропорционально степени обогащения кислородом. Предельное содержание RO_2 будет уже не как при дутье атмосферным воздухом $\frac{21}{1+\beta'}$, а $\frac{O_2^0}{1+\beta}$ %, например при дутье чистым кислородом $O_2^0 = 100\%$ и $RO_2^{макс} = \frac{100}{1+\beta}$. Обобщенный коэффициент Бунте

$$\beta = \frac{O_2^0}{100}\left(1 + 0{,}43\,\frac{N^р + xN_2}{C^р}\right) - 1, \qquad (I\text{-}77)$$

в свою очередь

$$x = \frac{8/3C^р + 8H^р - O^р}{O_2}. \qquad (I\text{-}78)$$

Здесь N_2 и O_2 — содержание азота и кислорода в продуктах сгорания, определенное по газовому анализу.

Избыток воздуха при обогащении кислородом

$$\alpha = \frac{O_2^0}{O_2^0 - O_2} = \frac{O_2^0}{(1+\beta)RO_2}. \qquad (I\text{-}79)$$

3. Процесс с образованием полугаза

Расчеты полугазового процесса могут быть приближенные и уточненные. При приближенном расчете ограничиваются определением теплосодержания и теплоты сгорания полугаза, выходом его, количеством первичного и вторичного воздуха для сгорания.

При уточненном расчете определяют также и состав полугаза по методам, применяемым в расчетах газогенераторов. Поскольку полугаз сразу по выходе из топки смешивается со вторичным воздухом и полностью сгорает в рабочем пространстве печи, то расчет состава полугаза как промежуточного продукта горения не имеет решающего значения для печи в целом, и все режимы в печи могут проводиться, исходя из расчета теплообмена продуктов полного

сгорания топлива. Кроме того, состав полугаза находится в сравнительно узких пределах и уточнение расчета имеет больше теоретический, чем практический, интерес. Поэтому обычно ограничиваются приближенным расчетом, в основу которого принимается состав газа, принятый по данным испытания полугазовых топок. Для приближенного расчета задаются величиной механических потерь $q_м$ в зависимости от практического содержания несгоревшего углерода в шлаках, провале, уносе:

$$q_м = \frac{Q_м}{Q_н^р} 100 =$$

$$= \frac{\left(a_{шл+пр} \frac{C_{шл+пр}}{100-C_{шл+пр}} + a_{ун} \frac{C_{ун}}{100-C_{ун}} \right) 7\,800 A^р}{Q_н^р}. \qquad (I\text{-}80)$$

Здесь $a_{шл+пр}$, $a_{ун}$ — доля золы топлива в шлаке (и провале) и уносе;
$C_{шл+пр}$ и $C_{ун}$ — содержание в них углерода в %;
$A^р$ — зольность топлива по рабочей массе в %.

Задаются и потерями в окружающую среду $q_{о.с}^т = 5—12\%$ (тем меньше, чем больше тепловая мощность топки). По формуле (I-17) находят к. п. д. полугазовой топки $\eta_{іт}$. Принимая определенный состав полугаза, можно по формуле (I-33) найти теплоту его сгорания $Q_н$ *ккал/нм*³. Далее, задаются температурой полугаза t и находят его теплосодержание $i=ct$ *ккал/нм*³.

В пределах температур, характерных для полугаза, $c=0{,}352—0{,}365$ *ккал/нм*³ *град*. Учтя добавочно теплосодержание дутьевого воздуха $Q_в = c_в\ t_в\ \alpha_I V^\circ$, можно найти выход полугаза:

$$V = \frac{Q_н^р \cdot \eta_т + Q_в}{ct + Q_н^с} \ [нм^3/кг]. \qquad (I\text{-}81)$$

По формуле полного сгорания (I-36) определяют теоретически необходимый расход воздуха для газифицируемого топлива V° *нм*³/*кг* и задаются суммарным коэффициентом избытка воздуха $\alpha = \alpha_I + \alpha_{II}$ в пределах 1,1—1,25, α_I обычно меньше половины α.

4. Газогенераторный процесс

Расчеты газификации топлив разработаны в трудах Н. Н. Доброхотова, Д. Б. Гинзбурга, Б. И. Китаева и других советских ученых. Полный теоретический расчет газогенераторного процесса делается при конструировании новых типов газогенераторов или для уточнения, по данным исследований, существующих методов расчета. Процесс, протекающий в газогенераторе, как показано выше, состоит из подготовки топлива в верхней части и самого процесса газификации.

В задачи подготовки топлива входят подогрев топлива, его сушка и сухая перегонка. При полной подготовке топлива в зону гази-

фикации приходит лишь кокс. При неполной подготовке топлива в зону газификации приходит также часть влаги и летучих топлива. На полную подготовку топлива затрачивается определенное количество тепла $Q_{под}$, равное 300—450 *ккал/кг*. Бо́льшие количества тепла необходимы для влажных топлив и топлив с малым выходом летучих. Чем интенсивнее теплообмен в верхнем слое топлива, тем меньше может быть высота зоны подготовки в газогенераторе.

Степень неполноты подготовки θ составляет в среднем 0,03—0,25. По Н. Н. Доброхотову, в случае полной подготовки топлива ($\theta = 0$) выход продуктов сухой перегонки обусловливается следующими положениями.

В водяные пары переходит вся рабочая влага топлива, а также водяной пар, образовавшийся из 50% кислорода топлива (O^p) и эквивалентного этому количеству водорода топлива (H^p).

В углекислый газ переходит кислород топлива (в процентах от общего содержания O^p): при сухой перегонке торфа 30—35%, древесины 20—25%, бурого угля 20%, каменного угля, антрацита, кокса 10%.

В метан переходит водород топлива (в процентах от общего содержания): при древесине и торфе 15—20%, буром угле 25—30%, каменном угле, антраците, коксе 25—30%. В этилен переходит 5% водорода топлива.

В смолу переходят углерод и водород топлива в различных в зависимости от условий газификации количествах.

Смола* содержит обычно: $C_{см} = 67—80\%$; $H_{см} = 7—10\%$; $O_{см} = 8—26\%$; остальное может быть сера и азот.

В азот газа переходит почти весь азот топлива.

В сероводород переходит около $^3/_4$ серы топлива, остальная сера остается в золе. В водород газа переходит весь водород топлива, оставшийся после вышеуказанных реакций. В окись углерода переходит оставшийся кислород топлива. Кроме того, продукты сухой перегонки содержат уксус и пыль. Под уксусом понимается уксусная кислота, древесный спирт и некоторые другие продукты сухой перегонки древесины и торфа. Выход их от веса горючей массы: 3—4,5% для древесины; 1,5—2,5% для торфа. Содержание $C_у = 40{,}8\%$, $H_у = 8{,}8\%$, $O_у = 50{,}4\%$. Пыль из газогенератора представляет собой унос из слоя мелких фракций (0,5 ÷ ÷ 1,5 *мм*) свежего топлива, а также золы и кокса. В пыли принимают содержание углерода $C_п = 70\%$, остальное зола $A_п = 30\%$. Унос по весу составляет от 0 до 2% в зависимости от термостойкости топлива и интенсивности газификации. На основе этих положений составляются теоретические расчеты газификации, тепловые и материальные балансы по зонам. При расчетах газификации в типовых газогенераторах составом топлива и получаемого генераторного газа задаются.

---

* Выход смолы указан на стр. 56.

Исходя из материального баланса углерода, нетрудно проверить выход генераторного газа на 1 *кг* топлива по формуле

$$V_{сг} = 1{,}866 \frac{C^{р} - C_{шл} - C_{см} - C_{у} - C_{п}}{CO_2 + CO + CH_4 + \frac{m}{2} C_m H_n} \ [нм^3/кг]. \qquad (I\text{-}82)$$

Влагосодержание газа

$$d_г = \frac{89{,}4\left[H^{р} - H_{см} - H_{п} - 0{,}0889 V_{сг}\left(H_2 + H_2S + 2CH_4 + \frac{n}{2} C_m H_n\right)\right] + 10\,W^{р} + 1\,000\,W_{пд}}{V_{сг}} \ [г/нм^3]. \qquad (I\text{-}83)$$

Объем водяных паров в генераторном газе

$$V_{H_2O} = \frac{d_г V_{сг}}{804} \ [нм^3/кг]. \qquad (I\text{-}84)$$

Выход влажного газа

$$V = V_{сг} + V_{H_2O} \ [нм^3/кг]. \qquad (I\text{-}85)$$

Расход воздуха на газификацию определяется по балансу азота в воздухе ($N_2 = 0{,}79 V_в$), в топливе ($N^{р}$) и в сухом газе $N_г$:

$$V_в = \frac{N_г V_{сг} - 0{,}8 N^{р}}{79} \ [нм^3/кг]. \qquad (I\text{-}86)$$

Далее вычисляются к. п. д. газификации по горячему или холодному газу.

Раздел второй

ДВИЖЕНИЕ ГАЗОВ И ВОПРОСЫ ТЕПЛООБМЕНА

ГЛАВА I

ДВИЖЕНИЕ ГАЗОВ

1. Общие положения

Правильное движение газов в тепловых установках имеет важнейшее значение для производительности и экономичности их работы. В топочных устройствах для обеспечения необходимой тепловой мощности надо подать в достаточном количестве окислитель (воздух) и своевременно удалить продукты сгорания. В рабочем пространстве печей и сушилок только газовый поток, рационально направленный к материалу и изделиям и имеющий оптимальную скорость, вызывает интенсивный теплообмен при минимальных затратах электроэнергии на искусственное побуждение движения газов. Большое значение имеют и другие вопросы, связанные с движением газов и рассматриваемые механикой газов.

До 20-х годов нашего века печные и сушильные установки работали главным образом на естественном побуждении и большой заслугой В. Е. Грум-Гржимайло является разработанная им на основе учения М. В. Ломоносова «Гидравлическая теория пламенных печей» (1905—1922 гг.), где даны указания, как строить тепловые установки с наивыгоднейшим использованием располагаемого геометрического напора. Однако современные установки с их большими удельными тепловыми мощностями не могут обеспечить скоростных режимов на естественной тяге и в подавляющем большинстве случаев они работают с принудительным движением газов.

Так как чисто теоретические расчеты движения газа не могут дать полной уверенности в правильности предпосылок для проектирования новых типов печей и сушилок, то на помощь приходит теория моделирования. Моделирование как метод научного исследования дает возможность, не выполняя промышленных объектов в натуре, без каких-либо больших материальных затрат на моделях проводить все необходимые опыты по выяснению эффективности работы создаваемых конструкций и вносить необходимые изменения в модели для доводки ее до наивыгоднейшей.

Перенос результатов моделирования на промышленные объекты может быть выполнен только при условии соблюдения основных положений теории подобия.

2. Законы о газах, используемые в расчетах тепловых установок

Характеристическое уравнение. На основе характеристического уравнения определяется удельный вес газов в различных точках газового тракта

$$\gamma = \frac{p}{RT} \ [кг/м^3]. \qquad \text{(II-1)}$$

Здесь p — удельное давление газа в $кг/м^2$;
$T = t + 273$ — абсолютная температура газа в $^\circ K$;
R — газовая постоянная.

Так как давление газа обычно близко к атмосферному и $p = \text{const}$, то

$$\frac{\gamma_t}{\gamma_0} = \frac{p}{RT} : \frac{p}{R273},$$

откуда

$$\gamma_t = \gamma_0 \frac{1}{1 + \frac{1}{273} t}. \qquad \text{(II-2)}$$

Соответственно объемы газов при 0°С (V_0) и при данной температуре (V_t) будут связаны уравнением

$$V_t = V_0 \left(1 + \frac{1}{273} t\right) \ \left[м/сек \right], \qquad \text{(II-3)}$$

а скорости газов

$$v_t = v_0 \left(1 + \frac{1}{273} t\right) \ \left[м/сек \right], \qquad \text{(II-4)}$$

где v_0 — скорость, приведенная к состоянию газа при 0° и 760 *мм* рт. ст., в *нм/сек*.

Принцип непрерывности потока. При установившемся состоянии действует принцип непрерывности потока, заключающийся в том, что в каждом сечении (F_1, F_2 и т. д.) канала секундный весовой расход газа постоянен:

$$G = F_1 v_1 \gamma_1 = F_2 v_2 \gamma_2 = \text{const} \quad [кг/сек]. \qquad \text{(II-5)}$$

В канале равного сечения $F_1 = F_2 = F$ весовая скорость, от температуры не зависящая, имеет постоянную величину:

$$\frac{G}{F} = v_t \gamma_t = v_0 \gamma_0 = \text{const}. \qquad \text{(II-6)}$$

При наличии неплотностей расход газа G_2 в конце реальной установки будет отличаться от его расхода G_1 в начале ее на количество выбивающихся газов или присосанного воздуха (аналогично каналу с ответвлениями):

$$G_2 = G_1 \pm \Sigma \gamma_i \Delta V_i . \qquad \text{(II-7)}$$

Уравнение Д. Бернулли для реальной жидкости, известное из гидравлики, может быть применено и для газового потока в печных и сушильных установках при аэродинамических расчетах:

$$H_г + H_{ст} + H_д + H_п = \text{const} , \qquad \text{(II-8)}$$

т. е. сумма геометрического $H_г$, статического $H_{ст}$, динамического $H_д$ и потерянного $H_п$ напоров или давлений в каждой точке газового потока есть величина постоянная.

Геометрическим давлением, или напором газа, называется удельная потенциальная энергия положения рассматриваемого элементарного объема газа, обусловленная его подъемной силой в среде более тяжелого газа. На элементарный объем газа dV (рис. 18) действуют в состоянии равновесия поверхностные силы $(pdxdy)$, $(p + \frac{\partial p}{\partial z} dz)dxdy$ и т. д. и силы тяжести $\rho g dV$. Если элемент газа dV будет иметь меньший удельный вес $\gamma_г$ (например, вследствие большей температуры его), чем удельный вес γ_0 окружающего газа, то разница давлений на уровне верхней грани элементарного параллелепипеда, очевидно, составит

$$-dpdxdy = (\gamma_0 - \gamma_г) d\ xdydz [кг] . \qquad \text{(II-9)}$$

При делении обеих частей уравнения на величину площади основания параллелепипеда $dxdy$ можно получить и удельную потенциальную энергию более легкого газа в среде более тяжелого:

$$-dp = (\gamma_0 - \gamma_г) dz\ [кг/м^2]. \qquad \text{(II-10)}$$

После интегрирования по высоте z в пределах точек z_1 z_2:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = -(\gamma_0 - \gamma_г)(z_2 - z_1)\ [кг/м^2]. \qquad \text{(II-11)}$$

Знак силы выталкивания легкого газа противоположен знаку силы тяжести. Разница Δp и представляет собой геометрическое давление и обозначается символом $p_г$. Соотношение между напором H, выраженным в $м$ столба газа, и напором p, выраженным в $кг/м^2$:

$$H = p : \gamma\ [м]. \qquad \text{(II-12)}$$

Пьезометрический, или статический, напор представляет собой разность давлений газа внутри рассматриваемого объема и окружающей среды. Эта разница давлений может

быть измерена манометром, почему иногда ее называют манометрическим напором. Геометрический напор, рассчитанный по положению нижней грани объема легкого газа, превращается в статический напор на его верхней грани. Для газа, находящегося в покое, статическое давление изменяется по высоте обратно изменению геометрического давления, и сумма этих двух напоров на каждом уровне одинакова. При движении газа ($v > 0$) появляются динамический и потерянный напоры, в которые превращаются геометрический и статический напоры.

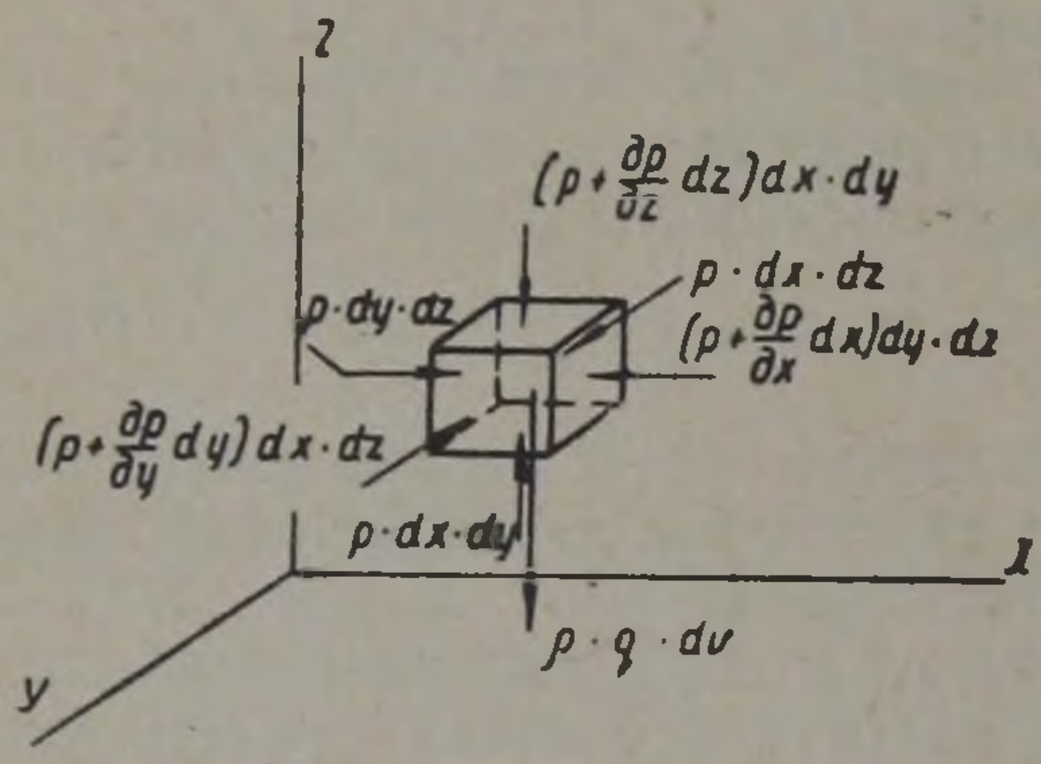


Рис. 18. Схема к определению давлений газа

Динамический, или скоростной, напор представляет собой кинетическую энергию газа, движущегося со скоростью v:

$$p_д = \frac{v_t^2}{2g}\,\gamma_t = \frac{v_0^2}{2g}\,\gamma_0\left(1+\frac{t}{273}\right)[кг/м^2]. \qquad (II\text{-}13)$$

Потерянный напор представляет собой потерю энергии газа при его движении в реальных условиях. Он пропорционален динамическому напору и при движении газа последовательно возрастает:

$$p_п = \zeta\,\frac{v_0^2}{2g}\,\gamma_0\left(1+\frac{t}{273}\right)[кг/м^2], \qquad (II\text{-}14)$$

где ζ — коэффициент потерь при движении газов. Ниже разъясняется его значение (см. стр. 82).

В тепловых установках движущим напором при естественном движении газов является геометрический напор, создаваемый дымовой трубой или заглублением топки, при принудительном движении газов — сумма напоров статического и динамического, создаваемая специальными машинами — вентиляторами, воздуходувками и т. д.

3. Расчет сопротивлений при движении газов

Для аэродинамического расчета вычерчивается, как показано на рис. 20, схема тепловой установки с указанием всех местных сопротивлений. К последним относятся места перехода из одного сечения канала в другое, повороты, шиберы и все подобные места потерь энергии движения газа. Если плоская схема не дает полного представления для расчета, то вычерчивается аксонометрическая схема газового тракта. На нем каждый прямой участок харак-

теризуется длиной l *м* и сечением f *м*^{2}, а также количеством V_0 *нм*^{3}/*сек*, удельным весом γ_0 *кг*/*нм*^{3} и температурой t град. проходящего газа, кроме того, в случае теплообмена на участке и температурой стенки $t_{ст}$ град. Местные сопротивления на схеме имеют свои условные обозначения и номера. Потери на трение в прямых каналах зависят от длины их l *м*, диаметра d *м*, динамического напора и опытного коэффициента трения β, зависящего от шероховатости канала и числа Рейнольдса:

$$h_{тр}=\beta\ \frac{l}{d}\cdot\frac{v_0^2}{2g}\gamma_0\left(1+\frac{t}{273}\right)\left(\frac{t+273}{t_{ст}+273}\right)^{0,583}\ [мм\ вод.ст.]. \quad (II\text{-}15)$$

При отсутствии теплообмена последний множитель может быть опущен. При движении в каналах некруглого сечения вместо d ставится эквивалентный диаметр $d_э$:

$$d_э=\frac{4f}{P}, \quad (II\text{-}16)$$

где f и P — сечение в *м*^{2} и периметр канала в *м*.

Для каналов прямоугольного сечения $(a\times b)$

$$d_э=\frac{4ab}{2(a+b)}=\frac{2ab}{a+b}. \quad (II\text{-}17)$$

Число Рейнольдса

$$\mathrm{Re}=\frac{vd}{\nu},$$

где ν — коэффициент кинематической вязкости газов в *м*^{2}/*сек*.

Температура .	t в град.	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
Коэффициенты: для воздуха	$\nu_в\cdot10^6$	13,3	23,2	34,9	48,3	63,1	79,2	96,8	115,1	134,7	155,2	176,7	199,2	222,7
для дымовых газов среднего состава*	$\nu_{д.г}\cdot10^6$	12,2	21,5	32,8	45,8	60,4	76,3	93,6	112,1	131,8	152,5	174,3	197,1	221

* $RO_2 = 13\%$; $H_2O = 11\%$.

Кинематическая вязкость определяется по температуре стенки, а плотность и удельный вес газов — по средней температуре на участке. При гладких стенках и ламинарном движении газа коэффициент трения в прямых каналах

$$\beta=\frac{64}{\mathrm{Re}}. \quad (II\text{-}18)$$

При турбулентном движении ($\mathrm{Re}>2\,200$) в трубах ЦКТИ рекомендует

$$\beta=0,19\sqrt[3]{\frac{k}{d}}. \quad (II\text{-}19)$$

Для новых стальных труб $k = 0{,}1—0{,}2$ *мм*, для чугунных $k = 0{,}8—1$ *мм*, для корродированных $k \leqslant 3$ *мм*. По Никурадзе:

$$\beta = \frac{1}{\left(1{,}74 + 2\lg \frac{d}{k}\right)^2}. \qquad \text{(II-20)}$$

По Н. Н. Доброхотову, для кирпичных каналов

$$\beta = \frac{0{,}175}{\mathrm{Re}^{0{,}12}}. \qquad \text{(II-21)}$$

В упрощенных расчетах принимают β равным: для кирпичных каналов 0,05; для металлических — с сильной коррозией 0,045, при небольшой коррозии 0,035, при отсутствии коррозии 0,025.

Удельный вес дымовых газов вычисляется по формулам смеси; обычно он равен $\gamma_0 = 1{,}32—1{,}35$ *кг/нм*^{3}. Температура газов для каждой точки определяется из расчетов теплообмена газов с ограждениями и материалом.

Произведение $\beta \frac{l}{d}$ является приведенным коэффициентом потерь на трение при выражении динамического напора и может быть приравнено по аналогии с последующим к некоторому обобщающему коэффициенту:

$$\zeta_{тр} = \beta \frac{l}{d}. \qquad \text{(II-22)}$$

Расчет потерь от местных сопротивлений производится по формуле

$$h_м = \zeta_м \frac{v_0^2}{2g} \gamma_0 \left(1 + \frac{t}{273}\right) [\text{мм вод.ст.}]. \qquad \text{(II-23)}$$

Коэффициенты местных сопротивлений приведены на рис. 19.

Садка изделий (рис. 102) в кольцевых и туннельных печах имеет в зависимости от типа различное сопротивление, которое может быть рассчитано по К. А. Нохратяну следующим образом. Для каждой группы каналов, образованных изделиями, по их размерам находят приведенные диаметры каналов d *м*. Далее, по формулам определяют коэффициенты аэродинамического сопротивления прямых каналов:

$$a = \frac{0{,}00127}{d^{1{,}5}}, \qquad \text{(II-24)}$$

или косых — для кольцевой печи:

$$a_к = \frac{a}{\cos\alpha} \left(\frac{B}{B - \frac{L}{\mathrm{ctg}\alpha}}\right)^2. \qquad \text{(II-25)}$$

Для туннельных печей множитель в скобках приравнивается к единице. Здесь α — угол отклонения оси канала от оси печи, B и L — ширина обжигательного канала и длина садки между разрывами в *м*.

Если каналы образованы решетчатыми стенками, то коэффициенты сопротивления умножаются на коэффициент k, равный от 1,075 до 2,4 (большие величины — для пустотелых камней и при решетке со всех четырех сторон). Общий коэффициент сопротивления садки с разнотипными каналами

$$a_0 = \left(\frac{1{,}1 F_c}{\sum_1^m \frac{nF}{\sqrt{ka}}} \right)^2, \qquad \text{(II-26)}$$

где F_c — суммарное сечение всех каналов;
n и F — число и сечение однотипных каналов;
m — число типов каналов.

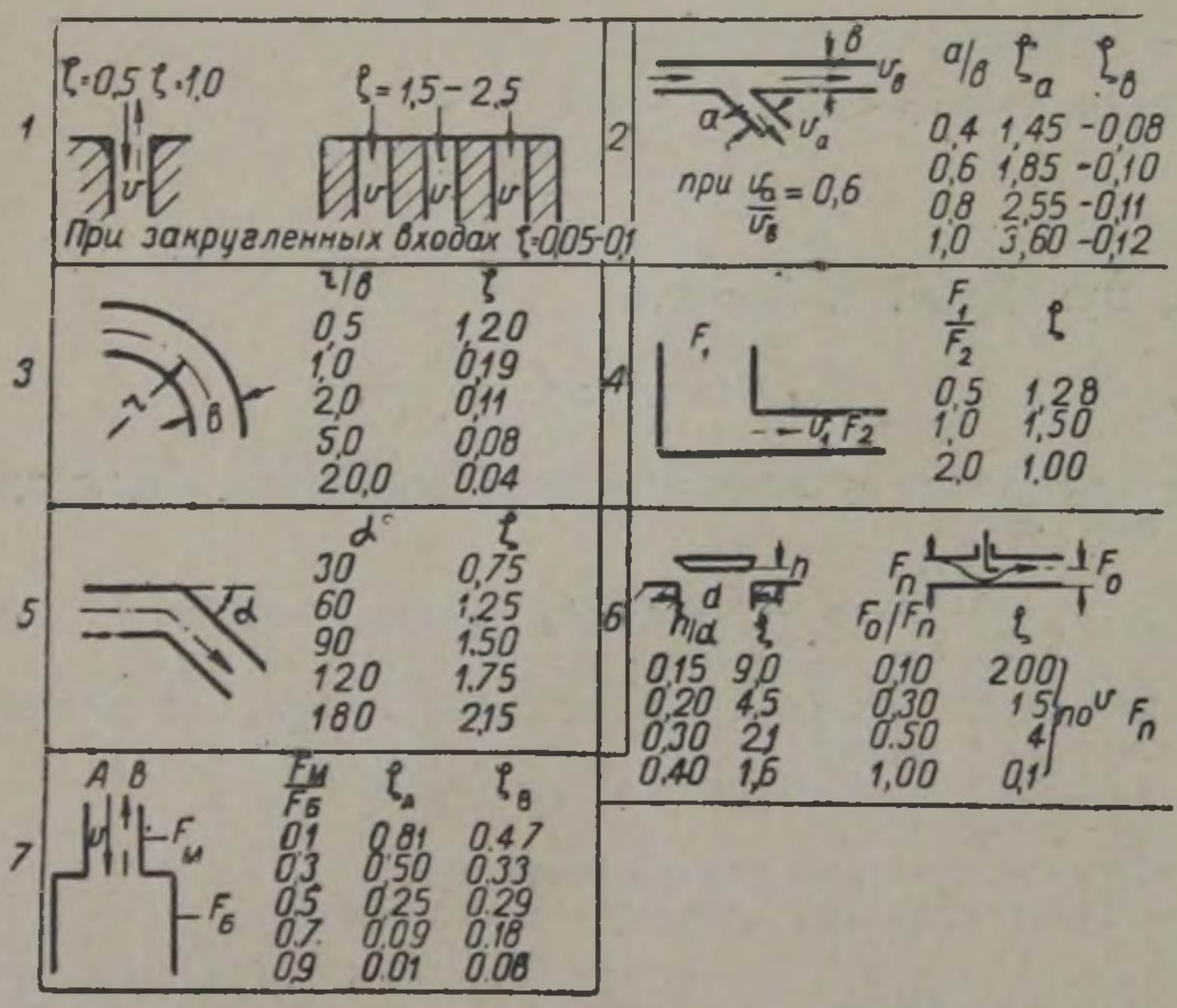


Рис. 19. Таблица коэффициентов местных сопротивлений к аэродинамическому расчету

1 — вход в каналы и выход; *2* — раздающий тройник под углом 45°; *3—5* — повороты; *6* — клапан и задвижка; *7* — расширение и сужение каналов

Разрывы между садками увеличивают коэффициент сопротивления на 0,015—0,025, тем больше, чем шире разрыв и меньше живое сечение садки. Общее сопротивление садки при температуре 0° и скорости v_0 *нм/сек*

$$\Delta p_c = a_0 v_0^2 L \ [\text{мм вод.ст.}]. \qquad \text{(II-27}$$

При температуре t°С оно в $\left(1 + \frac{t}{273}\right)$ раз больше.

Величина β в общепринятой формуле расчета сопротивления движению в каналах находится из соотношения

$$\beta = \frac{2gda_0}{\gamma_0} \approx 15{,}2a_0d. \qquad \text{(II-28)}$$

Практически определенные коэффициенты сопротивления садок находятся в пределах a_0 от 0,024 до 0,08. Косая садка имеет больший коэффициент.

Сопротивление при проходе газов через слой кускового или сыпучего материала можно определить по формуле ВТИ (И. М. Федоров):

$$h_{сл} = \beta_{сл}\frac{H}{d_к} \cdot \frac{v_0^2}{2g}\gamma_0\left(1 + \frac{t_{ср}}{273}\right). \qquad \text{(II-29)}$$

Здесь $\beta_{сл}$ — коэффициент сопротивления слоя.

Для шаров при $Re < 7$ и $k_п = 0{,}4$

$$\beta_{сл} = \frac{2\,056}{Re}. \qquad \text{(II-30)}$$

То же, при $Re > 7$ и $k_п = 0{,}4$

$$\beta_{сл} = \frac{1\,800}{Re} + \frac{46}{R^{0{,}08}}, \qquad \text{(II-31)}$$

$k_п$ — коэффициент пустотности, равный отношению объема пустот к объему слоя;

$$k_п = \frac{V_п}{V_{сл}} = \frac{\gamma_м - \gamma_{нас}}{\gamma_м} \ (k_п \text{ обычно } 0{,}4—0{,}6),$$

где $\gamma_м$ — кажущийся удельный вес материала в *кг/м*³, или объемный вес материала в куске;
$\gamma_{нас}$ — насыпной вес материала в слое в *кг/м*³;
H — высота слоя в *м*;
$d_к$ — средневзвешенный размер куска в *м*;
v_0 — скорость газов по полному сечению шахты в *нм/сек*.

Таблица 12

Зависимость сопротивления слоя топлива от интенсивности газификации в *мм* вод. ст.

Вид топлива	Интенсивность газификации $\frac{B}{F}$ в *кг/м²час*		
	150	250	500
Дрова	5—10	20—30	100
Щепа	15—20	40—60	200
Торф	20—40	60—80	250
Каменный уголь, антрацит, кокс .	80—150	300	—

В отдельных случаях (шахтные печи, скруббе-ры и т. д.) используют и другие формулы для расчета сопротивления слоя.

Сопротивление слоя топлива на решетке преодолевается дутьевым вентилятором с тем, чтобы в топке было бы разрежение 1—2 *мм* вод. ст. Увеличение разрежения ведет к усилению присоса, развитие же избыточного давления в топке — к выбиванию пламени, разогреву докрасна фронтовой гарнитуры и к поджогу сводов. В табл. 3, 4, 5 указано

давление дутья для топок. Для бездутьевых топок учет сопротивления слоя можно делать по формуле

$$h_{\text{сл.т}} = C\left(\frac{\alpha}{100}\cdot\frac{B}{R}\right)^2, \qquad \text{(II-32)}$$

где α — избыток воздуха в топке;

$\frac{B}{R}$ — весовое напряжение решетки в *кг/м² час*; $\frac{B}{R} = \frac{Q}{Q_{\text{н}}^{\text{р}} R}$;

C — коэффициент, равный для дров 0,066, для торфа 0,085.

Для газогенераторов сопротивление слоя топлива зависит от интенсивности газификации, типа решетки, величины подвода дутья.

Самотяга представляет собой геометрический напор вертикального или наклонного участка газохода (на рис. 20 участки *2—3*, *6—7* и др.).

Расчет самотяги делается по формуле

$$h_{\text{с}} = H\left(\frac{\gamma_{\text{в.о}}}{1+\frac{t_{\text{в}}}{273}} - \frac{\gamma_{\text{о}}}{1+\frac{t_{\text{г}}}{273}}\right)\text{[}мм\text{ вод.ст.]}. \qquad \text{(II-33)}$$

Здесь H — высота участка в *м*;
$\gamma_{\text{в.о}}$ — удельный вес воздуха в *кг/нм³*;
$t_{\text{в}}$ — его температура в град.;
$\gamma_{\text{о}}$ и $t_{\text{г}}$ — то же, для газа.

Самотяга помогает движению газа вверх и препятствует ему, если газ проходит вниз по рассматриваемому участку.

Общее сопротивление движению газов в тепловой установке определяется как сумма потерь на трение и местных потерь. Самотяга учитывается со знаком минус, если газ идет вверх:

$$h_0 = \Sigma h_{\text{тр}} + \Sigma h_{\text{м}} \pm \Sigma h_{\text{с}}. \qquad \text{(II-34)}$$

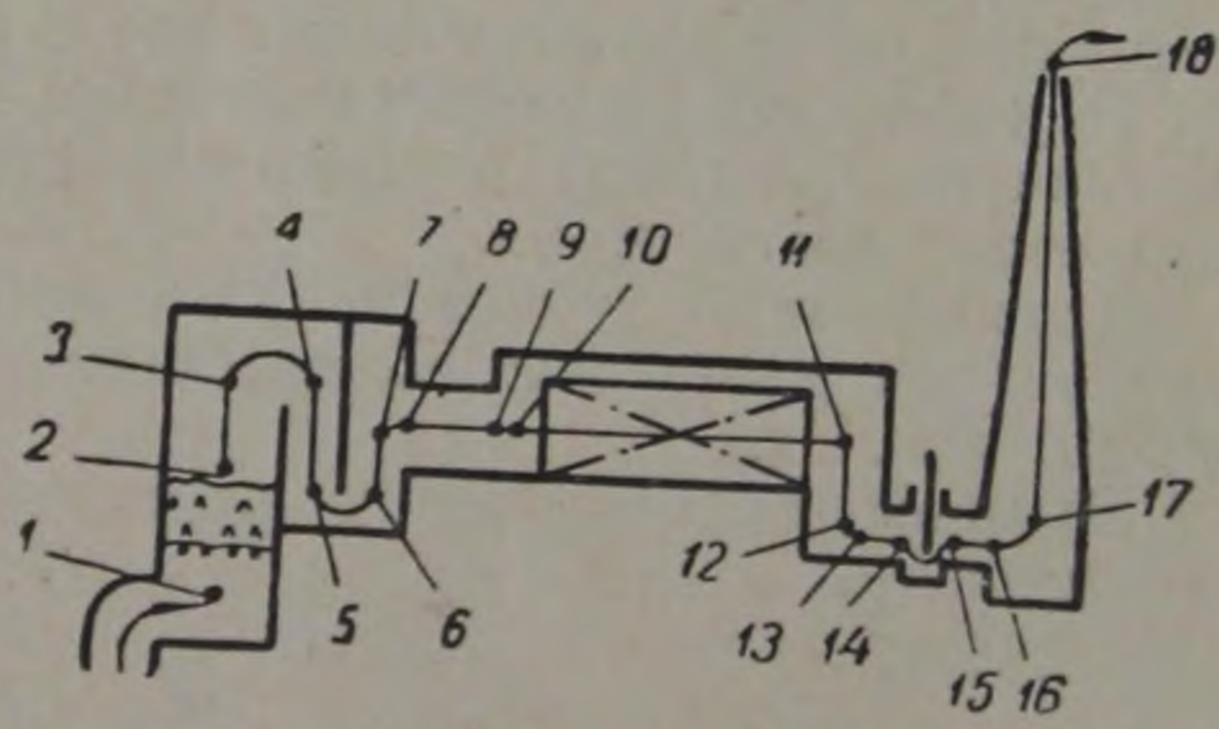


Рис. 20. Схема тепловой установки для аэродинамического расчета

Таким образом, в примере тепловой установки, показанной на схеме рис. 20, необходимо в сумму потерь ввести потери на участках: *1—2* — сопротивление слоя топлива; *2—3*, *6—7* — самотяга на подъеме нагретых газов, учитывается со знаком минус; *4—5*, *11—12* — потери от самотяги при опускании горячих газов; *3—4*, *5—6*, *7—8*, *12—13*, *16—17* — местные сопротивления при поворотах; *8—9*, *13—14*, *15—16* — местные сопротивления трению на прямом участке; *9—10* — местное сопротивление, вызванное из-

менением сечения; *10—11*—сопротивление садки изделий; *14—15*—местное сопротивление при проходе газов у шибера; *17—18* — расчетная тяга трубы.

Все расчеты удобно свести в таблицу, имеющую форму последовательных вычислений (табл. 13).

Таблица 13

Расчет сопротивлений движения газов

№ участка	Название сопротивления	V_0 в *нм³/сек*	f в *м²*	$v_0 = \frac{V_0}{f}$ в *нм/сек*	t в град	$1 + \frac{t}{273}$	l и d в *м*	$\frac{v_0^2}{2g}$ в *м*	$\beta \frac{l}{d}$ или ζ	h_0 в *мм* вод.ст.

4. Источники преодоления газовых сопротивлений

Для преодоления сопротивления движению газов в большинстве современных установок в начале газового тракта ставится дутьевой вентилятор, а в конце — отсасывающий. Такая система позволяет расположить нулевую точку (± 0 *мм* вод. ст.) в заранее заданном месте, а всю установку — под умеренным давлением или разрежением. При необходимости рециркуляции газов устанавливаются промежуточные побудители движению газов. Имеются и другие варианты обеспечения тягодутьевого режима.

В небольших печных установках может быть использован геометрический напор опущенной ниже пода печи топки взамен дутьевого вентилятора.

Горячие газы (более 300°) отсасываются из установки дымовой трубой без дымососа, если общие потери не превышают 50÷60 *мм* вод. ст.

Дымовые трубы. Высота дымовой трубы H *м* определяется по формуле

$$H = \frac{(h_0 + h_э - h_н) + \frac{v_{0.у}^2}{2g} \gamma_0 \left(1 + \frac{t_у}{273}\right)}{\left(\frac{\gamma_{в.о}}{1 + \frac{t_{в.ср}}{273}} - \frac{\gamma_0}{1 + \frac{t_{ср}}{273}}\right)\frac{B}{760} - \beta \frac{1}{d_{ср}} \frac{v_{0ср}^2}{2g} \gamma_0 \left(1 + \frac{t_{ср}}{273}\right)}, \quad \text{(II-35)}$$

где h_0 — расчетное сопротивление по формуле (II-34) в *мм* вод. ст.;
$h_э$ — сопротивление, добавляемое в запас и составляющее 0,25—0,4 h_0 в зависимости от местных условий, в *мм* вод. ст.;
$h_н$ — сопротивление, преодолеваемое до нейтральной зоны напором дутьевого вентилятора;

$v_{0.y}$ — приведенная скорость дымовых газов в устье трубы (обычно 2,5 ÷ 4) в *нм/сек*;
t_y — температура дымовых газов в устье в град.;
$\gamma_{в.о}$ — удельный вес воздуха при 0° и 760 *мм* вод. ст. в *кг/нм*³;
γ_0 — удельный вес газов при 0° и 760 *мм* вод. ст. в *кг/нм*³;
$v_{0ср}$ — средняя приведенная скорость газов в дымовой трубе в *нм/сек*;
$t_{в.ср}$ — средняя по высоте трубы температура наружного воздуха;
$t_{ср}$ — средняя температура газов в трубе в град.;
B — барометрическое давление в *мм* рт. ст.;
β — коэффициент потери на трение;
$d_{ср}$ — средний внутренний диаметр трубы в *м*.

Температура дымовых газов в устье определяется по формуле

$$t_y = t_o - \Delta t H, \qquad \text{(II-36)}$$

где t_o — температура газов у основания трубы в град.;
Δt — потеря температуры в град. на 1 *пог. м*;
$\Delta t = 1 + 1{,}5$°C на 1 *пог. м* для кирпичных и 2—3°C на 1 *пог. м* для металлических труб.

Средняя по высоте трубы температура наружного воздуха определяется по формуле

$$t_{в.ср} = t_в - 0{,}5\sqrt{H}\ [\text{град.}], \qquad \text{(II-37)}$$

где $t_в$ — температура воздуха на поверхности земли в град.

Для устойчивости стенки дымовых труб делаются с уклоном i=0,015 ÷ 0,03. Это при данной высоте трубы H определяет соотношение диаметров основания d_o и устья d_y;

$$d_o = d_y + 2iH\ [м]. \qquad \text{(II-38)}$$

Общая высота трубы по санитарным нормам проектирования промышленных предприятий (Н-101-54) берется $\geqslant$ 30 *м* при расходе топлива до 5 *т/час* и $\geqslant$ 100 *м* при расходе топлива 100—200 *т/час*. Диаметр устья рассчитывается при естественной тяге по скорости газов 2—4 *нм/сек*, а при искусственном побуждении по скорости 8—15 *нм/сек*.

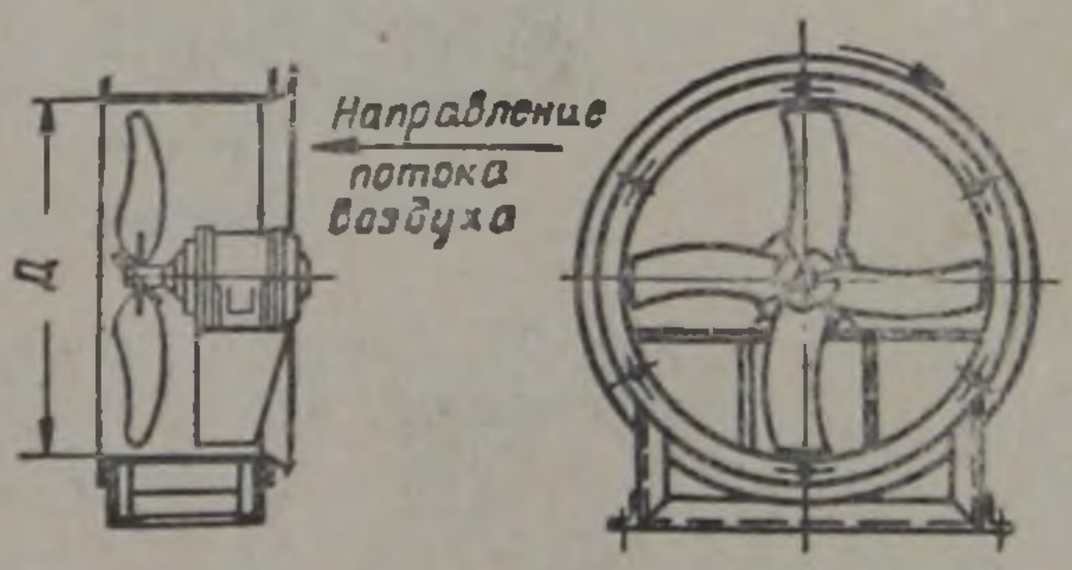


Рис. 21. Схема осевого вентилятора

Вентиляторы. Вентиляторы делятся по основной схеме на осевые (рис. 21) и центробежные (рис. 22). Осевые вентиляторы имеют максимально развиваемое давление 35—40 *мм* вод. ст. Центробежные вентиляторы делятся по величине полного давления на три группы: вентиляторы низкого давления — до 100 *мм* вод. ст. (или 100 *кг/м*²), среднего давления — до 300 *мм* вод. ст., высокого давления — до 1 500 *мм* вод. ст. При больших давлениях устанавливаются газодувки. К. п. д. центробежных вентиляторов 0,55—0,65, осевых 0,6—0,7. Выбор вентиляторов и дымососов производится по характеристикам, приведенным в каталогах, которые устанавлива-

ют связь между: подачей V *м³/сек*, *м³/час*, полным давлением H, статическим давлением $H_{ст}$ *кг/м²*, *мм* вод. ст., к. п. д. η и $\eta_{ст}$, а также мощностью N *квт*. Пример размерной характеристики показан на рис. 22. Рабочий участок подачи выбранного вентилятора должен находиться в области наивысших к. п. д.

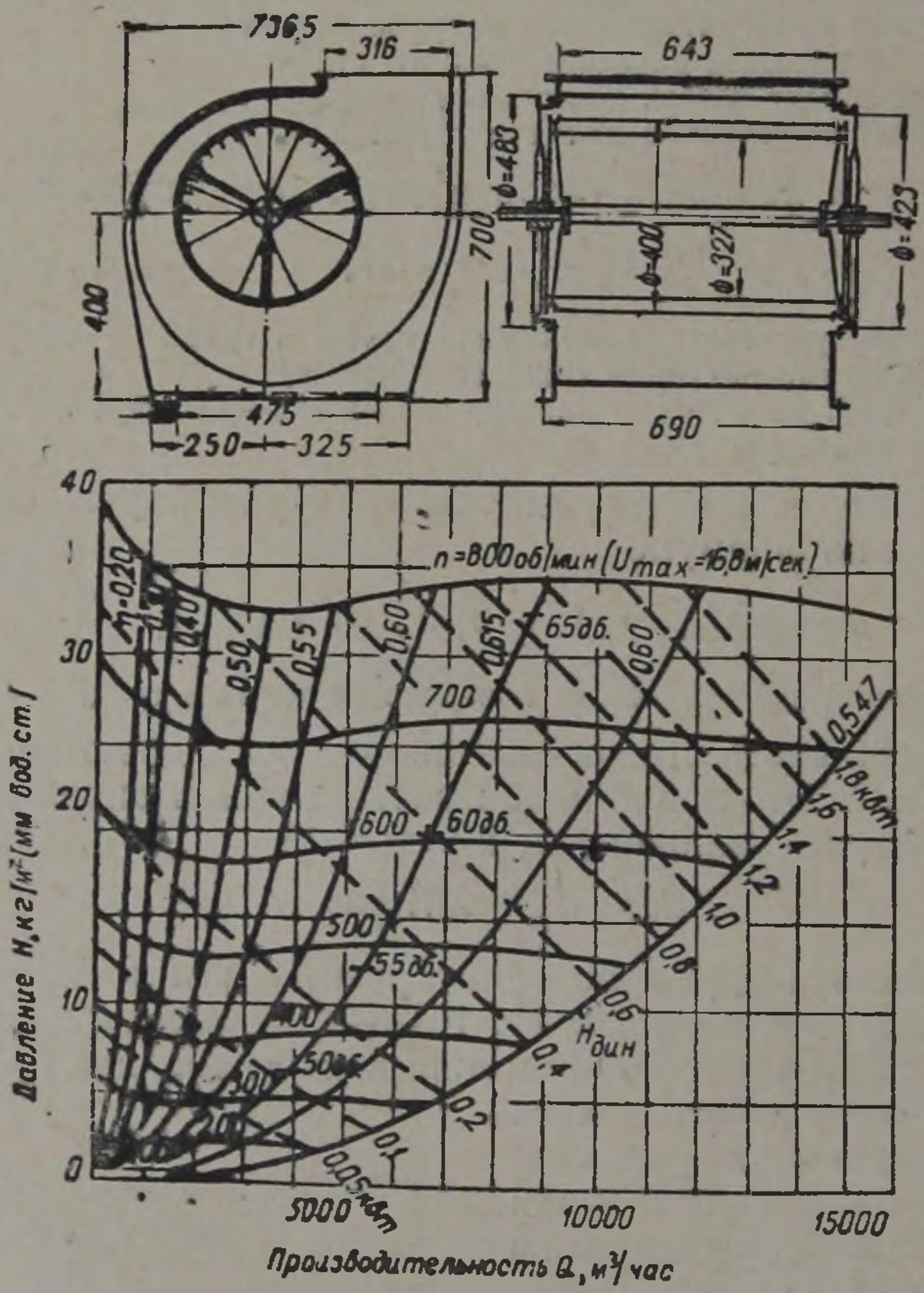


Рис. 22. Схема и размерная характеристика центробежного вентилятора двустороннего всасывания ВНИИСТО-9

Помимо размерных характеристик, для каждого номера вентилятора, для всех номеров одной серии вентиляторов имеются безразмерные характеристики (рис. 23). Они связывают безразмерные величины:

коэффициент подачи

$$\overline{V} = \frac{V}{F_2 U_2}; \qquad \text{(II-39)}$$

коэффициент полного давления,

$$\overline{H} = \frac{H}{\rho U_2^2}; \qquad \text{(II-40)}$$

коэффициент статического давления

$$\overline{H}_{ст}=\frac{H_{ст}}{\rho U_2^2}; \qquad \text{(II-41)}$$

коэффициент мощности

$$\overline{N}=\frac{102N}{F_2\rho U_2^3}; \qquad \text{(II-42)}$$

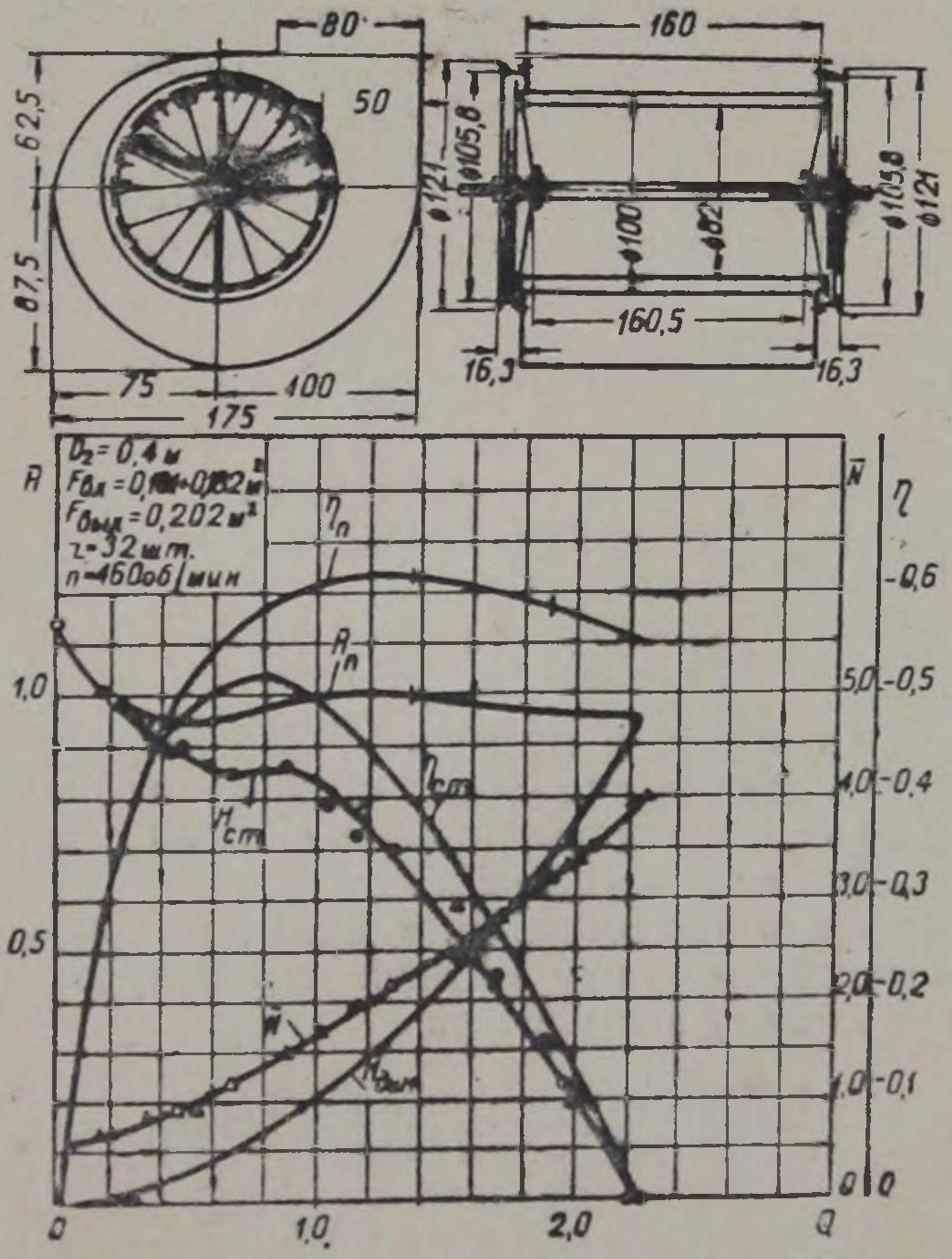


Рис. 23. Схема и безразмерная характеристика центробежного вентилятора ВНИИСТО-9 (размеры — в % от диаметра колеса)

к. п. д. по полному и статическому давлению

$$\eta=\frac{\overline{V}\,\overline{H}}{\overline{N}}=\frac{VH}{102N}; \qquad \text{(II-43)}$$

$$\eta_{ст}=\frac{\overline{V}\,\overline{H}_{ст}}{\overline{N}}=\frac{VH_{ст}}{102N}, \qquad \text{(II-44)}$$

где F_2 — площадь колеса, равная 0,785 D_2^2 в $м^2$, D_2 — диаметр колеса, измеряемый по внешним кромкам лопаток, в $м$;
U_2 — окружная скорость при D_2 в $м/сек$;
ρ — плотность газа в $кг\,сек^2/м^4$.

Полное давление вентилятора равно сумме статического и динамического давлений

$$H = H_{ст} + H_{д} = H_{ст} + \frac{v^2}{2g}\gamma, \qquad \text{(II-45)}$$

где v — скорость газа в выходном сечении вентилятора в *м/сек*;
γ — удельный вес газа в *кг/м*³.

Зная размер диаметра колеса, можно по схемам вентилятора (см. рис. 23) найти его прочие размеры, а также от безразмерных характеристик перейти к размерным.

Изменения числа оборотов, удельного веса, диаметра колеса меняют подачу, давление и мощность вентиляторов данной серии, оставляя к. п. д. постоянным, что выражается следующими зависимостями:

$$V_2 = V_1 \frac{n_2}{n_1}\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3; \qquad \text{(II-46)}$$

$$H_2 = H_1\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2\frac{\gamma_2}{\gamma_1}; \qquad \text{(II-47)}$$

$$N_2 = N_1\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^5\frac{\gamma_2}{\gamma_1}. \qquad \text{(II-48)}$$

Подбор вентиляторов и дымососов. Характеристики вентиляторов в каталогах даются для «стандартного» воздуха, имеющего температуру 20 °С, относительную влажность 50%, давление 760 *мм* рт. ст. и удельный вес $\gamma = 1{,}2$ *кг/м*³.

В каталогах для дымососов иногда даются характеристики дымососов непосредственно при высоких температурах (200°).

Мощность на валу вентилятора

$$N_э = \frac{VH(1+\mu)}{3\,600\cdot 102\eta_в\eta_{пе}}\cdot\frac{20+273}{t_г+273}\,[квт], \qquad \text{(II-49)}$$

где V в *м*³/*час*; H в *мм* вод. ст.; $t_г$ в град., кроме того:
μ — концентрация твердых частиц, если вентилятор предназначен для пневмотранспорта (угля, сыпучего материала и т. д.). Концентрация выражается отношением веса взвешенных твердых частиц к весу несущего их газа;
$\eta_в$ — к. л. д. вентилятора;
$\eta_{пе}$ — к. п. д. передачи, равный при соединении муфтой 0,95; при передаче клиновыми ремнями 0,9; плоскими 0,85.

Установочная мощность электродвигателей

$$N_{уст} = kN_э, \qquad \text{(II-50)}$$

где k — коэффициент запаса мощности, равный произведению коэффициентов запаса: по производительности 1,1; по давлению 1,15; по мощности мотора 1,05, а в итоге $k = 1{,}33$.

Если вентилятор, рассчитанный для работы на стандартном воздухе, выбирается для работы при повышенной температуре газов,

то давление ($H_{20°}$) по таблицам должно выбираться бóльшим, чем рассчитанное по сопротивлению сети при данном расходе газов:

$$H_{20°} = h_0 \frac{273+t}{273+20} \text{ [мм вод.ст.]}. \qquad \text{(II-51)}$$

Регулирование производительности вентиляторов достигается различными средствами: дросселированием шиберами, гидромуфтами, направляющими аппаратами. Последний метод экономичен и прост и поэтому получил широкое распространение.

Если температура отсасываемых газов превышает 180°, то следует предусматривать вентиляторы с охлаждением водой подшипников, кожухов, колес и вала. При температурах выше 400—500° применяется либо искусственное охлаждение взбрызгиванием воды или присадкой холодного воздуха, либо детали вентилятора делаются из жароупорной стали, либо применяется вместо прямой косвенная тяга с эжекцией горячих газов струей холодного воздуха.

Наилучший же способ охлаждения газов — это располагать между печью и дымососом рекуператоры и другие теплообменники и возвращать часть тепла дымовых газов в качестве вторичных энергоресурсов для полезного использования.

Характеристика сети и совместная работа вентиляторов. Характеристикой сети называется зависимость потери давления в газовом тракте (каналы печи, борова и т. д.) от количества протекающего в единицу времени газа. Эта зависимость в общем случае может быть выражена формулой

$$h_0 = f(V) = av_0^2 + bv_0^n + c, \qquad \text{(II-52)}$$

здесь показатель степени n находится в пределах от 1 до 2, причем сопротивление при движении газов в прямых, относительно коротких каналах и потери давления на местные сопротивления пропорциональны квадрату скорости газов. Сопротивление при прохождении газов через длинные трубопроводы пропорционально скорости их в степени, несколько меньшей, чем 2, сопротивление же фильтров, решеток пропорционально скорости газов в степени, близкой к единице. Сопротивление, создаваемое самотягой, от скорости потока не зависит. Характеристики сети, наложенные на характеристику вентилятора, показаны на рис. 24.

Характеристика сети *I* — параболическая, сети *II* — прямолинейная. Очевидно, что точка P и соответственно точка P' пересечения характеристики сети с характеристикой вентилятора дают возможность определить рабочий режим вентилятора, т. е. подачу V_p и давление H_p. Для характеристики конкретной сети надо так подбирать вентилятор, чтобы его работа по возможности всегда проходила при наибольших значениях к. п. д., например при к. п. д., отклоняющихся от максимального значения не более чем на 10%. На рис. 24 область наивыгоднейших подач отмечена на оси абсцисс отрезком ΔV. Если бы характеристика сети пересекла характери-

стику вентилятора вне этой области, допустим в точке P', то рабочий режим вентилятора $V'_р$ и $H'_р$ выходил бы из наивыгоднейшей области в сторону резкого понижения к. п. д. ($\eta'_р < 0{,}9\,\eta_{макс}$) и был бы связан с перерасходом электроэнергии на подачу того же количества газа.

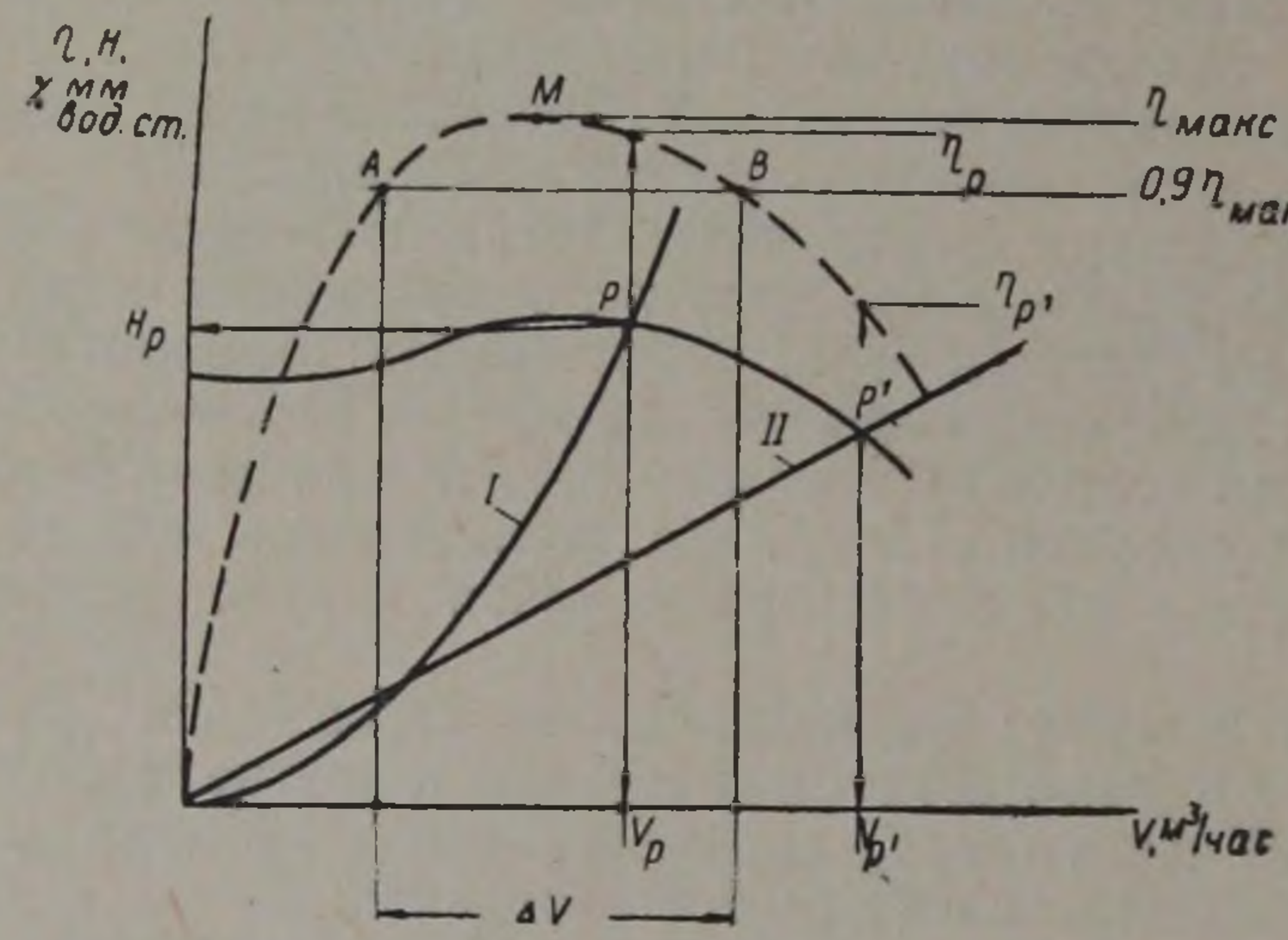


Рис. 24. Характеристика сети, наложенная на характеристику вентилятора

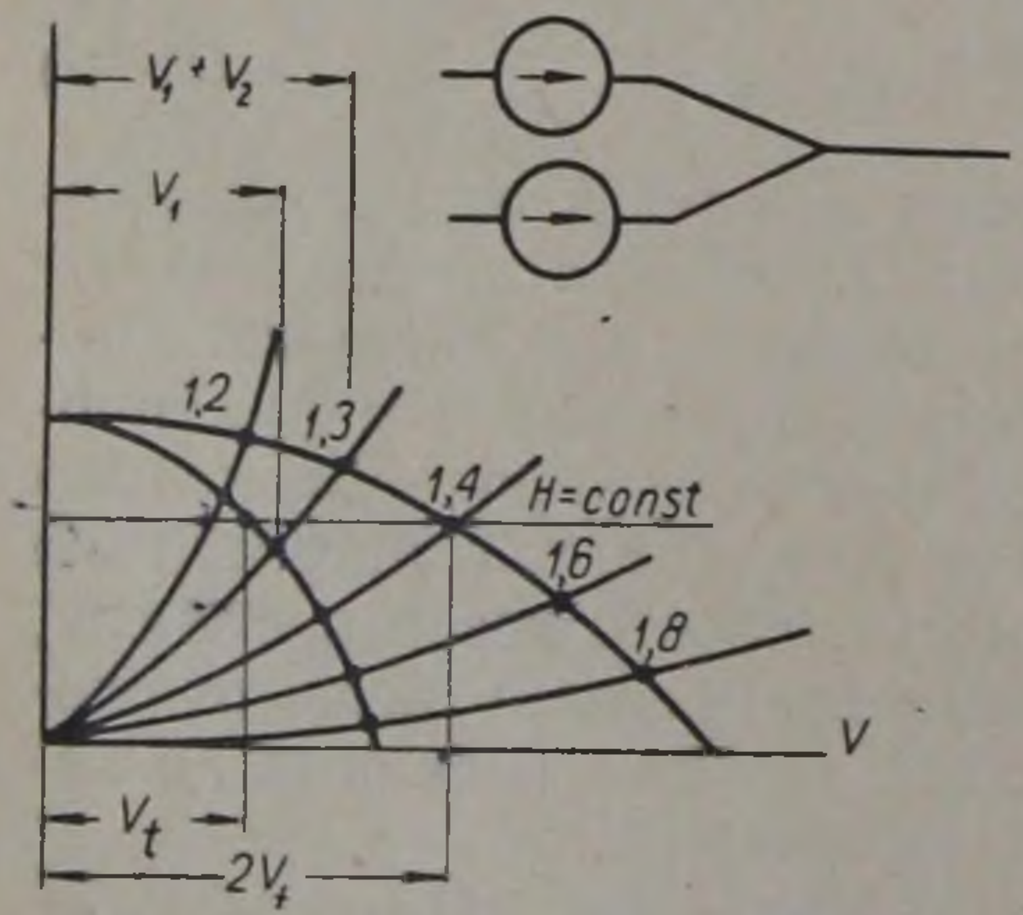


Рис. 25. Характеристика параллельной работы вентилятора

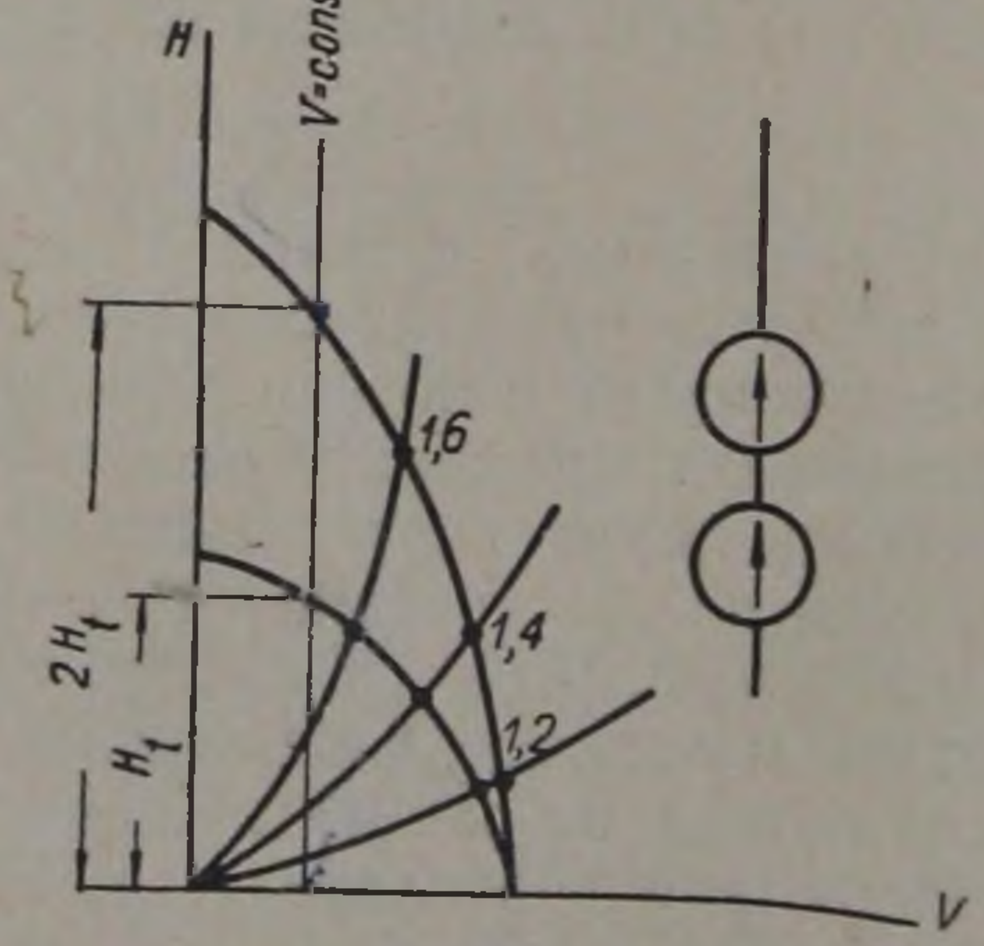


Рис. 26. Характеристика последовательной работы вентилятора

Для увеличения подачи два или несколько вентиляторов включают параллельно (рис. 25), для увеличения давления вентиляторы включаются последовательно (рис. 26). Чтобы решить вопрос, насколько изменится подача или давление, строится суммарная характеристика работы вентиляторов по определенному правилу: при параллельной работе вентиляторов (рис. 25) при постоянном дав-

лении (H=const) подачи (V_i) складываются ($2V_i$). При последовательной работе вентиляторов (рис. 26) при постоянной подаче (V=const) давления H_i складываются ($2H_i$).

Во сколько раз (1,2, 1,3 ... 1,8) увеличится подача или давление при работе двух вентиляторов по сравнению с таковыми при работе одиночного вентилятора зависит от того, в какой точке пересекает суммарная характеристика вентиляторов характеристику сети. Если точка пересечения находится в области относительно малой подачи, то параллельная работа двух вентиляторов приводит лишь к небольшому увеличению подачи (например, $V_1 + V_2 = 1{,}2V_1$). Если точка пересечения суммарной характеристики находится в области относительно больших подач, то параллельная работа двух одинаковых вентиляторов дает подачу суммарную, равную 1,6—1,8 от подачи одиночно работающего вентилятора. Как видно из рис. 26, при последовательной работе вентиляторов имеет место обратное соотношение: чем относительно больше подача, тем по суммарной характеристике меньше рост давления по отношению к давлению одиночно работающего вентилятора, например $H_1 + H_2 = 1{,}2H_1$.

При выборе оптимальных показателей работы вентиляторов, соединенных параллельно или последовательно, необходимо учитывать также и то, каков к. п. д. при данном рабочем режиме каждого вентилятора. К. п. д. вентилятора при совместной работе находится по характеристике одиночного вентилятора при соответствующей подаче (при параллельной работе подача одного вентилятора равна половине суммарной подачи двух вентиляторов). С этой точки зрения, хотя параллельная работа в области относительно больших подач дает бо́льший прирост подачи, к. п. д. при значениях суммарной подачи $1{,}8V_1$ и выше значительно меньше максимального. Поэтому требование выбора рабочей области в зоне наивысших к. п. д. остается в силе и при совместной работе вентиляторов.

Если два вентилятора имеют не одинаковые характеристики, как это рассматривалось выше, а различные, могут практически встретиться случаи, когда параллельная или последовательная работа не только не дает заметного увеличения подачи и соответственно давления, но и приводит к ухудшению показателей одиночно работающего вентилятора: суммарная подача или суммарное давление при двух вентиляторах могут оказаться ниже таковых, чем при работе одного вентилятора. То же можно сказать и о последовательной работе дымососа и дымовой трубы: если расход дымовых газов, вызываемый естественной тягой, превосходит максимальную подачу вентилятора, то включение в последовательную работу с дымовой трубой такого вентилятора только уменьшит разрежение в сети, ухудшит ее работу и вызовет напрасную затрату электроэнергии на привод дымососа.

Поэтому при расчете и выборе тягодутьевых устройств должны быть предварительно хорошо изучены характеристики сети и этих устройств.

Эжекторные установки. Для перекачки горячих газов могут использоваться эжекторные установки. Схема их действия (рис. 27) состоит в том, что струя холодного воздуха от вентилятора высокого давления B через сопло C поступает в смесительную камеру $СК$, куда присасывается за счет разрежения в ней горячий газ, который подлежит перекачке. Смесь получает общее побуждение движения и, проходя через диффузор D, уходит по трубопроводу T к назначенному месту. Действие эжекторов сходно с действием инжекционных горелок.

Расчет эжектора производится на основе уравнений механики газов.

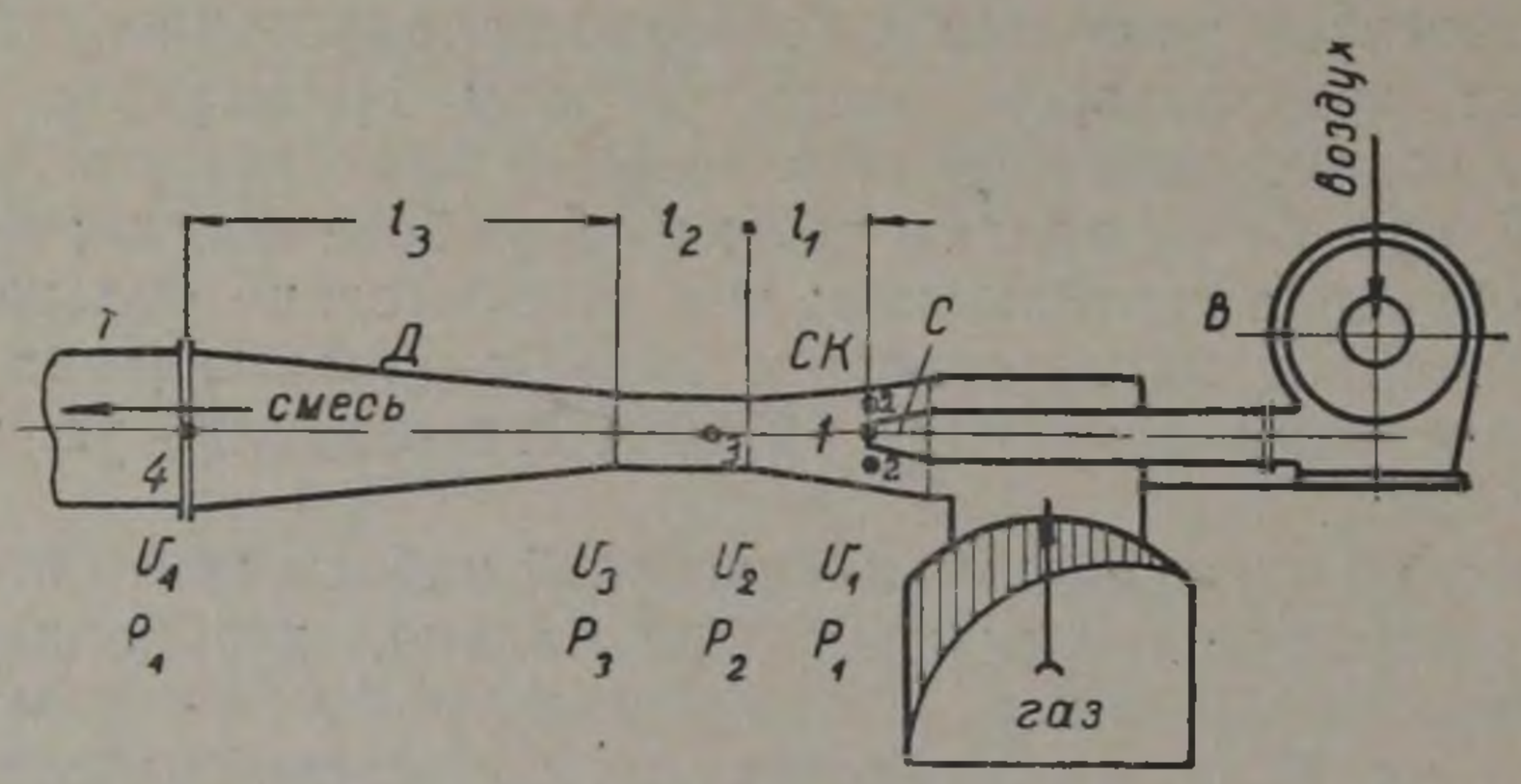


Рис. 27. Схема эжектора

Уравнение равенства количеств движения

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2)\, v_3. \qquad \text{(II-53)}$$

Здесь m_1 и m_2 — секундные массы эжектирующего и эжектируемого газов, $m = \frac{G}{g}$ в *кг сек/м*, где G в *кг/сек*; v_1, v_2, v_3 — скорости газов до смешения и скорость смеси в *м/сек*.

Наивыгоднейшая скорость смеси газов определяется по формуле

$$v_3 = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} = \frac{G_1 v_1 + G_2 v_2}{G_1 + G_2} = \frac{V_1 \gamma_1 v_1 + V_2 \gamma_2 v_2}{V_1 \gamma_1 + V_2 \gamma_2}. \qquad \text{(II-54)}$$

Если давление в сопле p_1, а в горле после смешения p_3 в *кг/м²*, то скорость истечения согласно равенству суммы статического и динамического напоров по формуле Бернулли равна

$$v_1 = \varphi_{ск} \sqrt{\frac{2g(p_1 - p_3)}{\gamma_1}}\ [м/сек]. \qquad \text{(II-55)}$$

Здесь $\varphi_{ск}$ — коэффициент, учитывающий потерю скорости и равный 0,85 при сужающемся или цилиндрическом и 0,9—0,95 при расширяющемся ($7 \div 10°$) сопле, типа сопла Лаваля.

Скорость v_2 эжектируемого газа принимается порядка 8—12 *м/сек*, а давление его p_2 принимается, исходя из условий подсоса:

$$p_3 = p_2 - \frac{v_2^2}{2g}\gamma_2 \ [кг/м^2]. \qquad \text{(II-56)}$$

Давление эжектирующего газа, необходимое для работы эжектора, вычисляется по формуле

$$p_1 = \frac{v_1^2}{2g\varphi_{ск}^2}\gamma_1 + p_3. \qquad \text{(II-57)}$$

Диффузор переводит динамический напор в статический с к. п. д. $\eta_д$, равным 0,7 ÷ 0,8, поэтому приращение статического напора от p_3 до p_4 будет

$$p_4 - p_3 = \eta_д \frac{v_3^2}{2g}\gamma_3 \qquad \text{(II-58)}$$

или, подставляя значение v_3 из формулы (II-53) и учитывая, что

$$\gamma_3 = \frac{\gamma_1 V_1 + \gamma_2 V_2}{V_1 + V_2},$$

получим

$$p_4 - p_3 = \eta_д \frac{(V_1\gamma_1 v_1 + V_2\gamma_2 v_2)^2}{2g(V_1\gamma_1 + V_2\gamma_2)(V_1 + V_2)}. \qquad \text{(II-59)}$$

Давление p_4 должно быть больше, чем давление p_0 в пространстве, куда подается смесь газов, на величину потерь на покрытие сопротивления трению в подводящем трубопроводе T и потерь выхода смеси из горелки или иного устройства, т. е.:

$$p_4 = p_0 + \sum h_{пот} + \frac{v_{вых}^2}{2g}\gamma_{вых}. \qquad \text{(II-60)}$$

Уравнение (II-59) считается основным для определения размеров эжектора. Расстояния l_1 и l_2 выбираются равными 1,5 $(d_3 - d_1)$. При угле между образующей диффузора с осью, равным $\alpha = 4—8°$, выходной диаметр диффузора d_4 зависит от длины l_3 $(l_3 = 5—10d_3)$, так:

$$d_4 = d_3 + 2l_3 \operatorname{tg}\alpha. \qquad \text{(II-61)}$$

При вертикальном расположении оси диффузора учитывается геометрический напор, увеличивающий напор, создаваемый диффузором. Приведенный расчет эжектора базируется на формулах истечения несжимаемой жидкости, что применимо (с ошибкой 1 ÷ 3%) при небольшом давлении газа (∠1 000 *мм* вод. ст.). При бóльших давлениях во избежание роста ошибок из-за неучета расширения необходимо применять формулы истечения с адиабатическим расширением газов, известные из термодинамики.

5. Некоторые вопросы движения газов в печах и сушилках

При движении газов по вертикальным каналам, образованным, например, стенками рекуператоров или садкой материалов, охлаждающиеся в каналах газы надо направлять сверху вниз; газы, нагревающиеся стенками каналов, следует направлять снизу вверх. Это дает устойчивость равномерного газораспределения по каналам.

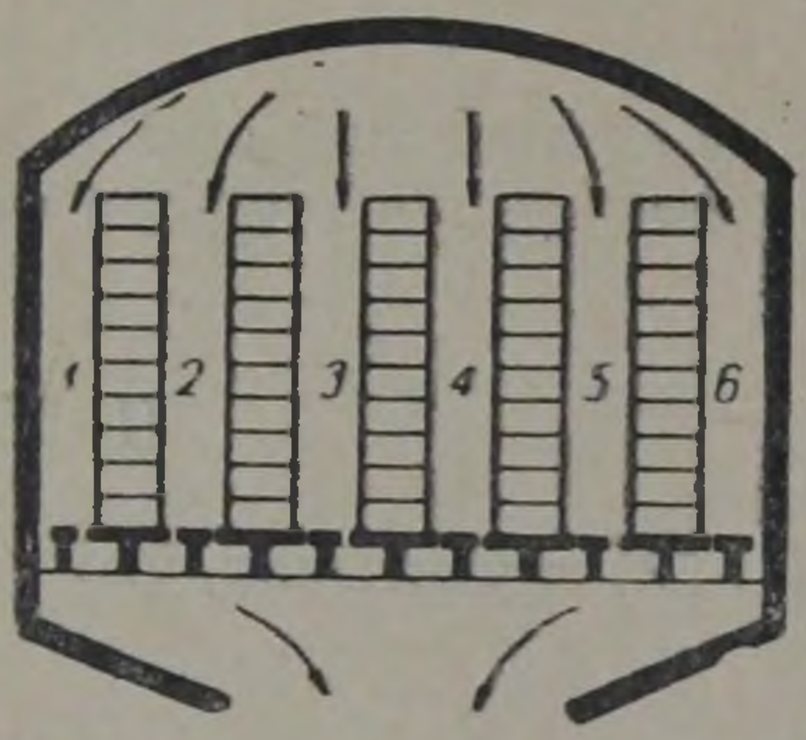


Рис. 28. Саморегулирование распределения газа по каналам

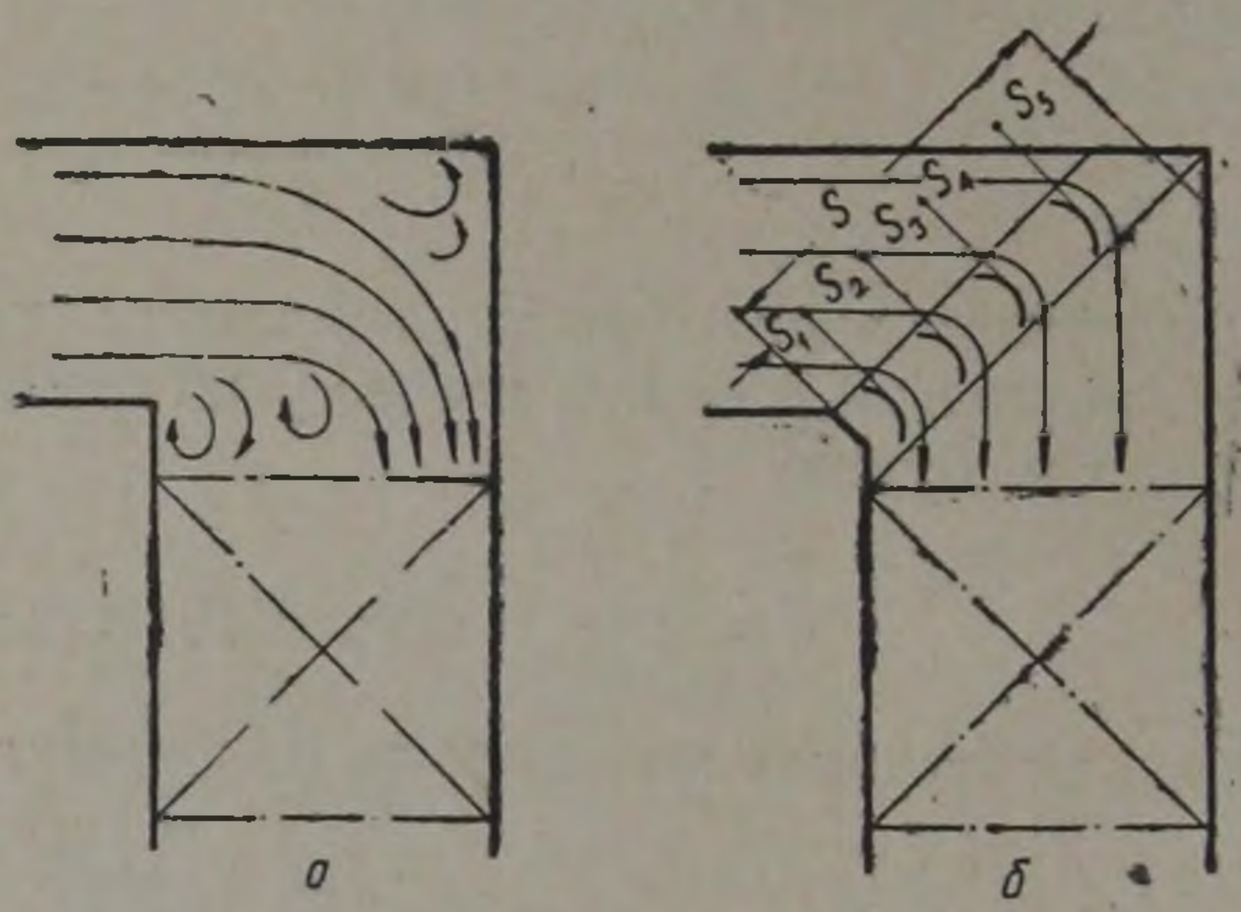


Рис. 29. Схема установки направляющих лопаток

а — ход газов без направляющих лопаток; *б* — ход газов после установки направляющих лопаток

Действительно, пусть в канал *6* (рис. 28) по каким-либо причинам поступило меньше греющего газа, чем в каналы *1—5*. Тогда в нем противодействующая опусканию газов самотяга — $\Delta\gamma\ H$ — уменьшится, так как газы при малом количестве больше охладятся и $\Delta\gamma$ уменьшится. В соседних же каналах, куда поступило больше греющего газа, его охлаждение будет меньше и самотяга, противодействующая опусканию газов, усилится. Это приведет к самовыравниванию распределения газов по всем каналам.

Это правило было выведено В. Е. Грум-Гржимайло из наблюдений над ламинарным движением горячих газов.

С целью равномерного распределения газов на поворотах при их принудительном движении устанавливаются направляющие лопатки по схеме рис. 29. Если n — число лопаток, S — заданная длина, где размещаются лопатки, то S_1, S_2 — расстояния между отдельными лопатками, выбираются по формулам:

$$S_1 = \frac{0{,}67S}{n+1};$$

$$S_2 = S_1\frac{n+1}{n};\ S_3 = S_2 + \frac{S_1}{n} \text{ и т. д.} \qquad \text{(II-62)}$$

Направляющие лопатки не только выравнивают газовый поток по сечению, но и уменьшают потери на местные сопротивления.

Для равномерного распределения газов, идущих из общего канала по отдельным камерам, необходимо правильно расставлять тягодутьевые средства, достигая, во-первых, выравнивания газовых сопротивлений по трактам *1—2—3*, *1—4—3* и т. д. и, во-вторых, стремясь создать близкие аэродинамические режимы во всех камерах.

На рис. 30,*а* все камеры находятся в разных аэродинамических условиях: камера *А*—под наибольшим разрежением и, следовательно, в ней наибольший присос наружного воздуха и наибольшее охлаждение. Камера *И*, наоборот, находится под наибольшим давлением и в ней наименьший присос. Кроме того, нейтральная точка (±0) меняет свое положение по оси в разных камерах.

Напоры как нагнетающего вентилятора, так и отсасывающего в этом варианте наибольшие.

Расположение тягодутьевых устройств в схеме *б* приводит к меньшим потерям энергии и к более равномерному по камерам распределению газов; преимущество схемы *в* — большая регулируемость системы. Наименее благоприятной надо считать схему, еще встречающуюся на производствах, при которой дутьевой и отсасывающий вентиляторы расположены с одного конца блока (например, оба около камеры *И*). В этом случае в камере *И* будет наибольший перепад давлений, а в камере *А* — наименьший, и добиться равномерного газоснабжения камер практически невозможно даже при тщательном регулировании шиберами на подводящем и отсасывающем каналах. Наивыгоднейшие тягодутьевые режимы устанавливаются в каждом конкретном случае в зависимости от назначения тепловой установки, производительности и режима ее работы и других факторов.

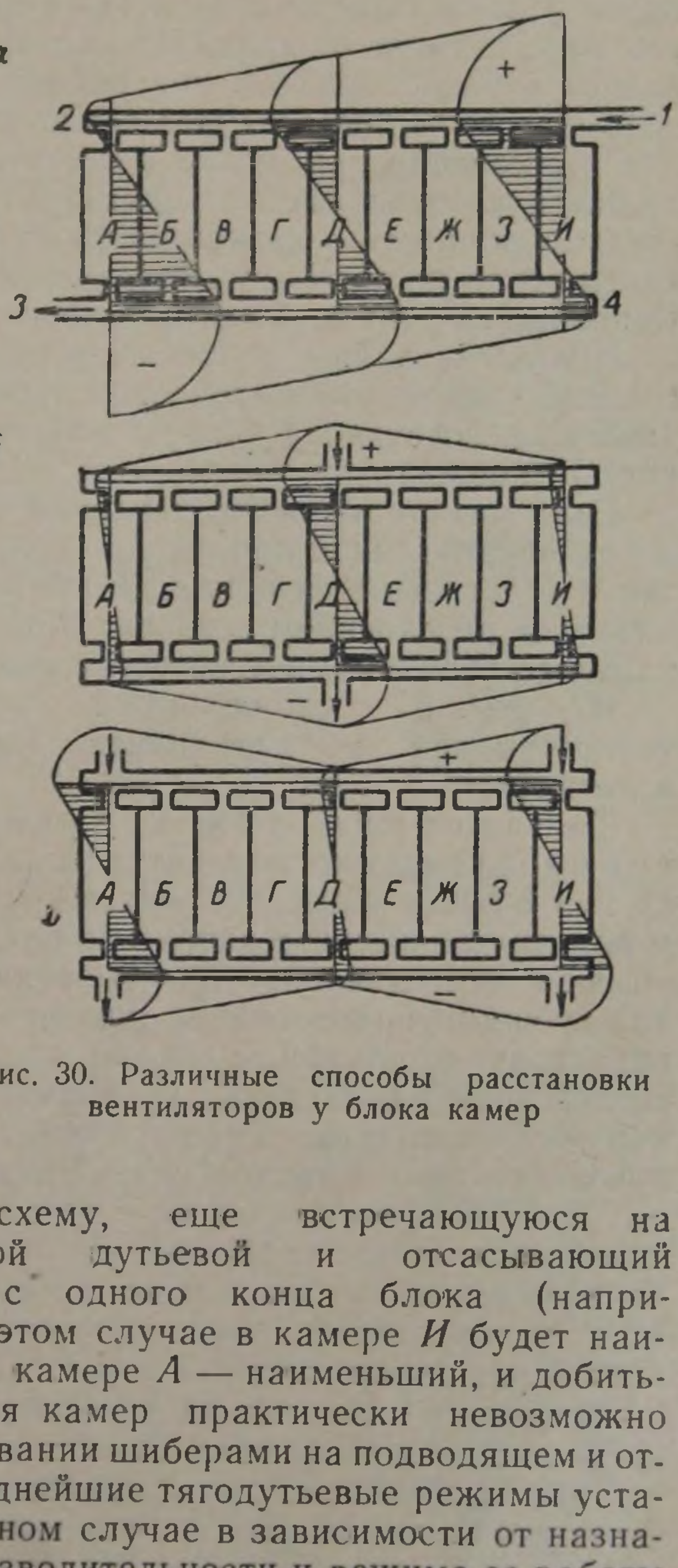


Рис. 30. Различные способы расстановки вентиляторов у блока камер

ГЛАВА II

ТЕПЛООБМЕН

1. Общие положения

В тепловых установках вопросы теплообмена являются решающими. Интенсивность и качество тепловой обработки в значительной мере зависят от правильности использования законов теплопередачи в разнообразных конкретных случаях. Общие законы теплообмена известны из курса теплотехники. Здесь рассматривается их применение при сушке и обжиге строительных материалов, свойства которых следует предварительно изучить: теплоемкость, теплопроводность в зависимости от температуры и влажности, затраты тепла на эндо- и экзотермические реакции при обжиге и т. д. Основные из этих свойств приведены ниже (см. табл. 22, 23 и т. д.).

При организации теплообмена в промышленных условиях важно создать равномерность тепловой обработки в полном объеме периодически действующей камеры или сечении непрерывно действующих установок.

Если неравномерность тепловой обработки останется, в общей массе обработанной продукции будет содержаться как перегретый, так и недогретый материал. Чаще всего неравномерность обусловливается расслоением газового потока из-за отклонения от рационального аэродинамического режима установки.

На рис. 31 схематически показаны характерные случаи теплопередачи в установках для строительных материалов и деталей.

Теплообмен лучеиспусканием (рис. 31,*а*) характерен для высокотемпературных процессов в печах: вращающихся для обжига вяжущих — схема *1*, ванных для шлака — схема *2* и для других печей с развитым пламенным пространством. Теплообмен лучеиспусканием при умеренных температурах используется для сушки инфракрасными лучами — схема *3*. При небольших температурах, маломерном объеме, где происходит теплообмен, и при воздействии на материал прозрачных газов (при малом содержании в газах водяных паров, углекислоты и твердых частиц) доля лучеиспускания в теплопередаче незначительна.

Теплообмен конвекцией (рис. 31,*б*) более характерен для большинства процессов тепловой обработки при протекании газов через слой материала — схема *4*, через садку изделий — схема *5*, у поверхности рекуператоров — схема *6*, над уровнями жидкостей при сушке — схема *7* и т. д.

Передача теплопроводностью (рис. 31,*в*) имеет место всегда при нагреве обрабатываемого материала, стен и других ограждений тепловых установок, а также при передаче тепла через пограничные слои теплоносителей. Теплообмен может совершаться при установившемся состоянии (например, передача тепла через ограждения непрерывно действующих установок — схема *8*)

и при неустановившемся состоянии (аккумуляция тепла в стенах периодически действующих установок — схема *9* и в подине вагонеток туннельных печей — схема *10*). В реальных производственных условиях обычно имеет место комбинированный теплообмен: от газов к материалу (внешняя задача) — лучеиспусканием, конвекцией и в самом материале (внутренняя задача) — теплопроводностью. Особенно сложным является процесс теплопередачи через муфель печи к изделию — схема *11*.

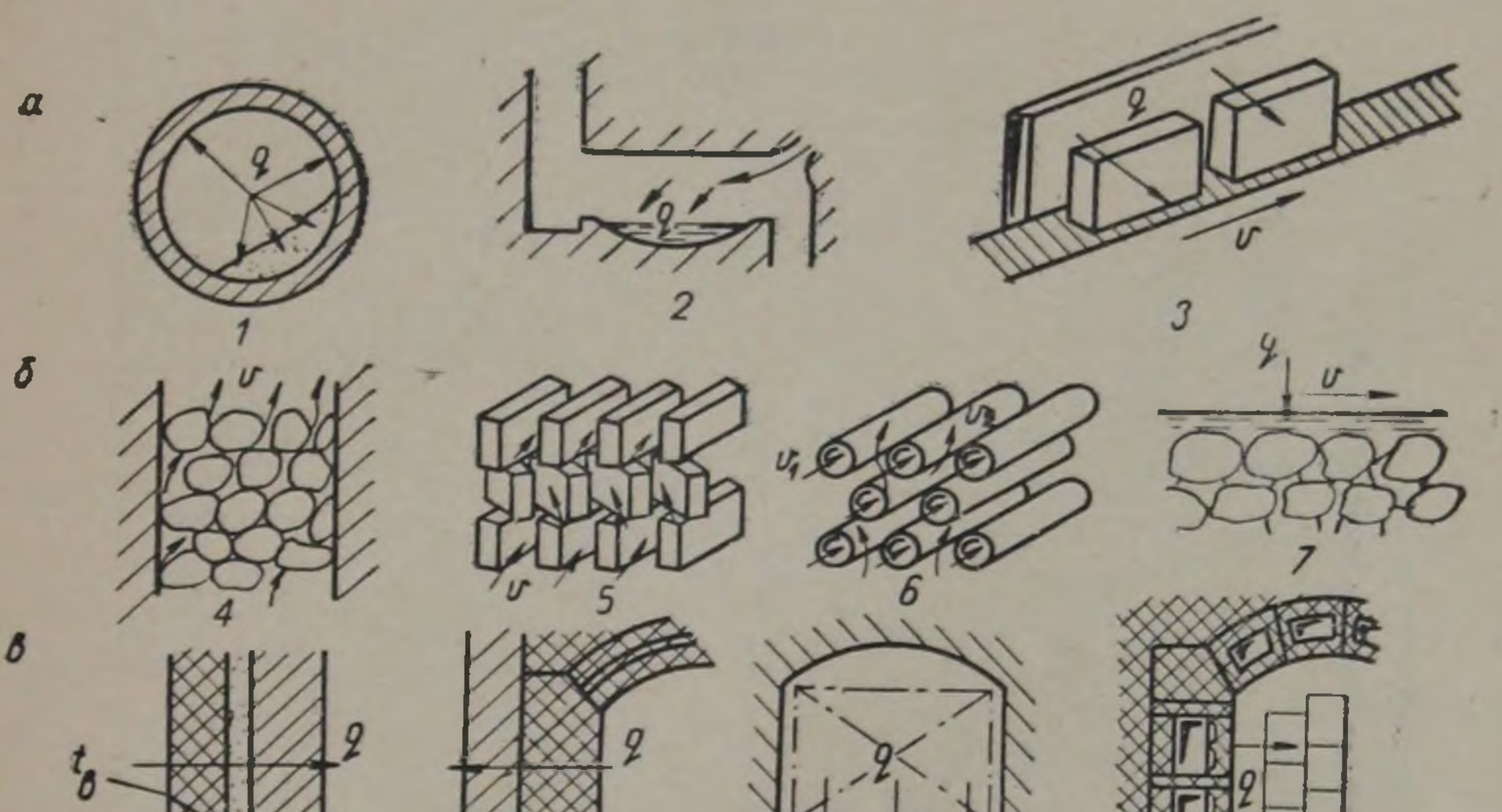


Рис. 31. Схемы теплообмена в установках для тепловой обработки строительных материалов и изделий

q — направление теплового потока; *υ* — скорость; $t_н$ — наружная температура; $t_в$ — внутренняя температура

При тепловой обработке многих материалов в них, помимо нагрева, происходят сложные физико-химические процессы экзо- или эндотермического характера, фронт распространения которых имеет определенную скорость, зависящую от свойств материалов. Учет этих процессов в расчете теплообмена обязателен. В некоторых случаях для упрощения затрату тепла на реакции, происходящие в материале, условно относят к удельной теплоемкости материала «при нагреве». Естественно, такая теплоемкость будет выше теплоемкости материала в тех же температурных пределах, но при охлаждении, когда никаких реакций уже совершаться не будет. Эта же величина теплоемкости будет характерна и для уже обожженных материалов как при их нагреве, так и при охлаждении , так как в таких материалах химические реакции не происходят.

2. Передача тепла лучеиспусканием

Количество тепла, передаваемое от газа к единице поверхности лучеиспусканием, на основе закона Стефана-Больцмана может быть определено по формуле ВТИ:

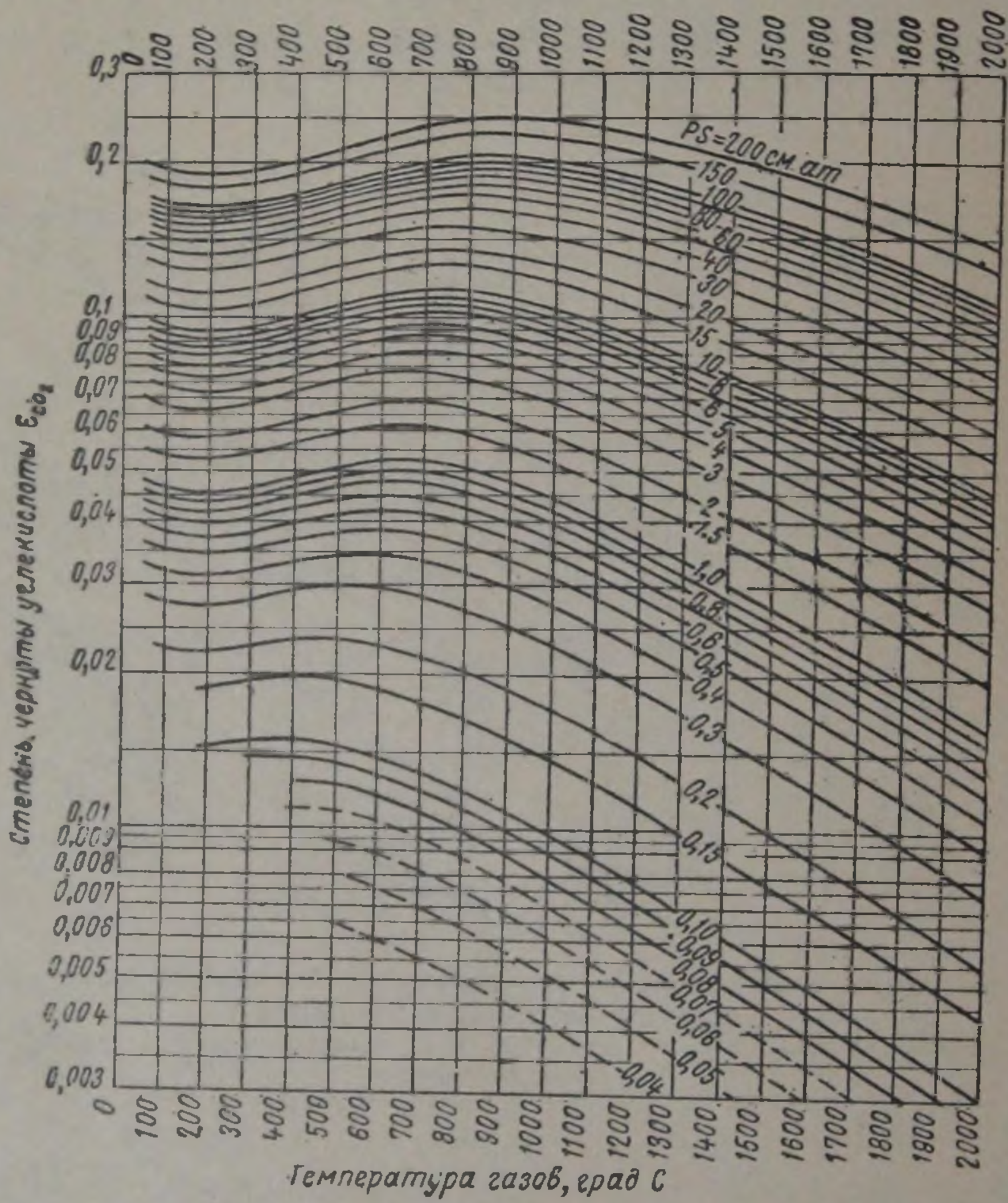


Рис. 32. Степень черноты углекислоты ε_{CO_2}

$$q = 4{,}96\varepsilon_г \left(\frac{t_г+273}{100}\right)^4 \cdot \left(1 - \frac{t_{пов}+273}{t_г+273}\right)^{3,6} \left[ккал/м^2час\right], \quad \text{(II-63)}$$

где $\varepsilon_г$ — степень черноты газа при данной температуре, равная сумме:

$$\varepsilon_г = \varepsilon_{CO_2} + \beta\varepsilon_{H_2O} - \Delta\varepsilon_г, \quad \text{(II-64)}$$

где ε_{CO_2} — степень черноты углекислоты, зависящая от произведения $p_{CO_2}S$ и температуры (рис. 32);

p_{CO_2} — парциальное давление углекислоты в газах в *ата*;

S — эффективная толщина газового слоя в *м*;

ε_{H_2O} — степень черноты водяных паров, определяемая тоже как функция $p_{H_2O} S$ и температуры по графику рис. 33;

β — поправочный коэффициент на парциальное давление H_2O в зависимости от p_{H_2O} и $p_{H_2O}\ S$ (см. рис. 34);

$\Delta\varepsilon_г$ — поправочный коэффициент на совместное лучеиспускание CO_2 и H_2O, зависящий от $(p_{H_2O} + p_{CO_2})\ S$, t и отношения $p_{H_2O} : (p_{H_2O} + p_{CO_2})$ (рис. 35).

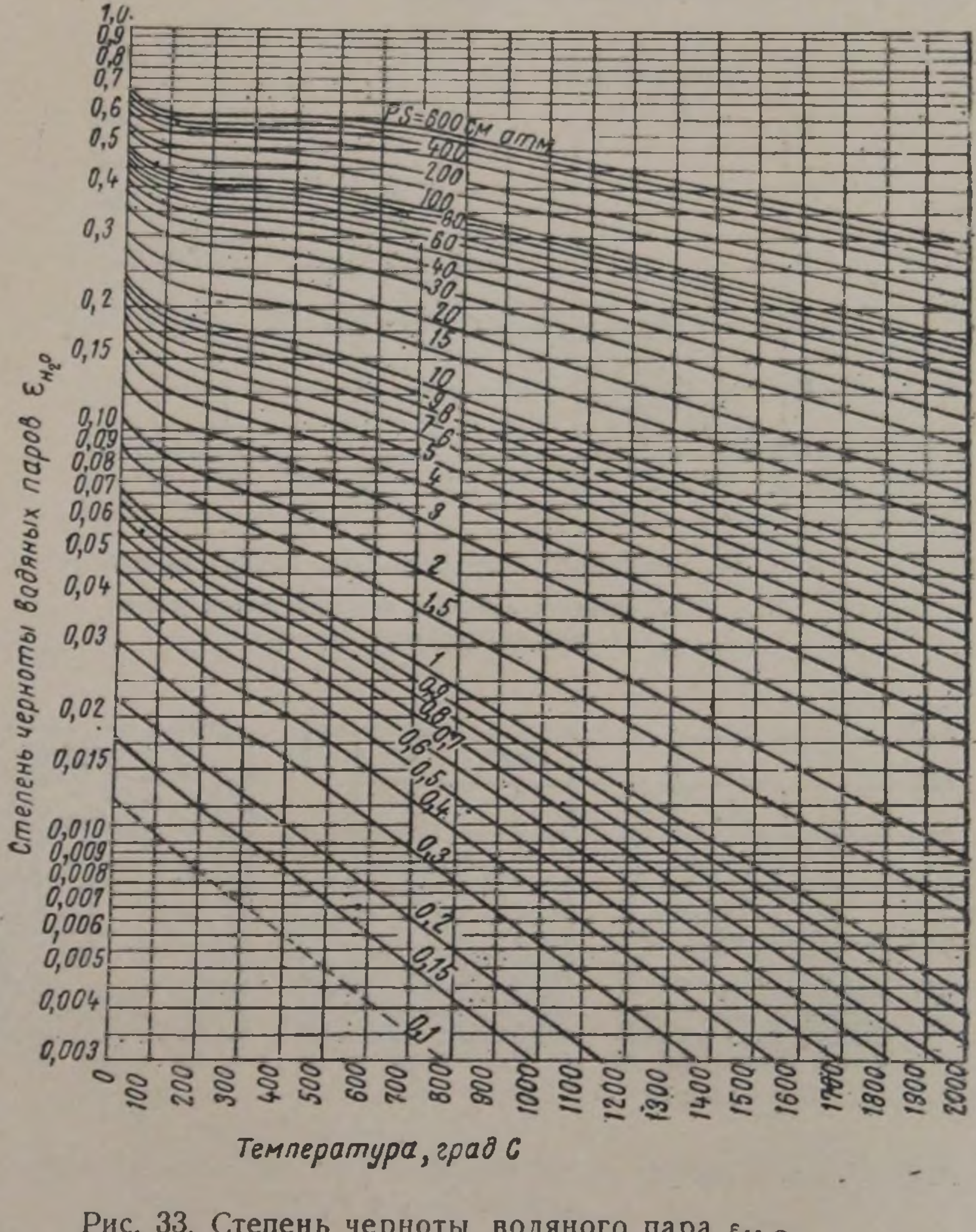


Рис. 33. Степень черноты водяного пара ε_{H_2O}

Эффективная толщина газового слоя определяется по формуле

$$S = m\,\frac{V}{F}\,, \qquad \text{(II-65)}$$

где m — коэффициент, равный 3,6 при $S > 1$ *м* и 3,4 при $S < 1$ *м*;
V — объем рабочей камеры, заполненной лучеиспускающими газами, в $м^3$;
F — поверхность ограждений этой камеры в $м^2$.

За температуру газов рекомендуется принимать усредненную температуру $T_г$ ° К, определяемую из формулы

$$\left(T_г^4 - T_{пов}^4\right)_{ср} = \sqrt{\left(T_{теор}^4 - T_{пов.к}^4\right)\left(T_{ух}^4 - T_{пов.н}^4\right)}\ , \qquad (II\text{-}66)$$

где $T_{пов}$ — температуры поверхности материала, стен и т. д. в ° К. Значок «к» — конечная, «н» — начальная;

$T_{теор}$ — теоретическая в данных условиях температура горения в ° К;

$T_{ух}$ — температура уходящих газов в ° К.

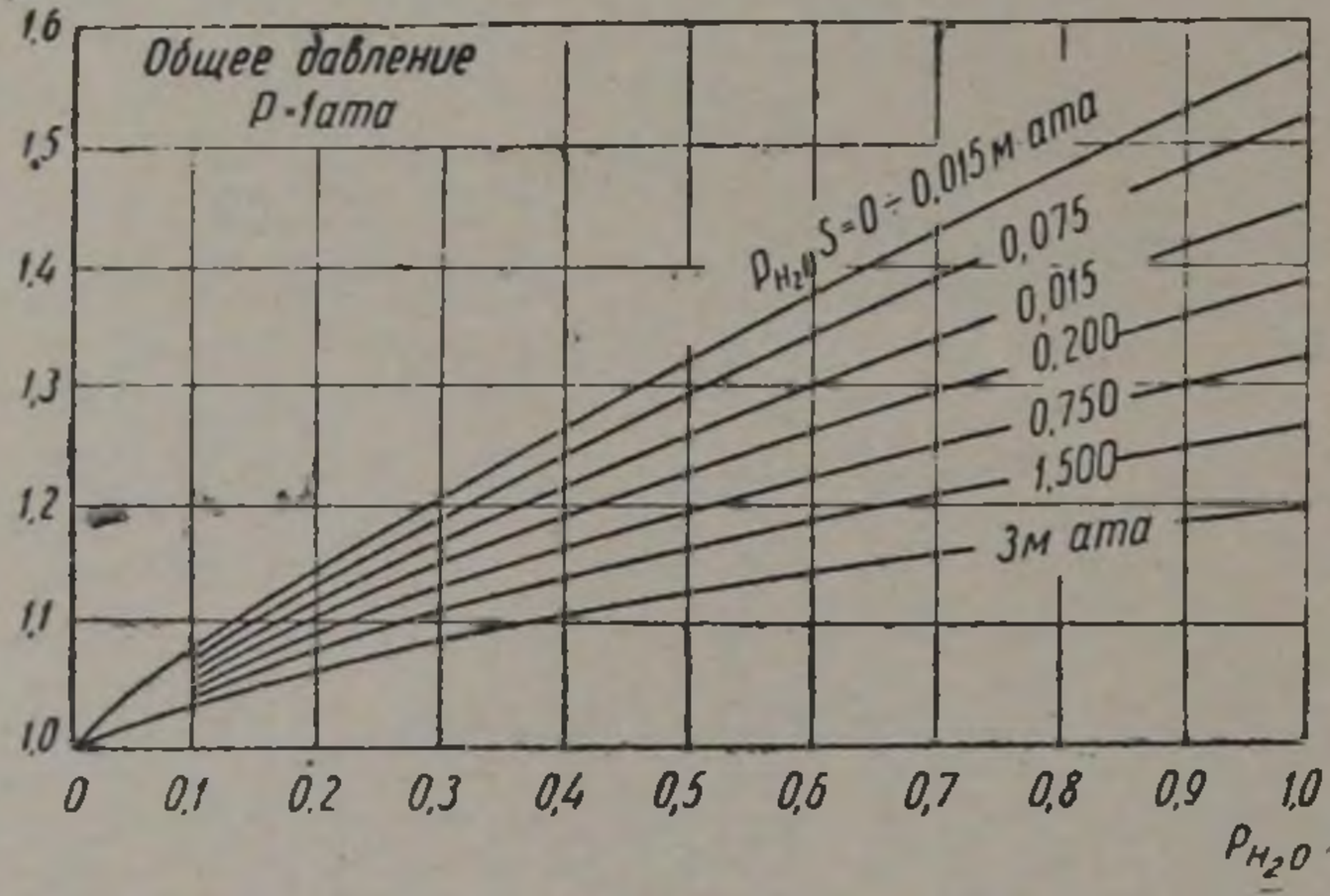


Рис. 34. Значение поправочного коэффициента β

p_{H_2O} — парциальное давление водяных паров в *ата*;

S — толщина газового слоя в *м*

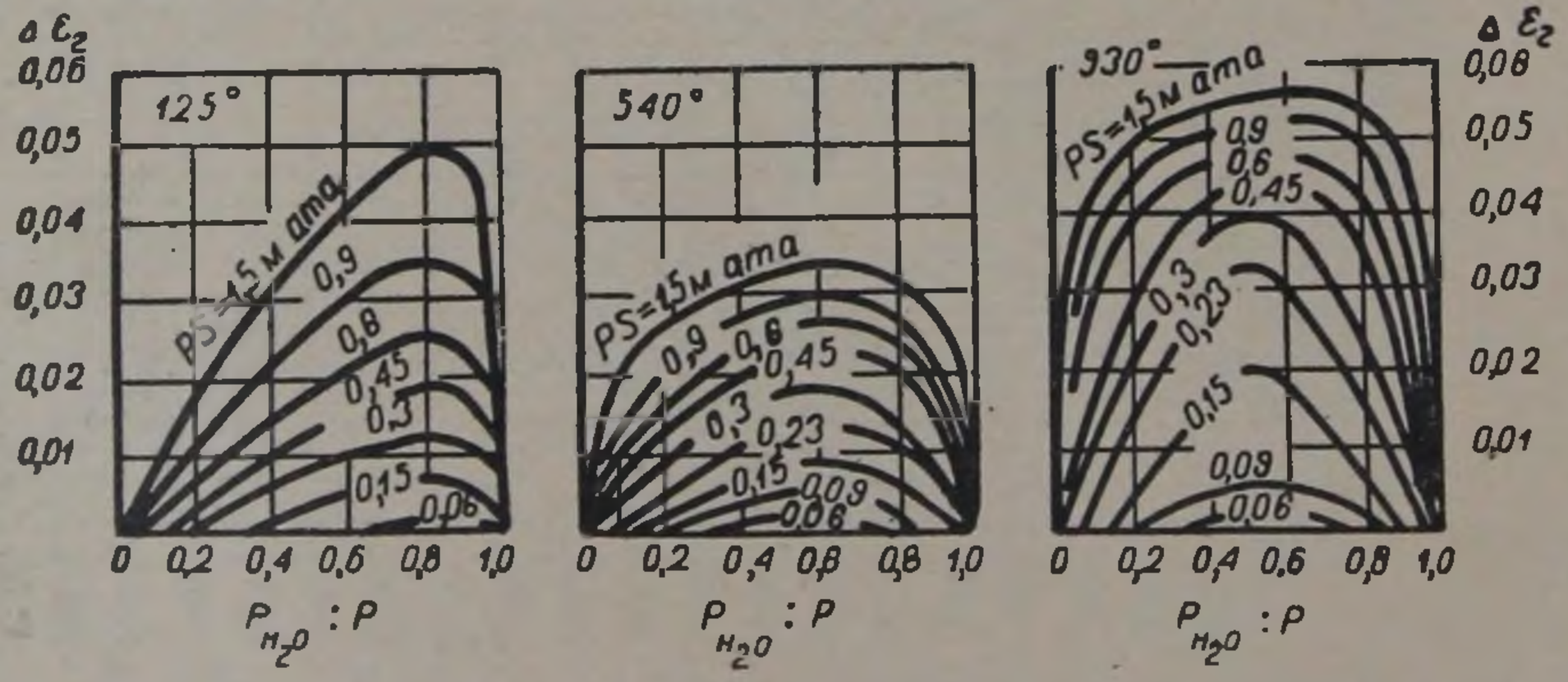


Рис. 35. $\Delta\varepsilon_г$ — поправочный коэффициент на совместное лучеиспускание CO_2 и H_2O

Отсюда коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием равен

$$\alpha_л = \frac{q}{t_г - t_{пов}}\ [ккал/м^2час\ град]. \qquad (II\text{-}67)$$

Общее количество тепла, переданного лучеиспусканием, определяется по формуле

$$Q_л = \alpha_л F\,(t_г - t_{пов}) = qF\ [ккал/час]. \qquad (II\text{-}68)$$

В последнее время ЦКТИ, ЛПИ (А. М. Гурвич, Н. В. Кузнецов, А. Г. Блох и др.) были заново обработаны экспериментальные данные по излучению трехатомных газов и золовой пыли. Согласно этим данным, коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием для запыленного потока равен

$$\alpha_л = 4{,}9 \cdot 10^{-8} \frac{\varepsilon_{пов}+1}{2} \varepsilon_{г+п} + \\ + T_г^3 \frac{1-\left(\frac{T_{пов}}{T_г}\right)^4}{1-\frac{T_{пов}}{T_г}} \left[ккал/м^2\ час\ град\right] \qquad (II\text{-}69)$$

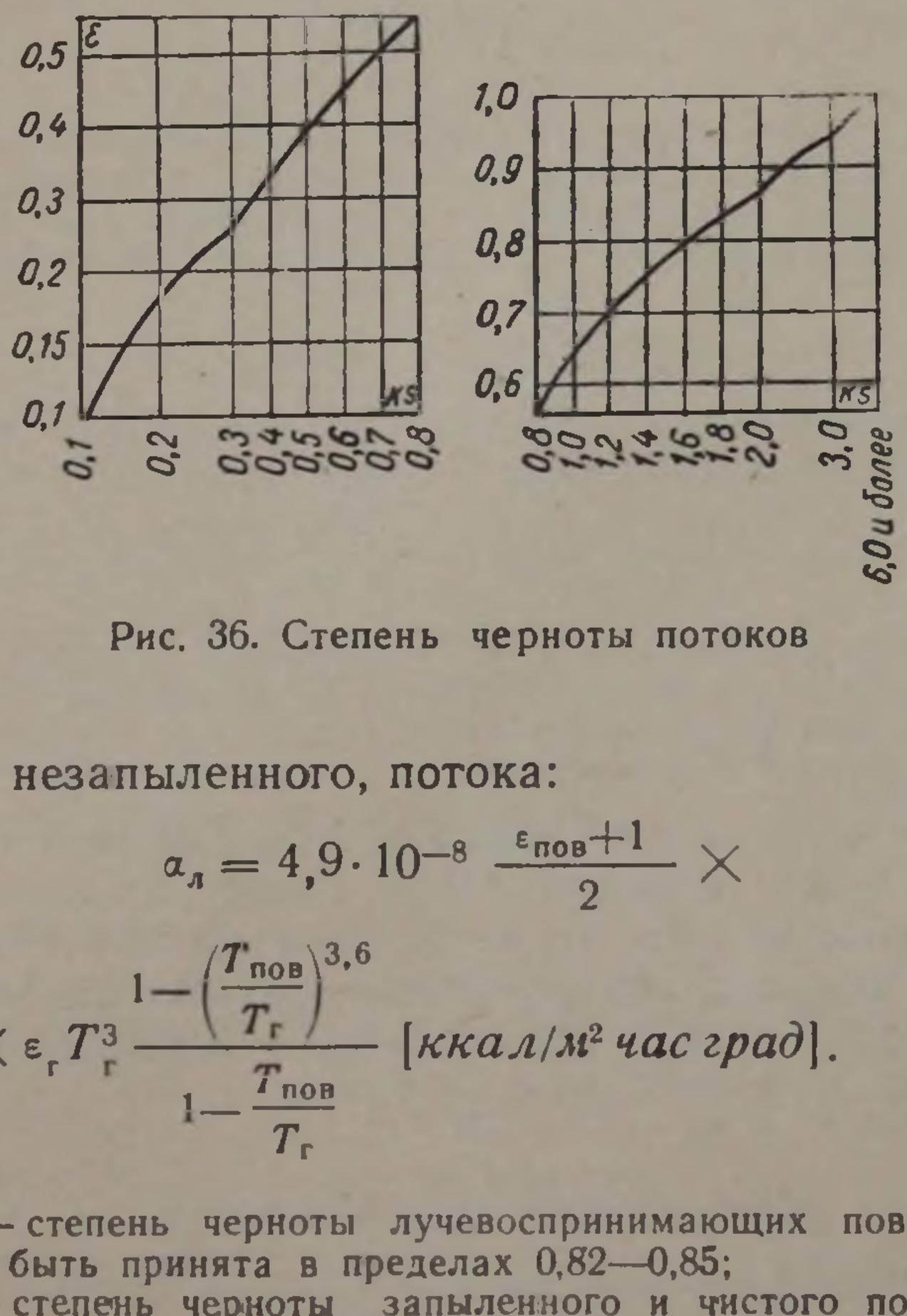


Рис. 36. Степень черноты потоков

и для чистого, незапыленного, потока:

$$\alpha_л = 4{,}9 \cdot 10^{-8} \frac{\varepsilon_{пов}+1}{2} \times \\ \times \varepsilon_г T_г^3 \frac{1-\left(\frac{T_{пов}}{T_г}\right)^{3,6}}{1-\frac{T_{пов}}{T_г}} \left[ккал/м^2\ час\ град\right]. \qquad (II\text{-}70)$$

Здесь $\varepsilon_{пов}$ — степень черноты лучевоспринимающих поверхностей, может быть принята в пределах 0,82—0,85;

$\varepsilon_{г+п}$ и $\varepsilon_г$ — степень черноты запыленного и чистого потоков. Для обоих случаев

$$\varepsilon = 1 - e^{-kS}, \qquad (II\text{-}71)$$

где kS — суммарная сила поглощения продуктов сгорания. Величины ε находят по графику на рис. 36.

Суммарная сила поглощения запыленного газового потока

$$kS = \left[k_г \left(p_{H_2O} + p_{CO_2}\right) + k_п \mu\right] S. \qquad (II\text{-}72)$$

Для чистого потока $k_п \mu = 0$.

$k_г$ — коэффициент ослабления луча трехатомными газами:

$$k_г = \frac{0{,}8+1{,}6p_{H_2O}}{\sqrt{(p_{H_2O}+p_{CO_2})\,S}}\left(1-0{,}38\,\frac{T_г}{1\,000}\right)[1/м\ ата]. \qquad (II\text{-}73)$$

$k_п$ — коэффициент ослабления луча в объеме, заполненном золовой пылью:

$$k_п = 7\sqrt[3]{\frac{1}{T_г^2\,d_п^2}}\,[м^2/г], \qquad (II\text{-}74)$$

где $d_п$ — эффективный диаметр частиц золы в μ, равный 13—33μ в зависимости от качества помола угля;

μ — концентрация золовых частиц в продуктах сгорания в $г/нм^3$:

$$\mu = 10\,\frac{A^р a_{ун}}{V_г}, \qquad (II\text{-}75)$$

$a_{ун} = 0{,}85$—$0{,}9$ для камерных топок и 0,2—0,35 — для слоевых топок.

$T_{пов} = t_{пов} + 273$ оценивается по напряженности теплового потока и условиям теплообмена. Для теплообменников с протекающей в их трубах теплоемкой средой температура поверхности близка к средней температуре протекающей среды ($t_{ср}$):

$$t_{пов} = t_{ср} + 25\,[\text{град.}]. \qquad (II\text{-}76)$$

Для случая протекания за нагреваемой поверхностью H $м^2$ среды с малым коэффициентом теплоотдачи от стенки к среде α_2 в $ккал/м^2\ час\ град$:

$$t_{пов} = t_{ср} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}\right)\frac{BQ}{H}\,[\text{град.}], \qquad (II\text{-}77)$$

где ε — коэффициент загрязнения в $м^2\ час\ град/ккал$, незаметно малый ($< 0{,}2$) при скоростях газа выше 15 $м/сек$ и доходящий до 2—2,5 при малых скоростях газа (1—3 $м/сек$);

BQ — тепловая мощность в $ккал/час$.

Для случая нагрева материала или стен в печи температура их поверхности близка к температуре газов, отличаясь от нее на 200—20° С в зависимости от времени нагрева. Для определения коэффициента теплоотдачи лучеиспусканием для запыленного потока можно пользоваться номограммой, приведенной на рис. 37. Из номограммы 37, *а* находят $\alpha_н$, а затем

$$\alpha_л = \alpha_н\,\varepsilon_{г+п}. \qquad (II\text{-}78)$$

Для чистого потока

$$\alpha_л = \alpha_н\varepsilon_г C_г. \qquad (II\text{-}79)$$

Величина $C_г$ находится по вспомогательному графику 37,*б*.

Как видно из вышеизложенного, интенсивность теплоотдачи лучеиспусканием может быть увеличена повышением температуры газового потока (подогрев газового топлива, подогрев дутьевого воздуха — в рекуператорах, регенераторах). Если факел газа прозрачен, как это имеет место при сжигании бедных подземных и генераторных газов, то можно для интенсификации теплоотдачи в факел газа подать добавочно мазут, что увеличит p_{H_2O} и p_{CO_2}.

или угольную пыль, что также сделает факел светящимся. Обогащение дутьевого воздуха кислородом повышает температуру газов и увеличивает парциальное давление трехатомных газов. Увеличе-

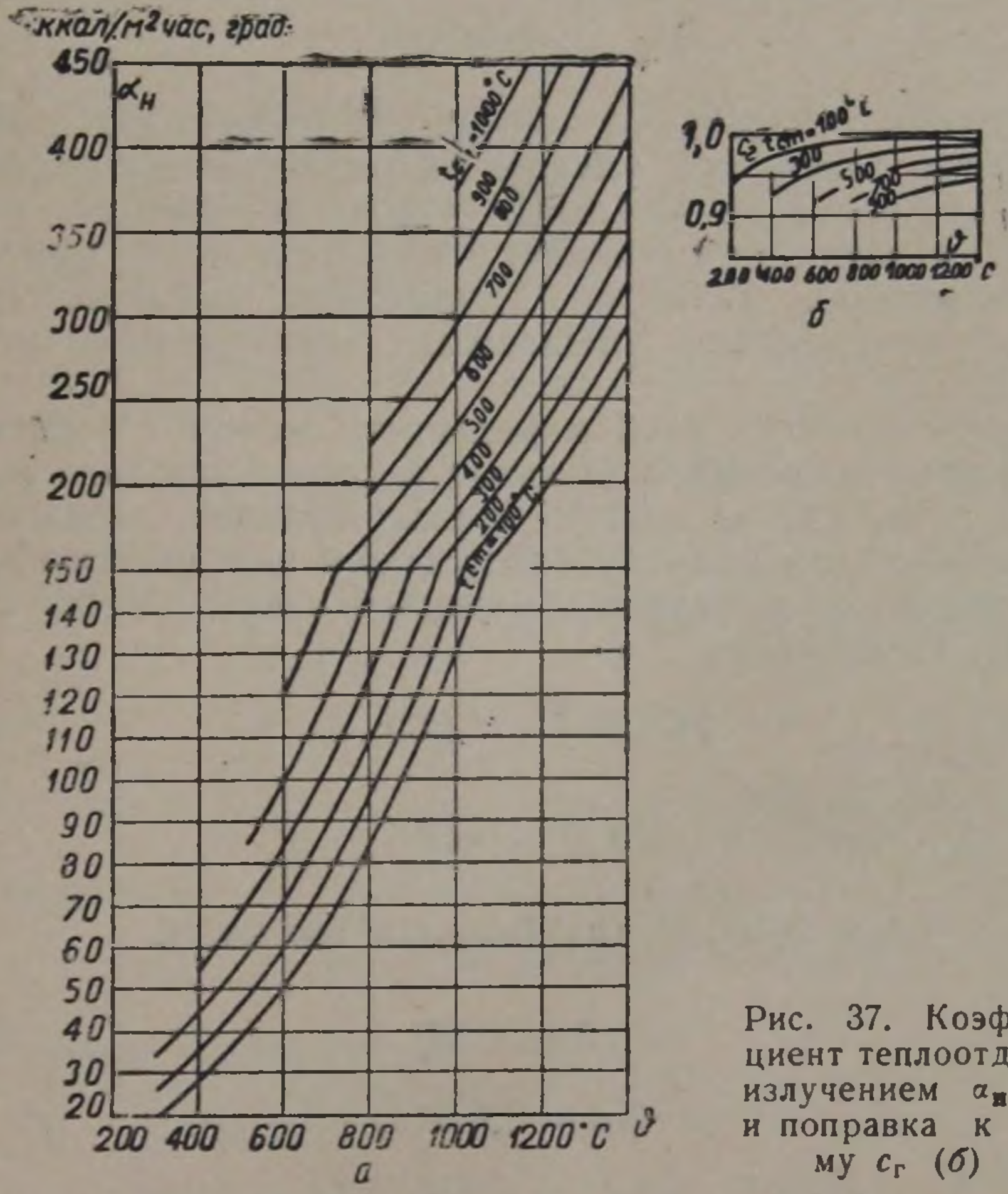


Рис. 37. Коэффициент теплоотдачи излучением $\alpha_л$ (*а*) и поправка к нему $c_г$ (*б*)

ние толщины газового слоя интенсифицирует излучение, поэтому целесообразно, например, иметь вращающиеся печи бо́льших диаметров.

3. Конвекционная теплоотдача

В основе расчета конвекционной теплоотдачи лежит связь между критериями Nu, Re, Pr, Gr, Fo, определяемая экспериментально. Из критериальных уравнений уравнения с размерными величинами получаются после раскрытия критериев: Нуссельта $\mathrm{Nu}=\frac{\alpha l}{\lambda}$; Рейнольдса $\mathrm{Re}=\frac{v l}{\nu}$; Прандтля $\mathrm{Pr}=\frac{\nu}{a}$; Грасгофа $\mathrm{Gr}=\frac{g l^3}{\nu^2}\beta\Delta t$; Фурье $\mathrm{Fo}=\frac{a\tau}{l^2}$,

где a — коэффициент температуропроводности $a=\frac{\lambda}{c\gamma}$;

β — коэффициент объемного расширения жидкости, газа.

При стационарном теплообмене исключается критерий Fo, а при принудительном движении теряет свое влияние критерий Gr. Наиболее часто поэтому формулы теплоотдачи конвекцией имеют вид

$$Nu = CRe^m Pr^n. \qquad (II\text{-}80)$$

Интенсификация теплоотдачи конвекцией происходит: при увеличении скорости газов, при улучшении омывания нагреваемых поверхностей (устранение «мертвых углов» и объемов, равномерность газового потока по сечению и объему и т. д.), при уменьшении определяющих размеров (диаметров каналов, где протекает газ; поперечника омываемых газом кусков материала и т. д.).

В качестве примера этой зависимости может служить формула теплоотдачи конвекцией от газов к слою кускового материала в шахтной печи, где вследствие малых толщин газовых каналов для протекания газа роль лучеиспускания незначительна, а главную роль играет теплоотдача конвекцией. Связь между критериями по В. Н. Тимофееву:

При $$Re = \frac{vd}{\nu} < 200;$$

$$Nu = 0{,}106Re$$

или $$\alpha_к = 0{,}106 \frac{\lambda}{g\mu}(v\gamma)\ [ккал/м^2\ час\ град]. \qquad (II\text{-}81)$$

При $$Re > 200$$

$$Nu = 0{,}61Re,$$

$$\alpha_к = 0{,}61 \frac{\lambda}{d^{0,33}}\left(\frac{v\gamma}{g\mu}\right)^{0,67} = 0{,}61 \frac{\lambda}{d^{0,33}}\left(\frac{v}{\nu}\right)^{0,67} [ккал/м^2\ час\ град]. \qquad (II\text{-}82)$$

В этих формулах:
v — скорость газов при их средней температуре, отнесенная к полному сечению шахты, в *м/сек*;
γ — удельный вес газов при их средней температуре в *кг/м³*;
d — средневзвешенный диаметр куска в *м*;
ν — коэффициент кинематической вязкости газов в *м²/сек*;
g — 9,81 *м/сек²*;
μ — коэффициент динамической вязкости газов в *кг сек/м²*;
λ — теплопроводность газов в *ккал/м час град*.

К полученному коэффициенту теплоотдачи конвекцией для расчета общего коэффициента теплоотдачи в слое α следует прибавить коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием $\alpha_л$, который в слое кусков при изменении средней температуры газов от 500° до 1200° обычно находится в пределах 1—5 *ккал/м² час град*. При средней температуре газов ниже 500° $\alpha_л \approx 0$ и $\alpha = \alpha_к$. Эти коэффициенты приняты при расчете на единицу поверхности кусков (в *м²*).

Поверхность кусков шарообразной формы на единицу объема для неслеживающихся материалов определяется по формуле

$$f_t = \frac{F}{V} = \pi d^2 : \frac{\pi d^3}{6(1-k_п)} = \frac{6(1-k_п)}{d} \ [м^2/м^3]. \qquad (II\text{-}83)$$

При исследовании теплоотдачи к кускам слоя для упрощения учета поверхности кусков, фактически открытой для газов, иногда пользуются коэффициентом теплоотдачи, отнесенным не к 1 $м^2$ поверхности куска, а к 1 $м^3$ объема слоя. При этом, по Б. И. Китаеву, коэффициент теплоотдачи определяется по формуле

$$\alpha_v = \alpha \frac{7{,}5(1-k_п)}{d} = 160 \frac{v_0^{0,9} T^{0,3}}{d^{0,75}} \cdot m \ [ккал/м^3 час \ град], \qquad (II\text{-}84)$$

где v_0 — скорость газов в полном сечении шахты, приведенная к град. и 760 *мм* рт. ст., в *нм/сек*;
T — абсолютная температура газов в °К;
d — диаметр куска в *м*;
m — коэффициент, зависящий от $k_п$ — коэффициента пустотности: при $k_п=0{,}25$ $m=1{,}5$; при $k_п=0{,}5$ $m=1$; при $k_п=0{,}6$ $m=0{,}5$.

Коэффициент α_v по этой формуле учитывает как теплоотдачу конвекцией, так и лучеиспусканием.

Для случая протекания газов через садку обжигаемого стандартного кирпича К. А. Нохратян предложил формулу для определения коэффициента теплоотдачи конвекцией

$$\alpha_к = 0{,}3 v_0^{0,5} d_э^{-0,33} \ [ккал/м^2 \ час \ град]. \qquad (II\text{-}85)$$

Здесь v_0 — скорость газов в каналах в *нм/сек*;
$d_э$ — эквивалентный диаметр каждого канала, образованного садкой кирпича, в *м*, который определяется по формуле

$$d_э = \frac{2ab}{a+b}. \qquad (II\text{-}86)$$

В каналах садки при обжиге кирпича коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием играет бо́льшую роль, чем при проходе газов через слой кускового материала, так как толщина газового слоя, особенно при разреженной садке, значительно больше, чем в слое кусков ($\alpha_л \approx 5—10$ *ккал/м² час град*).

Коэффициент теплоотдачи при проходе газов через пучок труб рекуператора зависит от конструкции пучка, диаметра и расположения его труб и других факторов и определяется по формулам применительно к типу рекуператора.

Специфические коэффициенты теплоотдачи конвекцией при нагреве и испарении воды характерны для сушильного процесса. В этом случае, например, по Н. Ф. Докучаеву:

$$Nu = 0{,}46 Re^{0,53}. \qquad (II\text{-}87)$$

Коэффициенты теплоотдачи при сушке больше, чем при отсутствии испарения влаги при прочих равных условиях.

Коэффициент теплообмена между газами и ограждающими поверхностями тепловой установки α состоит из двух слагаемых: $\alpha_к$ — коэффициента теплоотдачи конвекцией и $\alpha_л$ — коэффициента теплоотдачи лучеиспусканием, что и показывает расчетная формула:

$$\alpha = \alpha_к + \alpha_л = a\sqrt[4]{t_{пов} - t_{о.с}} + \frac{C\left[\left(\frac{t_{пов}+273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_{о.с}+273}{100}\right)^4\right]}{t_{пов} - t_{о.с}}, \quad \text{(II-88)}$$

a — равно для вертикальных поверхностей 2,2; для отдачи от горизонтальных поверхностей вверх 2,8; для отдачи от горизонтальных поверхностей вниз 1,4;

C равно для металлических поверхностей 4.

Для теплоотдачи от продуктов сгорания к внутренним ограждениям рабочей камеры коэффициент теплоотдачи обычно находится в пределах $\alpha_1 = 100 \div 400$ *ккал/м² час град*. Коэффициент теплоотдачи от наружных поверхностей ограждения в окружающий воздух может быть рассчитан с учетом скорости ветра v (*м/сек*) по формуле

$$\alpha_2 = (8 + 0{,}06t_{пов})(1 + 0{,}2v)\ [ккал/м^2\ час\ град]. \quad \text{(II-89)}$$

Максимально допустимые потери в окружающую среду в зависимости от температуры рабочего пространства t не должны превышать:

$$q \leqslant 50 + \frac{t}{2}\ [ккал/м^2 час]. \quad \text{(II-90)}$$

4. Теплопроводность

Одним из основных свойств материалов является теплопроводность. Теплопроводность в большинстве случаев может быть выражена в зависимости от температуры следующей формулой:

$$\lambda_t = \lambda_0 \pm a(t_1 + t_2)\ [ккал/м\ час\ град] \quad \text{(II-91)}$$

или

$$\lambda_t = \lambda_0 \pm 2at_{ср}\ [ккал/м\ час\ град]. \quad \text{(II-92)}$$

Теплопроводность дается или при средней температуре $t_{ср}$, или для заданных пределов минимальной t_1 и максимальной t_2 температур, поэтому коэффициент у $t_{ср}$ от 0° до t_2 вдвое больший, чем у суммы $t_1 + t_2$.

Знак плюс относится к материалам ограждения (кирпич, теплоизоляция, огнеупоры, кроме магнезитовых), знак минус — к железу, алюминию и некоторым другим материалам. Влажность строительных материалов увеличивает их теплопроводность

($\lambda_{воды}$ =0,5 *ккал/м час град*). Каммерером установлена зависимость увеличения теплопроводности пористых материалов ($\lambda_{сух}$ = 100%) от влажности (w в %):

$$\lambda_w = \lambda_{сух} + 34w^{0,5}\ [\%]. \qquad \text{(II-93)}$$

Увеличение теплопроводности материалов в 1,5—2 раза при их увлажнении приходится учитывать при выборе расчетной теплопроводности ограждений, работающих во влажной среде: сушилок, пропарочных камер и т. д. Уменьшение объемного веса за счет увеличения количества пор, заполненных малотеплопроводным воздухом ($\lambda_{возд}$ = 0,02 *ккал/м час град*), снижает теплопроводность сухих материалов, на чем в большинстве случаев и основаны их теплоизоляционные свойства.

5. Комплексный теплообмен

Как уже говорилось выше, в производственных условиях имеет место комплексный теплообмен конвекцией, лучеиспусканием и теплопроводностью.

Различают теплообмены стационарный и нестационарный. Стационарный теплообмен характерен для потерь во внешнюю среду через ограждения непрерывно действующих установок. Эти потери для каждого участка рассчитываются по формуле

$$Q_{о.с} = Fk\,(t_в - t_{о.с})\ [ккал/час], \qquad \text{(II-94)}$$

где

$t_в$ — температура внутри рабочего пространства в град.;

k — коэффициент теплопередачи в *ккал/м² час град*, который определяется по формуле

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}\ [ккал/м^2\ час\ град], \qquad \text{(II-95)}$$

где α_1 и α_2 — коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях стен, зависящие от теплоотдачи конвекцией и лучеиспусканием, в *ккал/м² час град*;

$\Sigma \frac{S}{\lambda}$ — термическое сопротивление многослойной стенки в *м² час град/ккал*;

S — толщина каждого слоя в *м*;

λ — коэффициент теплопроводности каждого слоя в *ккал/м час град*.

При конструировании ограждений печи необходимо знать температуру на поверхности каждого слоя, чтобы рабочая температура материала не превысила максимально допустимую для него температуру. Температура на поверхности слоя зависит от величины теплового потока q

$$q = k\,(t_в - t_{о.с})\ [ккал/м^2час]. \qquad \text{(II-96)}$$

Температура поверхности между первым и вторым слоем рассчитывается по формуле

$$t = t_в - q\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{S_1}{\lambda_1}\right) = t_в - q\sum r\ [град]. \qquad \text{(II-97)}$$

Аналогично находятся и другие температуры, если известен тепловой поток q и термическое сопротивление r участков, расположенных до рассматриваемой поверхности. Можно все температуры найти графически (рис. 38) без предварительного определения величины теплового потока. Для этого по оси абсцисс откладываются величины условной толщины каждого слоя, пропорциональные их термическим сопротивлениям, включая и сопротивления теплопереходу $\frac{1}{\alpha_1}$ и $\frac{1}{\alpha_2}$. По оси ординат откладываются величины заданных температур $t_в$ и $t_н$. Все искомые температуры получаются графически на пересечении прямой AB с ординатами каждой поверхности слоя. Температуры на внутренней и наружной поверхностях стенки определяются на основе формул (II-96) и (II-97):

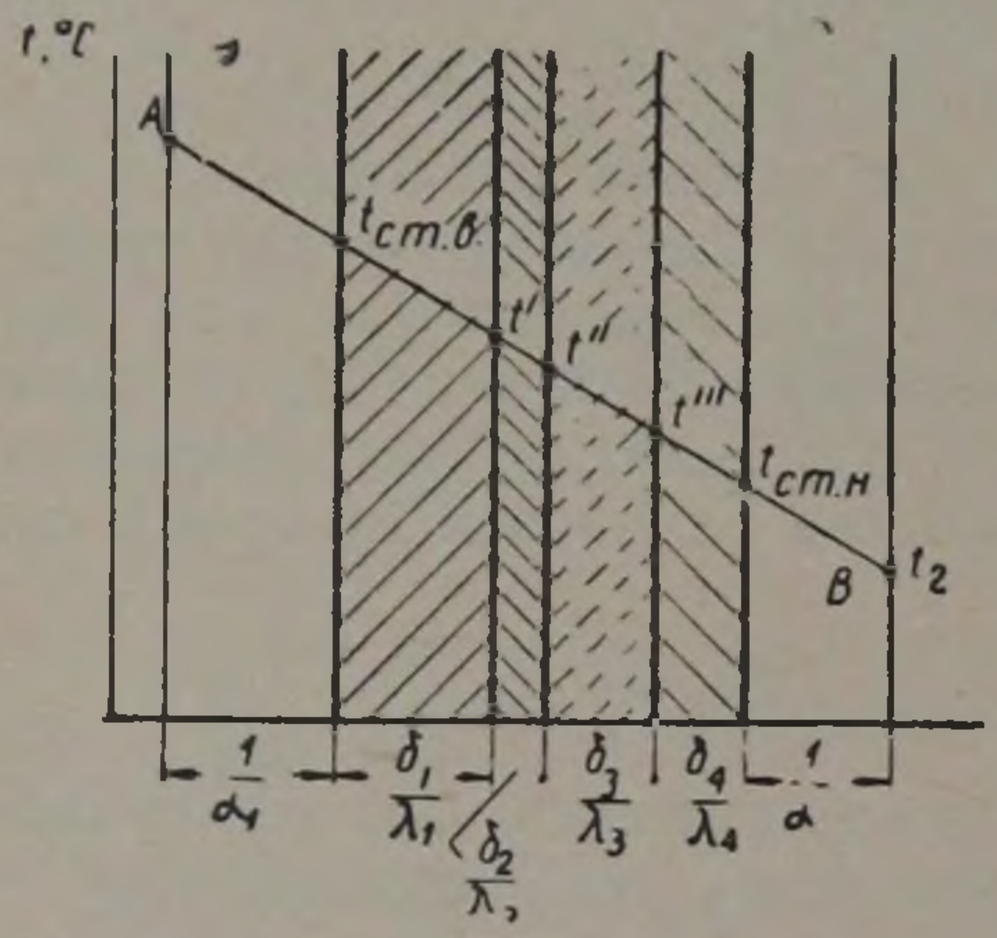


Рис. 38. Графическое определение температур в сложной стенке

$$t^{в}_{ст} = t_в - \frac{k}{\alpha_1}(t_в - t_{о.с}) \text{ [град.]}, \qquad \text{(II-98)}$$

$$t^{н}_{ст} = t_{о.с} + \frac{k}{\alpha_2}(t_в - t_{о.с}) \text{ [град.]}. \qquad \text{(II-99)}$$

Тепловой поток через ограждения печей $q_{сек}$ *ккал/м² сек* может быть определен по диаграмме рис. 39, в зависимости от температуры $t_в$ и суммы термических сопротивлений $\sum\frac{S}{\lambda}$. Часовая потеря во внешнюю среду составит

$$Q_{о.с} = q_{сек} F 3\,600 \text{ [ккал/час]}. \qquad \text{(II-100)}$$

При расчетах тепловых потерь в окружающую среду ограждениями низкотемпературных сушилок, пропарочных камер следует руководствоваться «Строительными нормами и правилами». Согласно этим правилам, суммарное тепловое сопротивление ограждения вычисляется по формуле

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_в} + \sum\frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_н} = R_в + R_1 + R_2 + \cdots + R_н. \qquad \text{(II-101)}$$

Оно должно быть равно или больше требуемого

$$R_0 \geqslant R_0^{тр} = \frac{(t_в - t_{о.с})nm}{\alpha_в \cdot \Delta t^н} = \frac{(t_в - t_{о.с})nm}{\Delta t^н} \cdot R_в, \qquad \text{(II-102)}$$

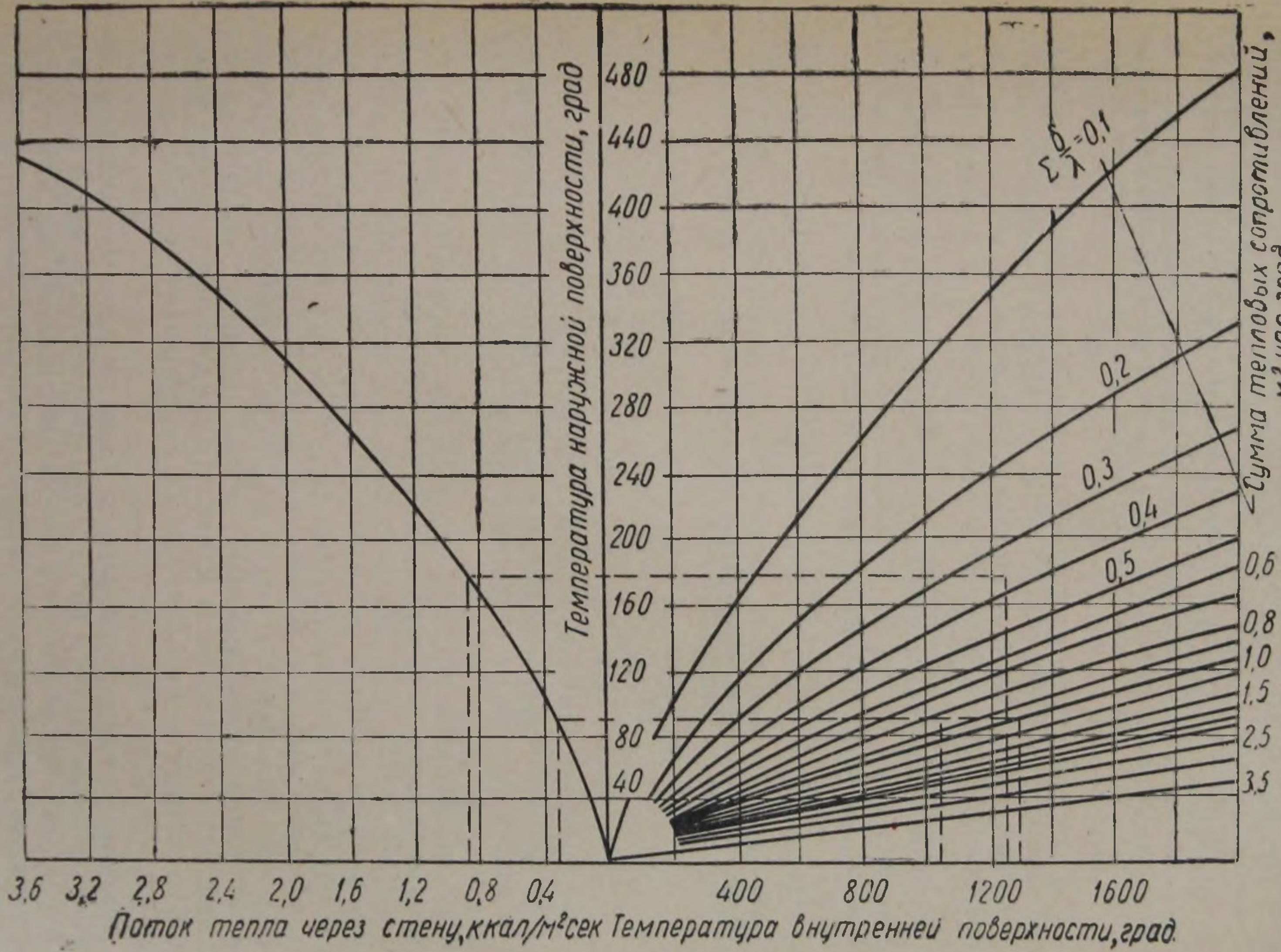


Рис. 39. Диаграмма для расчета тепловых потерь через ограждение при стационарном режиме

где $\alpha_в$ — для внутренних поверхностей стен, полов и гладких потолков равно 7,5 *ккал/м² час град*. для ребристых потолков 6 *ккал/м² час град*;

$\alpha_н$ — для наружных стен и бесчердачных перекрытий равно 20 *ккал/м² час град*, для перекрытий чердаков или над холодными подвалами и подпольями — 10 *ккал/м² час град*;

n — для наружных стен и бесчердачных перекрытий равно 1; для перекрытий над холодными подпольями 0,75; для перекрытий над неотапливаемыми подвалами 0,6;

m — для массивных ограждений равно 1; для легких ограждений 1,15;

$\Delta t^н$ — для наружных стен помещений с расчетной относительной влажностью воздуха $\varphi > 75\%$ равно 7, а для перекрытий равно $t_в - t_р$, где $t_р$ — точка росы.

Так как при влажности, приближающейся к $\varphi = 100\%$, эта разница температур стремится к нулю, ограждение выбирается конструктивно с проверкой величины теплового потока при больших относительных влажностях. Этот тепловой поток не должен превышать 100—150 *ккал/м² час*.

Сопротивление теплопередаче утепленных ($\lambda < 1$ *ккал/м час град*) полов, лежащих на грунте, определяется для каждой двухметровой зоны, отстоящей от наружных стен, по формуле

$$R_{у.п} = (1 + 1{,}25 \Sigma R) R_{н.п} [м^2 час\ град/ккал], \qquad (II\text{-}103)$$

где ΣR — сумма термических сопротивлений слоев пола в *м² час град/ккал*;

$R_{н.п}$ — сопротивление теплопередаче неутепленного пола, принимаемое независимо от толщины его конструкции:

для I зоны $R_{н.п} = 2{,}5$ *м² час град/ккал*

„ II „ $R_{н.п} = 5$ „

„ III „ $R_{н.п} = 10$ „

Для остальной части пола $R_{н.п} = 16{,}5$ *м²/час град/ккал*.

Теплопотери через подземную часть наружных стен рассчитываются также по зонам с отсчетом их от поверхности земли, как для полов.

К сумме основных потерь в окружающую среду прибавляются добавочные потери для ограждений, обращенных на запад и юго-восток, 5%, на юг 0%, для остальных ориентаций 10%. К потерям через наружные двери добавляются потери от открывания и закрывания их, которые составляют 65—100% основных потерь через двери в зависимости от частоты и продолжительности открывания.

Как уже указывалось выше, в случае увлажнения материалов ограждающих конструкций полученные величины тепловых потерь в сушилках и пропарочных камерах для надежности следует умножить на коэффициент 1,5 ÷ 2. Этот коэффициент не вводится для теплопотерь через пол.

Расчеты регенераторов должны были бы основываться на уравнениях нестационарного потока, однако сложность таких расчетов не оправдывается инженерной практикой и поэтому они базируются на конечных результатах, определяемых из тепловых балансов регенератора при его нагревании отходящими газами и при охлаждении его воздухом или газообразным топливом.

Наивыгоднейшая конструкция ограждения тепловых установок

решается на основе технико-экономического сравнения 2—4 вариантов конструкций с применением разных по теплопроводности и стоимости материалов. При сравнении по каждому варианту конструкции известными величинами являются

q — тепловые потери ограждения в *ккал/м² час*;
τ — число часов работы установки в году в *час/год*;
$c_т$ — стоимость единицы тепла в *руб/мг кал*;
p — установленный процент на текущий ремонт и амортизацию ограждения в %;
$c_{огр}$ — стоимость 1 $м^2$ ограждения данной конструкции в *руб/м²*.

На их основе подсчитывается стоимость годовых потерь тепла

$$C_т^{год} = q\tau c_т \cdot 10^{-6} \ [руб/м^2 год] \qquad (II\text{-}104)$$

и стоимость текущего ремонта и годовых амортизационных отчислений $C_{A+p}^{год}$:

$$C_{A+p}^{год} = 0{,}01 p c_{огр} \ [руб/м^2 год]. \qquad (II\text{-}105)$$

Для каждого варианта подсчитывается сумма годовых эксплуатационных расходов

$$C_э^{год} = C_т^{год} + C_{A+p}^{год} \ [руб/м^2 год]. \qquad (II\text{-}106)$$

Сравнение вариантов позволяет выбрать вариант конструкции ограждения с минимальными годовыми эксплуатационными расходами при условии, что сроки окупаемости дополнительных капитальных затрат на лучшую конструкцию находятся в допустимых пределах, например менее 3 лет.

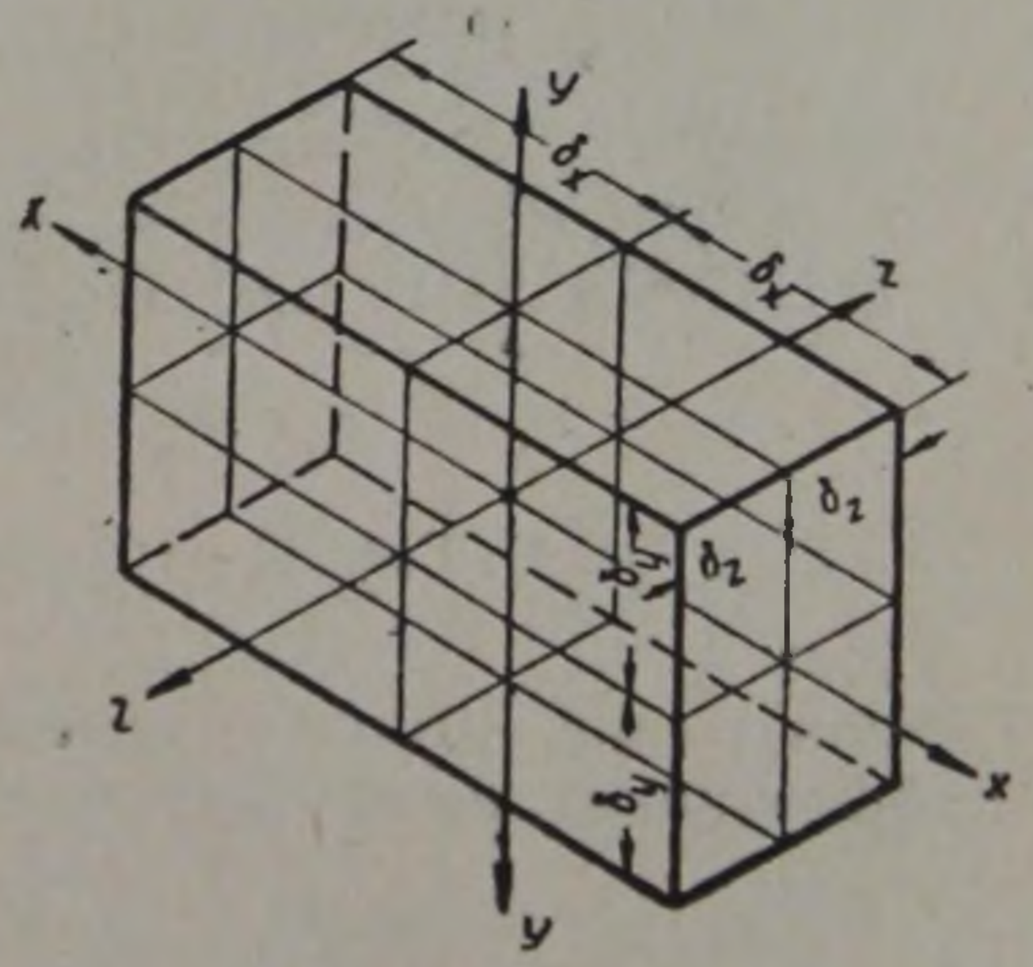


Рис. 40. Схема распределения температур при нагреве параллелепипеда

Нестационарный теплообмен имеет место при нагревании материалов и изделий, при разогревании ограждений во время пуска тепловых установок, при аккумулировании тепла ограждениями периодических печей, подом вагонеток тунельных печей и в других аналогичных случаях. Так как здесь процессы связаны с изменениями во времени, то в расчетах используются: критерий Фурье $Fo = \frac{a\tau}{l^2}$, коэффициент теплопроводности $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$, характеризующий быстроту прогрева материала при равных условиях, и критерий Био $Bi = \frac{\alpha l}{\lambda_м}$, связывающий внешние условия теплообмена α с теплопроводностью материала $\lambda_м$ и его разме-

рами l. При расчетах температур материала при его прогреве на глубине x используют, таким образом, зависимости следующего типа:

$$\frac{t}{t_{\text{нач}}} = \varphi\left(\text{Bi}, \text{Fo}, \frac{x}{l}\right). \qquad \text{(II-107)}$$

Для часто встречающегося случая нагрева параллелепипеда в среде с постоянной температурой

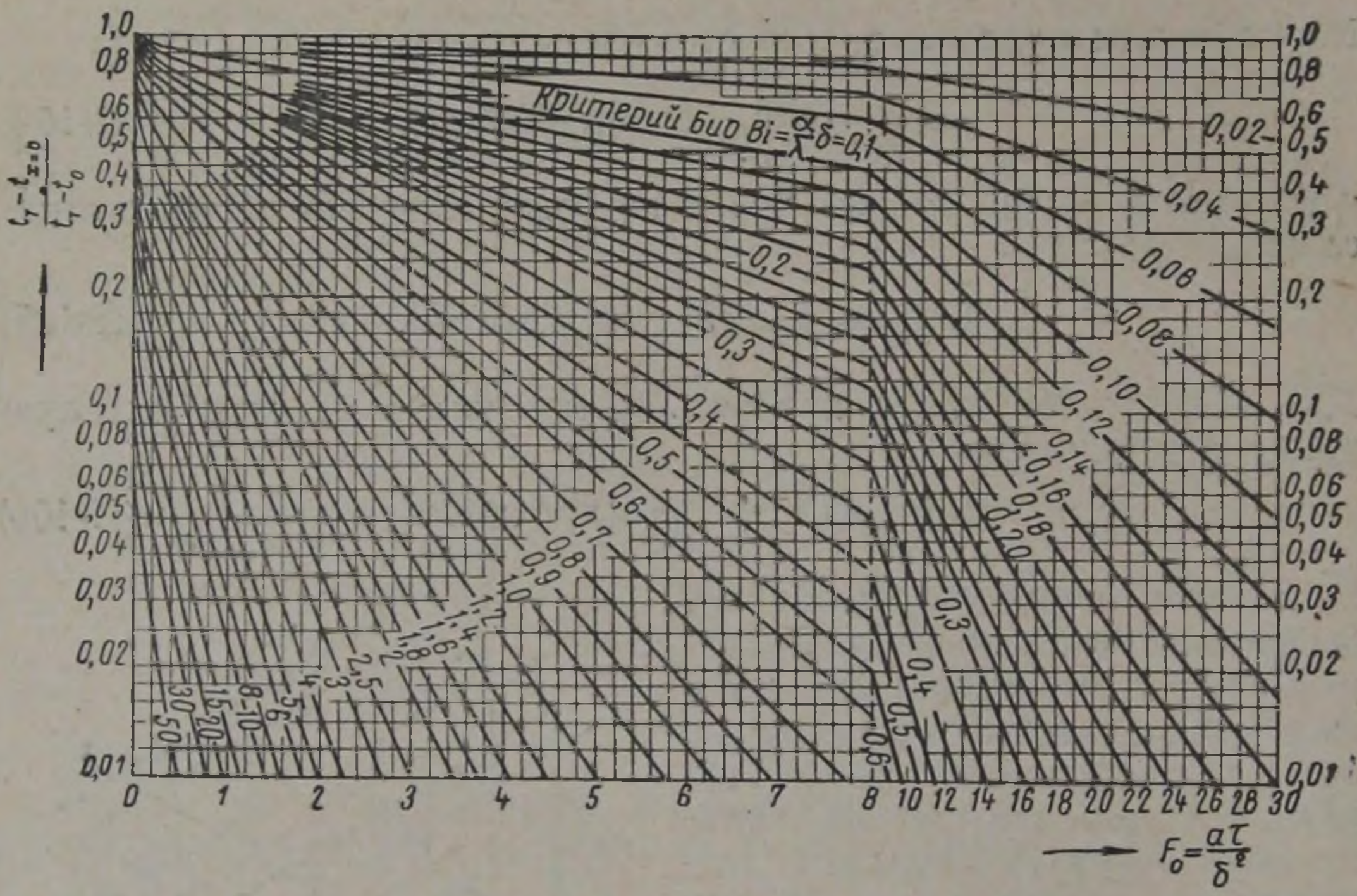


Рис. 41. График для определения температур в центре

t_c=const (рис. 40) поле температур в параллелепипеде опишется дифференциальным уравнением:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right). \qquad \text{(II-108)}$$

Начальное условие: при $\tau = 0$ по всему объему $t = t_{\text{нач}}$. Граничные условия: при $\tau > 0$ и $x = \pm \delta x$; $y = \pm \delta y$; $z = \pm \delta z$:

$$\left.\begin{aligned} \alpha(t_c - t) &= \pm \lambda \frac{\partial t}{\partial x}; \\ \alpha(t_c - t) &= \pm \lambda \frac{\partial t}{\partial y}; \\ \alpha(t_c - t) &= \pm \lambda \frac{\partial t}{\partial z}. \end{aligned}\right\} \qquad \text{(II-109)}$$

Решение этой задачи может быть представлено в виде:

$$\frac{t_c - t}{t_c - t_{нач}} = \frac{t_c - t_x}{t_c - t_{нач}} \cdot \frac{t_c - t_y}{t_c - t_{нач}} \cdot \frac{t_c - t_z}{t_c - t_{нач}}, \qquad \text{(II-110)}$$

где t_x, t_y, t_z — нестационарные поля температуры в трех пластинах, пересечением которых образован данный параллелепипед.

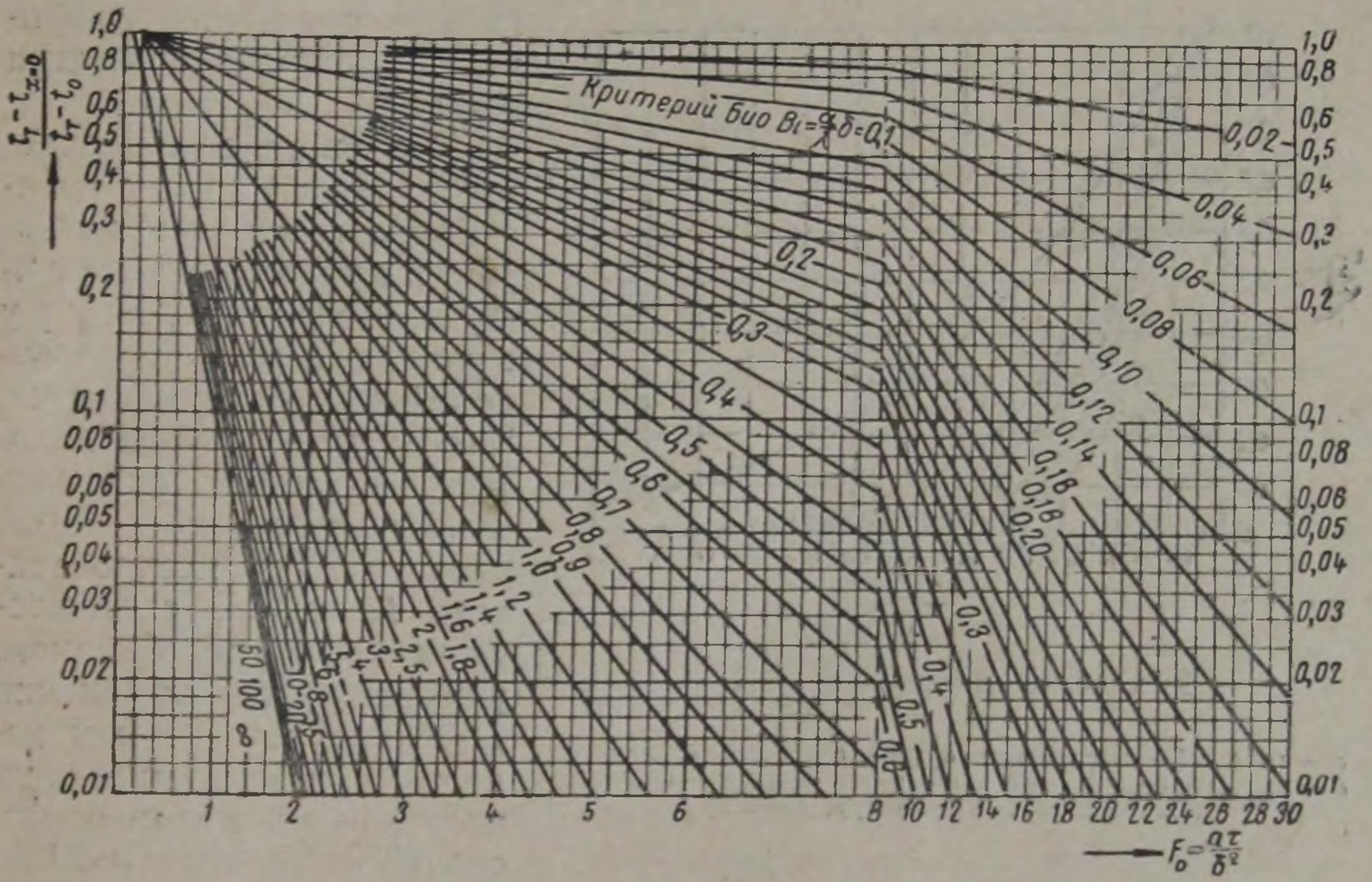


Рис. 42. График для определения температур на поверхности

Температуры этих пластин определяются по уравнениям:

$$\left.\begin{aligned} \frac{t_c - t_x}{t_c - t_{нач}} &= f_1(\mathrm{Fo}_x, \mathrm{Bi}_x); \\ \frac{t_c - t_y}{t_c - t_{нач}} &= f_1(\mathrm{Fo}_y, \mathrm{Bi}_y); \\ \frac{t_c - t_z}{t_c - t_{нач}} &= f_1(\mathrm{Fo}_z, \mathrm{Bi}_z). \end{aligned}\right\} \qquad \text{(II-111)}$$

Для определения температуры в центре $x=y=z=0$ пользуются графиком Д. В. Будрина (рис. 41), для определения температур на поверхности $x=\delta_x$ и т. д. — графиком на рис. 42. Так как величины a, δ и τ заданы, то вычисляются значения критериев $\mathrm{Fo}_x = \frac{a\tau}{\delta_x^2}$; Fo_y и Fo_z и значения критериев $\mathrm{Bi}_x = \frac{\alpha\delta_x}{\lambda}$, Bi_y и Bi_z. Из графиков по данным значениям Fo и Bi определяются величины $\frac{t_c - t_{x=0}}{t_c - t_{нач}}$,

$\frac{t_c - t_{x=\delta_x}}{t_c - t_{нач}}$ и др., что дает возможность по формуле (II—110) при заданных t_c и $t_{нач}$ найти интересующие величины $t_{x=0}$; $t_{x=\delta_x}$ и т. д. Из соотношения (II—110) может быть обратным путем найдено и время $\tau_{час}$ прогрева изделия до нужной температуры в ее центре. Имеются аналогичные расчетные графики для нагрева цилиндра и шара.

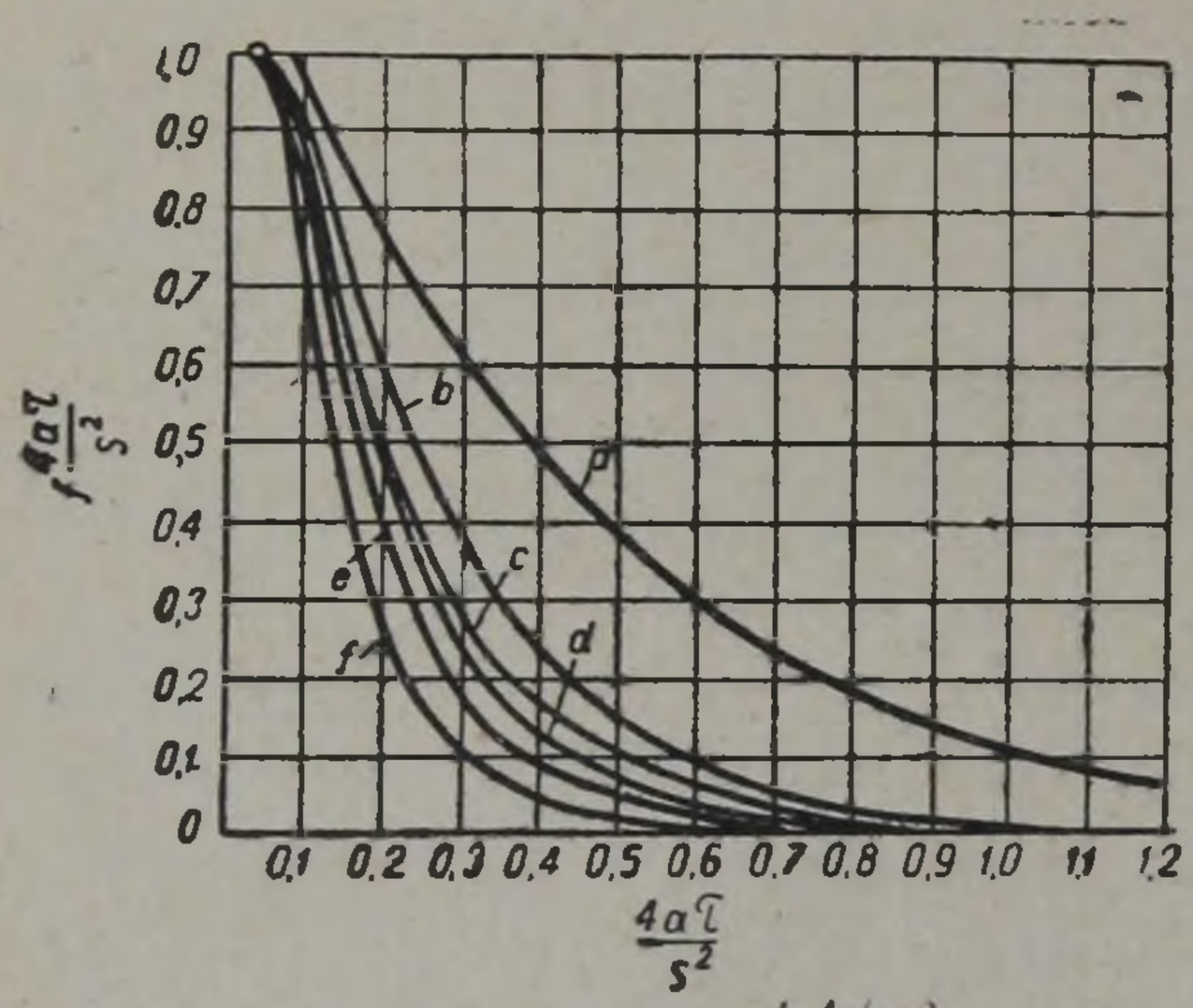


Рис. 43. Функция $f\left(\frac{4a\tau}{S^2}\right)$

a — плита; *b* — квадратные брусья бесконечной длины; *c* — цилиндр бесконечной длины; *d* — куб; *e* — цилиндр с длиной, равной диаметру; *f* — шар

В туннельных печах изделия двигаются вдоль печи, встречая различную температуру среды. Температура изделий все время меняется. Чтобы использовать изложенный метод, вся печь разбивается на 8—10 участков, где можно считать $t_c = \text{const}$, составляются тепловые балансы, учитывающие изменения температуры газов и изделий при заданном соотношении их водяных чисел ($W = Gc$, см. стр. 212). При обжиге изделий в садке необходимо учитывать взаимное закрывание изделиями части их тепловоспринимающей поверхности. Аналитическое решение должно быть уточнено опытом в конкретных условиях.

Если можно принять, что температура на поверхности $t_п$ поднялась внезапно, то для определения температуры в центре $t_ц$ часто используется формула

$$t_ц = t_п - (t_п - t_{нач}) f\left(\frac{4a\tau}{S^2}\right). \qquad \text{(II-112)}$$

Функция $f\left(\frac{4a\tau}{S^2}\right)$ от комплекса $\frac{4a\tau}{S^2}$ приведена на рис. 43 (S — толщина пластины или диаметр цилиндра или шара, $S = 2R$).

Односторонний прогрев стенки характерен для нагрева ограждений сушилок, печей, в том числе пода вагонеток туннельной печи. Если критерий $\text{Fo} = \frac{a\tau}{S^2} < 0{,}7$ (где S — толщина стенки), или соответственно отношение $\frac{S}{2\sqrt{a\tau}} > 0{,}6$, то тепло аккумулируется в материале, который до конца не прогревается за вре-

мя τ; при $\frac{S}{2\sqrt{a\tau}} < 0{,}6$ материал прогревается и процесс переходит в стационарный.

Количество тепла ΔQ, аккумулированное материалом ограждений, является потерей в тепловом балансе. Оно может быть получено экспериментально, если по толще стены измерены температуры до и после прогрева (рис. 44) и построены графики распределения температур в стене до начала прогрева t_{τ_I} и после прогрева $t_{\tau_{II}}$. Количество тепла, аккумулированное материалами ограждений за период $\tau_{II} - \tau_I$, будет

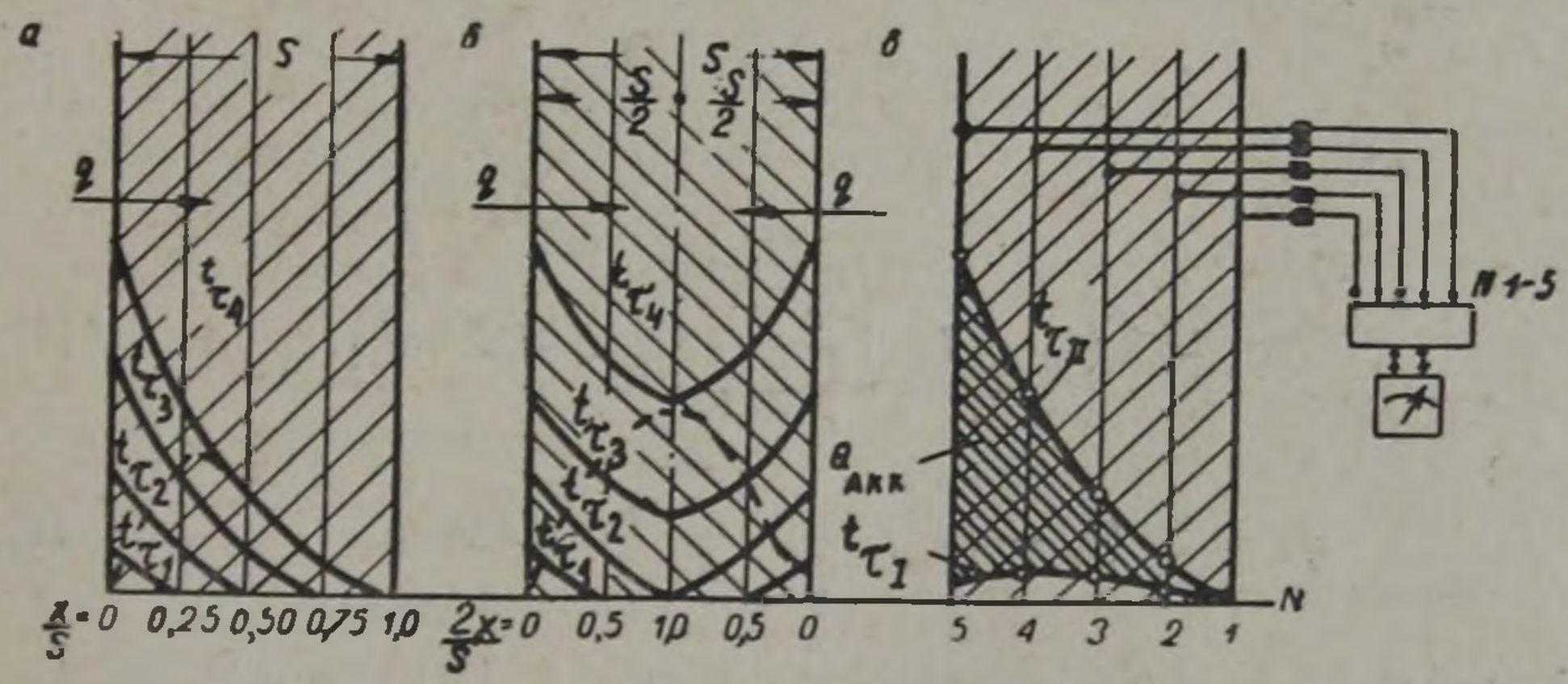


Рис. 44. Распределение температур в стенке при прогреве

а — односторонний прогрев; *б* — двусторонний прогрев; *в* — экспериментальное определение температур в стенке до (*I*) и после (*II*) прогрева

пропорционально разности площадей на графике Q_{II} и Q_I и может быть выражено так:

$$\Delta Q = Q_{II} - Q_I = V\gamma\left(c_{II}\, t_{II_{ср}} - c_I\, t_{I_{ср}}\right) [ккал/период], \quad \text{(II-113)}$$

где V — объем материала в ограждении в $м^3$;

γ — удельный вес материала в ограждении в $кг/м^3$;

c_{II} и c_I — удельные средние теплоемкости материала при средних температурах $t_{II_{ср}}$ и $t_{I_{ср}}$ в *ккал/кг град*.

Температуры t в различных точках односторонне прогреваемой стены могут быть найдены аналитическим методом.

Пусть t — температура материала на расстоянии x от поверхности по истечении τ час. в град.;

$t_п$ — температура (внезапно поднявшаяся) поверхности в град.;

$t_{нач}$ — начальная температура поверхности в град.;

q_0 — тепловой поток через поверхность $x=0$ по истечении τ час. в $ккал/м^2\ час$;

q_x — то же, но через поверхность на расстоянии $x > 0$ в $ккал/м^2\ час$;

q_τ — общее количество тепла, прошедшее через поверхность $x=0$ за период τ час. и аккумулированное кладкой, если сквозной прогрев не достигнут, в $ккал/м^2$.

Тогда

$$t = t_{\text{п}} - (t_{\text{п}} - t_{\text{нач}})\, D \text{ [град.]}, \qquad \text{(II-114)}$$

где

$$D = f\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) = f(A). \qquad \text{(II-115)}$$

Величина D определяется в зависимости от A:

A	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
D	0,113	0,223	0,329	0,410	0,521	0,604	0,678	0,742
A	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
D	0,797	0,843	0,880	0,910	0,934	0,952	0,966	0,976
A	1,7	1,8	1,9	2				
D	0,984	0,990	0,993	0,995				

$$q_0 = \lambda\, \frac{t_{\text{п}} - t_{\text{нач}}}{\sqrt{a\pi\tau}} \text{ [ккал/м}^2\text{ час]}; \qquad \text{(II-116)}$$

$$q_x = \lambda\,(t_{\text{п}} - t_{\text{нач}})\, \frac{e^{-\frac{x^2}{\sqrt{a\tau}}}}{\sqrt{a\pi\tau}} \text{ [ккал/м}^2\text{ час]}; \qquad \text{(II-117)}$$

$$q_\tau = 2\lambda\,(t_{\text{п}} - t_{\text{нач}}) \cdot \sqrt{\frac{\tau}{a\pi}} \text{ [ккал/м}^2\text{час]}. \qquad \text{(II-118)}$$

Глубина прогрева стенки x ($м$) определяется при любом изменении температуры поверхности:

$$x = 0{,}17 \cdot 10^{-3}\, t_{\text{п.ср}} \sqrt{\tau}, \qquad \text{(II-119)}$$

где $t_{\text{п.ср}}$ — средняя температура поверхности в град., за время прогрева τ в час.; при $x > S$ процесс переходит в стационарный.

Если $x < S$, то количество тепла, аккумулированного стенкой, может быть определено приближенно по формуле Грум-Гржимайло:

$$q_\tau = 0{,}56 t_{\text{п}\tau} \sqrt{t_{\text{п.ср}}\tau} \text{ [ккал/м}^2\text{час]}, \qquad \text{(II-120)}$$

где $t_{\text{п}\tau}$ — температура поверхности через τ час. в град.

Прогрев материала может быть рассчитан приближенно, если исходное дифференциальное уравнение нестационарного прогрева (А) заменить уравнением конечных разностей (Б). Такой метод предложен Э. Шмидтом:

$$\frac{dt}{d\tau} = a\,\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \text{ (А)}; \qquad \frac{\Delta t}{\Delta\tau} = a\,\frac{\Delta^2 t}{\Delta x^2} \text{ (Б)}.$$

Он достаточно точен, но более громоздок, чем изложенные выше методы.

Для упрощения расчетов по теплообмену многослойной стенки предварительно вычисляют эквивалентные значения ее теплофизи-

ческих характеристик. Эквивалентный коэффициент теплопроводности $\lambda_э$ плоской трехслойной стенки той же общей толщины рассчитывается по формуле

$$\lambda_э = \frac{S_1+S_2+S_3}{\frac{S_1}{\lambda_1}+\frac{S_2}{\lambda_2}+\frac{S_3}{\lambda_3}} \; [ккал/м\,час\,град]. \qquad (II\text{-}121)$$

Эквивалентная удельная теплоемкость

$$c_э = \frac{\gamma_1 S_1 c_1+\gamma_2 S_2 c_2+\gamma_3 S_3 c_3}{\gamma_1 S_1+\gamma_2 S_2+\gamma_3 S_3} \; [ккал/кг\,град]. \qquad (II\text{-}122)$$

Эквивалентный объемный вес

$$\gamma_э = \frac{\gamma_1 S_1+\gamma_2 S_2+\gamma_3 S_3}{S_1+S_2+S_3} \; [кг/м^3]. \qquad (II\text{-}123)$$

Иногда в графических расчетах приводят толщины всех слоев по характеристике к основному, например, по его теплопроводности к первому:

$$S_{2э} = S_2 \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \; [м]; \qquad (II\text{-}124)$$

$$S_{3э} = S_3 \frac{\lambda_1}{\lambda_3} \; [м]. \qquad (II\text{-}125)$$

Если в обжигаемом материале совершаются эндотермические реакции с удельной затратой тепла $q_{энд}$ *ккал/кг*, то условная удельная теплоемкость принимается

$$c_{усл} = \frac{c_{кон}t_{кон}-c_{нач}t_{нач}+q_{энд}}{t_{кон}-t_{нач}} \; [ккал/кг\,град]. \qquad (II\text{-}126)$$

ГЛАВА III

ТЕПЛОВЫЕ БАЛАНСЫ

1. Общие положения

Тепловым балансом называется уравнение, где в одной части находятся величины статей прихода тепла, а в другой — величины статей расхода тепла в установке или в ее отдельных частях. В приходную часть теплового баланса входят обычно: теплота сгорания топлива, теплосодержание горячего воздуха или газов и т. д. В расходную — тепло, затраченное на полезные цели для печей—

на эндотермические реакции (для сушилок — на испарение воды) и тепловые потери: в окружающую среду, с уходящими газами и т. д.

Решение уравнения теплового баланса позволяет определить неизвестную величину, входящую в уравнение, например расход топлива, температуру подогрева воздуха, а также позволяет найти соотношение между отдельными статьями прихода и расхода. Тепловой баланс составляется по выбранному контуру, что и определяет условное наименование приходных и расходных статей. Баланс может быть составлен для одной из зон печи, для всей печи, всей установки в целом, включая и теплоиспользующую аппаратуру. При периодически действующих установках тепловой баланс составляется для отдельных периодов тепловой обработки и для всего цикла в целом.

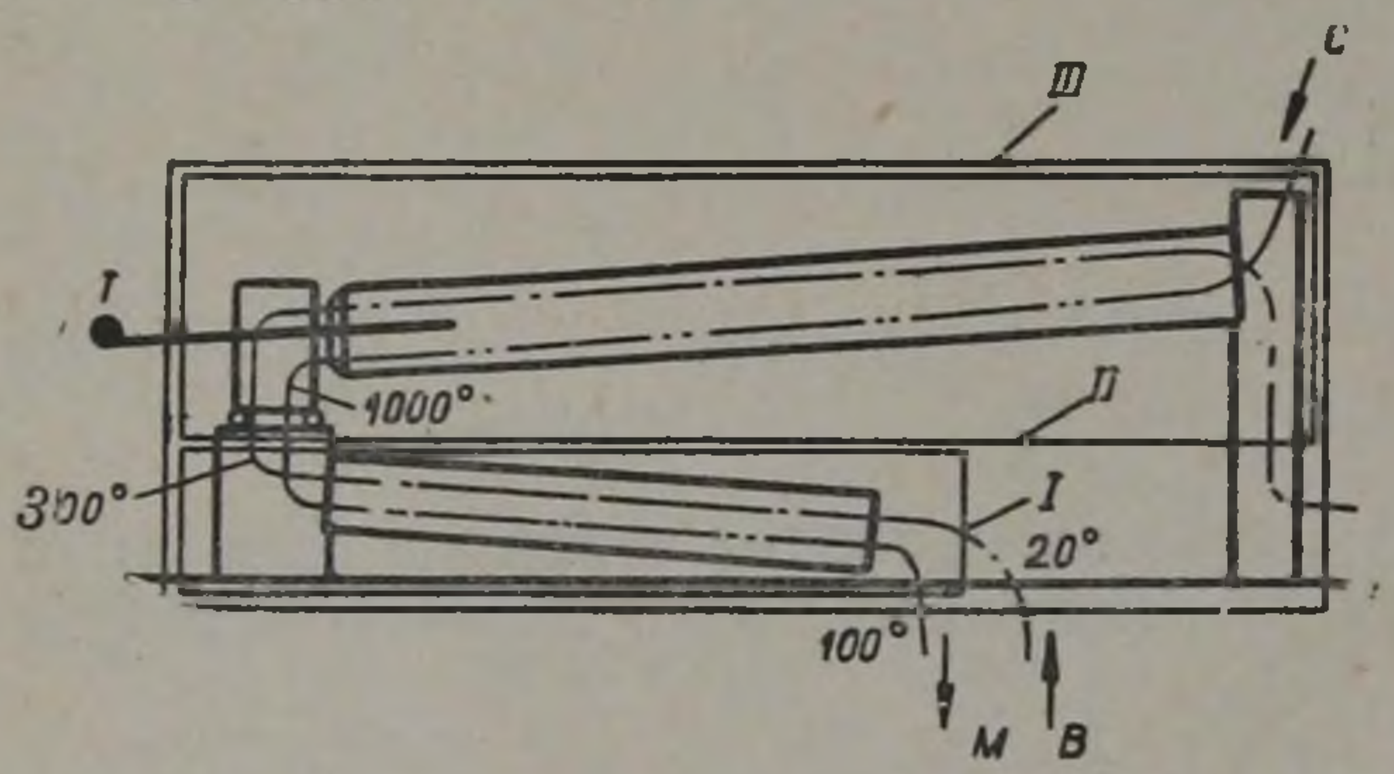


Рис. 45. Контуры для расчета тепловых балансов

На рис. 45 показаны контуры на схеме печной установки, по которым часто составляются тепловые балансы: контур *I* — для одной из частей установки (холодильник продукта), контур *II*— для самой печи, контур *III* — для установки в целом. Аналогично могут быть очерчены и другие контуры — для зоны обжига, для одной топки и т. д. Особенностью каждого контура является то, что он рассматривает только те потоки теплоносителей, которые его пересекают. Поэтому для контура *III* характеристика потоков будет иная, чем для контура *II*: температура продукта 100°, а не 1000°, температура воздуха 20°, а не 300°. Тепловые балансы составляются по каждому контуру. Для контура *I* в приходе тепло воздуха при 20°, в расходе тепло продукта при 100°, а для контура *II* в приходе тепло воздуха при 300°, а в расходе тепло продукта при 1000° и т. д.

Разбивая всю печь на отдельные зоны, составляя тепловые балансы зон и решая совместно их уравнения, можно получить температуры на границах зон, а по ним построить кривую обжига. Сравнение расчетной кривой с кривой обжига, полученной фактическими замерами, позволяет судить обо всех отклонениях от расчетных положений. Статьи теплового баланса, рассчитанные по данным испытаний тепловых установок, позволяют сравнить их величины с нормативными, определить причины повышенных удельных расходов топлива и наметить меры к их устранению. Тепловые балансы составляются для печей, сушилок, установок тепловлажностной обработки и т. д.

Ниже подробно изложен метод составления теплового баланса для печной установки, в последующих специальных разделах даются дополнения к составлению тепловых балансов для других установок.

2. Метод составления теплового баланса (печи)

Базой теплового баланса называется количество тепла, принимаемое за 100% прихода тепла. Такой базой является количество тепла, расходуемое установкой в единицу времени работы или относимое на определенное количество готовой продукции (за 1 час работы, за определенный период или цикл обжига, на 1000 шт. изделий, на 100 *кг* продукта и т. д.). По отношению к этой базе оценивается в процентах каждая статья прихода или расхода.

Рекомендуется для непрерывно действующих установок одновременно составлять тепловой баланс на 1 час работы, что облегчает расчет таких потерь, как потери в окружающую среду и т. п., и на единицу продукта (на 1 *т* вяжущего, на 1 000 шт. кирпича и т. д.), что дает возможность быстро сравнить работу данной установки с аналогичными. Для периодически действующих установок баланс составляется на период, на цикл и на единицу изделия.

В табл. 14 приведена расчетная форма теплового баланса.

Таблица 14

Расчетная форма теплового баланса

№ статьи	Обозначение статей	Наименование и расчетная формула статьи	Единицы измерения		%
			ккал/час	*ккал* на единицу продукции	
		I. Приход тепла			
I—1	$Q_т^х$	С теплотой сгорания топлива $Q_н^р B = 6\,300 \cdot 500$	$3{,}15 \cdot 10^6$	1 850	98,5
I—2	$Q_т^ф$	С физическим теплом топлива (теплосодержанием) $Bc_т t_т = 500 \cdot 0{,}3 \cdot 30$	$4{,}5 \cdot 10^3$	3	0,14
и т. д.	. . . .	. . . . .	. . . .	. . . . .	. . .
		Итого в приходе I	$3{,}2 \cdot 10^6$	1 875	100
		II. Расход тепла			
II—1		Эндотермические реакции $Q_{энд} = 358 \cdot 2\,000$	$716 \cdot 10^3$	420	22,35
и т. д.	. . . .	. . . . .	. . . .	. . . . .	. . .
		Итого в расходе II	$3{,}2 \cdot 10^6$	1 875	100

I. Приход тепла

В приходной части (общий индекс I) баланса для печи рассматриваются следующие статьи (*ккал/час*):

I_1. С теплотой сгорания топлива (при расходе топлива B *кг/час*)

$$Q_т^х = Q_н^р B. \qquad \text{(II-127)}$$

I_2. С физическим теплом (теплосодержанием) топлива

$$Q_т^ф = B c_т t_т. \qquad \text{(II-128)}$$

Эта статья дает значительную величину при высоконагретом газообразном топливе печи.

$c_т$ — для мазута (60°) 0,45 *ккал/кг град*, для твердого топлива $c_т^{сух} = 0{,}25$ *ккал/кг град*:

$$c_т = 0{,}25\ \frac{100 - W^р}{100} + \frac{W^р}{100}. \qquad \text{(II-129)}$$

I_3. С теплосодержанием (энтальпией) воздуха

$$Q_в = \alpha V^0 c_в t_в B; \qquad \text{(II-130)}$$

$c_в$ берется по табл. 11.

Температура воздуха $t_в$, подогретого теплом остывания продукта, определяется из баланса зоны охлаждения; если воздух подогрет за счет тепла отходящих газов — по балансу теплоиспользующей установки, установленной после печи, температура воздуха из соседнего теплового агрегата находится по данным этого агрегата.

I_4. С теплосодержанием дутьевого пара (при паровых форсунках, при подаче пара под колосники и т. д.)

$$Q_{пд} = i_{пд} W_{пд} B, \qquad \text{(II-131)}$$

где $i_{пд}$ — теплосодержание пара в *ккал/кг*;
$W_{пд}$ — расход пара на 1 *кг* топлива в *кг/кг*.

I_5. С теплом экзотермических реакций

$$Q_{экз} = \Sigma q_{экз} G_i. \qquad \text{(II-132)}$$

Здесь $q_{экз}$ — количество тепла, выделяемого при обжиге материала, отнесенное или на 1 *кг* готового продукта, или на 1 *кг* какой-либо составной части сырья.

$q_{экз}$ [*ккал/кг*] равно:

100 *ккал/кг* клинкера — для цементного клинкера, если тепло экзотермических реакций учитывается отдельно в общем тепле клинкерообразования;

300 *ккал/кг* SiO_2 — образование силиката кальция, SiO_2 — содержание кремнезема в шихте в *кг*;

120 *ккал/кг* Al_2O_3 — образование алюмината кальция. Al_2O_3 — содержание глинозема в шихте в *кг*;

G_i — часовое количество готового продукта или той составной части сырья, к чему отнесена $q_{экз}$ в *кг/час*.

I_6. С физическим теплом сырья

$$Q'_м = G'_м\ c'_м\ t'_м, \qquad \text{(II-133)}$$

где $G'_м$ — количество сырья в *кг/час*;

$c'_м$ — теплоемкость сырья в *ккал/кг град*;

$t'_м$ — температура поступающего сырья в град.

$$c_м = \frac{100c_м^{сух} + W}{100 + W}, \qquad \text{(II-134)}$$

здесь $c_м^{сух}$ — теплоемкость сухого материала в *ккал/кг град*. Теплоемкость материалов обычно растет с повышением температуры (см. табл. 22);

W — абсолютная (по сухому весу) влажность материала в %.

I_7. С теплом транспорта (например, вагонеток туннельной печи):

$$Q'_{тр} = \Sigma G_{тр}^{час} c'_{тр} t'_{тр}, \qquad \text{(II-135)}$$

где $G_{тр}^{час}$ — вес деталей транспортных устройств, участвующий в часовом теплообмене. Берется отдельно для металлических, керамических деталей;

$c'_{тр}$ — теплоемкость материала деталей транспортных устройств при данной температуре. Например, для металлических частей $c_{тр} = 0{,}115$ *ккал/кг град*; для керамических 0,2—0,27 *ккал/кг град* в пределах температур 0°—1000°.

I_8. С теплом ограждений

$$Q'_{акк} = \Sigma G_{акк}\ c'_{акк}\ t'_{акк}. \qquad \text{(II-136)}$$

Это тепло содержится в кладке печи перед началом расчетного периода и определяется по методам, изложенным в предыдущей главе. $G_{акк}$, $c'_{акк}$, $t'_{акк}$ представляют собой вес, теплоемкость и среднюю температуру отдельных частей ограждения. Тепло по этой статье относится также к базе баланса. (Часовое количество тепла, пошедшего, например, на нагрев вагонеток непрерывно действующей печи и т. д.).

II. Расход тепла

II_1. Тепло эндотермических реакций и расплавления определяется по формуле

$$Q_{энд} = \Sigma q_{энд} G_l + \Sigma q_{пл} G_l. \qquad \text{(II-137)}$$

Тепло эндотермической реакции дегидратации $q_{энд}$ можно принимать для гипсового камня (переход в полуводный при температуре 60—150°) 138 *ккал/кг* сырья и 25,2 *ккал/кг* сырья. Первое — при отделении воды в виде пара, второе — при отделении воды в виде жидкости (см. табл. 23).

Тепло эндотермической реакции дегидратации для глин $q_{энд}$ =70—133 *ккал/кг* сырья для различных глин или 500 *ккал/кг* Al_2O_3.

Тепло эндотермической реакции диссоциации карбонатов $q_{энд}$ =314 *ккал/кг* $MgCO_3$ или 661,4 *ккал/кг* MgO, 425 *ккал/кг* $CaCO_3$ или 758,7 *ккал/кг* CaO.

Тепло реакций клинкерообразования на 1 *кг* клинкера (избыток эндотермии над экзотермией) $q_{энд}$ =400—500 *ккал/кг*, если сырье известняк и глина, и 250 *ккал/кг*, если сырье известняк и доменные шлаки.

Затрата тепла на плавление $q_{пл}$ *ккал/кг* расплава: 100 *ккал/кг* — тепло плавления гранита и других горных пород, 30—50 *ккал/кг* — то же, доменных и мартеновских шлаков, 80 *ккал/кг* — то же, для льда.

II_2. Тепло с выходящим (из печи или зоны) материалом

$$Q''_м = G''_м\, c''_м\, t''_м . \qquad (II\text{-}138)$$

При нагреве необожженных материалов тепло эндотермических реакций иногда включается в условную теплоемкость материалов при их нагреве (см. формулу II-126), что исключает определение этого тепла по статье II-1.

II_3. Тепло, уходящее с углекислотой разложения карбонатов: содержащиеся в сырье карбонаты $CaCO_3$ и $MgCO_3$ при нагреве диссоциируют, выделяя CO_2, которая уходит из печи, унося с собой тепло:

$$Q_{г.р} = G_{CO_2}\, c_{CO_2}\, t_{ух}. \qquad (II\text{-}139)$$

Здесь G_{CO_2} — количество выделившейся углекислоты, которое определяется по формуле

$$G_{CO_2} = 0{,}44CaCO_3 + 0{,}525MgCO_3 = 0{,}786CaO + 1{,}1MgO. \qquad (II\text{-}140)$$

В случае неполного разложения перед $CaCO_3$ или $MgCO_3$ вводится коэффициент полноты разложения $k_{п.р} < 1$. Все вещества указаны по количеству *кг/час*. Коэффициенты в формуле (II-140) определены на основе стехиометрии; c_{CO_2} — теплоемкость углекислоты в *ккал/кг град*.

II_4. Тепло испарения и перегрева влаги сырья

$$Q_{ис} = (595 + 0{,}47t_{ух})\, W^*, \qquad (II\text{-}141)$$

где W — количество испаренной влаги в *кг/час*,

$$W = G'_м - G_{сух} = \frac{w'_0}{100} G'_м = \frac{w'_a}{100} G_{сух}, \qquad (II\text{-}142)$$

где $G_{сух}$ — количество сухого вещества в сырье в *кг/час*. w'_0 и w'_a — относительная и абсолютная начальные влажности сырья в %. Если не вся вода испарилась, то $W = W' - W''$.

II_5. Тепло с уходящими продуктами сгорания топлива

$$Q_{ух.т} = \Sigma V_i c_i t_{ух} B = I_г B, \qquad (II\text{-}143)$$

$I_г$ — теплосодержание продуктов сгорания при данном избытке воздуха и температуре уходящих газов на 1 *кг* топлива [см. формулу (I-55)].

II_6. Тепло потерь от химической неполноты сгорания топлива

$$Q_х = (30{,}18CO + 25{,}57H_2 + 85{,}55CH_4 + 48H_2S)\, V_{с.г} B. \qquad (II\text{-}144)$$

---

* В скобках стоит теплосодержание водяных паров при температуре уходящих газов и давлении 1 *ата* в *ккал/кг*.

II_7. Тепло потерь от механической неполноты сгорания топлива [см. формулу (I-80)]:

$$Q_м = \left(a_{шл+пр} \frac{C_{шл+пр}}{100 - C_{шл+пр}} + a_{ун} \frac{C_{ун}}{100 - C_{ун}} \right) \cdot 78 A^р B. \quad (II-145)$$

II_8. Тепло с транспортом (выходящим из печи или зоны)

$$Q''_{тр} = \Sigma G^{час}_{тр} c''_{тр} t''_{тр}. \quad (II-146)$$

II_9. Тепло, аккумулированное кладкой:

$$Q''_{акк} = \Sigma G_{акк} c''_{акк} t''_{акк}. \quad (II-147)$$

II_{10}. Тепло, отдаваемое печью на сторону (например, тепло воздуха, нагретого при охлаждении изделий и отдаваемого на сушку, тепло охлаждающей печь воды и т. п.):

$$Q_{ст} = \Sigma V_i c_i t_i \text{ или } \Sigma G_i c_i t_i. \quad (II-148)$$

II_{11}. Тепло, отдаваемое в окружающую среду:

$$Q_{о.с} = \Sigma F_i k_i (t_в - t_{о.с}). \quad (II-149)$$

Рассчитывается по методике, изложенной в предыдущей главе.

II_{12}. Потери тепла с газами, выбивающимися из отверстий. Для отверстий, горизонтально вытянутых:

$$Q^{гор}_{выб} = 3\,600 \varphi f \sqrt{2gH(\gamma_в - \gamma_г)\gamma_г} = c_г t_г. \quad (II-150)$$

Для отверстий, вытянутых в высоту:

$$Q^{верт}_{выб} = 0{,}67 Q^{гор}_{выб}. \quad (II-151)$$

Здесь φ — коэффициент расхода; обычно $\varphi = 0{,}62$;
f — площадь отверстия в $м^2$;
H — высота расположения средней линии этой площади от нейтральной по давлению в $м$;
$\gamma_г$, $c_г$, $t_г$ — удельный вес в $кг/м^3$, теплоемкость в $ккал/кг\ град$ и температура газов в град., выбивающихся из отверстия;
$\gamma_в$ — удельный вес окружающего воздуха в $кг/м^3$.

Если из печи выбиваются газы, содержащие химическую неполноту сгорания, то это учитывается как дополнительное слагаемое по статье $Q_{выб}$.

II_{13}. Потери тепла от излучения через отверстия

$$Q_{изл} = 4{,}96 \psi \left[\left(\frac{t_в + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{о.с} + 273}{100} \right)^4 \right] f, \quad (II-152)$$

где ψ — коэффициент диафрагмирования, он берется в зависимости от соотношения глубины отверстия x и высоты его h. Например, для отверстия, у которого ширина больше высоты h вдвое:

$\frac{h}{x}$	0,2	0,6	1	2	4	6
ψ	0,2	0,48	0,6	0,73	0,87	0,88

II_{14}. Тепло уноса материала из печи

$$Q_{ун} = \Sigma G_{ун} c_{ун} t_{ух}. \qquad (II\text{-}153)$$

Так как вес материала в процессе тепловой обработки изменяется (за счет испарения воды, выделения газов разложения, добавления в материал золы или шлаков топлива, уноса части материала из печи и т. д.), то перед составлением теплового баланса предварительно составляется материальный баланс, где в приходе будут: вес сырья (сухого и его влаги), топлива, воздуха, а в расходе: вес продукта, испаренной влаги и газов разложения сырья, уноса топлива и материала, продуктов сгорания топлива.

Наличие тех или иных статей в тепловом балансе зависит от способа тепловой обработки и вида сырья.

3. Определение из теплового баланса неизвестных показателей

После расчета по вышеприведенным формулам сумма статей прихода приравнивается к сумме статей расхода. Так как одна величина при составлении баланса принимается как неизвестная, то ее можно найти решением уравнения теплового баланса. Таким путем определяется расчетная величина расхода топлива в проектируемой установке, температура на границе двух зон, расход газов и т. д. Решая уравнения теплового баланса при испытаниях тепловой установки, находят потери тепла в окружающую среду, неучтенные потери от химической неполноты сгорания и т. д. Для примера рассмотрим тепловой баланс для зоны охлаждения печи (рис. 46). В зону охлаждения поступает $G_м$ *кг/час* горячего продукта при температуре $t'_м$. Этот продукт выходит из зоны охлажденным при $t''_м$ в том же количестве. Тепло остывающего продукта тратится на нагрев V *нм³/час* воздуха от температуры $t'_в$ до $t''_в$ и на потери $Q_{о.с}$ *ккал/час* в окружающую среду. Из уравнения

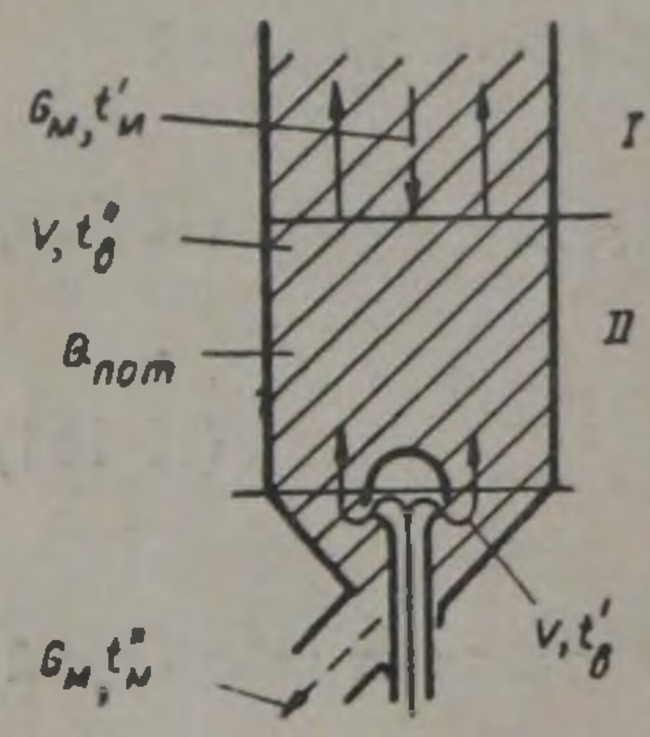


Рис. 46. Схема теплового баланса зоны охлаждения

I — зона обжига; *II* — зона охлаждения

$$G_м (c'_м t'_м - c''_м t''_м) = V (c''_в t''_в - c'_в t'_в) + Q_{о.с} \qquad (II\text{-}154)$$

можно определить одну из величин V, $t''_в$, $Q_{о.с}$, $t''_м$, которую считают неизвестной. Чаще всего так определяют $t''_в$ на границе двух зон, что необходимо, например, для построения кривой обжига. Теплоемкости $c_м$, $c_в$ находят из таблиц в зависимости от температуры.

4. Графическое изображение теплового баланса

Чтобы наглядно представить отдельные статьи баланса, используют его графическое изображение (рис. 47). Прямоугольник представляет собой базу баланса (100%). Сверху в масштабе изображаются потоки, отраженные в приходной части баланса. Каждый поток в приходе обозначается цифрой I с индексом, соответствующим порядковому номеру статьи прихода в таблице баланса. Расходные статьи баланса (цифры II с соответствующим индексом) вычерчиваются отходящими снизу от базы потоками, причем статьи полезных расходов ($q_{эид}$, $q_{пл}$ и т. д.) направляются прямо вниз, давая представление о к.п.д. теплового процесса, а потоки, изображающие потери, отводятся (без изменения их ширины) вправо. Если часть этих потерь в дополнительной аппаратуре используется полезно (II-4), то эта часть изображается после поворота вправо повернутым также вниз потоком, как все полезные расходы. Если часть тепловых потерь используется на подогрев воздуха, для интенсификации процессов горения в самой установке или для других внутренних целей (подогрев материала, идущего на обжиг, и т. д.), то такие потоки носят название регенеративных и изображаются замкнутым кольцом, входящим при одинаковой своей ширине в приходную и расходную части.

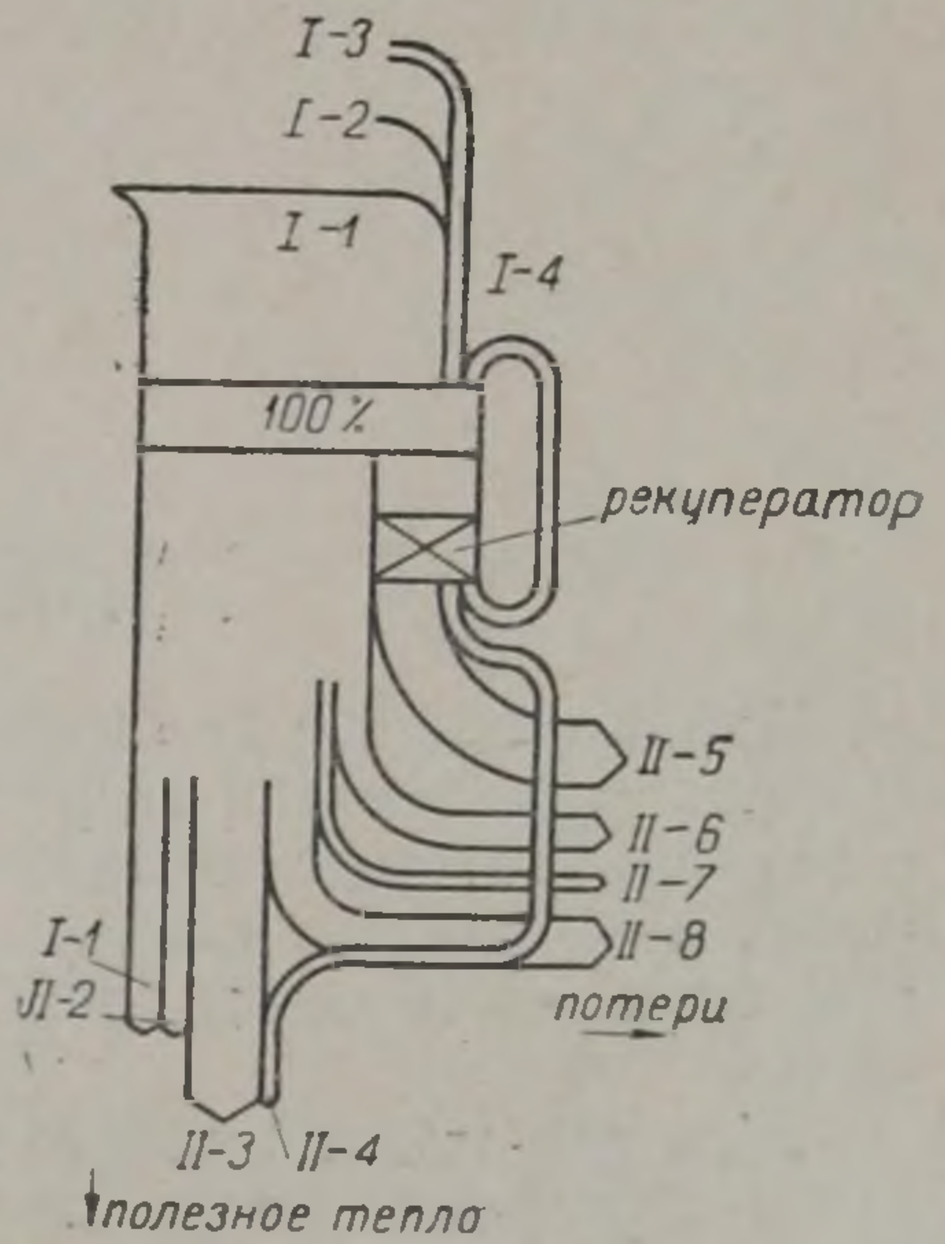


Рис. 47. Графическое изображение теплового баланса

Раздел третий

КЛАДКА ПЕЧЕЙ, ГАРНИТУРА, ТЕПЛОИСПОЛЬЗУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

ГЛАВА I

КЛАДКА

1. Общие положения

Кладка печей выполняется из разных материалов. Внутренняя сторона при температурах газов выше 700—750° футеруется огнеупорными материалами. В отдельных случаях для облегчения веса кладки применяют легковесные огнеупоры. Наружные слои ограждения выкладываются из обыкновенного кирпича.

Для связывания отдельных камней кладки применяют растворы и мертели. С целью предохранения поверхности футеровки от ее износа пламенем, шлаком и золой используют огнеупорные обмазки и торкретмассы, а для уменьшения газопроницаемости кладки применяют уплотнительные наружные обмазки.

Для уменьшения тепловых потерь в окружающую среду с наружной стороны применяют теплоизоляционные изделия и конструкции, а в качестве промежуточных слоев—теплоизоляционные засыпки. Чтобы предохранить кладку от распора и укрепить гарнитуру, ставятся металлические каркасы.

2. Основные свойства материалов кладки

Материалы для фундаментов печей выбираются в зависимости от температуры их прогрева в работе, от наличия грунтовых вод и степени агрессивности влаги. Материалом может служить бутовый камень, известняк при температурах менее 250°, при более высоких температурах песчаник. Красный строительный кирпич в фундаментах применяется до температуры 700°. При постоянном увлажнении бутовый известковый камень не применяется. Если воды кислые, мягкие, то для фундаментов применяются растворы с пуццолановым цементом взамен силикатного. В качестве материала для фундамента тепловых установок широко применяется бетон. Для футеровок печей у боровов, дымовых труб используют огнеупорные материалы: шамотные, динасовые, магнезитовые, хромомагнезитовые и др., свойства которых приведены в табл. 15.

Таблица 15

Основные свойства огнеупорных материалов

Свойство	Единица измерения	Материал изделий					
		шамот	динас	магнезит	хромомагнезит	карборунд „карбофракс"	талько-магнезит
Огнеупорность	град.	А, 1 730 Б, 1 670 В, 1 580	1 690—1 710	2 000	2 000	1 850—2 000	1 675
Предельные рабочие температуры	град.	А, 1 400 Б, 1 300 В, 1 250	1 600	1 650—1 700	1 500	1 700	1 400
Температура начала размягчения под нагрузкой 2 *кг/см*²	град.	1 150—1 400	1 620—1 660	1 500	1 450	1 500—1 700	1 275—1 440
Коэффициент теплового расширения m	1/град.	$5{,}7 \cdot 10^{-6}$	$12 \cdot 10^{-6}$	$13{,}4 \cdot 10^{-6}$	—	$4{,}7 \cdot 10^{-6}$	—
Расширение	—	Равномерное	Крайне неравномерное	Равномерное	—	—	—
Термостойкость U (число теплосмен)	—	Удовлетворительная, 5—25	Плохая, 1—4	Плохая, 1—2	Удовлетворительная и хорошая, 25—50	Хорошая 50—60	Плохая 2—4
Механическая прочность (предел прочности на сжатие) не менее	*кг/см*²	80—500	150—250	350—400	250	500—700	80—100
Шлакоустойчивость плохая при шлаках	—	Основных	Основных	Кислых	—	Кислых и основных	—
Теплопроводность от t_1 до t_2 средняя, $\lambda_{ср}$	$\frac{ккал/м}{час\ град}$	$0{,}6+0{,}000275 \cdot (t_1+t_2)$	$0{,}7+0{,}000325 \cdot (t_1+t_2)$	$5{,}3-0{,}00125 \cdot (t_1+t_2)$	$3{,}0-0{,}00025 \cdot (t_1+t_2)$	$3{,}26-0{,}0005t+0{,}0000012t^2$ (истинная)	—
Теплоемкость средняя от 0° до t, $c_{ср}$	$\frac{ккал/кг}{град}$	$0{,}2+63 \cdot 10^{-6}t$	$0{,}19+80 \cdot 10^{-6}t$	$0{,}225+60 \cdot 10^{-6}t$	$0{,}18+36 \cdot 10^{-6}t$	0°—0,18 300°—0,261 600°—0,275	— — —
Пористость объемная (кажущаяся не более)	%	22	21—25	15—25	24	17—24	0,7—2,7
Объемный вес	*т/м*³	1,7—1,9	1,7—1,9	2,6	2,8	2—2,6	2,8—2,85

3. Некоторые особенности кладки печей

Температурные швы. При кладке стен, подвергаемых сильному обогреву, необходимо принимать во внимание их тепловое расширение, так как в этих случаях отсутствие температурных швов приводит к распору и разрушению кладки. Температурный шов представляет собой зазор, допускающий независимое свободное расширение при нагреве соседних участков кладки.

Линейное расширение кладки вычисляется по формуле

$$\Delta l = m\, l \Delta t \ [м], \qquad \text{(III-1)}$$

где m — коэффициент теплового расширения в *м/м град*;
l — первоначальная длина рассматриваемого участка в *м*;
Δt — максимальная разница температур кладки при разогреве с холодного ее состояния в град.

Практически принимают среднюю величину температурных швов на 1 *пог. м* кладки: для шамотной и трепельной 5—6 *мм*; из сырого талькового камня 8—10 *мм*; для магнезитовой 8 *мм* и для динасовой 12 *мм*; для огнеупорных бетонов 10—12 *мм*. Температурные швы заполняются эластичной огнеупорной массой с асбестом. При многослойной кладке температурные швы взаимно перекрываются. Швы наружных слоев перекрываются во избежание проникновения воздуха или просыпания засыпной изоляции кирпичом (плашка) или металлическими полосами.

Своды. Своды могут быть выполнены лучковыми, полуциркульными и плоскими. Если обозначить центральный угол дуги свода через α, а радиус ее через r, пролет, перекрываемый сводом, или хорду дуги через b, то величина стрелки свода h будет определена:

$$h = r\left(1 - \cos\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{b}{2}\operatorname{tg}\frac{\alpha}{4}; \qquad \text{(III-2)}$$

$$r = \frac{b}{2\sin\frac{\alpha}{2}}. \qquad \text{(III-3)}$$

Наиболее часто встречающееся отношение стрелки h к пролету b : h/b $^1/_{12}$; $^1/_{10}$; $^1/_8$; $^1/_{7,5}$; $^1/_6$; $^1/_4$; $^1/_2$, что соответствует величинам угла α

38°, 45°, 56°, 60°, 74°, 106°, 180°.

Свод, имеющий дугу в 180°, носит название полуциркульного, остальные — лучковые. Своды, работающие при высоких температурах, делаются двойными, разделенными температурным швом. Верхний свод исполняет роль разгрузочного. У лучковых сводов горизонтальный распор боковых стен тем больше, чем больше вес свода, чем меньше центральный угол α и больше температура разогрева свода. Поэтому такие своды требуют прочный металлический каркас, предохраняющий стены от разрушения под действием горизонтального распора свода. Полуциркульные своды тако-

го распора не имеют и употребляются только там, где увеличенное подсводовое пространство может быть полезно использовано (перекрытие боровов, рабочего канала кольцевых печей и т. д.).

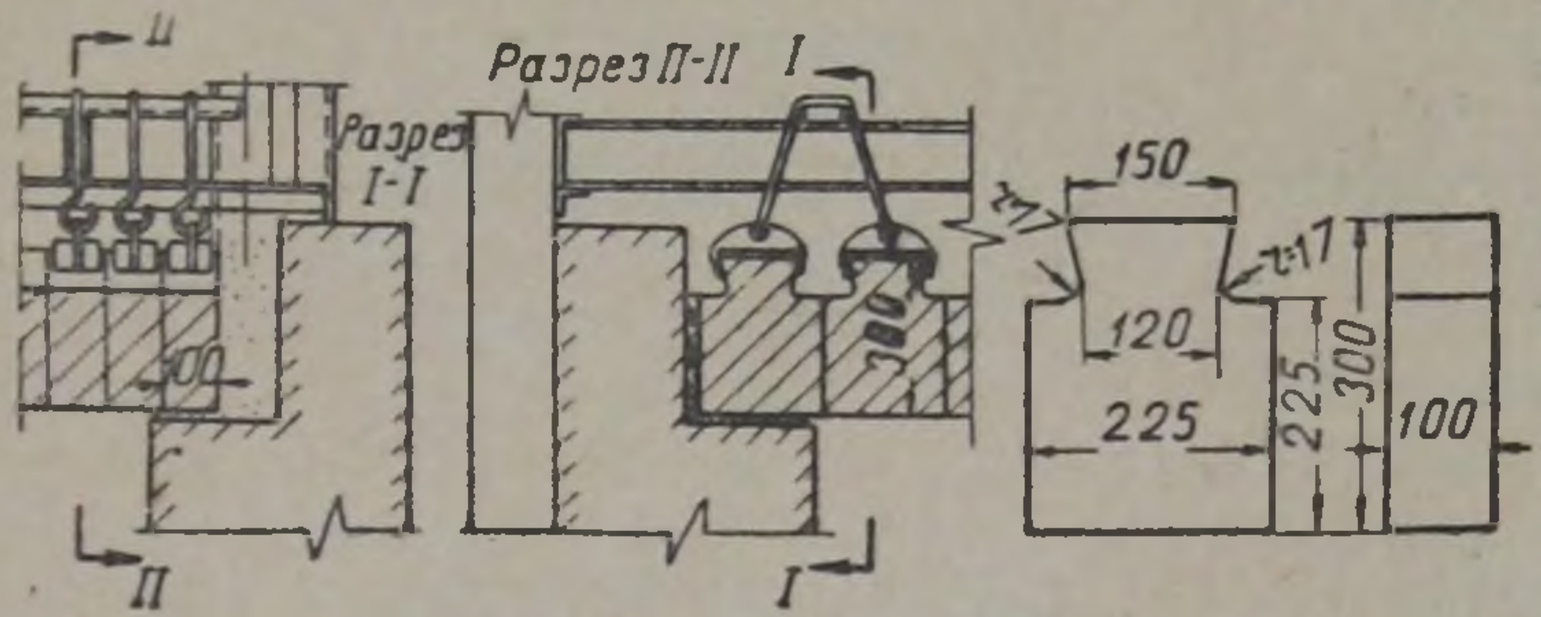


Рис. 48. Подвесные своды печи

Наиболее рациональными с точки зрения оформления по любому контуру перекрытия являются подвесные своды (рис. 48), хотя их стоимость и выше обычных.

ГЛАВА II

КАРКАСЫ, ГАРНИТУРА И АРМАТУРА

Каркасы представляют собой металлическую конструкцию тепловых установок, которая служит для предотвращения распора стен и для прикрепления необходимой гарнитуры и арматуры. Во избежание увеличенных присосов или выдувания газов каркасы установок обшиваются металлическими листами. В некоторых печах (вращающиеся печи) сам металлический корпус является несущей конструкцией. Нижние концы стоек каркаса или заделываются в массив фундамента, или, так же как и верхние, стягиваются поперечными стержнями с резьбой и гайками на концах. К каркасу прикрепляется гарнитура: чугунные рамы с топочными дверцами, лючки, лазы и т. д. Помимо этого, к гарнитуре относятся: колосниковые решетки, воздушные заслонки, дымовые шиберa и другие подобные детали. Конструкция дымовых шиберов приведена на рис. 49 (см. стр. 132). Тепловые установки оборудуются в зависимости от назначения их: газопроводами, паропроводами, водопроводом и запорными и предохранительным органами, конденсатоотводчиками и другой арматурой.

ГЛАВА III

ТЕПЛОИСПОЛЬЗУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

1. Технико-экономические обоснования теплоиспользования

Теплоносители, выходящие из печей, сушилок, автоклавов, после воздействия на обрабатываемый материал во многих случаях еще имеют большой тепловой потенциал и могут рассматриваться как вторичные энергоресурсы. Так, из камерных печей газы уходят при температуре 800—1000°, а часто и выше.

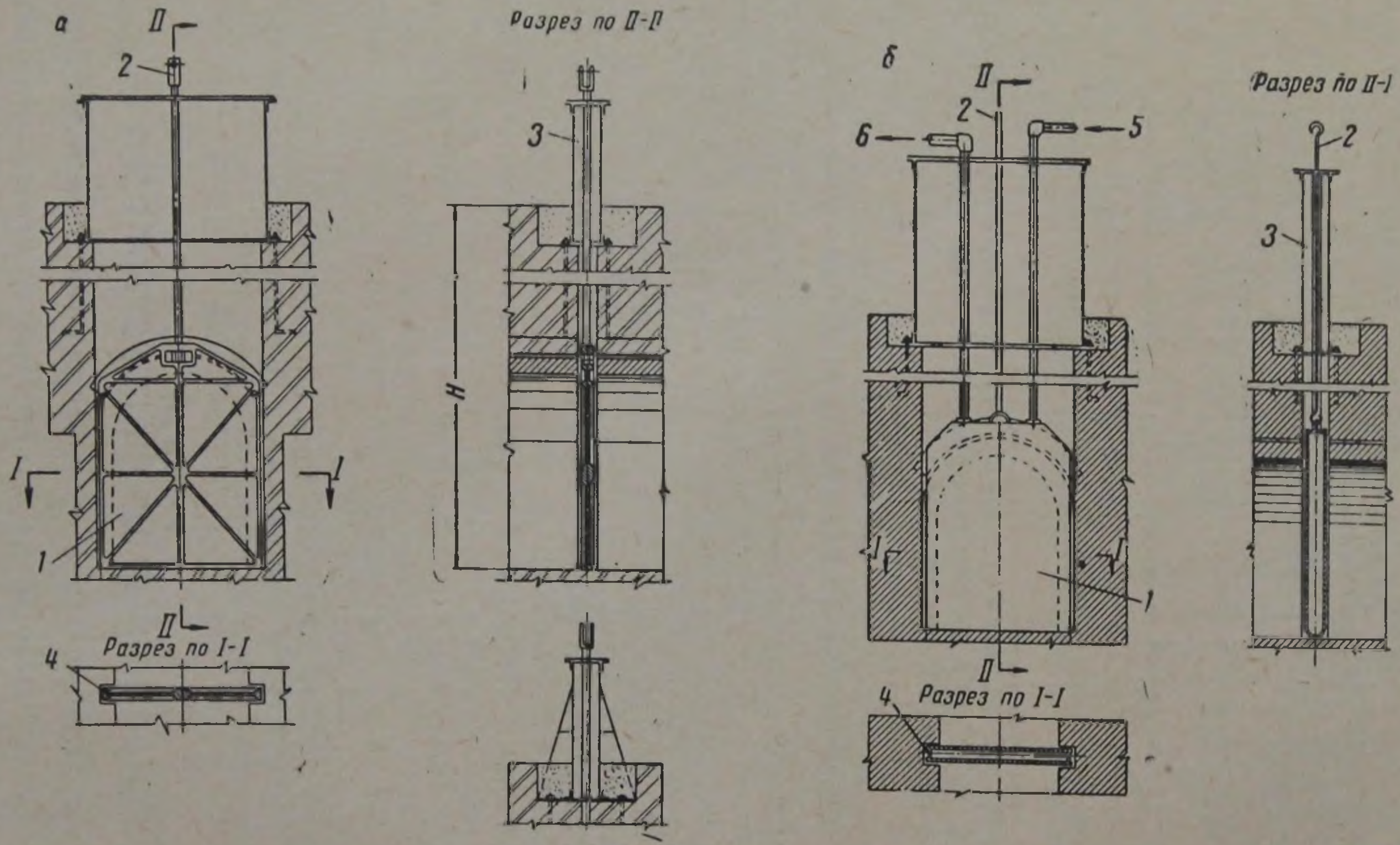


Рис. 49. Шиберы дымоходов

а — литые чугунные и стальные; *б* — сварные стальные с водяным охлаждением; *1* — шибер; *2* — тяга; *3* — защитный кожух: *4* — направляющие; *5* — труба для подвода воды; *6* — труба для отвода воды

Газы, выходящие из пересыпных шахтных печей, уносят, помимо физического тепла, теплоту сгорания горючих составляющих (CO, H_2, CH_4), некоторые виды высокотемпературных сушилок отдают парогазовую смесь, обладающую большим теплосодержанием. Из автоклавов выпускают после окончания рабочего цикла отработавший пар с теплосодержанием, незначительно отличающимся от теплосодержания свежего пара. Подробный анализ тепловых балансов тепловых установок приводит к выводу, что для экономии топлива, снижения удельных его расходов, повышения производительности и экономичности установок необходимо всемерно использовать отработавшее тепло. Технико-экономические сравнения показывают выгодность применения в подавляющем большинстве случаев специальной теплоиспользующей аппаратуры, так как капиталовложения на ее сооружение окупаются полученной экономией топлива в течение 2—5 лет, а иногда и в срок менее года. Такие сроки окупаемости доказывают рентабельность установки и целесообразность ее сооружения. Под сроком окупаемости подразумевается отношение

$$n = \frac{K}{Э} \text{ лет}, \qquad \text{(III-4)}$$

где K — капиталовложения на сооружение теплоиспользующей установки в руб;
$Э$ — экономия годовых эксплуатационных расходов после введения в действие теплоиспользующей установки в руб./год.

Капитальные затраты связаны с мощностью теплоиспользующей установки, которая чаще всего пропорциональна величине ее поверхности нагрева F *м*^{2}. Стоимость 1 *м*^{2} этой поверхности $c_п$ *руб/м*^{2}. Кроме этой, главной составляющей капитальных затрат, в них входит и стоимость вспомогательных сооружений и дополнительного оборудования $K_{всп}$. Таким образом, капитальные затраты:

$$K = c_п F + K_{всп}. \qquad \text{(III-5)}$$

Экономия топлива после введения теплоиспользования ΔB в *т/год*

$$\Delta B = B_1 \frac{\Delta\eta}{\eta_2}, \qquad \text{(III-6)}$$

где B_1 — годовой расход топлива без теплоиспользующей установки в *т/год*;

$\eta_2 - \eta_1 = \Delta\eta$ — разница в к. п. д. тепловой установки после и до введения теплоиспользующей аппаратуры.

Стоимость сэкономленного топлива франко-завод при цене за 1 *т* $c_т$ *руб/т* будет $c_т \Delta B$ руб./год. Годовая экономия эксплуатационных затрат после введения теплоиспользования составит

$$Э = c_т \Delta B - Э_{доп} \text{руб./год} \qquad \text{(III-7)}$$

Здесь $Э_{доп}$ — дополнительные годовые затраты по эксплуатации, связанные с теплоиспользующей установкой, например стоимость дополнительной электроэнергии на дымососы, затраты на эксплуатационный персонал, амортизационные отчисления и т. д. в руб./год.

Если принять во внимание, что потребная поверхность нагрева с учетом коэффициента потерь $\eta_{\text{п}}$ равна:

$$F = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}} \Delta B}{\Delta t k \eta_{\text{п}}} \text{ м}^2, \qquad \text{(III-8)}$$

то срок окупаемости сооружения теплоиспользующей установки составит

$$n = \frac{\frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}} \Delta B \; c_{\text{п}}}{\Delta t k \eta_{\text{п}}} + K_{\text{всп}}}{B_1 \frac{\Delta \eta}{\eta_2} c_{\text{т}} - Э_{\text{доп}}}. \qquad \text{(III-9)}$$

Эта формула дает первое обоснование для решения вопроса о целесообразности теплоиспользования. Формула показывает, что высокая рентабельность теплоиспользующей установки будет обеспечена при большом температурном напоре Δt, высоком коэффициенте теплопередачи k, низкой стоимости единицы поверхности нагрева $c_{\text{п}}$, небольших затратах на вспомогательное оборудование $K_{\text{всп}}$ и на эксплуатацию теплоиспользующей установки $Э_{\text{доп}}$, при значительном повышении к. п. д. $\Delta\eta$, при дорогом топливе $c_{\text{т}}$ и при достаточно высокой тепловой мощности установки, что пропорционально расходу топлива B_1. Считая, например, $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 7\,000$ *ккал/кг*; $c_{\text{п}} = 300$ *руб/м*^{2}; $c_{\text{т}} = 150$ *руб/т*; $\eta_{\text{п}} = 0{,}9$ можно найти срок окупаемости теплоиспользующей установки так:

$$n = \frac{A_{\text{всп}} \frac{7\,000 \Delta B 300}{\Delta t k 0{,}9}}{\Delta B 150 Б_{\text{доп}}} \qquad \text{(III-10)}$$

или

$$n = 15\,600 \frac{x}{\Delta t k} = 15\,600 \frac{x}{q}. \qquad \text{(III-11)}$$

Здесь $A_{\text{всп}}$ — коэффициент, выражающий отношение всего числителя формулы (III-9) к первому слагаемому и учитывающий удорожание теплоиспользующей установки за счет вспомогательных устройств;

$Б_{\text{доп}}$ — коэффициент, выражающий отношение всего знаменателя к первому члену и учитывающий уменьшение экономии эксплуатационных затрат за счет дополнительных затрат после введения теплоиспользующей установки;

$q = \Delta t k$ — тепловой поток или теплонапряжение поверхности нагрева в *ккал/м*^{2} *час*;

$x = \frac{A_{\text{всп}}}{Б_{\text{доп}}}$ — отношение расчетных коэффициентов.

2. Схемы теплоиспользования и аппаратура

Наивыгоднейшей схемой теплоиспользования является такая схема, при которой теплоноситель, отработавший в основном агрегате, направляется в соседний без трансформации в специальной установке, так как в этом случае $F = 0$ и срок окупаемости одних

вспомогательных (на газопроводы, дымососы) капиталовложений, $K_{всп}$, [формула (III-9)] чрезвычайно мал. Примером может служить совместная работа печи и сушилки для изделий, когда горячий воздух и дымовые газы из печи прямо направляются на сушку изделий перед обжигом.

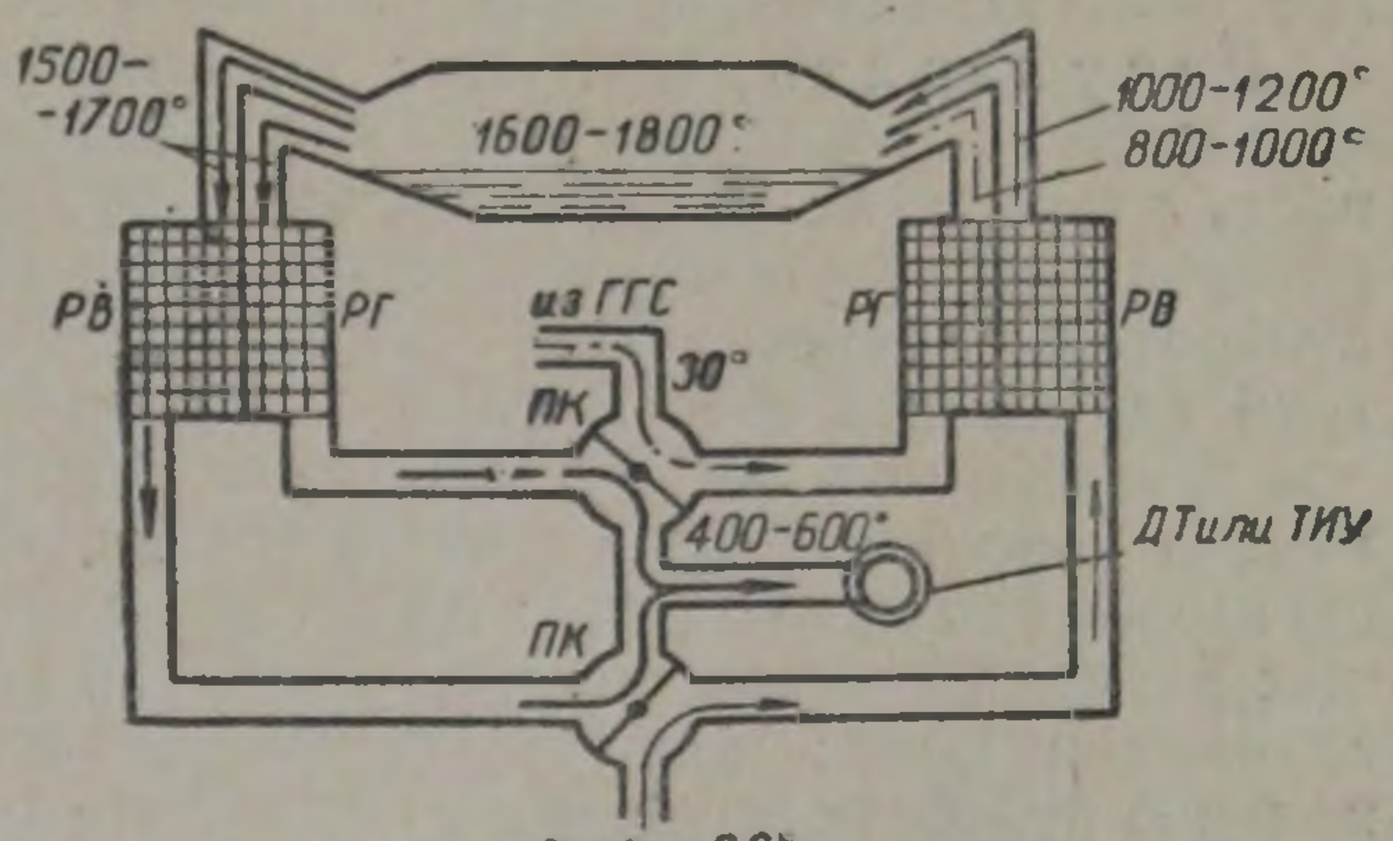


Рис. 50. Схема установки регенераторов

ГГС — газогенераторная станция; *ДТ* — дымовая труба; *ТИУ* — теплоиспользующая установка; *ПК* — перекидной клапан; *РВ* — регенератор для воздуха; *РГ* — регенератор для газа

Если для использования отработавшего тепла требуется предварительное его преобразование, то применяется соответствующая теплоиспользующая аппаратура. Установки, предварительно аккумулирующие тепло газов, которые проходят через них из печи, а затем отдающие это тепло проходящему через них в печь газу или воздуху, называются регенераторами (рис. 50). Для переменного направления через насадки регенераторов дымовых газов из печи и подогреваемого воздуха в печь служат перекидные клапаны. Если печь работает на высококалорийном топливе (мазут или природный газ), то для достижения действительной температуры горения в рабочем пространстве печи 1800° и выше достаточно иметь регенераторы только для подогрева (до 1000—1200°) воздуха. При работе на низкокалорийном газе типа генераторного ($Q_н^с$ = 1 200—1 500 *ккал/нм*³) следует подогревать и газ до 800—1000°, для чего устанавливаются и регенераторы для газа. Использование тепла дымовых газов в регенераторах целесообразно только, если необходимы особо высокие температуры рабочего пространства печей (стекловаренные, мартеновские печи). Громоздкость регенераторов,

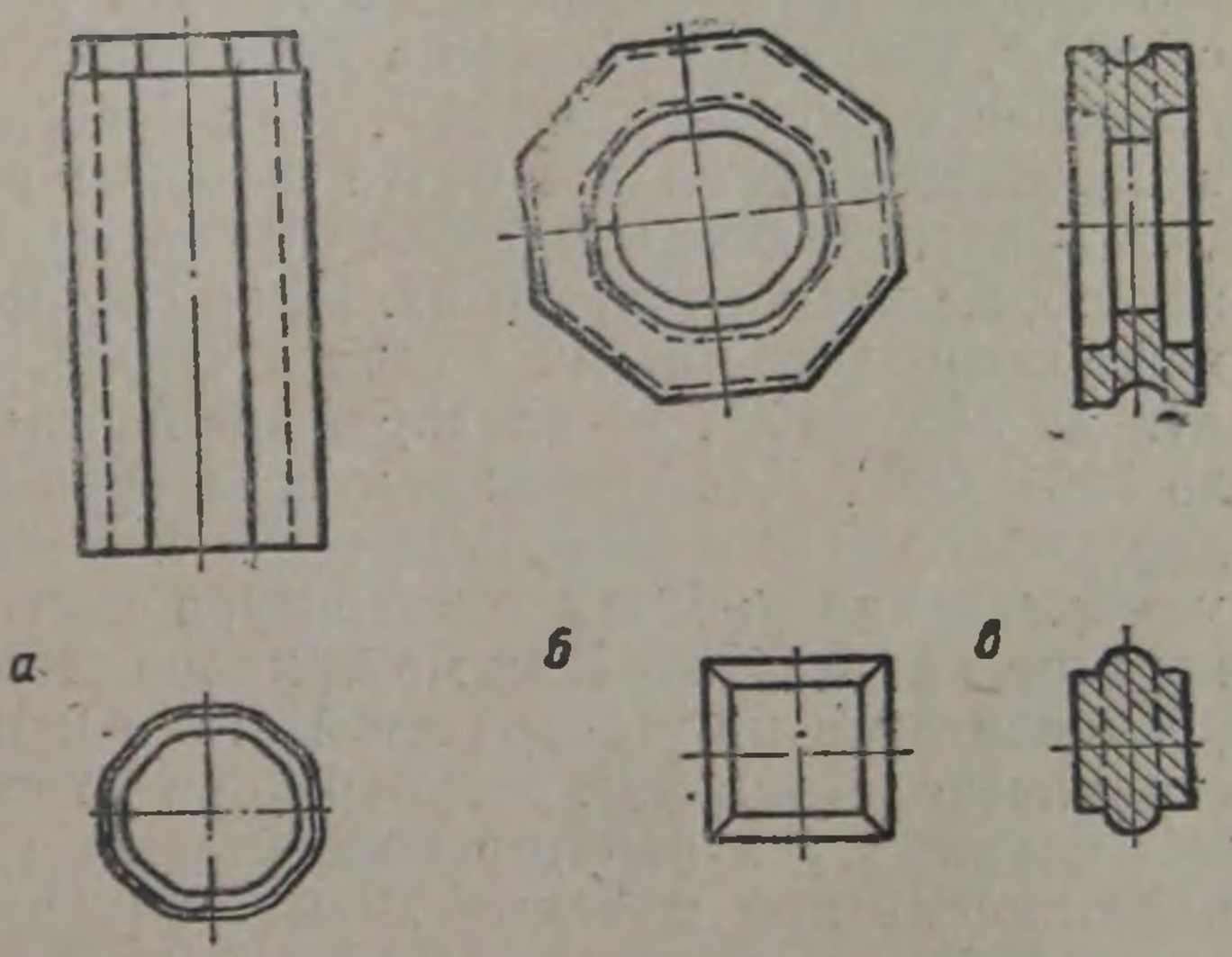


Рис. 51. Элементы керамического рекуператора

а — рекуператорная труба; *б* — стыковое кольцо; *в* — промежуточная перегородка

необходимость перемены направления газов несколько раз в течение одного часа, недолговечность перекидных клапанов и другие недостатки регенераторов ограничивают область их использования, представляя большую область применения рекуператорам.

Рекуператоры служат для подогрева газообразного топлива и воздуха дымовыми газами, отходящими из печей через поверхность нагрева. Условия наибольшей выгодности установки рекуператоров указаны при анализе формулы (III-9). Керамические рекуператоры представляют собой (рис. 51) набор керамических труб или камней особой формы. Внутри этих труб проходит дымовой газ, снаружи по образованным при соединении отдельных элементов каналам — нагреваемый воздух. Керамические рекуператоры имеют ряд недостатков: малая газоплотность соединения отдельных элементов вызывает утечку воздуха до 20—40%, а в отдельных случаях и выше; подогрев горючего газа здесь опасен, так как наличие присосов приводит к образованию взрывчатых смесей; возможность появления трещин элементов при резком разогреве рекуператора из-за появления большой разницы температур в стенках; малые допускаемые скорости в рекуператоре (во избежание увеличения присосов) и низкие коэффициенты теплопередачи, что влечет за собой громоздкость керамических рекуператоров. Эти недостатки обусловили применение керамических рекуператоров только в тех случаях, когда для подачи в печь требуется сравнительно высокий подогрев воздуха — до 1000°. Для подогрева воздуха до 500—600° в настоящее время все более широкое распространение получают металлические рекуператоры: трубчатые, игольчатые, термоблоки и некоторые разновидности их. Рекуператоры, выполненные из обычной углеродистой стали и серого чугуна, позволяют нагревать воздух до 350°—400°, из алитированной стали или хромистого чугуна до 500÷600°. Для стенок рекуператоров из хромистого чугуна, содержащего хрома 30%, никеля 4% и выплавляемого в электропечи, максимальная рабочая температура достигает 1000°. Однако рекуператоры из жаростойких материалов стóят в несколько раз дороже рекуператоров из углеродистой стали и поэтому их употребление ограничено. Примером рекуператора из гладких стальных труб может служить рекуператор конструкции Союзтеплостроя (рис. 52), работающий при максимальной температуре дымовых газов на входе 800° и подогреве воздуха до 400°. Подвесная система петель допускает свободное расширение труб, что позволяет отказаться от компенсаторов тепловых удлинений, обязательных при прямых трубах.

Желание сделать рекуператор дешевым и компактным привело к созданию чугунных односторонне- и двусторонне-игольчатых рекуператоров (рис. 53). У первых на наружной стороне игл нет, что делает их более применимыми в случае запыленности дымовых газов. Кроме того, односторонне-игольчатые трубы выдерживают бóльшую температуру, чем двусторонне-игольчатые. С другой стороны, коэффициент теплопередачи двусторонне-игольчатых труб при незагрязняющих дымовых газах выше, чем для односторонних.

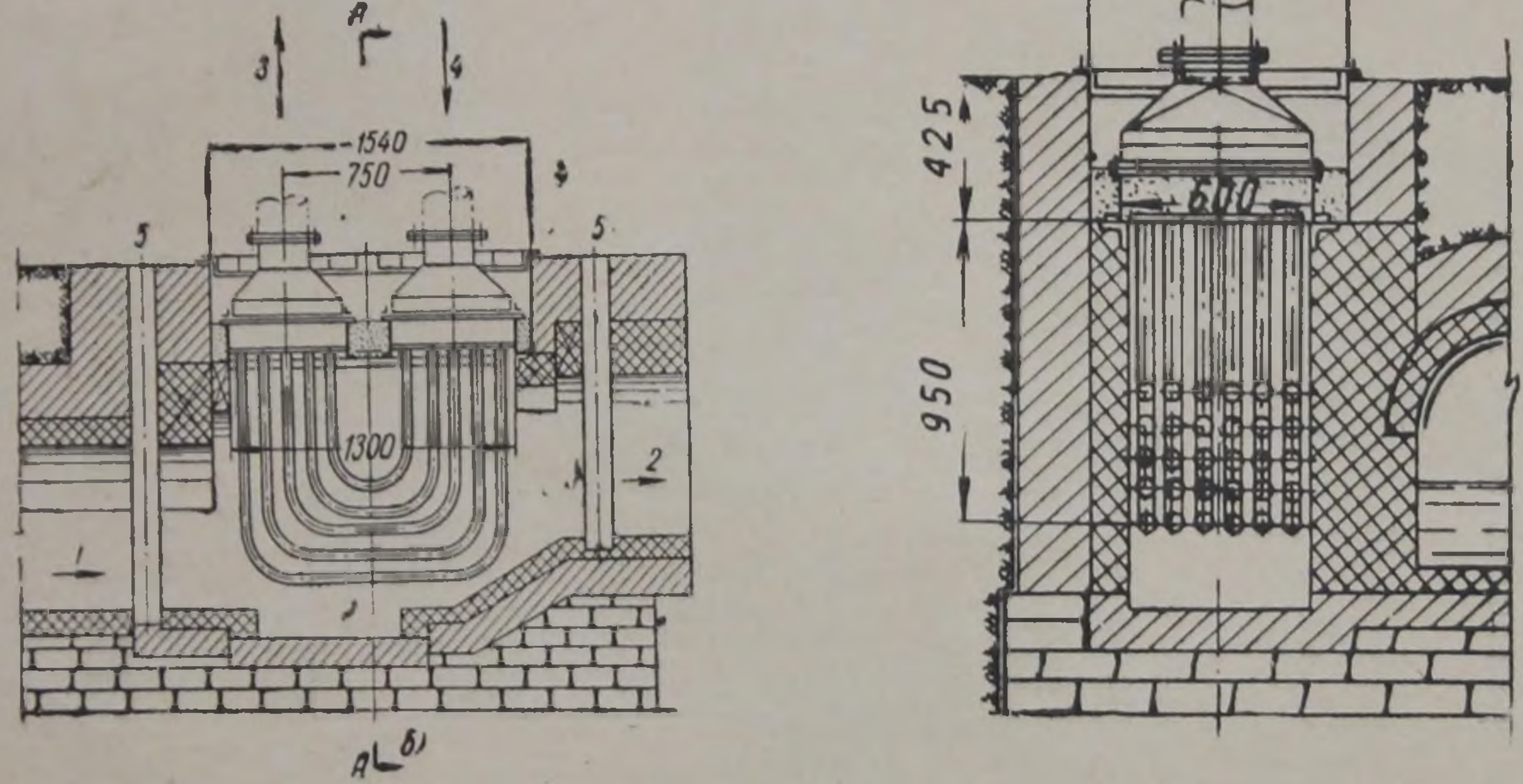
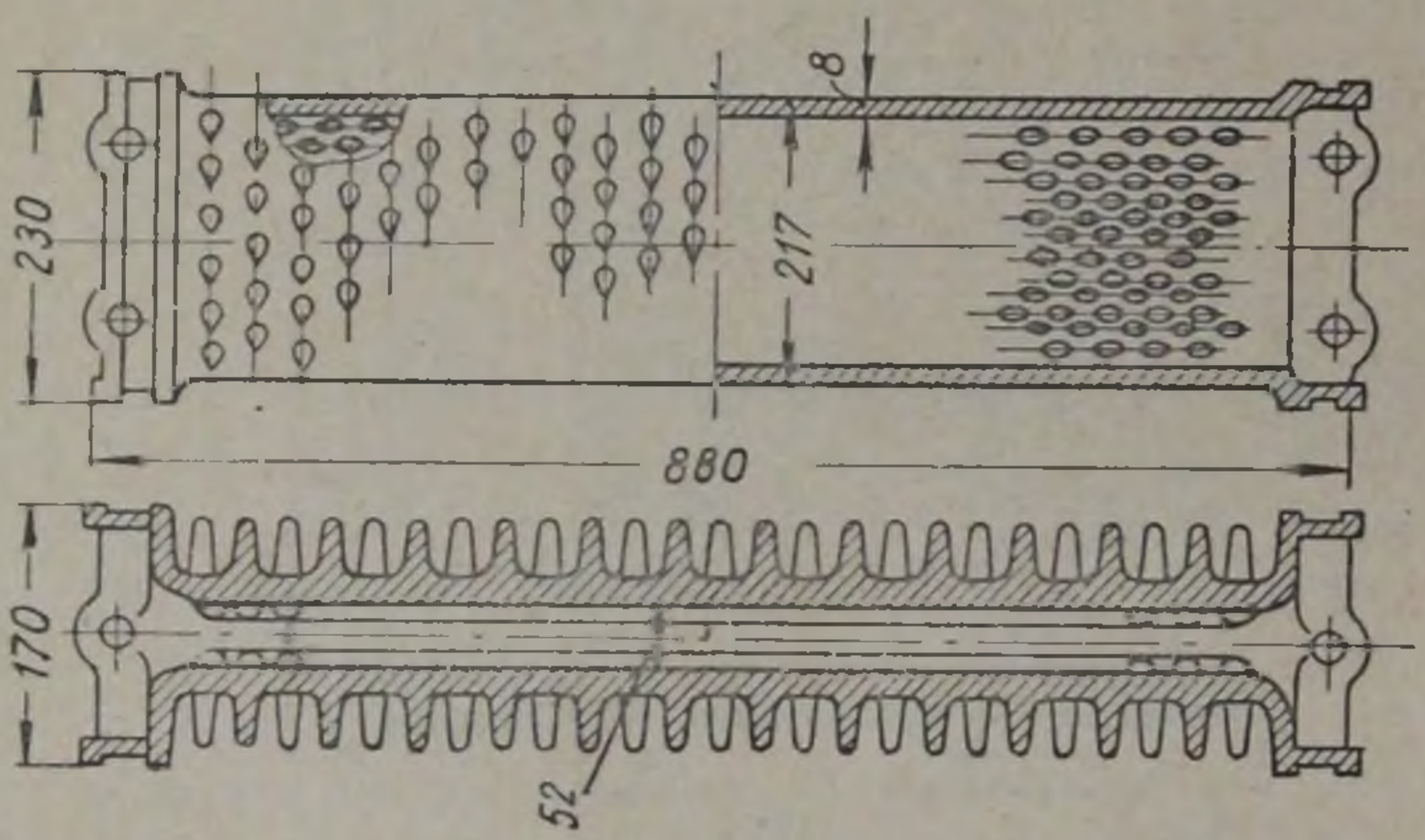


Рис. 52. Рекуператор из гладких стальных труб

1 — дымовые газы до рекуператора; *2* — дымовые газы после рекуператора; *3* — выходящий горячий воздух; *4* — входящий холодный воздух; *5* — место установки дымовых шиберов

Газоплотность у игольчатых рекуператоров выше, чем у керамических, однако меньше, чем у других металлических из-за большего количества фланцевых соединений. Так как газоплотность чугунных игольчатых рекуператоров падает с увеличением числа их элементов, то практически максимальная тепловая мощность игольчатых рекуператоров не превышает 10 млн. *ккал/час*.



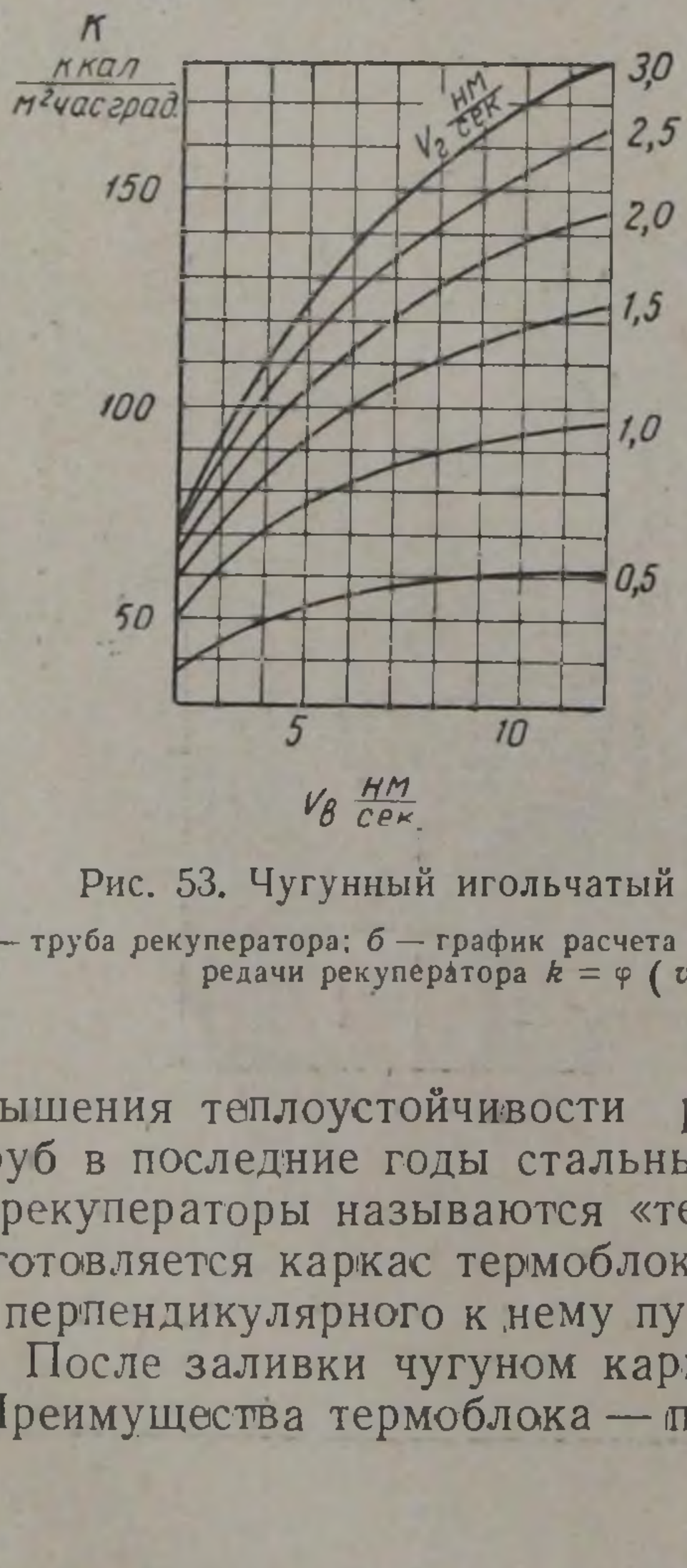


Рис. 53. Чугунный игольчатый рекуператор

а — труба рекуператора; *б* — график расчета коэффициента теплопередачи рекуператора $k = \varphi(v_г, v_в)$

Для повышения теплоустойчивости рекуператоров из гладких стальных труб в последние годы стальные трубы защищают чугуном. Такие рекуператоры называются «термоблоками» (рис. 54,*а*). Сначала изготовляется каркас термоблока из пучка труб для прохода газа и перпендикулярного к нему пучка труб для прохода воздуха (54,*б*). После заливки чугуном каркаса получается монолитный блок. Преимущества термоблока — повышенная теплоустойчи-

вость (температура входящих дымовых газов до 1300°), простота конструкции и возможность изготовления в местных условиях, повышенная газоплотность из-за надежного разъединения двух теплоносителей. Термоблоки имеют на единицу переданного тепла вес, в 2—3 раза превосходящий вес других металлических рекуператоров, поэтому термоблоки целесообразно применять лишь при высоких температурах отходящих газов сравнительно небольших печей. Термоблоки более компактны, чем стальные трубчатые рекуператоры, но уступают в этом двусторонне-игольчатым.

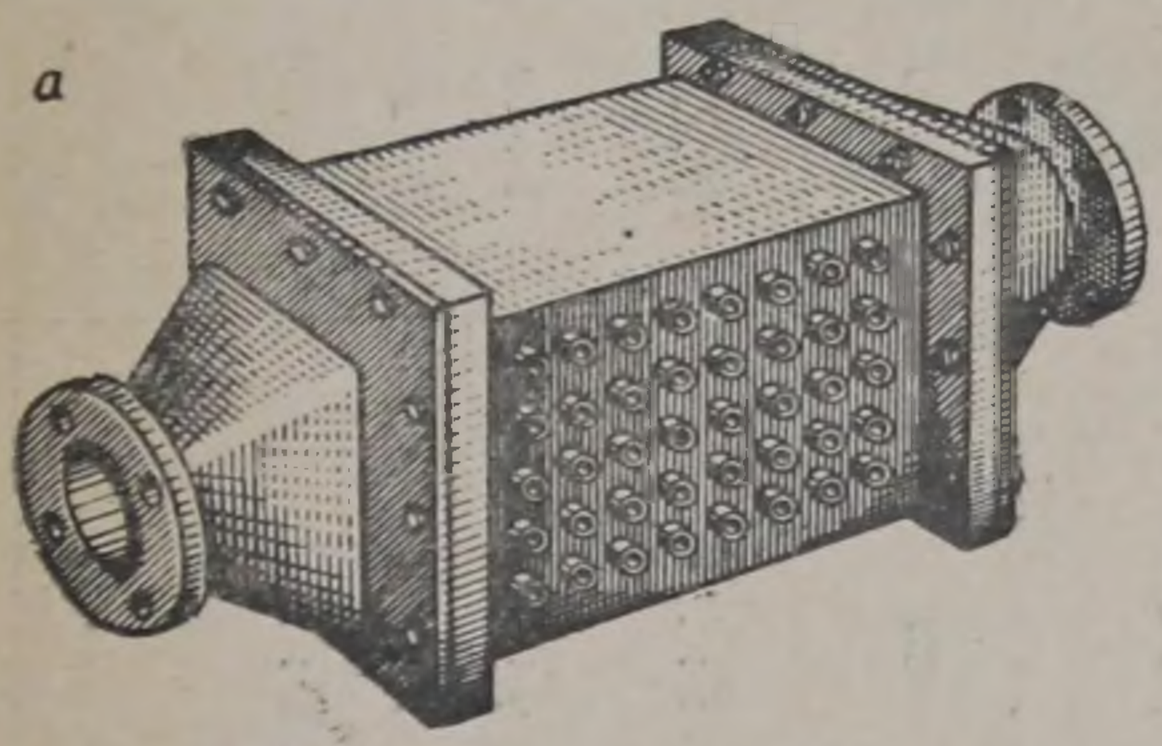


Рис. 54. Термоблок

а — общий вид; *б* — каркас термоблока

Расчетные данные для различных рекуператоров представлены в табл. 16.

Надо отметить, что двусторонне-игольчатые рекуператоры из расчета на единицу коэффициента теплопередачи в 3—4 раза дешевле термоблоков и в 1,5 раза дешевле трубчатых стальных рекуператоров.

Тепло отходящих из печи газов может быть использовано не только для нагревания газообразного топлива и воздуха, идущих на горение в печь, но и для получения пара, горячей воды для произ-

Таблица 16

Типы рекуператоров и основные показатели их работы

Показатели, единица измерения / Типы рекуператоров	Керамические	Трубчатые стальные	Чугунные рекуператоры		Монолитные термоблоки
			односторонне-игольчатые	двусторонне-игольчатые	
Максимальная температура газов перед рекуператором, град.	1 600	Углеродистая сталь 600	Чугун серый	700	1 200÷1 300
			То же, с 1,5% Cr	850	
		Алитированная сталь 800	То же, с 14% Cr	900	
			То же, с 30% Cr	1 200	
Максимальная температура стенок, град.	Из шамота, 1 400, из карборунда, 1 500	Углеродистая сталь 400	Чугун серый	500	800÷1 000
			То же, с 1,5% Cr	650	
		Алитированная сталь 600	То же, с 14% Cr	750	
			То же, с 30% Cr	1 000	
Коэффициент теплопередачи по условной гладкой поверхности, *ккал/м²час град*	2÷5	20÷25	30	50÷70	25
Удельная поверхность нагрева на единицу объема, *м²/м³*	6÷12	4÷8	8÷12	10÷14	20÷24
Скорость воздуха, *нм/сек*	1÷2	5÷12	4÷6	8÷10	6÷10
Скорость дымовых газов, *нм/сек*	0,3÷1	1,5÷2,5	2÷3	1÷2	1÷2
Объемный коэффициент теплопередачи, *ккал/м³час град*	30÷50	100÷200	200÷300	600÷700	500÷600

водственных, бытовых нужд, для теплофикации близлежащих зданий, для подогревания топочного мазута и т. п.

Горячая вода из водяных рубашек вагранок может быть использована для тех же целей. В агрегатах специальной конструкции охлаждение печей может быть выполнено пароводяной смесью, что дает большие технико-экономические преимущества перед водяным охлаждением. Пар из таких охлаждающих систем используется в производстве и для отопления. Отработавшая парогазовая смесь из сушилок также может быть направлена для использования тепла в особые аппараты — теплоуловители.

За непрерывно работающими печами с высокой температурой отходящих газов могут быть установлены паровые или водяные котлы-утилизаторы, а за котлами при необходимости воздухоподогреватели. В этом случае последние работают в условиях пониженных температур и жаростойких материалов не требуют. Широко распространена установка котлов-утилизаторов за мартеновскими печами и реже за вращающимися печами. Особенностью их является использование в основном конвективной теплоотдачи и поэтому они имеют относительно невысокий паросъем (10—15 *кг/м² час*).

Раздел четвертый

ПРОЦЕССЫ СУШКИ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ И СУШИЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

ГЛАВА I

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СУШИЛЬНОГО ПРОЦЕССА И СВОЙСТВА ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

1. Введение

Удаление влаги из материала при сушке преследует различные технологические цели. Сушка глины, гипсового камня, угля перед их размолом снижает расход электроэнергии на помол и устраняет замазывание транспортирующих устройств. Сушка топлива перед сжиганием, кроме того, повышает его теплоту сгорания и температуру горения. При обжиге вяжущих материалов сушка является начальной стадией общего процесса.

Сушка таких материалов, как глина и песок, нужна при формовке изделий для получения компонентов с определенной начальной влажностью. Сушка керамических изделий перед обжигом увеличивает в 2 раза и более их прочность, облегчает их укладку на вагонетки и транспортирование в печь. В производстве гипсовых, минераловатных и других изделий сушка является конечным процессом.

Скорость сушки или интенсивность удаления влаги не может быть произвольно большой, но и не должна быть слишком медленной. В первом случае быстрое испарение влаги из изделий приводит к их разрушению при сушке и массовому браку; во втором случае необоснованная затяжка процесса сушки вызывает снижение производительности сушильного цеха и резкое увеличение стоимости продукции. Поэтому производственные процессы сушки должны основываться на изучении теории сушки, связи влаги с материалом, на изучении в опытных условиях чувствительности изделий к скоростной сушке.

Испарение влаги из материала требует подвода определенного количества тепла, соответствующего количеству удаляемой влаги и условиям высушивания. Это тепло может быть сообщено различными путями: конвекцией от проходящих около высушиваемого материала горячих дымовых газов и воздуха, теплопроводностью при контакте материала с горячими поверхностями, инфракрасными лу-

чами от электрических или газовых нагревателей и т. д. Чтобы избежать запаривания материала, водяные пары должны быстро удаляться с его поверхности, поэтому при всех методах сушки происходит обдувание высушиваемого материала относительно сухим влагоносителем, которым служат воздух или дымовые газы. Чем больше они подогреты, тем интенсивнее тепловлагообмен и тем меньше их расход на 1 *кг* испаренной влаги. Поэтому необходимо изучение свойств газов как тепло- и влагоносителей — сушильных агентов — и соблюдение в каждом случае режима сушки.

Режимом сушки называется совокупность в каждый момент времени температуры, относительной влажности сушильного агента, а также скорости его прохождения около материала. Если сушка происходит под вакуумом, то величина абсолютного давления является четвертым регулируемым параметром процесса сушки.

Режимы сушки для каждого материала и изделия разрабатываются очень тщательно, так как от выбора их зависит производительность и экономичность процесса. Если, например, для песка быстрая сушка дымовыми газами при начальных температурах в 700—900° вполне допустима, то сушка керамических изделий сложного фасона, выполненных из высокочувствительных глин, требует замедленного процесса при начальных температурах не выше 100°.

Теория сушки рассматривает как конечные результаты — материальный и тепловой балансы сушки, так и вопросы движения (миграции) влаги по капиллярам и испарения в зависимости от связи ее с материалом и условиями тепло- и влагообмена. Одновременное изучение изменения свойств материала и появляющихся при удалении влаги напряжений в изделиях дает возможность установить параметры быстрой и высококачественной сушки, высокой производительности сушилки.

Сушка является сложным коллоидно-теплофизическим процессом. Строительные материалы можно отнести к капиллярно-пористым (хрупкие гели) или большей частью к капиллярно-пористым коллоидным телам (со свойствами хрупких и эластичных гелей). Удаление влаги в определенной степени изменяет свойства материалов, и это изменение зависит от вида связи влаги с материалом.

Современные достижения в изучении процессов сушки обусловлены многочисленными работами как отечественных, так и зарубежных ученых. Вопросы тепло- и влагообмена до недавнего времени разрабатывались изолированно. В настоящее время такое рассмотрение затруднило бы дальнейшее глубокое изучение вопросов сушки, и поэтому сушка материалов изучается сейчас как комплекс тепло- и массообмена. Теория сушки использует закон сохранения массы и энергии М. В. Ломоносова, работы В. В. Докучаева, П. С. Коссовича, Кина, Фишера, Шервуда, Льюиса в области массообмена в капиллярно-пористых телах, учение о связи влаги с материалом П. А. Ребиндера, работы по тепло- и влагообмену Н. Н. Доброхотова, И. И. Палеева, А. В. Лыкова, Л. К. Рамзина, М. Ю. Лурье, П. Д. Лебедева и других советских ученых, а также

работы научно-исследовательских институтов, проектирующих сушильные установки и изучающих их работу в различных отраслях промышленности.

2. Связь влаги с материалом

Согласно классификации П. А. Ребиндера, формы связи влаги с материалом делятся на три группы: химическая, физико-химическая и физико-механическая.

Каждая из указанных форм связи характеризуется дополнительными признаками, показывающими характер связи, условия ее образования и нарушения, изменение свойств тела и влаги в результате их связи и т. д.

Химическое связывание основного вещества и воды или гидратации происходит в точных химических соотношениях по законам стехиометрии. Ионная и молекулярная связи дают соединения, влага которых может быть отделена или химическим реагентом, или прокаливанием. Дегидратированное вещество имеет резко отличные свойства по сравнению с исходным. В качестве примера можно привести $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ — гипсовый камень и $CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$ — гипсовое вяжущее, образованное из камня прокаливанием его при температуре около 150°.

Такой метод удаления влаги, отличный от испарения, относится уже к обжигу, а не к сушке. Поэтому вопросы дегидратации химически связанной влаги рассматриваются в разделе обжига материалов.

При сушке материалов испаряется влага, имеющая физико-химическую или физико-механическую связь с телом. Физико-механическая связь может быть в виде адсорбционной (связь влаги в гидратных оболочках), осмотической или структурной. При этом количественные соотношения воды и сухого вещества не являются строго определенными.

Адсорбционная связь обусловлена силовым воздействием всех или поверхностных молекул, осмотическая — осмотическим давлением. Структурная связь получается при захватывании воды образовавшимся гелем.

Физико-механическая связь удерживает влагу в неопределенных соотношениях, в микро- и макрокапиллярах за счет капиллярного давления, обусловленного кривизной поверхности жидкости, и на поверхности тела (влага смачивания) за счет поверхностного натяжения. К микропорам относятся капилляры с радиусом r менее $^1/_{100}$ *мм*, к макропорам с r более $^1/_{100}$ *мм*. Жидкость смачивания адсорбируется на гладких непористых гидрофильных поверхностях. При абсорбции пары проникают в массу вещества за счет диффузии с образованием твердого раствора. Так как процессы адсорбции и абсорбции происходят одновременно, хотя с отставанием по скорости абсорбционного процесса, то оба эти поглотительных процесса называют сорбцией, процессы удаления влаги испарением — десорбцией.

Тело, имеющее микропоры, адсорбирует водяные пары из окружающей среды, которые заполняют капилляры с образованием вогнутого мениска. Над вогнутым мениском водяной пар имеет тем меньшее давление, чем меньше радиус капилляра, поэтому его давление оказывается ниже парциального давления паров окружающей среды. Это и обусловливает капиллярную конденсацию пересыщенного над мениском пара. Такого явления нет в макропорах, так как давление пара над почти плоской поверхностью жидкости приближается к парциальному давлению пара в окружающей среде.

3. Влажность материала

Всякий влажный материал состоит из сухого вещества G_c *кг* и влаги W *кг*. Поэтому вес влажного материала равен

$$G = G_c + W\ [кг]\ . \qquad \text{(IV-1)}$$

Относительной (средней по объему всего материала) влажностью, или влажностью на общий вес, называется отношение веса влаги к весу влажного материала

$$w_0 = \frac{W \cdot 100}{G}\ [\%]\ . \qquad \text{(IV-2)}$$

Абсолютной влажностью, или влажностью на сухой вес, называется отношение веса влаги материала к весу сухого вещества

$$w = \frac{W \cdot 100}{G_c}\ [\%]\ . \qquad \text{(IV-3)}$$

Между этими двумя величинами существуют такие соотношения:

$$w_0 = \frac{W \cdot 100}{G_c + W} = \frac{\frac{W}{G_c}100}{1 + \frac{W}{G_c}} = \frac{w \cdot 100}{100 + w}\ [\%]\ , \qquad \text{(IV-4)}$$

и

$$w = \frac{w_0 \cdot 100}{100 - w_0}\ [\%]\ . \qquad \text{(IV-5)}$$

Как видно из приведенных формул, цифровая величина относительной влажности не может быть выше 100%, тогда как абсолютная влажность может быть любой.

Так как знаменатель в формуле относительной влажности в процессе сушки меняется, а в формуле абсолютной влажности остается постоянным, то, для того чтобы ясно представить себе степень высушивания материала, следует пользоваться понятием абсолютной, а не относительной влажности.

Производительность всякого сушильного агрегата характеризуется количеством воды, испаренной в час. Оценка производительности сушилок по количеству высушенного или поступившего влажного материала больше характеризует емкостную, или транспорт-

ную, производительность сушилки и требует дополнительного указания величины перепада влажности материала до и после сушилки.

Количество испаренной влаги может быть определено по разности весов поступившего G_1 *кг/час* и высушенного G_2 *кг/час* материала

$$W = G_1 - G_2 \, [кг/час] , \qquad \text{(IV-6)}$$

или по весу сухого вещества G_c *кг/час* и абсолютной влажности до w_1 (%) и после w_2 (%) сушки

$$W = W_1 - W_2 = \frac{w_1 - w_2}{100} \cdot G_c \, [кг/час] . \qquad \text{(IV-7)}$$

Определяя начальное W_1 *кг/час* и конечное W_2 *кг/час* содержание влаги в материале через относительные влажности w_{0_1} и w_{0_2}, можно найти количество испаренной за час влаги из соотношений:

$$W = W_1 - W_2 = G_1 \frac{w_{0_1}}{100} - G_2 \frac{w_{0_2}}{100} =$$

$$= \left(G_2 + W \right) \frac{w_{0_1}}{100} - G_2 \frac{w_{0_2}}{100} ,$$

откуда

$$W = G_2 \frac{w_{0_1} - w_{0_2}}{100 - w_{0_1}} \, [кг/час] \qquad \text{(IV-8)}$$

и аналогично

$$W = G_1 \frac{w_{0_1} - w_{0_2}}{100 - w_{0_2}} \, [кг/час] . \qquad \text{(IV-9)}$$

Вес сухого вещества определяется так:

$$G_c = G_1 \frac{100}{100 + w_1} = G_2 \frac{100}{100 + w_2} \, [кг/час] , \qquad \text{(IV-10)}$$

$$G_c = G_1 \frac{100 - w_{0_1}}{100} = G_2 \frac{100 - w_{0_2}}{100} \, [кг/час] . \qquad \text{(IV-11)}$$

Количество высушенного материала равно

$$G_2 = G_1 \frac{100 + w_2}{100 + w_1} = \frac{G_c}{100} \left(100 + w_2 \right) [кг/час] , \qquad \text{(IV-12)}$$

$$G_2 = W \frac{100 + w_2}{w_1 - w_2} = W \frac{100 - w_{0_1}}{w_{0_1} - w_{0_2}} \,]кг/час] , \qquad \text{(IV-13)}$$

$$G_2 = G_1 \frac{100 - w_{0_1}}{100 - w_{0_2}} = G_c \frac{100}{100 - w_{0_2}} \, [кг/час] . \qquad \text{(IV-14)}$$

Понятия о влажности материала, связанной с кинетикой сушки, приведены ниже.

4. Свойства влажного воздуха

В большинстве случаев тепловлагоносителем или сушильным агентом при сушке материалов являются воздух и дымовые газы, которые всегда содержат определенное количество водяных паров, т. е. представляют собой газовые смеси. Характеристическими параметрами для влажного газа являются: давление (общее) p, парциальное давление водяного пара $p_п$ и сухого воздуха $p_в$, температура T, удельный объем v, удельный вес γ, влагосодержание d, относительная влажность φ, теплоемкость c и теплосодержание J.

По закону Дальтона, общее давление влажного газа как смеси равно

$$p = p_в + p_п \ [кг/м^2] , \qquad \text{(IV-15)}$$

По уравнению Клапейрона — Менделеева, каждый газ в смеси подчиняется зависимости

$$pV = GRT \text{ или } p = \gamma RT . \qquad \text{(IV-16)}$$

Здесь V и G — общий объем и вес, а R — газовая постоянная для каждого газа, равная $R = \frac{848}{M}$, где M — его молекулярный вес.

В расчетах процессов сушки, поскольку влагоносителем является только сухая часть газовой смеси, все показатели относят к 1 *кг* сухого газа. Например, если на 1 *кг* сухого газа приходится x *кг* водяных паров, то общий вес смеси на 1 *кг* сухого газа составляет $1+x$ *кг*.

Влагосодержанием называется отношение веса влаги в данной смеси к весу сухой части смеси. Таким образом, влагосодержание выражается величиной x *кг/кг*, или $d = 1\,000\ x$ *г/кг*.

В смеси газов объем каждого газа будет равен общему объему смеси V *м*^{3}, а температура — общей температуре смеси $T°$ *K*. Поэтому

$$x = \frac{G_п}{G_в} = \frac{p_п \ V}{R_п \ T} : \frac{p_в V}{R_в T} = \frac{R_в}{R_п} \cdot \frac{p_п}{p_в} . \qquad \text{(IV-17)}$$

Для воздуха и водяного пара отношение

$$R_в : R_п = 29{,}27 : 47{,}1 = 0{,}622 ,$$

таким образом

$$x = 0{,}622 \frac{p_п}{p_в} = 0{,}622 \frac{p_п}{p - p_п} \ [кг/кг];$$

$$d = 622 \frac{p_п}{p - p_п} \ [г/кг] . \qquad \text{(IV-18)}$$

Относительной влажностью газа φ называется отношение данной абсолютной влажности газа $\gamma_п$ *кг/м*^{3} к максимальной $\gamma_н$ *кг/м*^{3}, которая может удерживаться в 1 *м*^{3} газа без

конденсации влаги при данном давлении p и данной температуре t. Величины $\gamma_н$ и $p_н$ (давление насыщения) находят по таблицам сухого насыщенного водяного пара по заданной температуре:

$$\varphi = \frac{\gamma_п}{\gamma_н} \text{ или, очевидно, } \varphi = \frac{p_п}{p_н}. \qquad \text{(IV-19)}$$

Поэтому можно написать

$$d = 622 \frac{\varphi p_н}{p - \varphi p_н} \qquad \text{(IV-20)}$$

и

$$\varphi = \frac{pd}{(622 + d)\, p_н}. \qquad \text{(IV-21)}$$

Удельный вес влажного воздуха можно найти так:

$$\gamma = \gamma_в + \gamma_п = \frac{p_в}{R_в T} + \frac{p_п}{R_п T}.$$

Прибавляя в правую часть уравнения и сейчас же вычитая величину $\frac{p_п}{R_в T}$, получим после сложения первого и второго, а также третьего и четвертого слагаемого и преобразований:

$$\gamma = \frac{p_в}{R_в T} + \frac{p_п}{R_в T} - \frac{p_п}{R_в T} + \frac{p_п}{R_п T} = \frac{p}{R_в T} - 0{,}0129 \frac{\varphi p_н}{T}. \qquad \text{(IV-22)}$$

Откуда видно, что влажный воздух имеет меньший удельный вес, чем сухой воздух при том же общем давлении p.

Удельную теплоемкость газовой смеси также относят к 1 *кг* сухого газа, что для влажного воздуха дает (при $c_в = 0{,}24$ и $c_п = 0{,}47$ *ккал/кг град*)

$$c = 0{,}24 + 0{,}47x = 0{,}24 + 0{,}47 \frac{d}{1\,000} \; [\text{ккал/кг град}]. \qquad \text{(IV-23)}$$

Теплосодержание влажного воздуха, отнесенное к 1 *кг* сухого воздуха (*ккал/кг*):

$$J = 0{,}24t + (595 + 0{,}47t)\, x = 0{,}24t + (595 + 0{,}47t) \frac{d}{1\,000}. \qquad \text{(IV-24)}$$

Здесь первое слагаемое представляет собой теплосодержание 1 *кг* сухого воздуха, а второе — теплосодержание находящегося в смеси с ним перегретого водяного пара при атмосферном давлении и при данной температуре. Водяные пары в газовой смеси перегреты, если ее температура выше температуры «точки росы» $t_р$. При охлаждении смеси до температуры точки росы газ становится сухим насыщенным ($\varphi = 100\%$), при дальнейшем охлаждении смеси начинает конденсироваться влага.

5. Процесс испарения влаги со свободной поверхности

Поверхность жидкости, соприкасающаяся с газовой средой, называется свободной. Между этой поверхностью и газовой средой происходит теплообмен и в результате испарения жидкости влагообмен. Газовая среда воспринимает испаренную влагу с теплосодержанием ее пара. Если, кроме газовой среды как теплоносителя, нет других источников тепла, то, очевидно, все тепло газа, связанное с теплоотдачей на испарение влаги и характеризующееся понижением температуры ограниченного количества окружающего газа, вернется в этот газ в виде теплосодержания паров испаренной жидкости. Так как общее теплосодержание влажного газа при отсутствии потерь остается постоянным $J = \text{const}$, то такой процесс испарения носит название адиабатического. Жидкость при установившемся процессе испарения принимает температуру $t_м$, носящую название температуры мокрого термометра. Это название связано с теорией психрометра. Психрометр, дающий возможность определить относительную влажность воздуха, может быть выполнен в виде двух укрепленных на одной доске термометров, из которых один имеет шарик, одетый в тонкую кисею, свободный конец которой опущен в стаканчик с водой. Вследствие постоянной отдачи термометром тепла с испаряющейся на кисее влагой в окружающую среду «мокрый» термометр покажет температуру $t_м$ более низкую, чем $t_с$, которую показывает сухой термометр, находящийся в тепловом равновесии с окружающей средой.

Разница показаний сухого и мокрого термометров носит название психрометрической разности ε. Эта разность и показание одного из термометров позволяют по табл. приложения I определить относительную влажность воздуха в данный момент. Психрометрическая разность $\varepsilon = t_с - t_м$ является важнейшей величиной во всех сушильных расчетах.

Чем больше ε, тем, при прочих равных условиях, интенсивнее идет процесс испарения влаги со свободной поверхности. Когда $\varepsilon = 0$, испарение прекращается.

Интенсивность испарения m *кг/м² час* определяется количеством воды W *кг*, испаряемой за определенное время τ час. со свободной поверхности жидкости F *м²*:

$$m = \frac{W}{F\tau}\,[кг/м^2час]\,. \qquad \text{(IV-25)}$$

Согласно правилу Дальтона, интенсивность испарения будет тем больше, чем больше разность парциальных давлений пара над свободной поверхностью $p_н$ и в окружающей среде $p_п$, чем меньше барометрическое давление B и чем больше скорость газа v *м/сек*:

$$m = C\left(p_н - p_п\right)\frac{760}{B}\,[кг/м^2час]. \qquad \text{(IV-26)}$$

Коэффициент C, уточненный опытами ВТИ, равен:

$$C = 0{,}0229 + 0{,}0174v \left[кг/м^2\ мм \text{ рт.ст.}\right], \qquad \text{(IV-27)}$$

где B, $p_н$ и $p_п$ выражены в *мм* рт. ст.

По А. В. Лыкову интенсивность испарения:

$$m = A\psi \frac{p_н - p_п}{L} \cdot \frac{760}{B} [кг/м^2час], \qquad \text{(IV-28)}$$

где A — безразмерная скорость испарения, являющаяся функцией критерия Рейнольдса и равная:

$$A = \varphi(\mathrm{Re}); \qquad \mathrm{Re} = v\gamma \frac{L}{\mu g}, \qquad \text{(IV-29)}$$

где L — длина поверхности вдоль воздушного потока в *м*.

По экспериментальным данным:

$$A = 0{,}5\mathrm{Re}^{0{,}58} \text{ при } \mathrm{Re} = 200 - 20\,000,$$

$$A = 0{,}85\mathrm{Re}^{0{,}76} \text{при } \mathrm{Re} = 20\,000 - 200\,000.$$

Величина ψ для водяного пара при коэффициенте диффузии $D_0 = 0{,}0792$ *м²/час* может быть принята равной:

$$\psi = 0{,}307 \cdot 10^{-6} T_{пс}, \qquad \text{(IV-30)}$$

$$T_{п.с} = 0{,}5 (T_м + T_с) \text{ [град.К]}. \qquad \text{(IV-31)}$$

Здесь $T_{п.с}$, $T_м$ и $T_с$ — соответственно температуры пограничного слоя, поверхности жидкости и окружающего воздуха в ° К.

Наряду с рассмотрением процесса испарения как диффузионного необходимо рассмотреть его и с точки зрения теплообмена. Если приравнять количество тепла, отданное газом жидкости за счет теплоотдачи, к количеству тепла, воспринятого испарившейся жидкостью, то можно написать уравнение

$$Q = \alpha F (t_с - t_м) \tau = Wr \left[ккал\right], \qquad \text{(IV-32)}$$

где α — коэффициент теплоотдачи от газа к поверхности жидкости в *ккал/м² час град* [см., например, формулу (II-87)];
r — скрытая теплота испарения при температуре поверхности $t_м$ в *ккал/кг*.

Отсюда интенсивность испарения равна

$$m = \frac{W}{F\tau} = C\left(p_н - p_п\right)\frac{760}{B} = \frac{\alpha}{r}\left(t_с - t_м\right)[кг/м^2час]. \qquad \text{(IV-33)}$$

6. Материальный и тепловой балансы сушилки

Схема сушильной установки (рис. 55) состоит из рабочей или сушильной камеры *1*, где происходит высушивание материала, калориферов *2*, где производится подогрев сушильного агента, и тягодутьевых устройств *3*, служащих для подачи нагретого агента в сушильную камеру и удаления его после увлажнения в атмосферу. Во внешнем калорифере сообщается количество тепла — Q, и дополнительно в самой сушильной камере — $Q_{доб}$ *ккал/час*. В су-

шильной камере имеют место потери тепла, отличающие ее от идеальной сушилки, — $Q_{пот}$. Материал входит в сушильную камеру с влажностью w_1 %, в количестве по весу G_1 *кг/час* и выходит с меньшей влажностью w_2 % и весом $G_2 = G_1 - W$, где W *кг/час* — количество испаренной за час влаги. Сушильный агент по состоянию в точке A перед калорифером характеризуется параметрами: t_0 град, φ_0%; d_0 *г/кг*, J_0 *ккал/кг*, из которых только два независимых, а остальные два определяются, как это показано выше, по двум заданным. После калорифера (точка B) состояние сушильного агента характеризуется более высокими температурой t_1 и теплосо-

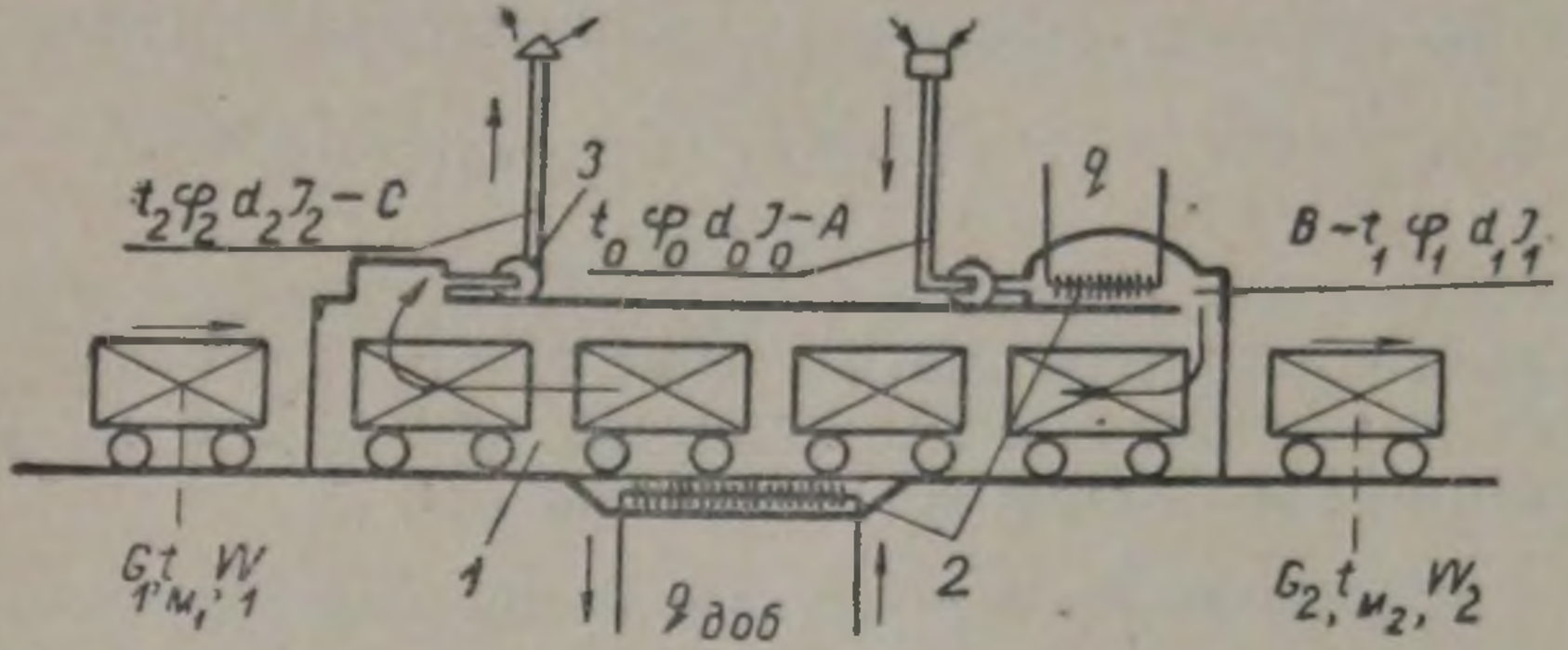


Рис. 55. Схема сушильной установки

1 — сушильная камера; *2* — калориферы

держанием J_1, меньшей относительной влажностью φ_1 и тем же влагосодержанием $d_1 = d_0 = \text{const}$. Если сушилка идеальная или $Q_{доб} = Q_{пот}$, то процесс испарения идет как адиабатический при $J_2 = J_1 = \text{const}$. Температура сушильного агента по выходе из сушильной камеры (точка C) меньше, чем при входе, т. е. $t_2 < t_1$, но влагосодержание выше начального $d_2 > d_1$, больше и относительная влажность $\varphi_2 > \varphi_1$, как за счет увеличения влагосодержания, так и за счет падения температуры.

Количество сухого агента L *кг/час* постоянно для всех характерных точек A, B и C, вес же влажной смеси L_2 больше веса поступившей смеси L_1 на количество испаренной влаги W.

Соответственно этому могут быть написаны уравнения материального баланса

$$W = W_1 - W_2 = L_1 - L_2 = \frac{w_1 - w_2}{100} \cdot G_c = \frac{d_2 - d_1}{1\,000} L, \quad \text{(IV-34)}$$

откуда потребное количество сухого воздуха на *кг* испаренной влаги

$$\frac{L}{W} = l = \frac{1\,000}{d_2 - d_1} [кг \text{ сухого воздуха}/кг \text{ влаги}]. \quad \text{(IV-35)}$$

Теоретическая сушилка не имеет потерь тепла. Принимается также, что она работает при температуре испарения воды $t_м = 0°C$. Тогда в приходе теплового баланса сушилки будет тепло, при-

несенное воздухом в калорифер, LJ_0 и тепло, сообщенное ему в калорифере, Q. В расходной части — тепло воздуха LJ_2 или LJ_1, поскольку в адиабатическом процессе $J_1 = J_2 = \text{const}$.

Уравнение теплового баланса теоретической сушилки поэтому может быть написано так:

$$LJ_0 + Q = LJ_2 = LJ_1. \qquad \text{(IV-36)}$$

Отсюда

$$Q = L(J_2 - J_0) - L(J_1 - J_0) \ [ккал/час]. \qquad \text{(IV-37)}$$

После деления обеих частей уравнения на W, получим расход тепла в теоретическом процессе на 1 *кг* испаренной влаги

$$q = \frac{Q}{W} = l\left(J_2 - J_0\right) = l\left(J_1 - J_0\right)[ккал/кг]. \qquad \text{(IV-38)}$$

В действительном процессе испарение происходит обычно при температуре мокрого термометра выше нуля: $t_м = \text{const} > 0$ град. Поэтому J_2 в адиабатическом процессе при $t_м > 0$ не равно J_1, а выше его на теплосодержание воды при $t_м$:

$$J_2 = J_1 + \frac{t_м}{l} \cdot c_{вод} \ [ккал/кг \text{ сухого воздуха}] . \qquad \text{(IV-39)}$$

Если же задано J_2, то начальное теплосодержание в этом случае и при $c_{вод} = 1$ будет найдено по формуле

$$J_1 = J_2 - \frac{t_м}{l} = J_2 - t_м \frac{d_м - d}{1\,000} [ккал/кг \text{ сухого воздуха}] , \qquad \text{(IV-40)}$$

где $d_м$ — влагосодержание воздуха при $\varphi = 100\%$ и температуре $t_м$ в *г/кг*;
d — влагосодержание при температуре окружающей среды $t_с$ и данной относительной влажности φ, *г/кг*.

$$\text{При } d=0, \ J_1 = J_2 - t_м \frac{d_м}{1\,000} [ккал/кг \text{ сухого воздуха}]. \qquad \text{(IV-41)}$$

Тепловой баланс действительного процесса учитывает отличие его от адиабатического за счет дополнительного прихода тепла и суммы потерь.

Так как определяющей расчетной величиной во всякой сушке является часовое количество испаренной влаги, то статьи баланса выражаются в *ккал/час*, в *ккал/кг* испаренной влаги и в процентах.

Прежде всего составляется материальный баланс и определяется количество испаренной влаги. Статьи прихода тепла по-прежнему обозначаются римской цифрой I с порядковым индексом каждой статьи. Статьи расхода цифрой II с соответствующим индексом. В приходную часть баланса тепла могут входить следующие статьи (взятые из расчета в *ккал* на 1 *кг* испаренной влаги при часовом количестве испаренной влаги W *кг/час*):

I_1 — тепло газов или воздуха из первичного источника (калорифер, топка):

$$q_1 = l_1 J_1 . \qquad \text{(IV-42)}$$

I_2 — тепло газов из вторичного источника (возврат отработавших газов, присадки воздуха и присосы)

$$q_2 = l_р J_2 \text{ или } l_{пр} J_0. \qquad \text{(IV-43)}$$

I_3 — тепло, добавочно сообщенное в сушильной камере:

$$q_{доб} = \frac{Q_{доб}}{W} . \qquad \text{(IV-44)}$$

I_4 — тепло, принесенное с влагой материала при его начальной температуре $t_{м_1}$:

$$q_{вл} = c_в t_{м_1} \approx t_{м_1} . \qquad \text{(IV-45)}$$

I_5 — тепло, принесенное сухой частью материала:

$$q_{м_1} = \frac{G_с \; c_{м_1} t_{м_1}}{W} . \qquad \text{(IV-46)}$$

I_6 — тепло, принесенное с часовым количеством транспорта $G_{тр}$, *кг/час*:

$$q_{тр_1} = \frac{G_{тр} \, c_{тр_1} t_{тр_1}}{W} . \qquad \text{(IV-47)}$$

I_7 — тепло, содержащееся в конструкциях ограждения периодически работающей сушилки к началу расчетного периода:

$$q_{акк_1} = \frac{G_к c_{к_1} t_{к_1}}{W\tau} . \qquad \text{(IV-48)}$$

В статье I_7 тепло ограждений отнесено ко всему количеству испаренной влаги за период работы сушилки τ час.

Общее количество тепла на 1 *кг* испаренной влаги, принесенное с газами, будет $q_1 + q_2 = q$; количество газов соответственно $l_1 + l_р = l$, а теплосодержание $J_1 = \frac{q}{l}$.

В расходную часть теплового баланса входят следующие статьи:

II_1 — тепло отработавших газов, выбрасываемых из сушилки:

$$q_{выб} = l_{выб} J_2 . \qquad \text{(IV-49)}$$

II_2 — тепло отработавших газов, возвращаемых для смеси со свежими:

$$q_р = l_р J_2 . \qquad \text{(IV-50)}$$

II_3 — тепло материала, выходящего из сушилки при температуре $t_{м_2}$:

$$q_{м_2} = \frac{G_{м_2} c_{м_2} t_{м_2}}{W} . \qquad \text{(IV-51)}$$

II_4 — тепло транспорта при температуре выхода его из сушилки $t_{тр_2}$:

$$q_{тр_2} = \frac{G_{тр} c_{тр_2} t_{тр_2}}{W}. \qquad \text{(IV-52)}$$

II_5 — тепло на прогрев конструкций ограждения периодически работающей сушилки до средней температуры $t_{к_2}$

$$q_{акк_2} = \frac{G_к c_{к_2} t_{к_2}}{W\tau}. \qquad \text{(IV-53)}$$

II_6 — тепло потерь в окружающую среду

$$q_{о.с} = \frac{\Sigma F_i k_i \Delta t_i}{W}. \qquad \text{(IV-54)}$$

Здесь k_i — коэффициент теплопередачи отдельных участков ограждения, определяемый согласно формуле II-95.

$II_7 — q_н$ — потери тепла с выходящим через неплотности ограждений сушильным агентом и другие неучтенные потери. Они принимаются в размере 5—10% от суммы всех предыдущих потерь.

Если влажный материал поступает в сушилку при температуре ниже нуля, то, помимо тепла на нагрев воды, требуется затратить тепло $q_л$ на нагрев содержащихся в материале воды и льда от отрицательной температуры до нуля и на расплавление льда. Теплота плавления льда равна 80 *ккал/кг*.

Приравнивая сумму по статьям прихода к сумме по статьям расхода тепла, можно получить уравнение теплового баланса действительного процесса сушки и определить одну из неизвестных или соотношение двух неизвестных величин. Если из величин статей расхода ($q_{м_2}$, $q_{тр_2}$ и т. д.) предварительно вычесть величины аналогичных статей прихода ($q_{м_1}$, $q_{тр_1}$ и т. д.), то получим расходы $q_м$, $q_{тр}$ и т. д. на нагрев не от 0°, а от соответствующей начальной температуры материала, транспортных устройств и т. д. Учитывая, что начальное теплосодержание окружающего воздуха было (точка A) J_0, можно написать уравнение теплового баланса сушки следующим образом:

$$l(J_1 - J_0) + q_{доб} + t_{м_1} = l(J_2 - J_0) + q_м + q_{тр} + q_{акк} + q_{о.с} + q_н + q_л \qquad \text{(IV-55)}$$

или

$$l(J_2 - J_1) = q_{доб} + t_{м_1} - \Sigma q_{пот} = \Delta\ [ккал/кг \text{ испаренной влаги}]. \qquad \text{(IV-56)}$$

Здесь под $\Sigma q_{пот}$ подразумевается сумма всех потерь, а под Δ — важнейшая расчетная величина, показывающая превышение дополнительного прихода тепла над суммой потерь.

После деления обеих частей уравнения на l получается

$$J_2 - J_1 = \frac{\Delta}{l}\ [ккал/кг \text{ сухого воздуха}]. \qquad \text{(IV-57)}$$

Здесь указанное тепловое превышение отнесено уже не к 1 *кг* испаренной влаги, как Δ, а к 1 *кг* сухого газа.

Если $\Delta = 0$, то $J_2 = J_1$, и действительный процесс сушки по своим конечным результатам аналогичен адиабатическому. При $\Delta \gtrless 0$ $J_2 \gtrless J_1$.

В аналитическом расчете сушилки можно при помощи ранее приведенных соотношений сделать все необходимые вычисления статей теплового баланса, однако просто и наглядно расчеты процесса сушки выполняются графически по *Jd*-диаграмме влажного воздуха, которая получила поэтому широкое применение в сушильной практике.

7. *Jd*-диаграмма влажного воздуха

Jd-диаграмма построена и предложена для расчетов сушки в 1918 г. Л. К. Рамзиным.

Jd-диаграмма (рис. 56) построена в координатах *d г/кг* и *J ккал/кг*. Для удобства рассмотрения процессов координатная ось *d* в начальном построении направлена к координатной оси *J* под углом 135°, а не под 90°, поэтому линии $J = \text{const}$ идут под этим углом к оси *J*. Линии $d = \text{const}$ расположены вертикально. Так как каждые два параметра влажного воздуха определяют все остальные, то на *Jd*-диаграмме можно нанести изотермы $t = \text{const}$. Как видно из формулы (IV-24), изотермы представляются в виде прямых, несколько поднимающихся с увеличением *d* и тем круче, чем больше *t*. Кривые относительной влажности $\varphi = \text{const}$ строятся [см. формулу (IV-21)] по соотношению

$$\varphi = \frac{Bd}{(622 + d)\, p_н} = \frac{745d}{(622 + d)\, p_н}. \qquad \text{(IV-58)}$$

Здесь B — барометрическое давление, принятое равным 745 *мм* рт. ст. для центральной части СССР;
$p_н$ — берется по таблицам насыщенного пара для выбираемых *t*.

Выше 99,4° кривые $\varphi = \text{const}$ уходят вверх вертикально по $d = \text{const}$, как это и следует из формулы (IV-58). Действительно при высоких температурах и при атмосферном давлении $p_н$ не может быть выше *B* и становится постоянной равной *B*. *Jd*-диаграмма строится для разных пределов температур. Иногда на *Jd*-диаграмме даются шкала парциальных давлений пара, связанная с точками диаграммы кривой *OR*, и шкала на полях диаграммы, позволяющая по наклону линии процесса *AC* (см. ниже) найти теоретический расход тепла *q ккал/кг* испаренной влаги. *Jd*-диаграмма позволяет решить графически следующие задачи.

1. По любым двум заданным параметрам для каждой точки состояния влажного воздуха (например, *d* и φ) определить остальные параметры (*t*, *J*).

2. Графически изобразить прямой *AB* при $d = \text{const}$ процесс подогрева воздуха в калорифере. Зная положение точки *A*, можно

по заданной t_1 точки B определить два ее остальных параметра φ_1 и J_1.

3. Прямая BC при $J = \text{const}$ изображает адиабатический процесс испарения влаги. Зная один из параметров точки C, можно найти остальные, проведя линию $J = \text{const}$ из точки B.

4. Прямая AC своим направлением показывает теоретический расход тепла q *ккал/кг* испаренной влаги.

5. Точку росы $t_р = t_м$ для любого состояния воздуха находят следующим образом: из заданной точки (C) проводят вертикальную прямую (CS) до пересечения с $\varphi = 100\%$. Проходящая через точку пересечения (S) изотерма даст значение точки росы $t_р$.

6. Парциальное давление паров во влажном воздухе для любой точки определится, если вертикальную прямую (CS) продолжить до пересечения с линией OR (точка Q) и прочесть справа на шкале значение парциального давления.

7. Расход сухого воздуха на 1 *кг* испаренной влаги для процесса типа ABC графически можно найти так:

$$l = \frac{1\,000}{d_2 - d_1} = \frac{1\,000}{DCM_d}\ [кг/кг], \qquad \text{(IV-59)}$$

где DC — в масштабе влагосодержания разность $d_2 - d_1$ в *мм*;
M_d — масштаб влагосодержания данной диаграммы в *г/кг мм*.

Для низкотемпературной Jd-диаграммы $M_d = 0{,}2$ *г/кг мм*, поэтому для нее:

$$l = \frac{1\,000}{DC \cdot 0{,}2} = \frac{5\,000}{DC}. \qquad \text{(IV-60)}$$

8. Соответственно расход тепла на 1 *кг* испаренной влаги (при $t_{м_1} = 0$)

$$q = l\left(J_1 - J_0\right) = \frac{1\,000}{DCM_d} \cdot ABMJ =$$

$$= \frac{1\,000\,MJ}{M_d} \cdot \frac{AB}{CD} = m\,\frac{AB}{CD}\ [ккал/кг]. \qquad \text{(IV-61)}$$

Здесь MJ — масштаб теплосодержания данной диаграммы в *ккал/кг мм*, например $MJ = 0{,}1$ *ккал/кг мм*,
m — приведенный масштаб диаграммы, равный для частного случая:

$$m = \frac{1\,000 \cdot 0.1}{0{,}2} = 500\ [ккал/кг].$$

Если $t_{м_1} > 0$, то

$$q = m\,\frac{AB}{CD} - t_{м_1}\ [ккал/кг]. \qquad \text{(IV-62)}$$

9. Направление практического процесса испарения при наличии тепловых потерь ($\Sigma q_{пот}$) и добавочного тепла ($q_{доб} + t_{м_1}$) будет характеризоваться на Jd-диаграмме тем, что прямая, изображающая

процесс испарения, из точки B пойдет не в точку C, а в точку C', отличающуюся от точки C теплосодержанием $\frac{\Delta}{l}$:

$$J_2 = J_1 + \frac{\Delta}{l} \quad \text{или} \quad J_{C'} = J_C + \frac{\Delta}{l}. \tag{IV-63}$$

Если $\Delta > 0$, то точка C' расположится выше точки C, если же тепловые потери, как это бывает в большинстве случаев, превосходят добавочное тепло и $\Delta < 0$, то точка C' окажется ниже точки C и прямая действительного процесса BC' пройдет ниже теоретической прямой BC при $J_1 = \text{const}$.

Практически конец процесса устанавливается не точкой C', а точкой C_2, характеризующейся заданными конечными φ_2 или t_2.

Чтобы не откладывать от точки C величину $CC' = \frac{\Delta}{l, M_J}$ *мм*, определяют направление действительного процесса так: на вертикали точки B берут произвольную точку f и проводят горизонталь fe до пересечения с линией теоретического процесса BC. Из точки e проводят вертикальный отрезок eE и через конец его E прямую BE, которая и показывает направление действительного процесса BC'.

Отрезок eE определяется из подобия треугольников:

$$eE : fe = CC' : DC = \frac{\Delta}{eM_J} : DC = \frac{\Delta DCM_d}{1\,000 M_J DC} = \frac{\Delta}{m}$$

$$\text{и} \quad eE = fe\frac{\Delta}{m}. \tag{IV-64}$$

Расчет действительных расходов воздуха l и тепла q на 1 *кг* испаренной влаги делается с подстановкой в формулы (IV-59) и (IV-62) вместо CD величины C_2D_2.

10. Процесс смешения двух количеств воздуха при разных состояниях, характеризуемых точками x и y, определяется прямой xy. Результат смешения и положение точки смеси z по влагосодержанию d_z на прямой xy зависит от того, в каких соотношениях смешивались эти два количества L_x и L_y и от их исходных влагосодержаний d_x и d_y.

$$L_x d_x + L_y d_y = (L_x + L_y) d_z, \tag{IV-65}$$

откуда

$$d_z = \frac{L_x d_x + L_y d_y}{L_x + L_y} = \frac{d_x + n d_y}{1 + n}, \tag{IV-66}$$

где

$$n = \frac{L_y}{L_x}. \tag{IV-67}$$

В свою очередь

$$n = \frac{d_z - d_x}{d_y - d_z}. \qquad \text{(IV-68)}$$

Jd-диаграмма позволяет решать и целый ряд других задач сушильного процесса наглядным графическим методом.

8. Варианты сушильного процесса

Сушка дымовыми газами. Дымовые газы широко применяются для сушки песка, глины и других материалов, а также для сушки недекоративных строительных изделий. Дымовые газы являются эффективным сушильным агентом, так как могут иметь любую начальную температуру. Получение газов не требует затраты металла на калориферы, кроме того могут быть использованы газы, отработавшие после печей, двигателей внутреннего сгорания, т. е. сушка может производиться без дополнительной затраты топлива. Недостатком дымовых газов как сушильного агента является их загрязненность золой, а иногда и догорающей сажей. Кроме того, газы, содержащие CO, CO_2 и SO_2, вызывают коррозию металлических частей сушилки, ее транспортных устройств и при выбивании из сушилки отравляют атмосферу помещения цеха.

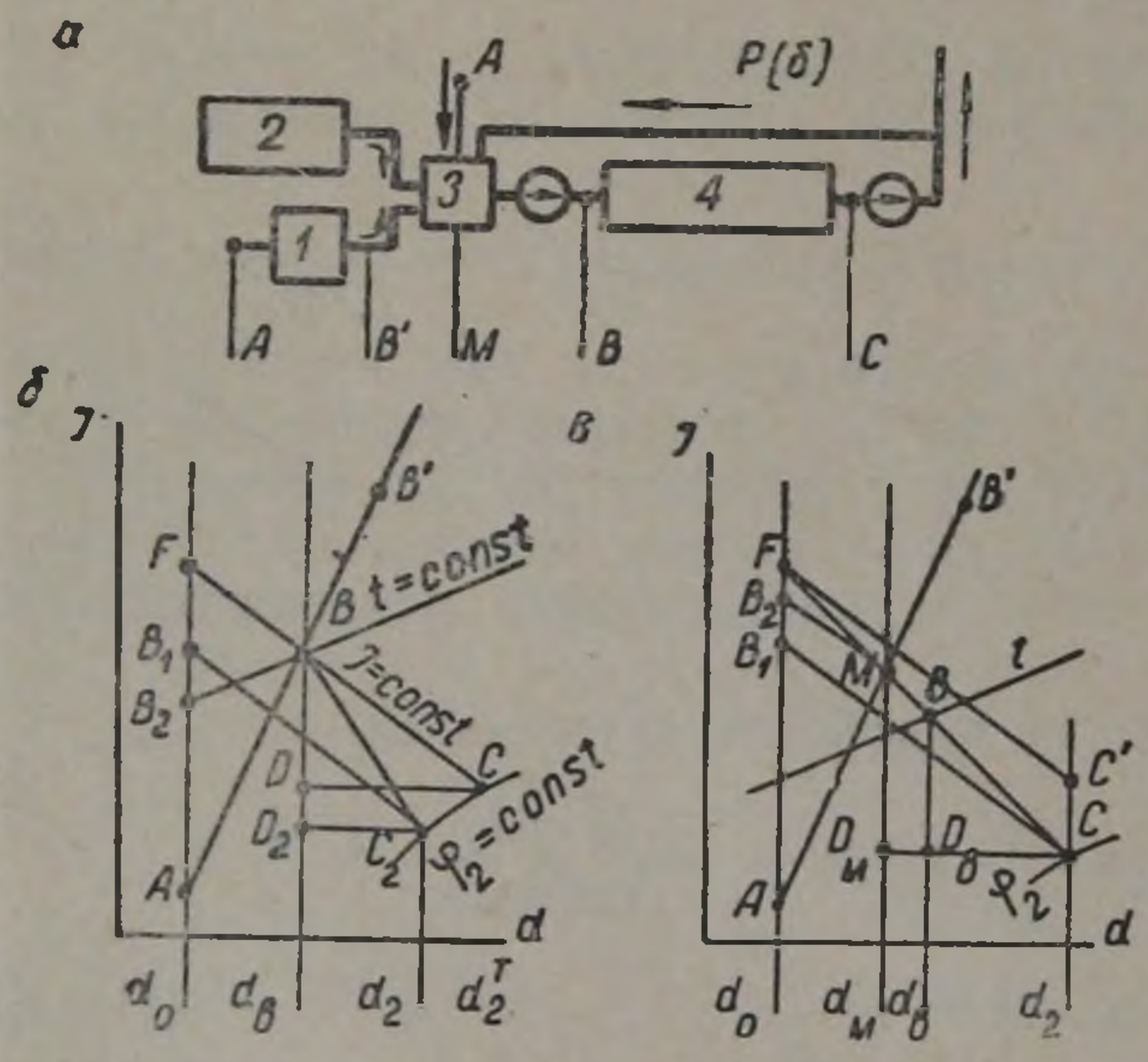


Рис. 57. Сушка дымовыми газами

а — схема сушилки; *б* — процесс сушки дымовыми газами без рециркуляции; *в* — процесс сушки дымовыми газами с рециркуляцией

Схема сушки дымовыми газами в общем виде представлена на рис. 57,*а*. Дымовые газы выходят из специальной топки *1* или источника отработавших газов *2* и направляются в камеру смешения *3*, куда может быть добавлен воздух из атмосферы *A* для понижения температуры газа перед сушилкой *4* за счет увеличения избытка воздуха с $\alpha_т$ до α. Из камеры смешения газовая смесь направляется вентилятором в сушилку. Избыток воздуха α, обеспечивающий требуемую температуру газов перед сушилкой (точка *B*), может быть определен из теплового баланса смешения газов и воздуха. В расчет вводится высшая теплота сгорания $Q_в^р$, так как теплосодержание пара, полученного при сгорании топлива, участвует в балансе.

Уравнение теплового баланса с искомым избытком α:

$$Q_в^р \eta_т + c_т t_т + \alpha L^0 J_0 + W_{пд}\, i_{пд} =$$

$$= \left[1 - \frac{8{,}94H^р + W^р + A^р}{100} + \alpha L^0\right] c_{сг}\, t_г +$$

$$+ \left[W_{пд} + \frac{8{,}94H^р + W^р}{100} + \frac{\alpha L^0 d_0}{1\,000} \right] i_п, \qquad \text{(IV-69)}$$

откуда можно найти избыток воздуха

$$\alpha = \frac{Q_в^р \eta_т + c_т t_т + W_{пд}(i_{пд} - i_п) -}{L^0 \left(c_{сг} t_г + \frac{i_п d_0}{1\,000} - J_0\right)}$$

$$- \frac{-\left[1 - \frac{8{,}94H^р + W^р + A^р}{100}\right] c_{сг} t_г - \frac{8{,}94H^р + W^р}{100} \cdot i_п}{L^0 \left(c_{сг} t_г + \frac{i_п d_0}{1\,000} - J_0\right)}. \qquad \text{(IV-70)}$$

Здесь все обозначения аналогичны таковым первого раздела.
$i_п$ — теплосодержание паров в газовой смеси в *ккал/кг*.

Влагосодержание смеси воздуха и газов после камеры смешения (точка B).

$$d_в = \frac{W_{пд} + \frac{8{,}94H^р + W^р}{100} + \frac{\alpha L^0 d_0}{1\,000}}{1 - \frac{8{,}94H^р + W^р + A^р}{100} + \alpha L^0} \cdot 1\,000\ [г/кг]. \qquad \text{(IV-71)}$$

Теплосодержание в точке B

$$J_в = \frac{Q_р^в \eta_т + c_т t_т + \alpha L^0 J_0 + W_{пд} i_{пд}}{1 + \alpha L^0 - \frac{8{,}94H^р + W^р + A^р}{100}}\ [ккал/кг]. \qquad \text{(IV-72)}$$

Здесь вместо линии подогрева имеется линия смешения AB'.

Точка B' представляет собой состояние газов по выходе из топки при избытке воздуха $\alpha_т$. Так как продукты сгорания имеют более высокое влагосодержание по сравнению с воздухом, то линия AB' наклонена вправо от вертикали $d_0 = \text{const}$.

Теоретический процесс сушки смесью дымовых газов и воздуха представлен линией BC, практический — BC_2. Оба продолжаются до заданной φ_2.

Расход газов из камеры смешения на 1 *кг* испаренной влаги определяется по формуле

$$l = \frac{1\,000}{C_2 D_2 M_d}\ [кг/кг], \qquad \text{(IV-73)}$$

а расход тепла на 1 *кг* испаренной влаги

$$q = m \frac{AB_1}{C_2 D_2} + \Sigma q_{пот} - t_{м_1}\ [ккал/кг]. \qquad \text{(IV-74)}$$

Сушка дымовыми газами с рециркуляцией. В камеру смешения *3* (рис. 57,*а*) могут быть частично возвращены отработавшие, выходящие из сушилки газы. С этой целью устраивается рециркуляционный канал *Р*. Преимущества сушки с рециркуляцией отработавших газов заключаются в больших скоростях газов в сушилке, что улучшает равномерность и ускоряет процесс сушки; в смягчении режима сушки, так как газы при входе в сушилку имеют большее влагосодержание и меньшую температуру. Однако затраты энергии на вентиляторы здесь несколько больше. Сушилки, работающие по этому варианту, используются при сушке гипсовых и керамических блоков, теплоизоляционных изделий и в ряде других случаев.

Процесс сушки с рециркуляцией отработавших газов в *Jd*-диаграмме строится следующим образом (рис. 57,*в*).

1. Принимаются точки *A* и *C* начала и конца действительного процесса.

2. От точки *C* по вертикали откладывается величина $CC' = \frac{\Delta}{lM_J}$ при отрицательном его значении вверх, при положительном — вниз.

3. Из точки *C'* проводится $J = \text{const}$ до пересечения с вертикалью, идущей через *A*, в точке *F*.

4. То же из точки *C* до пересечения в точке B_1.

5. Точки *F* и *C* соединяются прямой.

6. На *Jd*-диаграмму наносится точка *B'* по состоянию дымовых газов при выходе их из топки или печи.

7. Точки *B'* и *A* соединяются прямой.

8. Состояние смеси свежих дымовых газов и атмосферного воздуха в камере смешения определяется точкой *M* пересечения прямых *AB'* и *FC*.

9. Проводится изотерма заданной температуры *t* газовой смеси перед входом в сушилку после смешения: газов из камеры смешения *M* и газов, возвращенных после сушилки *C*.

10. Пересечение прямых *FC* и $t = \text{const}$ дает точку *B* — состояние готовой смеси газов перед входом в сушилку.

Расчетное количество газов из камеры смешения по состоянию в точке *M* на 1 *кг* испаренной влаги:

$$l_M = \frac{1\,000}{CD_M M_d} = \frac{1\,000}{d_2 - d_M}\ [кг/кг]\ . \qquad \text{(IV-75)}$$

Количество циркулирующих через сушилку газов по состоянию в точке *B*:

$$l_B = \frac{1\,000}{CD_B M_d} = \frac{1\,000}{d_2 - d_B}\ [кг/кг]\ . \qquad \text{(IV-76)}$$

Количество возвращенных отработавших газов по состоянию в точке *C*:

$$l_р = l_B - l_M = \frac{1\,000}{d_2 - d_B} \cdot \frac{d_B - d_M}{d_2 - d_M}\ \left[кг/кг\right]\ . \qquad \text{(IV-77)}$$

Практический расход тепла на 1 *кг* испаренной влаги

$$q = m\frac{AB_1}{CD_M} + \Sigma q_{\text{пот}} - t_{M_1} \quad [ккал/кг]. \qquad \text{(IV-78)}$$

Jd-диаграмма позволяет графически найти соотношения компонентов смеси. Так, например, отношение в смеси (точка M) газов $l_{B'}$ по состоянию в точке B' и воздуха l_A (точка A) получается как отношение отрезков

$$n'_B = \frac{l_{B'}}{l_A} = \frac{AM}{MB'} = \frac{d_M - d_0}{d'_B - d_M}. \qquad \text{(IV-79)}$$

Отношение в смеси (точка B) количеств влажных рециркулирующих газов по состоянию в точке C, $l_р$ и сухих по состоянию в точке M l_M получается как отношение отрезков

$$n_c = \frac{l_р}{l_M} = \frac{D_B D_M}{CD_B} = \frac{d_B - d_M}{d_2 - d_B}. \qquad \text{(IV-80)}$$

Если найдено общее количество смеси из газов (B') и воздуха (A) l_M *кг/кг*, то по соотношению (IV-80) нетрудно найти и $l_{B'}$ и l_A, так как

$$l_M = l_{B'} + l_A = l_A\left(n_{B'} + 1\right); \qquad \text{(IV-81)}$$

$$l_A = \frac{l_M}{n_{B'} + 1} \text{ и } l_{B'} = \frac{n_{B'}}{n_{B'} + 1} \cdot l_M. \qquad \text{(IV-82)}$$

На дымовых газах с рециркуляцией работают также двухзонные и многозонные сушилки, в каждой зоне которых может быть создан свой режим, наиболее отвечающий требованиям наивыгоднейшей постадийной сушки изделий.

Сушка с подогревом в сушильной камере. Из-за опасения перегреть высушиваемый материал впуском в сушильную камеру теплоносителя с высокой начальной температурой, обусловленной положением точки B на *Jd*-диаграмме (рис. 58), подают в сушилку *2* агент с пониженной в соответствии с положением точек B_1, B_2 и т. д. начальной температурой (t_1, t_2 и т. д.), а недостающее количество тепла $q_{\text{доб}}$ добавляют непосредственно в сушильной камере, от установленных в ней приборов отопления.

Общая затрата тепла на 1 *кг* испаренной влаги по-прежнему останется той же, соответствующей отрезку AB на *Jd*-диаграмме, но количество тепла, соответствующее отрезку BB_1, будет сообщено непосредственно в сушильной камере и только количество тепла соответственно отрезку AB_1 будет принесено в сушильную камеру из калорифера *1* или другого внешнего источника. Во внешнем подогревателе воздуху будет передано тепла

$$q_{\text{под}} = m\frac{AB_1}{CD} \,|ккал/кг|. \qquad \text{(IV-83)}$$

В самой камере дополнительно

$$q_{доб} = m\frac{B_1 B}{CD} + \Sigma q_{пот} - t_{м_1}\ [ккал/кг]. \qquad \text{(IV-84)}$$

По этому же варианту внешнего источника тепла может не быть совсем. Тогда все тепло сообщается приборами отопления в самой сушилке и весь процесс сушки идет при невысоких температурах, близких к температуре конечной точки C.

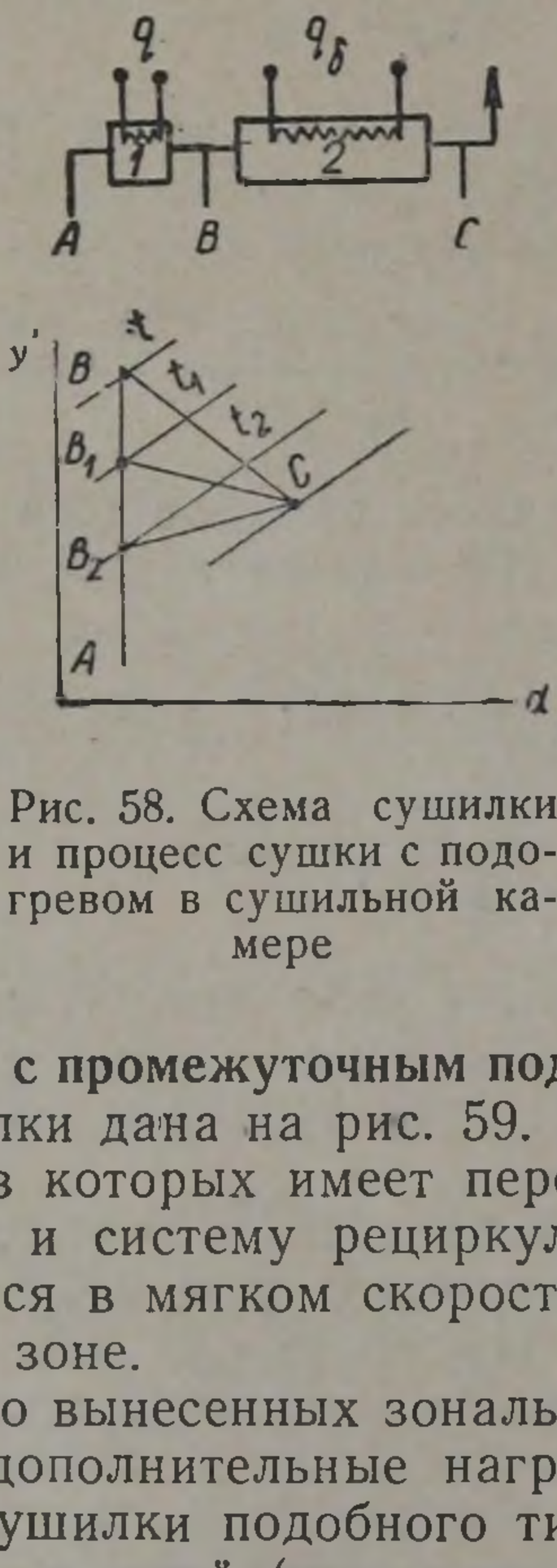


Рис. 58. Схема сушилки и процесс сушки с подогревом в сушильной камере

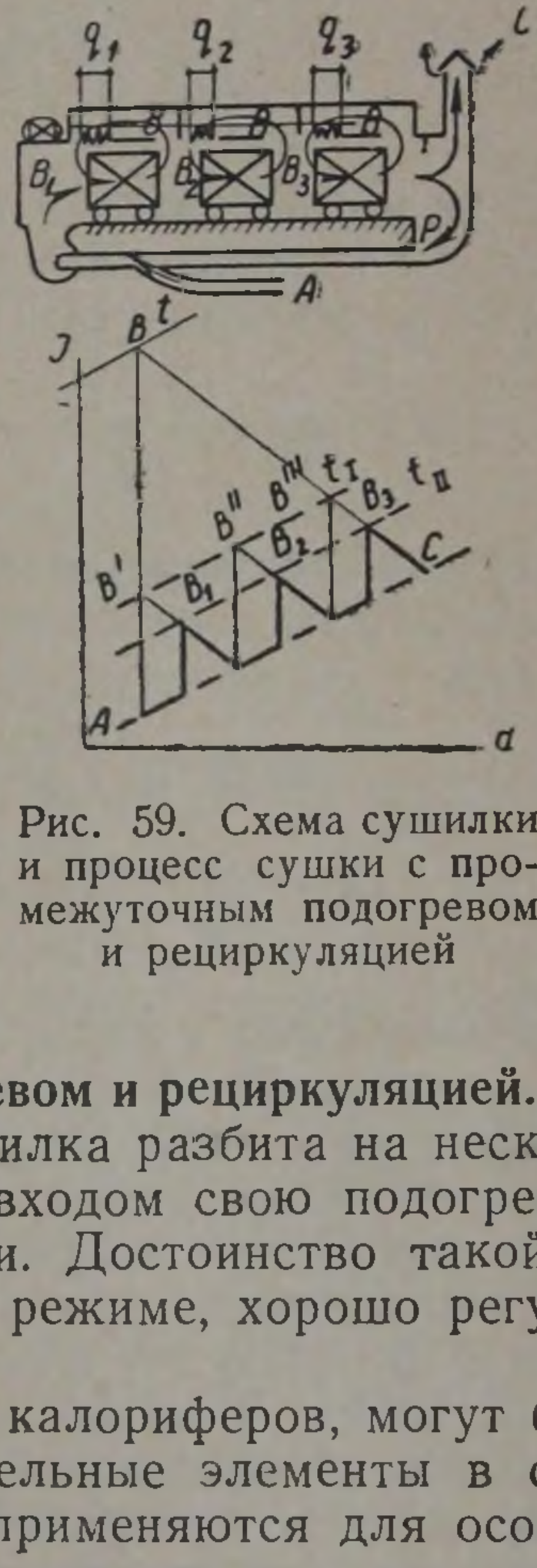


Рис. 59. Схема сушилки и процесс сушки с промежуточным подогревом и рециркуляцией

Сушка с промежуточным подогревом и рециркуляцией. Схема такой сушилки дана на рис. 59. Сушилка разбита на несколько зон, каждая из которых имеет перед входом свою подогревательную установку и систему рециркуляции. Достоинство такой сушилки заключается в мягком скоростном режиме, хорошо регулируемом в каждой зоне.

Помимо вынесенных зональных калориферов, могут быть установлены дополнительные нагревательные элементы в сушильной камере. Сушилки подобного типа применяются для особо чувствительных изделий (сухая гипсовая штукатурка, тонкая керамика и т. д).

9. Характерные периоды процесса сушки

Сушка материалов имеет по времени характерные периоды, что может быть разъяснено графиком, представленным на рис. 60. Материал с начальной влажностью w_1 и температурой t_1 вносится в относительно сухую газовую среду с постоянной температурой t_c. В период предварительного прогрева температура его повышается так, что температура поверхности становится равной $t_{п_1}$. Влажность к концу прогрева снижается незначительно. Скорость

испарения растет до некоторой величины m_1. Этого предварительного периода для тонких материалов может и не быть.

Первым основным периодом τ_1 является период, когда происходит интенсивная сушка с постоянной скоростью испарения: $m_1 = \frac{dw}{d\tau} = \text{const}$ (прямая, параллельная оси абсцисс). Температура поверхности в этом периоде равна температуре мокрого термометра: $t_{п_1} = t_м = \text{const}$. Парциальное давление паров на поверхности равно давлению насыщения $p_{п_1} = p_н = \text{const}$. Этот период носит название периода постоянной скорости сушки. Он заканчивается, когда свободная влага испарится, средняя влажность материала снизится до критической $w_{кр}$, а влажность на поверхности до гигроскопической $w_г$. Гигроскопическая влажность соответствует влажности материала при длительном воздействии на материал окружающей газовой среды, полностью насыщенной парами ($\varphi = 100\%$). Она различна для каждой температуры. Максимальная гигроскопическая влажность относится ко всему объему материала и соответствует его состоянию в момент, когда все микрокапилляры заполнены влагой.

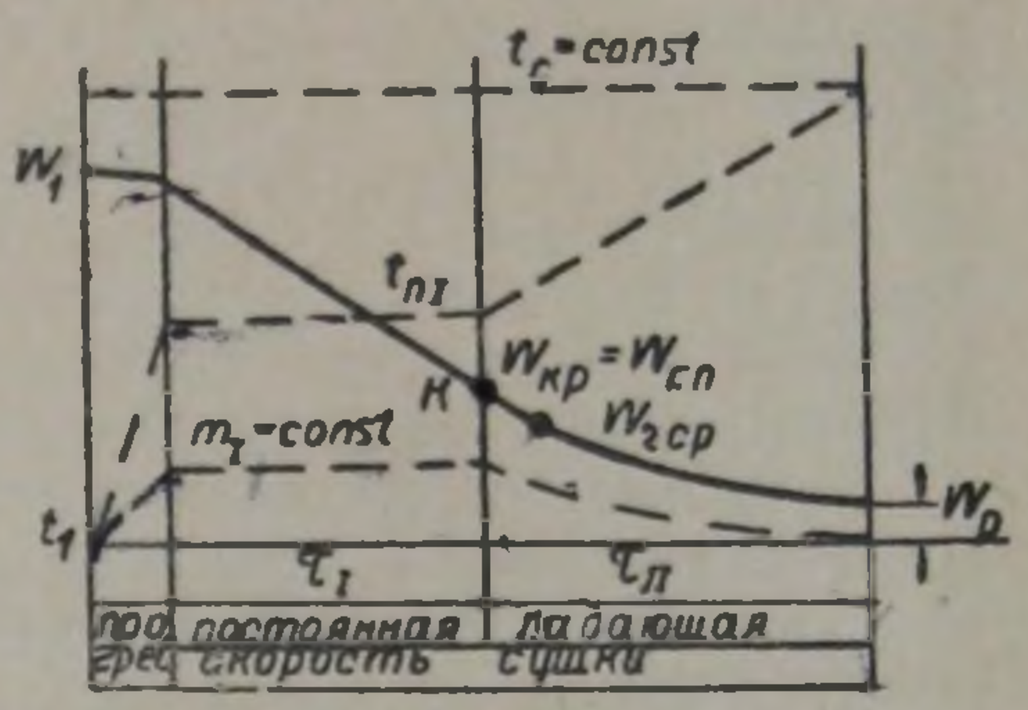


Рис. 60. Характерные периоды процесса сушки

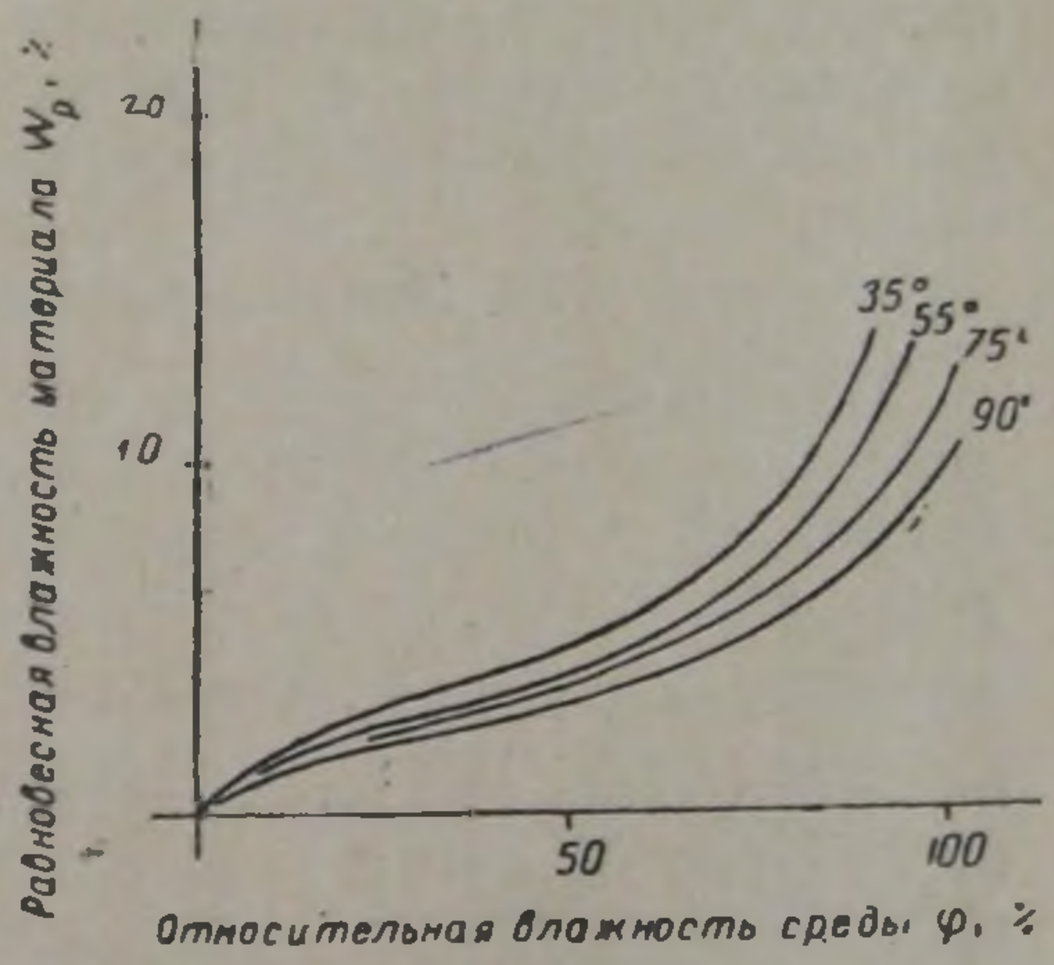


Рис. 61. Кривые равновесной влажности глины

Критическая влажность больше гигроскопической, так как при сушке влажность в центре всегда выше, чем на поверхности. Поэтому конкретная величина критической влажности для данного изделия зависит не только от внешних условий и рода материала, но также и от толщины, формы изделия и от режима сушки.

Процесс испарения в первый период сушки может быть рассчитан по формулам испарения влаги со свободной поверхности и носит название внешней диффузии. Для интенсификации процесса сушки необходимо повышать весовую скорость газов вдоль поверхности и до допустимых пределов разность температур сушильного агента и поверхности высушиваемых изделий или материала. Точка *K* отделяет область влажного состояния материала (влево) от области гигроскопического его состояния (вправо).

Второй период сушки материалов характеризуется падением интенсивности сушки, $m \to 0$, поэтому он носит название п е р и о д а п а д а ю щ е й с к о р о с т и с у ш к и. Падение интенсивности сушки в этом периоде объясняется тем, что внешняя поверхность материала уже не покрыта слоем влаги и скорость сушки будет определяться не столько условиями внешней диффузии пара через пограничный слой в окружающую газовую среду, сколько скоростью перемещения влаги внутри материала или внутренней диффузией. Во втором периоде сушки давление паров на поверхности вследствие уменьшения их концентрации меньше давления насыщенных паров при той же температуре, т. е. $p_п < p_н$; температура поверхности выше температуры мокрого термометра $t_п > t_м$, она растет, приближаясь к постоянной температуре окружающей среды $t_с$. Процесс сушки заканчивается вторым периодом, так как в конце его влажность материала достигает «равновесной», температура материала становится равной температуре окружающей среды, а интенсивность сушки — равной нулю.

Равновесная влажность материала $w_р$ соответствует тепловому и влажностному равновесию с окружающей средой и зависит для каждого материала от температуры t и относительной влажности среды φ.

На рис. 61 показаны кривые равновесной влажности для глины, или «изотермы десорбции». Установление необходимой величины влажности материала по выходе из сушки должно находиться в соответствии с равновесной влажностью, определяющейся условиями последующего использования материала.

10. Законы движения влаги в материале

Перемещение влаги в материале происходит под влиянием диффузионно-осмотических и капиллярных сил. Этот поток влаги направлен в сторону пониженной влажности материала, а скорость его пропорциональна удельному перепаду или градиенту влажности $\nabla u = \frac{\partial u}{\partial x}$. Здесь под u понимается не средняя по всему объему материала влажность, а истинная в данной точке. Влага перемещается как в виде жидкости, так и в виде пара. В начальных стадиях сушки, когда влажность превышает влажность гигроскопическую, перенос влаги происходит в виде жидкости. По мере уменьшения влажности и освобождения капилляров передвижение влаги в значительной доле происходит уже в виде пара.

Закон массопроводности при изотермичности процесса, по А. В. Лыкову, может быть выражен следующей формулой:

$$q' = -a'\gamma_0 \cdot \frac{\partial u}{\partial x} = -a'\gamma_0 \nabla u, \qquad \text{(IV-85)}$$

где q' — плотность потока или количество влаги, перенесенное через единицу поверхности в единицу времени, в *кг/м² час*;
a' — коэффициент потенциалопроводности в *м²/час*;
γ_0 — удельный вес абсолютно сухого тела в *кг/м³*.

Коэффициент потенциалопроводности является переменной величиной и зависит от влажности и температуры. Знак минус показывает, что поток влаги направлен в сторону, противоположную нарастанию влажности. Если в материале есть градиент температур $dt/dx = \nabla t$, то возникает дополнительно тепловой поток, обусловливающий перенос влаги в направлении от высокой температуры к более низкой:

$$q' = -a'\gamma_0\delta \cdot \frac{\partial t}{\partial x} = -a'\gamma_0\delta\,\nabla t\,, \qquad \text{(IV-86)}$$

где δ — термоградиентный коэффициент в 1/град.

Опытные величины a' и δ в зависимости от w и t приведены в табл. 17, по А. В. Лыкову и П. Д. Лебедеву.

Общий поток влаги в материале

$$q' = -a'\gamma_0\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \delta\frac{\partial t}{\partial x}\right) = -a'\gamma\left(\nabla u + \delta\nabla t\right). \qquad \text{(IV-87)}$$

Если распределение температур в материале будет противоположно распределению влажностей, как это, например, имеет место при конвекционной сушке, т. е. в центре высушиваемого изделия будет максимальная влажность и минимальная температура, а на поверхности минимальная влажность и максимальная температура, то знаки у ∇u и ∇t будут противоположны. Это показывает, что движение влаги за счет влагопроводности будет тормозиться обратным потоком влаги, обусловленным термовлагопроводностью. Для интенсификации процесса сушки, очевидно, необходимо организовать процесс так, чтобы или градиенты ∇u и ∇t имели одинаковые знаки, или влияние ∇t было близко к нулю. При сушке воздухом невысокой температурой составляющей, связанной с ∇t, ввиду ее незначительности можно пренебречь.

При сушке влажных материалов инфракрасными лучами температура поверхности материала быстро повышается, вследствие чего вначале наблюдается значительное торможение потока влаги. Влиянием градиента ∇t, имеющего противоположный знак и заметную величину, здесь пренебречь уже нельзя. Как показали эксперименты, в дальнейшем после повышения температуры материала и его влаги свыше 100°, развивается интенсивное движение влаги от центра к поверхности материала. Оно обусловливается возникновением третьего градиента, а именно градиента избыточного давления пара $dp_и/dx$ внутри материала над давлением внешней окружающей среды. Поэтому в случае сушки инфракрасными лучами общий поток влаги будет записан по П. Д. Лебедеву, учитывая направления отдельных потоков, так:

$$q' = a'\gamma_0\frac{\partial u}{\partial x} - a'\gamma_0\delta\frac{\partial t}{\partial x} + D\gamma_0\frac{\partial p_п}{\partial x}\,, \qquad \text{(IV-88)}$$

где D — коэффициент молярного переноса пара, численное значение которого определено П. Д. Лебедевым для древесины при температуре 115—120 °С и влажности выше критической равным $1 \cdot 10^{-4}$ *м²/час ата*.

В результате суммарный поток при инфракрасном облучении превышает таковой при конвективном процессе сушки.

При способах внешнего обогрева градиенты влажности и температуры имеют противоположные знаки и термовлагопроводность незначительно или заметным образом тормозит движение влаги за счет влагопроводности. Можно, однако, организовать сушку таким образом, что тепло будет развиваться внутри изделия и это приведет к суммированию потоков влаги как от влагопроводности, так и от термовлагопроводности. Интенсивность сушки при этом значительно превышает интенсивность сушки при внешнем обогреве.

Таблица 17

Зависимость коэффициента потенциалопроводности a' и термоградиентного коэффициента δ от температур и влажности (опытные данные)

Материал	$t_в$ в град.	$w_в$ в %	$a' \cdot 10^5$ в $м^2/час$	$\delta \cdot 10^2$ в 1/град.
Автоклавный бетон, $\gamma = 400\ кг/м^3$	20	10	1,9	0,4
	20	20	2	0,8
	20	30	2,5	0,92
	20	40	4	0,96
Каолин	45	5	8	0,15
	45	10	9	0,23
	45	20	25	0,27
	45	30	44	0,28
	45	40	45	0,25
	45	50	47	0,19
Кварцевый песок	45	5	70	0,12
	45	10	120	0,19
	45	15	208	0,18
	45	20	—	0,08
Глина кучинская	20	12	4	0,13
	30	12	7,5	0,13
	40	12	12,5	0,13
	50	10	18	0,12
Древесина (сосна)	40	10	0,18	1
	40	25	0,46	2
	40	50	0,62	2
	40	75	0,62	0,6
Минеральная вата, $\gamma = 220—280\ кг/м^3$	20	20	0,9	0,92
	20	60	2,7	0,92
	20	100	3,9	0,92
	20	140	4,8	—
	20	180	5,6	—

11. Усадка материала и допустимые скорости сушки

Первый период сушки для многих материалов, в том числе для глины, связан с процессом усадки. При удалении из глины свободной влаги линейные размеры изделия уменьшаются, что при неравномерности сушки и распределения влаги в изделии вызывает внутренние перенапряжения, появление трещин, т. е. брак изделия. Это заставляет особое внимание обращать на допустимую скорость сушки и на весь режим в целом в период удаления «усадочной влаги», который характеризуется появлением усадочных напряжений, опасных для различных материалов. У глин после достижения ими критической влажности усадка прекращается, что дает возможность увеличить приток тепла к материалу и ускоренным темпом закончить сушку, не опасаясь дальнейшего развития перенапряжений и трещин. Величина критической влажности глин находится экспериментальным путем для каж-

дого рода глины и различного режима сушки. Ее величина равна 12—15%. Гигроскопическая влажность глин 8—11%.

Некоторые материалы, как, например, торф, имеют усадку на протяжении всего процесса сушки, а древесина, в отличие от глины, начинает сокращаться в размерах (усушка) только во второй период, уже после достижения ею гигроскопической влажности ($w_г$ = =30%).

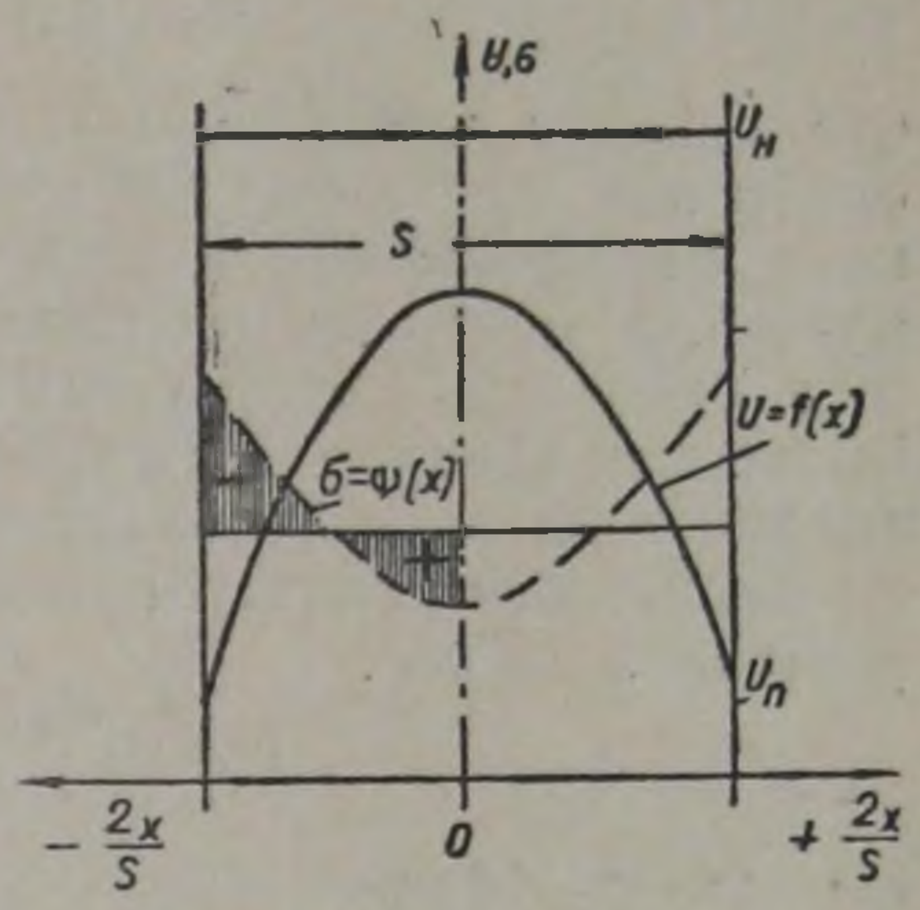


Рис. 62. Распределение влажности u и напряжений σ в толще пластины при двусторонней сушке

Величина усадки определяет размеры изделия после сушки; она может быть найдена из опытов по следующим соотношениям.

Пусть l_0, l_1 и l_2 представляют собой линейный определяющий размер изделия соответственно в абсолютно сухом состоянии, при влажности изделия w_1% и при w_2%. Тогда, принимая, согласно опытам, линейный закон усадки, можно написать.

$$l_1 = l_0(1 + \alpha w_1) \text{ и } l_2 = l_0(1 + \alpha w_2), \quad \text{(IV-89)}$$

откуда, исключая величину l_0. можно найти отношение

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{1 + \alpha\ w_1}{1 + \alpha\ w_2} \quad \text{(IV-90)}$$

и величину относительной усадки

$$y = \frac{l_1 - l_2}{l_1} = \frac{\alpha\,(w_1 - w_2)}{1 + \alpha w_1}\,. \quad \text{(IV-91)}$$

При этом

$$l_2 = (1 - y)\,l_1;\ \ l_1 = \frac{l_2}{1 - y} \quad \text{(IV-92)}$$

и

$$\alpha = \frac{y}{(w_1 - w_2) - y w_1}, \quad \text{(IV-93)}$$

где α — коэффициент линейной усадки, определенный А. В. Лыковым для глин, равный 0,0048—0,007.

Величина линейной усадки глин снижается при введении в шихту отощающих добавок до $\alpha = 0{,}002$.

Коэффициент усадки по площади может быть принят после отбрасывания малых величин равным двукратному линейному, т. е. 2α, а коэффициент объемной усадки — 3α.

Появление трещин и разрушение образцов глиняного сырца при усадке происходят по следующим причинам. По истечении

некоторого времени от начала сушки, когда $F_0 > 0{,}1$ (для влагопроводности) влажность по толщине S двусторонне обогреваемой пластины распределится по параболе (рис. 62).

$$u = u_{ц} - \left(\frac{2x}{S}\right)^2 \left(u_{ц} - u_{п}\right), \qquad \text{(IV-94)}$$

что создаст тенденцию к большему сокращению поверхностных слоев и к меньшему внутренних. Так как свободного относительного передвижения в слоях нет, наружные слои будут растягиваться, а центральные сжиматься — см. рис. 62 кривую напряжения $\sigma = \psi(x)$. Однако сами растягивающие напряжения еще не вызывают трещин. Их вызывают ранее появляющиеся предельные напряжения сдвига поверхностных слоев p; p падает с увеличением влажности глины: при $w = 5\%$ $p = 6 \div 10$ *кг/см²*, а при $w = 15\%$ $p = 0{,}5 \div 3$ *кг/см²*.

$$p = \frac{\alpha E_c l_н (\nabla u)_{п\ макс}}{1{,}27\,(1 + \alpha u_н)}\ [кг/см^2], \qquad \text{(IV-95)}$$

где α — коэффициент линейной усадки, 1/%;
E_c — модуль сдвига в *кг/см²* (для глины 2—12 *кг/см²*);
$l_н$ — начальная длина изделия в *см*;
$u_н$ — начальная влажность в %;
$(\nabla u)_п$ — поверхностный градиент влажности в %/*см*, который в свою очередь равен

$$(\nabla u)_п = \frac{6}{S}(w - u_п) = \frac{4}{S}(u_{ц} - u_п), \qquad \text{(IV-96)}$$

где w — средняя влажность изделия:

$$w = \frac{1}{3}(2u_{ц} + u_п)\ [\%], \qquad \text{(IV-97)}$$

$u_{ц}$ и $u_п$ — истинные влажности в центре и на поверхности в %.

Как видно из формулы (IV-95), появление трещин связано с достижением максимального или критического поверхностного градиента влажности. Это позволяет устанавливать максимальную скорость сушки по предельно допустимому поверхностному градиенту влажности $(\nabla u)_{п.макс}$. Значения его определяются для различных изделий опытным путем, при этом

$$(\nabla u)_п = \frac{100m}{a'\gamma_0}, \qquad \text{(IV-98)}$$

где m — интенсивность сушки в *кг/м² час*;
a' — коэффициент потенциалопроводности в *м²/час*;
γ_0 — удельный вес абсолютно сухого материала в *кг/м³*.

Коэффициент потенциалопроводности может быть определен из данных испытаний по величине $\frac{dw}{d\tau}$:

$$a' = \frac{\pi S\left(\frac{dw}{d\tau}\right)}{2(\nabla u)_п} = \frac{S^2}{8(u_{ц} - u_п)} \cdot \frac{dw}{d\tau}. \qquad \text{(IV-99)}$$

Здесь π — коэффициент формы, для пластины равный 1, $\frac{dw}{d\tau}$ в %/*час*.

Величина $(\nabla u)_{\text{п.макс}}$ растет при падении влажности $u_{\text{п}}$, например для глины при $u_{\text{п}} = 25\%$ $(\nabla u)_{\text{п.макс}} = 2\%/см$; при $u_{\text{п}} = 15\%$ $(\nabla u)_{\text{п.макс}} = 5\%/см$. Средняя величина $(\nabla u)_{\text{п.макс}} = 2—5\%/см$.

РОСНИИМС предложил делить глины на пять классов в зависимости от критического градиента влажности $(\nabla u)_{\text{п.макс}}$ и для каждого класса разработал режим сушки глиняного сырца.

Для устранения больших градиентов влажности в изделии в первый период сушки, а также для организации устойчивого и интенсивного потока влаги от центра к поверхности вводится предварительное перед прессами пропаривание или пароувлажнение

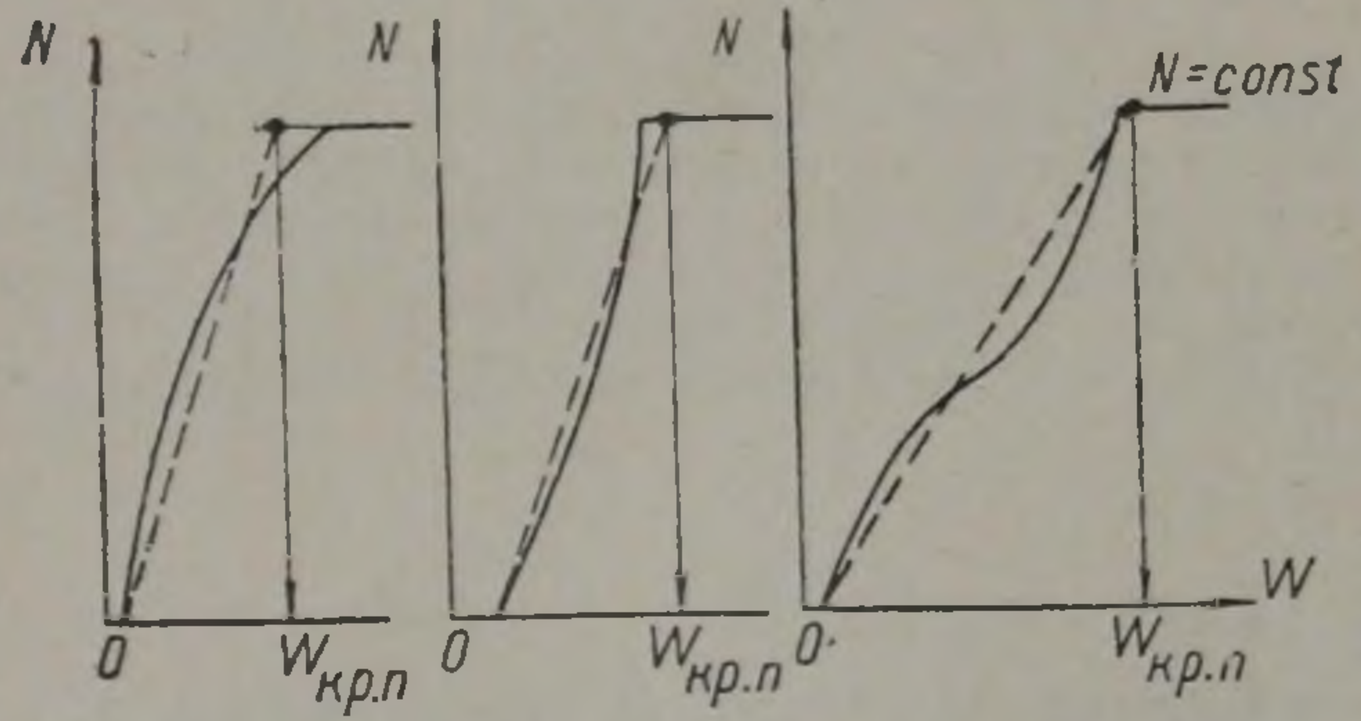


Рис. 63. Графический метод определения приведенной критической влажности

глины. Температура сырца поднимается до 50°. Сушка протекает быстрее на 30÷50%, качество высушенных изделий повышается.

Зная максимально допустимый поверхностный градиент влажности $(\nabla u)_{\text{п.макс}}$, начальную $w_{\text{н}}$ и критическую влажность изделия $w_{\text{кр}}$, можно определить время первого периода сушки:

$$\tau_{\text{I}} = \frac{w_{\text{н}} - w_{\text{кр}}}{N} \text{ [час.]}. \qquad \text{(IV-100)}$$

Постоянная скорость сушки

$$N = \frac{2 \cdot 100m}{S\gamma_0} \text{ [}^0/_0\text{/час]}. \qquad \text{(IV-101)}$$

Величина критической влажности в зависимости от гигроскопической, по А. В. Лыкову, равна

$$w_{\text{кр}} = u_{\text{г}} + \frac{NS^2}{12a'} \text{ [}^0/_0\text{]}, \qquad \text{(IV-102)}$$

$$m = \frac{(\nabla u)_{\text{п·макс}} a' \gamma_0}{100} \text{ [кг/м}^2\text{час]}, \qquad \text{(IV-103)}$$

откуда

$$\tau_{\text{I}} = \frac{(w_{\text{н}} - w_{\text{кр}})S}{2(\nabla u)_{\text{п.макс}}} \text{ [час]}. \qquad \text{(IV-104)}$$

Продолжительность второго периода сушки τ_{II} зависит уже не от допустимой для обеспечения качества глиняных изделий скорости сушки, а от тепловых и аэродинамических характеристик данной конструкции сушилки и определяется в основном законами теплопередачи. Учитывая логарифмическую зависимость падения влажности изделия от времени во втором периоде сушки, общая продолжительность ее может быть выражена

$$\tau = \tau_I + \tau_{II} = \frac{1}{N}\left[w_н - w_{кр.п} + 2{,}3 \lg \frac{w_{кр.п} - w_р}{w_{кон} - w_р}(w_{кр.п} - w_р)\right], \quad \text{(IV-105)}$$

где $w_{кр.п}$ — «приведенная критическая» влажность в %. Эта условная величина определяется из графика на рис. 63 в различных процессах сушки второго периода точкой пересечения с линией N=const, прямой (на рисунке — пунктирные линии), заменяющей сложные кривые второго периода сушки;

$w_р$ — равновесная и $w_{кон}$ — конечная влажности в %.

ГЛАВА II

КЛАССИФИКАЦИЯ И ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИИ СУШИЛОК

1. Классификация сушилок

Сушилки могут быть классифицированы по следующим основным признакам: по режиму работы — периодического и непрерывного действия, по виду обрабатываемого материала — для текучих, сыпучих, кусковых материалов, для штучных и листовых изделий.

По основной конструкции — распылительные, пневматические, размольно-сушильные, контактные, шахтные, барабанные, камерные, туннельные, конвейерные.

По способу передачи тепла — рекуперативно-контактные, конвективные, радиационные, электроконтактные, высокочастотные, комбинированные.

По схеме движения газов и материала — противоточные, прямоточные, с рециркуляцией, однозонные, многозонные.

Помимо этих основных признаков, сушилки характеризуются и рядом вторичных признаков, существенных, однако, для каждой конструкции.

2. Требования к конструкции сушилок

Кроме общих требований, как ко всякой тепловой установке (обеспечение заданной производительности при высоком качестве, тепловая и общая экономичность, обеспечение скоростных про-

цессов и т. д.), к сушилкам предъявляется требование равномерности сушки, которая и характеризует качество продукции, выходящей из сушилок. Коэффициент равномерности сушки, взятый по нескольким пробам:

$$k_р = \frac{(w_1 - w_2)_{макс}}{(w_1 - w_2)_{мин}} = \frac{\Delta w_{макс}}{\Delta w_{мин}}. \qquad (IV\text{-}106)$$

При идеальной сушке он равен единице. Коэффициент неравномерности сушки, который при идеальной сушке равен нулю:

$$k_{нр} = \frac{\Delta w_{макс} - \Delta w_{мин}}{\Delta w_{ср}}. \qquad (IV\text{-}107)$$

Здесь w_1 — начальная влажность;
w_2 — конечная влажность различных образцов материала;
$\Delta w_{макс}$ и $\Delta w_{мин}$ — максимальное и минимальное падение влажности образцов в результате сушки.

Степень неравномерности сушки может быть оценена по величине среднеквадратичного отклонения от средних значений по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Sigma_1^n \Delta w^2}{n-1}} [\%], \qquad (IV\text{-}108)$$

где $\Delta w = \Delta w_{ср} - \Delta w_i$ — разность между среднеарифметическим значением падения влажности во всех образцах и падением влажности в данном образце в %;
$\Delta w_{ср} = \Sigma_1^n \Delta w_i : n$ — среднеарифметическое значение падения влажности во всех образцах в %;
Δw_i — падение влажности в данном образце от начального значения в %;
n — число взятых образцов;
$\Sigma_1^n \Delta w^2$ — сумма квадратичных отклонений падения влажности в образцах по отношению к среднеарифметическому.

ГЛАВА III

КОНСТРУКЦИИ СУШИЛОК ДЛЯ ТЕКУЧИХ, СЫПУЧИХ И КУСКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

1. Сушилки для текучих материалов

Для получения тонкодисперсного, фракционно-однородного и хорошо высушенного порошка (производство керамических плиток и др.) предварительно готовят шликер (молотое сырье, смешанное с водой) и направляют его после процеживания в распылительные сушилки. Распыление до размера капель 0,5—1 *мм* обеспечивает громадное увеличение поверхности высушиваемого материала (1 *л* жидкости получает поверхность, равную 200—300 $м^2$) и поэтому процесс сушки протекает почти мгновенно (2—5 сек.) за счет чрезвычайно благоприятных условий тепло-и влагообмена. Распылительная сушилка (рис. 64) состоит из сушиль-

ной башни высотой 15—25 *м*, распылителя, устройства для подачи и отсоса сушильного агента; фильтров для улавливания уноса и механизма, удаляющего сухой порошок с пода башни. Объем башни определяется допускаемым объемным напряжением по испаренной влаге $m_0 = \frac{W}{V}$, *кг/м³час*:

$$V = \frac{W}{m_0} \ [м^3], \qquad \text{(IV-109)}$$

m_0 зависит от свойств распыливаемой жидкости, степени ее подогрева, вязкости и от температуры сушильного агента t.

В качестве первого приближения можно принять:

$$m_0 = 0{,}037t - 1{,}9 \ [кг/м^3час]. \qquad \text{(IV-110)}$$

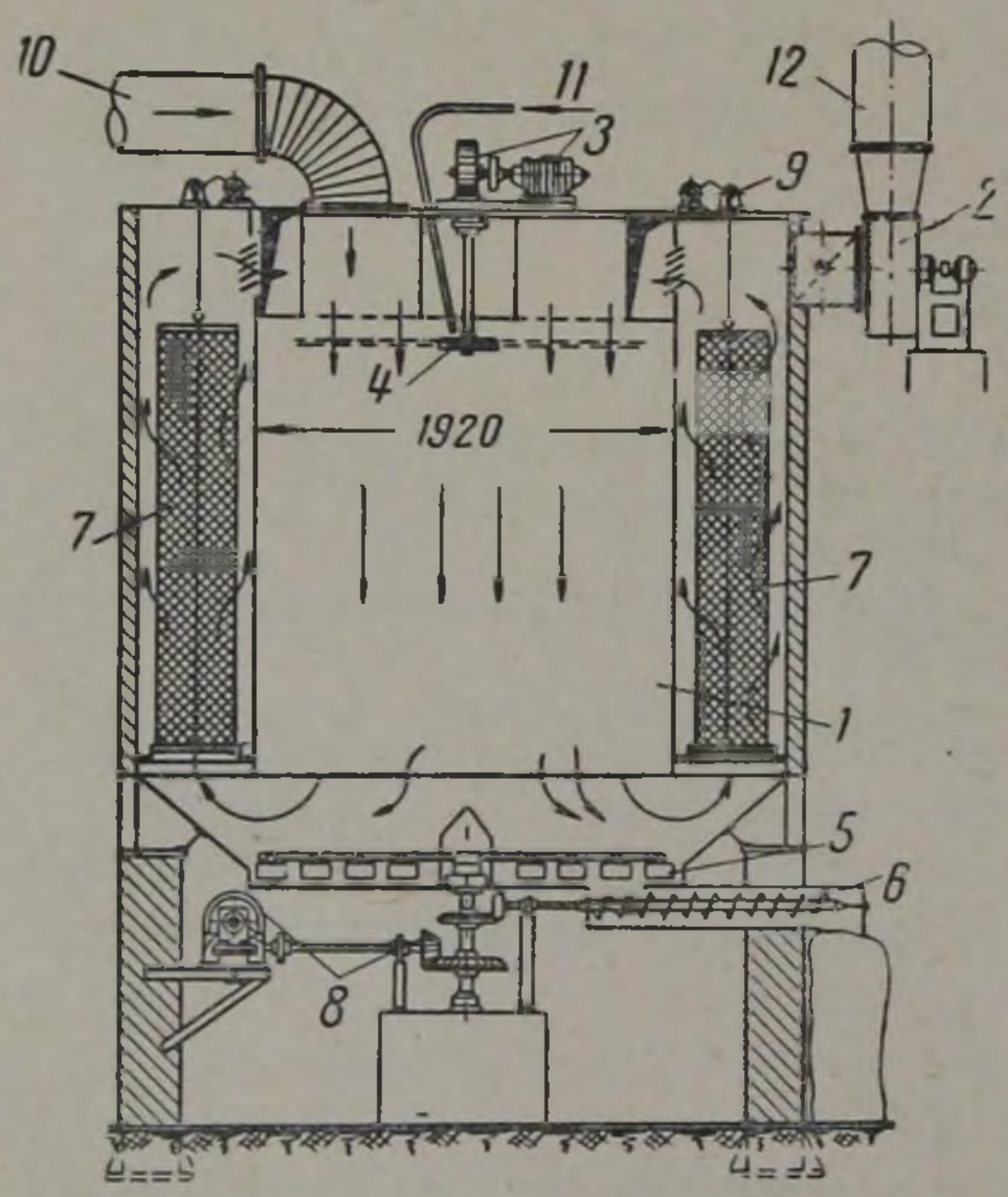


Рис. 64. Распылительная сушилка

1 — сушильная башня; *2* — вентилятор; *3* — привод распыливающего устройства; *4* — распыливающее устройство (диск); *5* — скребки; *6* — шнек; *7* — фильтры; *8* — привод разгрузочного механизма; *9* — механизм для встряхивания фильтров; *10* — труба для подачи сушильного агента; *11* — труба для подвода шликера; *12* — труба выброса отработавшего агента

Из различных методов распыливания шликера наиболее удобным является распыливание центробежным способом, так как распыливание форсунками (30—200 *кг/см²*) приводит к частому засорению их отверстий, а пневматическое (5—7 *кг/см²*) требует очень большого расхода электроэнергии (до 40 *квт-ч/т* жидкости).

При центробежном распыливании быстро вращающимся диском окружная скорость диска доходит до $v = 100—180$ *м/сек*. Число оборотов в пределах 5 000—20 000 об/мин обеспечивается турбинкой. Расход электроэнергии составляет 10—20 *квт-ч/т*. Отношение высоты башни к диаметру $H/D = 1{,}1 — 1{,}2$. Вентиляционное устройство обеспечивает равномерное распределение сушильного агента по сечению башни. Прямоточное движение (подача материала и газа сверху) дает лучшее распыливание из-за отсутствия коагуляции (укрупнения взвеси), наблюдающейся при противотоке. Расход тепла в такой сушилке 1 300—1 500 *ккал/кг* испаренной влаги. Расходы воздуха относительно увеличены, так как конечная влажность агента должна быть не более 25%. Фильтрующее уст-

ройство выполняет здесь весьма ответственную работу, так как в него уносится из башни до половины всего полученного сушкой порошка. Механизмом для удаления готового порошка служат вращающиеся скребки и шнек.

2. Пневматическая сушилка для сыпучих материалов

Влажный материал (рис. 65), имеющий размеры кусков не более 20—25 *мм*, поступает в вертикальную шахту *4* или трубу диаметром 600—1 200 *мм* и длиной 8—20 *м*. В эту же трубу подаются горячие (300—800°) дымовые газы, которые движутся со скоростью 10—30 *м/сек*. Взаимное движение газов и сушильного материала может быть прямоточное и противоточное. Труба может иметь как восходящий, так и нисходящий участки. При движении в трубе материал быстро, в течение нескольких секунд, высушивается. Перед подачей в сушильную трубу кусковой материал размалывается до расчетного размера. В мельницу *3*, барабанную, молотковую или иного типа подается горячий газ, и помол совмещается с частичной сушкой. В простейшем случае сушка может полностью происходить и заканчиваться в мельнице, а сушильная труба может отсутствовать. При совмещении помола и сушки последняя ускоряется, поскольку высушенные поверхностные слои материала при помоле все время разрушаются, и центральные части быстро становятся доступными для тепло- и влагообмена с дымовыми газами; кроме того, механическая работа дробящих шаров или молотков, превращаясь в тепло (80% энергии привода), содействует сушке. Основные размеры трубы-сушилки определяются на основе следующих соображений. При движении газов вверх по трубе частицы материала окажутся во взвешенном состоянии, если сила тяжести, действующая на частицу, уравновешивается силой давления на нее потока газов снизу вверх. Условие равновесия выражается уравнением:

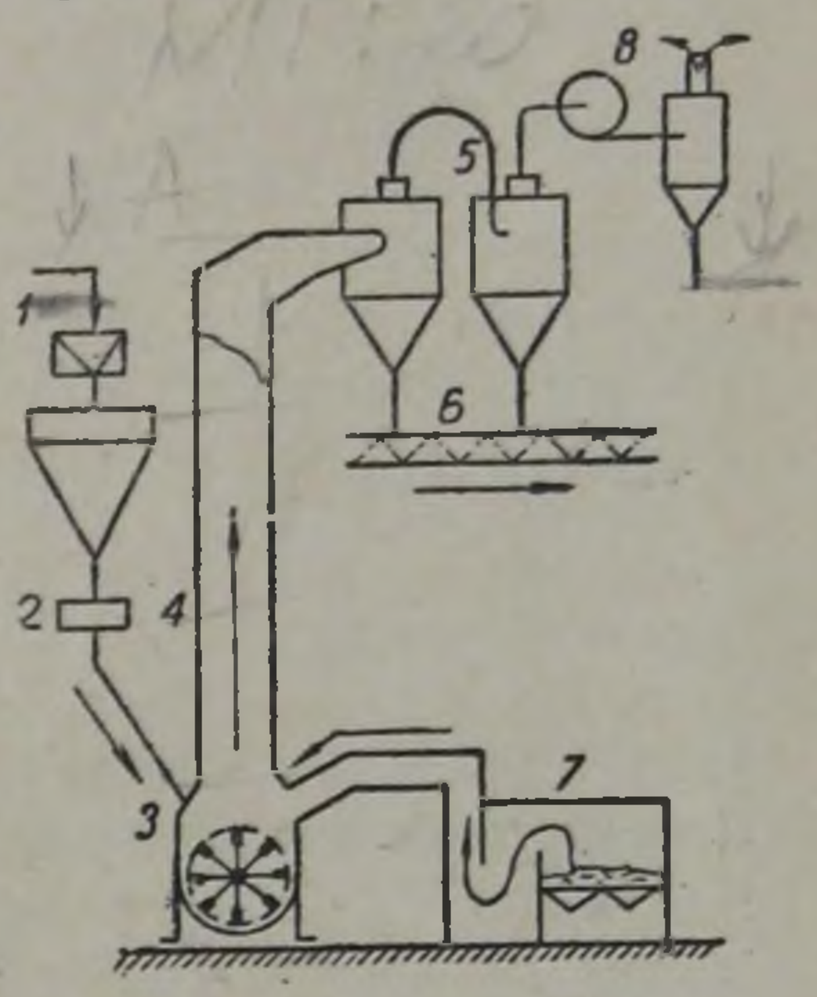


Рис. 65. Пневматическая сушильная установка

1 — дробилка; *2* — питатель; *3* — мельница; *4* — сушильная труба; *5* — циклоны; *6* — транспортер готовой продукции; *7* — топка или боров от печей; *8* — вентилятор

$$\frac{\pi\delta^3}{6}\,\gamma_м = C\,\frac{v_в^2}{2g}\,\gamma_г\,\frac{\pi\delta^2}{4}, \qquad \text{(IV-111)}$$

где δ — диаметр частицы, принимаемой по форме за шар, в *м*,
$\gamma_м$ — кажущийся удельный вес частицы в *кг/м*³;
C — коэффициент лобового сопротивления, $C = f(\mathrm{Re})$;
$v_в$ — скорость витания частицы в *м/сек*;
$\gamma_г$ — удельный вес газов в *кг/м*³.

Для транспортирования материала снизу вверх необходимо придавать скорости газов $v_г$ бо́льшие значения, чем скорость витания $v_в$. По В. А. Успенскому (ВНИИТ), скорость газов должна быть равна

$$v_г = 1{,}1 v_в \left(1 - \frac{\delta}{D}\right) = 5{,}6 \left(1 - \frac{\delta}{D}\right) \sqrt{\frac{\delta \gamma_м}{\psi \gamma_г}}, \qquad \text{(IV-112)}$$

где коэффициент $\psi = 0{,}4—0{,}65$. Он принимается тем меньше, чем ближе частицы по форме к шару;

D — диаметр трубы в *м*.

В процессе сушки удельный вес как материала за счет его высушивания, так и газов за счет их охлаждения и увлажнения будут меняться. Поэтому трубу или делают с уменьшающимся кверху сечением, или скорость входа газов при цилиндрической трубе выбирают больше. Так как секундный объем сушильного агента известен из теплового расчета $V_{сек}$ *м³/сек,* то зная скорость газов в трубе, можно найти ее диаметр:

$$D = 1{,}13 \sqrt{\frac{V_{сек}}{v_г}}. \qquad \text{(IV-113)}$$

Отношение веса материала $G_м$ к весу транспортирующего газа $G_г$ называется концентрацией μ, которая определяется по формуле

$$\mu = \frac{G_м}{G_г} = \frac{G_м}{3\,600 V_{сек} \gamma_г} \; [кг/кг]. \qquad \text{(IV-114)}$$

Если при расчете обычного пневмотранспорта величина концентрации может приниматься в пределах 5—15 *кг/кг,* то при совмещении сушки и транспортирования она выбирается в пределах 0,8—1,2 *кг/кг*. Время пребывания частицы в трубе зависит от длины трубы L *м* и от скорости движения частицы $v_м$ *м/сек,* величина которой устанавливается опытным путем как функция разности $v_г - v_в$. За время движения частицы в трубе условия тепло- и влагообмена должны удовлетворять требованию снижения влажности до заданных конечных ее значений. Коэффициент теплоотдачи к взвешенным частицам определяется по формулам И. М. Федорова:

$$\mathrm{Nu} = 0{,}41\,\mathrm{Fe}^{0{,}895} \quad \text{при } \mathrm{Fe} = 25 — 100. \qquad \text{(IV-115)}$$

$$\mathrm{Nu} = 0{,}83\,\mathrm{Fe}^{0{,}735} \quad \text{при } \mathrm{Fe} = 100 — 700, \qquad \text{(IV-116)}$$

где Fe — критерий Федорова:

$$\mathrm{Fe} = \delta \sqrt[3]{\frac{4}{3} \cdot \frac{g}{\nu^2} \left(\frac{\gamma_м}{\gamma_г} - 1\right)} = \sqrt[3]{C\mathrm{Re}^2}, \qquad \text{(IV-117)}$$

обозначения в формуле (IV-117) аналогичны (IV-111).

Найденная из расчета длина трубы не должна быть очень большой ($L \leqslant 25$ *м*) ввиду возрастания расхода электроэнергии на

вентиляторы, больших скоростей потока и связанных с ними повышенных износов трубопроводов. При работе труб-сушилок как обычно под разрежением необходимо в расчетах учитывать и воздух, подсасываемый из атмосферы. Его количество иногда доходит до 20% и более от количества дымовых газов, поступающих в трубу. Подсосы снижают тепловой эффект сушилки и увеличивают время сушки. Тепловой баланс трубы-сушилки строится по вышеприведенным методам. Аэродинамический расчет трубы и всей системы отличается тем, что общее сопротивление газопроводов включает составляющую, зависящую от сопротивления разгону частиц, и все формулы для расчета сопротивления движению запыленного потока содержат слагаемое, связанное с величиною концентрации μ. Например, сопротивление при движении газов вверх по трубе определяется по формуле

$$h = 0{,}016\,(1 + 1{,}7\mu)\,\frac{L}{D}\cdot\frac{v_0^2}{2g}\,\gamma_0\,(1 + \frac{t}{273})\ [мм\ \text{вод.ст.}]. \qquad \text{(IV-118)}$$

Сушка во взвешенном состоянии происходит с высокими технико-экономическими показателями и в течение короткого времени, поэтому этот метод является перспективным для сыпучих строительных материалов. По этому же способу производится и обжиг (гипса, извести, глин и т. д.). Недостатками способа являются большой износ газопроводов, особенно на поворотах, большие расходы электроэнергии на вентиляторы и громоздкость существующих аппаратов очистки газа от мелкой взвеси перед удалением его в атмосферу.

3. Контактные сушилки

Основная схема таких сушилок состоит в том, что по металлической поверхности, обогреваемой горячими газами, паром или электроэнергией, сушильный материал передвигается скребками, винтовым транспортером или другим механизмом.

Достоинства таких сушилок в том, что горячие газы не соприкасаются с материалом и не загрязняют его сажей и золой, что важно для сушки декоративных материалов. Расход воздуха в этих сушилках невысок, так как его задача заключается лишь в удалении испарившейся влаги. Ввиду незначительной скорости воздуха над материалом пыление и унос сыпучего материала значительно меньше, чем в каких-либо других сушилках, что имеет значение при сушке ценных сыпучих. Осадительно-фильтровальные установки для таких сушилок не громоздки. Интенсивность работы контактных сушилок характеризуется напряженностью по испаренной влаге с 1 $м^2$ горячей поверхности $m_п$ *кг/м² час*. Например, величина $m_п$ *кг/м² час* равна: для сушилки с вращающимся пучком труб, обогреваемым паром (1—3 *ати*), при очень влажных материалах 5—8, при сухих 0,1—2; для трубчатой барабанной сушилки для угля 3—6; для тарельчатой сушилки при сушке угля 5—8, песка 2—3, глины 0,6, мела 18—20 (нагрев тарелок га-

зами при температуре $t_г$ =800—1000°); гипса (обогрев паром) до 18 *кг/м² час*. Относительно большой расход металла в таких случаях окупается долгим сроком его службы, если рабочая температура невысока (200—400°).

4. Конвейерные сушилки

Конвейерные сушилки для кусковых материалов представляют собой туннель или камеру с конвейером, передвигающимся в горизонтальном или вертикальном направлении. Часто применяется и зигзагообразный путь — в цепных конвейерах. Горизонтальный

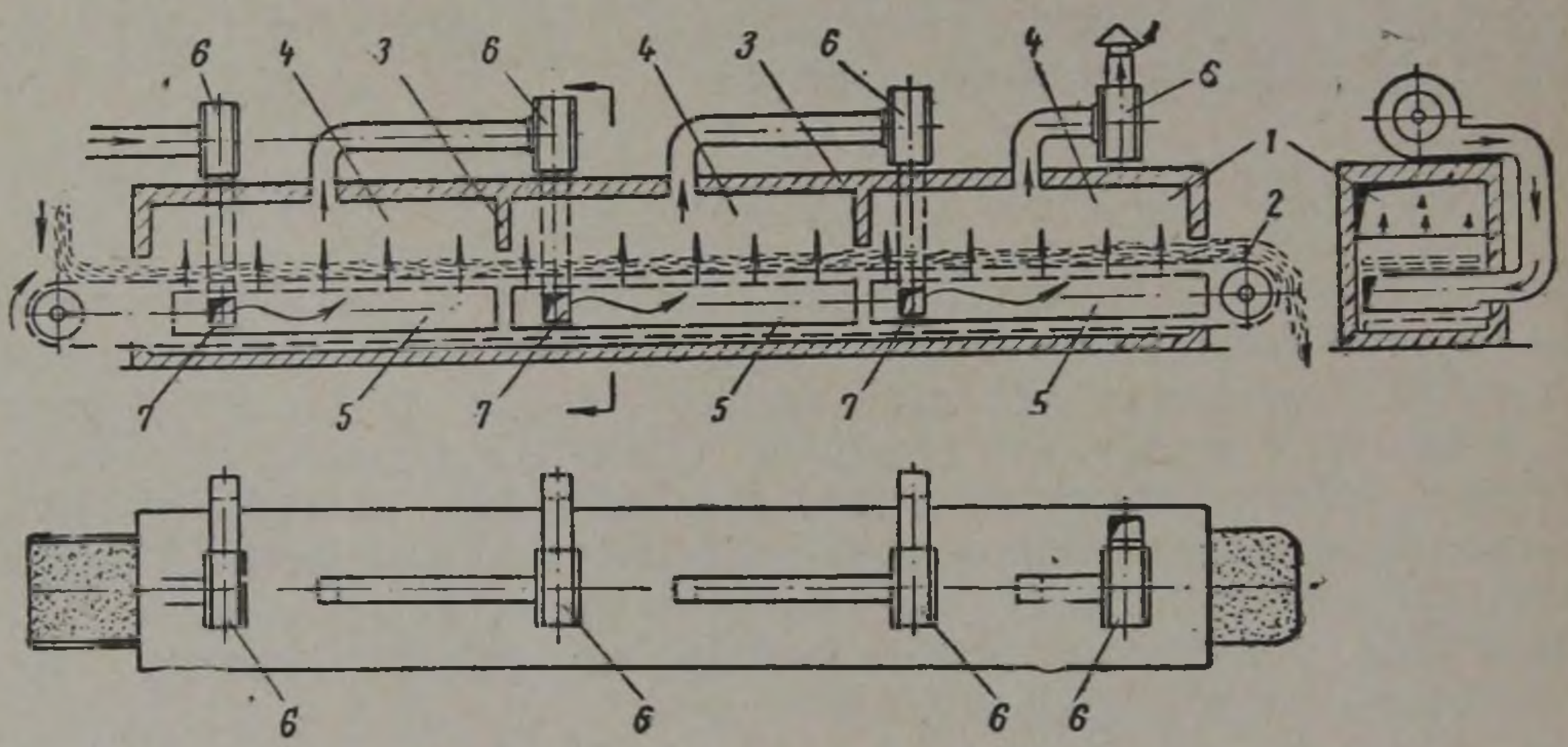


Рис. 66. Конвейерная сушилка для глиняных брикетов

1 — туннель; *2* — проволочная сетка ленты; *3* — перегородки; *4*—отсеки; *5* — короба с дырчатым верхом для распределения сушильного агента; *6* — вентиляторы; *7* — трубы подачи сушильного агента в короба

конвейер состоит из металлической сетки, прикрепленной к несущим цепям конвейера. Вертикальные и цепные конвейеры вместо сетки снабжаются ковшами. При горизонтальном сетчатом конвейере сушильный агент пропускается через слой материала иногда со скоростью, приводящей материал в полувзвешенное состояние («кипящий слой»), что ускоряет теплообмен и удаление влаги. В конвейерных сушилках рационально применять инфракрасные лучи для сушки глины, песка и др.

На рис. 66 показана газоструйная поперечно-поточная конвейерная сушилка б. ЦНИИПСа для глиняных брикетов в производстве керамзита. Удельная нагрузка брикетов при слое 130—140 *мм* 80 *кг/м²*. Время сушки 30 мин., температура поступающих газов 200°.

Для той же цели применяются многоярусные конвейерные сушилки. Данные, например, по пятиярусной сушилке таковы: производительность по сырью 7 *т/час*, по влаге 700 *кг/час*, ширина сетки (диаметр 2 *мм*, живое сечение 30%) конвейера 2000 *мм*, га-

бариты каркаса 2,5×16,6×5,3 *м*. Изоляция стен — древесно-волокнистые плиты толщиной 25 *мм* с обшивкой листовой сталью. Время сушки 2 часа. Сушильный агент — воздух (t_1=200° и t_2=60°), протягиваемый вентилятором снизу вверх через все ярусы. Удельный расход тепла 1 500— 1700 *ккал/кг* испаренной влаги.

5. Шахтные сушилки

В шахте сушилки происходит свободное падение материала или материал спускается, задерживаясь полками и нижележащими его слоями. В механизированных шахтных сушилках материал пересыпается с вращающихся тарелок, лопастных барабанов и т. д. Сушильный агент проходит через завесу падающего материала и над его слоем, лежащим на тарелках.

6. Барабанные сушилки

Барабанные сушилки (рис. 67) широко используются для сушки сыпучих и мелкокусковых ($\delta \leqslant 50$ *мм*) материалов. Материал, подвергаемый сушке, поступает в наклонный (4—6° к горизонту) полый барабан, при вращении которого (0,5—8 об/мин) материал

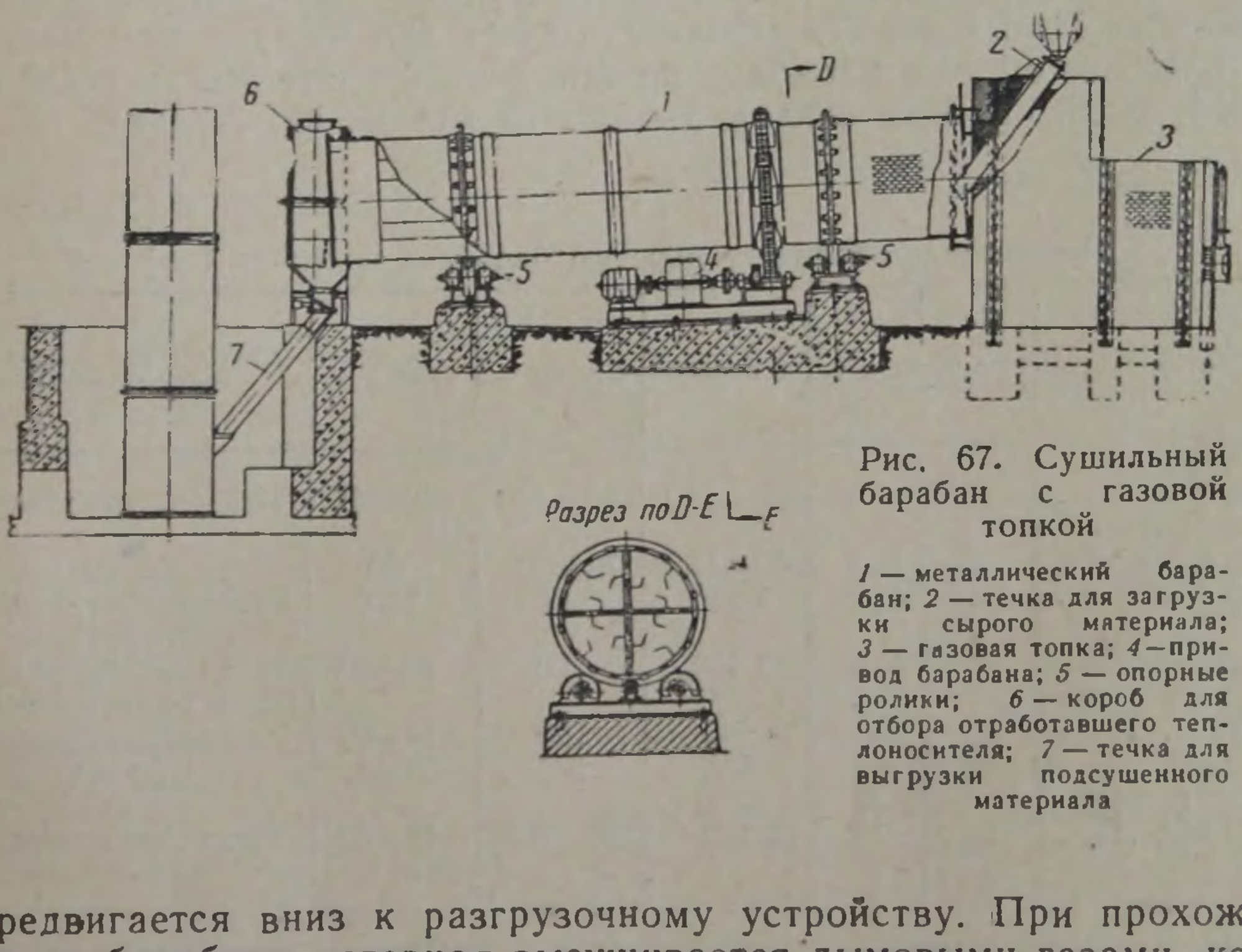


Рис. 67. Сушильный барабан с газовой топкой

1 — металлический барабан; *2* — течка для загрузки сырого материала; *3* — газовая топка; *4* — привод барабана; *5* — опорные ролики; *6* — короб для отбора отработавшего теплоносителя; *7* — течка для выгрузки подсушенного материала

передвигается вниз к разгрузочному устройству. При прохождении по барабану материал высушивается дымовыми газами, которые или только омывают стенки барабана снаружи (контактный способ), или проходят внутри барабана вдоль сушимого материала (конвективная сушка), что и применяется в большинстве случаев. Принципиально возможна схема из этих двух комбинаций.

Барабанная сушилка по основной схеме предназначена для сушки прямотоком, так как в этом случае она обладает свойством саморегулирования: мелкие частицы, срок сушки которых должен быть меньше, скорее проходят через барабан, чем более крупные, высушиваемые за больший срок. Кроме того, при прямотоке влажные пластичные материалы легче отдают начальную влагу и получают необходимую сыпучесть. Направление газов противотоком может применяться при глубоком высушивании или тогда, когда поступающий влажный материал не выдерживает высокой температуры в первый период сушки, но допускает ее в конце высушивания. При прямотоке обеспечиваются меньшее пыление и унос. Глина обычно сушится прямотоком, поскольку нельзя допускать потерю ею пластичности при перегреве газами в конце сушилки. Песок сушится и противотоком и прямотоком. Хотя входящие в сушилку дымовые газы имеют высокие температуры 600 ÷ 900°, сам материал за время сушки сильно не нагревается и выходит из барабана при температуре 70—80°, в то время как дымовые газы уходят при температуре около 100°. Скорость газов выбирается тем ниже, чем более склонен материал к растрескиванию и пылению. Скорость газов в конце барабана обычно не превышает 2—3 *м/сек*. Газовое сопротивление барабана в зависимости от типа внутренних устройств составляет 10—25 *мм* вод. ст. Конечная относительная влажность газов тем больше, чем меньше напряжение объема барабана по испаренной влаге m_0. m_0 *кг/м³ час* может быть принята согласно табл. 18 (по М. Ю. Лурье).

Таблица 18

Напряжение объема сушильного барабана по влаге (m_0)

Материал	w_1 в %	w_2 в %	t_1 в град.	t_2 в град.	m_0 в *кг/м³ час*	Система внутрибарабанных устройств
Глина	22	5	500—700	80—100	50—65	Подъемно-лопастная
Глина огнеупорная . .	9	0,7	800—1000	70—80	60	То же
Песок	6,1	0,3	1 000	90	100	Распределительная и перевалочная
Известняк . .	10	1,5	1 000	80	45—65	Подъемно-лопастная при противотоке
Трепел	40	15	550	120	50—65	Распределительная
Опилки . . .	40	15	350	100	30—40	То же
Уголь подмосковный . . .	30	10	450	150—200	40—60	Подъемно-лопастная

Напряжение по влаге относится к полному внутреннему объему барабана без учета загромождения его перегородками (8—10%). Отношение длины барабана L к диаметру D обычно 3,5 ÷ 7. Некоторые данные о барабанных сушилках, выпускаемых в СССР, приведены в табл. 19.

Таблица 19

Основные характеристики ячейковых сушильных барабанов*

Наименование показателей	Обозначение	Единица измерения	Цифровые данные					
Диаметр	D	*мм*	1 500	1 800	2 200	2 200	2 800	2 800
Длина	L	»	8 000	12 000	12 000	14 000	12 000	14 000
Отношение	$L:D$	—	5,3	6,7	5,5	6,4	4,3	5
Объем барабана	V	$м^3$	14,2	30,5	45,5	53,2	74	86,2
Число ячеек	z	шт.	25	28	28	28	51	51
Толщина стенок барабана	S	*мм*	10	12	14	14	14	14
Общий вес барабана без топки	G	*т*	13,6	24	42	45,7	65	70
Мощность привода	$N_э$	*квт*	6	10	12,5	15	20	26
Производительность по влаге	W	*кг/час*	920	2 000	2 950	3 460	4 800	5 600
Производительность по высушенной глине	G	*т/час*	2,8	6	9	10,2	14,4	16,8

* Значения даны при установке барабана с углом уклона $\alpha = 5—6°$, числе оборотов 5 об/мин и напряжении по влаге 65 *кг м³ час*. Начальная температура газов 800°. Время сушки около 25 мин. Производительность по высушенному песку в 1,5—2 раза выше. При увеличении числа оборотов производительность повышается.

Сушильные барабаны снабжаются в зависимости от вида материала различными системами внутренних устройств, схемы которых представлены на рис. 68.

а) Подъемно-лопастная система употребляется для крупнокусковых материалов, склонных к слипанию. Недостаток ее — расслоение газов, увеличивающееся тем сильнее, чем больше диаметр барабана, а также значительная высота падения материала, что способствует пылению и уносу сухого материала.

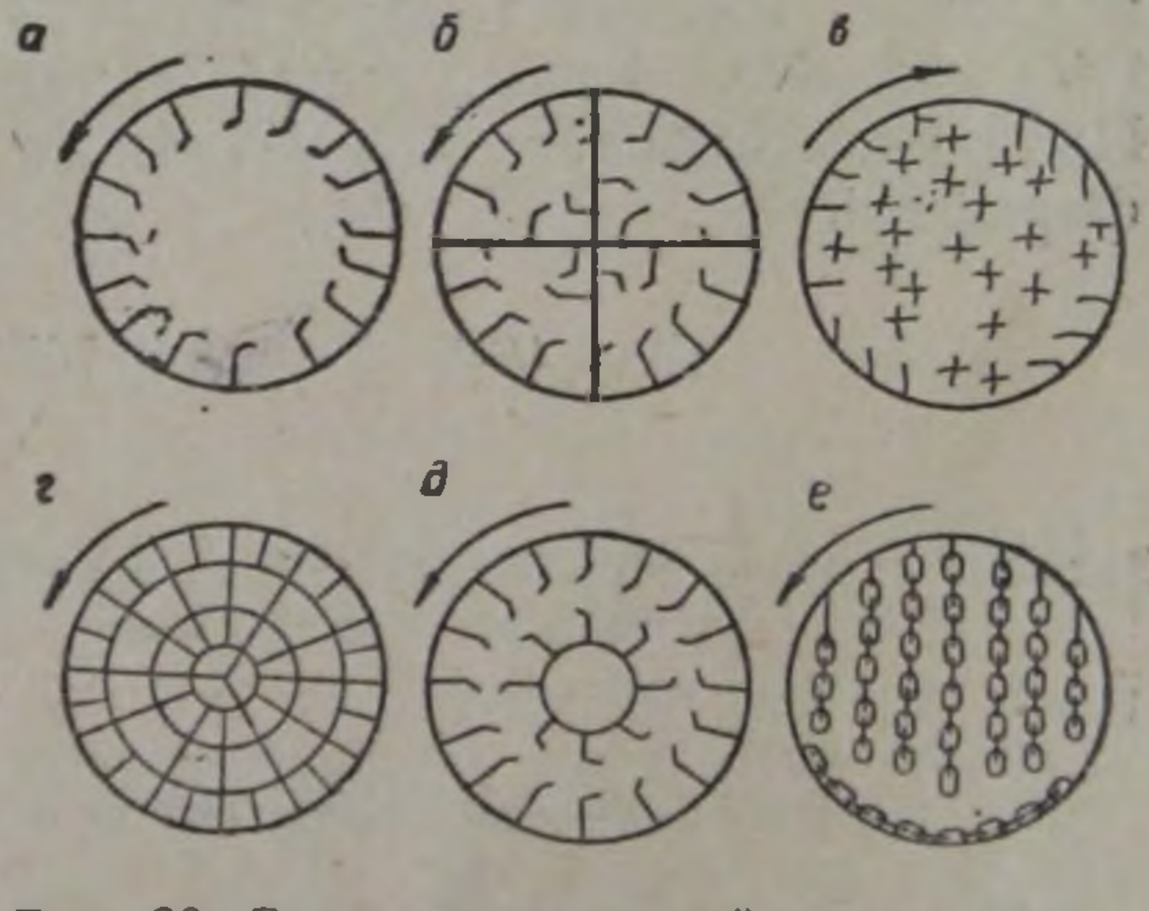


Рис. 68. Внутренние устройства сушильных барабанов (схемы)

б) Секторная система представляет собой подъемно-лопастную, но разделенную на несообщающиеся секторы. Употребляется для крупнокусковых, малосыпучих, имеющих большой удельный вес, материалов.

в) Распределительная система применяется для мелкокусковых, хорошо пересыпающихся материалов. Обеспечивает надежное перемешивание.

г) Перевалочная закрытая. Материал только переваливается при вращении барабана, что удобно для очень мелкого материала, склонного к пылению.

д) Подъемно-лопастная с центральными лопатками. Аналогична системе «*а*», но с меньшей высотой падения материала.

С входной стороны барабана устанавливаются лопасти или ковши, которые, поднимая материал, равномерно загружают его в ячейки. Для сушки глин со стороны загрузки материалом на расстоянии 2 *м* ячейки не делают, но футеруют огнеупором. На этом пространстве глина перед поступлением в ячейки предварительно подсушивается, чтобы не замазывать ячейки.

Для совмещения в одном агрегате сушки и помола глины сушильный барабан подвергается реконструкции (см. рис. 68,*е*). Часть перегородок по длине заменяется навеской цепей. Они разбивают куски глины, что улучшает теплообмен и ускоряет высушивание. Реконструированный барабан дает повышение производительности почти в 2 раза, экономию топлива на 25% и снижает неравномерность сушки.

Во избежание излишних присосов воздуха из помещения и нарушения режима работы в местах входа вращающегося барабана в неподвижные топочную и пылеосадительную камеры устраиваются лабиринтовые или скользящие уплотнения. За сушилкой устанавливается пылеулавливающая аппаратура. Для уменьшения потерь тепла в окружающую среду барабан изолируется асбестом, шлако-ватными матрацами и т. д. Теплоизоляция укрепляется проволочной сеткой и защищается стальным листовым кожухом. Тепловой баланс барабанной сушилки рассчитывается по обычной методике. Расход тепла на 1 *кг* испаренной влаги 1 000—1 400 *ккал/кг*. Время пребывания глины в барабане 20—35 мин. Производительность барабана, по К. К. Стрелову, выражается формулой

$$G = 46{,}5\,\frac{nR^{3}\alpha}{\sqrt{z}}\,\beta\,\mathrm{tg}\,[45^{\circ}(1-\beta)]\ [m/час]. \qquad \text{(IV-119)}$$

Здесь n — число оборотов барабана в об/мин;
R — внутренний его радиус в *м*;
α — угол наклона его к горизонту в град.;
z — число ячеек внутреннего устройства;
β — коэффициент заполнения объема барабана, $\beta = 0{,}1—0{,}3$.

Мощность привода барабана, по А. П. Ворошилову, вычисляется по формуле

$$N_{э} = 0{,}0013 D^{3} L \gamma_{ср} n \sigma\ [квт], \qquad \text{(IV-120)}$$

где $\gamma_{ср}$ — средний насыпной вес материала в *кг/м*³, для глины $\gamma_{ср} = 1{,}3$ *т/м*³;
σ — коэффициент мощности, составляющий при $\beta = 0{,}2$ и внутренних устройствах барабана по схемам рис. 68: а) $\sigma = 0{,}063$; б) $\sigma = 0{,}02$; в) $\sigma = 0{,}038$; г) $\sigma = 0{,}01$. С ростом β немного увеличивается и σ.

ГЛАВА IV

СУШИЛКИ ДЛЯ ЛИСТОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

К листовым изделиям относятся сухая гипсовая штукатурка, маты из минерального войлока и ряд других изделий. Листовые изделия характеризуются сравнительно большой внешней поверхностью и малой толщиной, поэтому особенностью их сушки является перенос большей части процесса в область внешней диффузии с сокращением влияния внутренней диффузии и общего времени

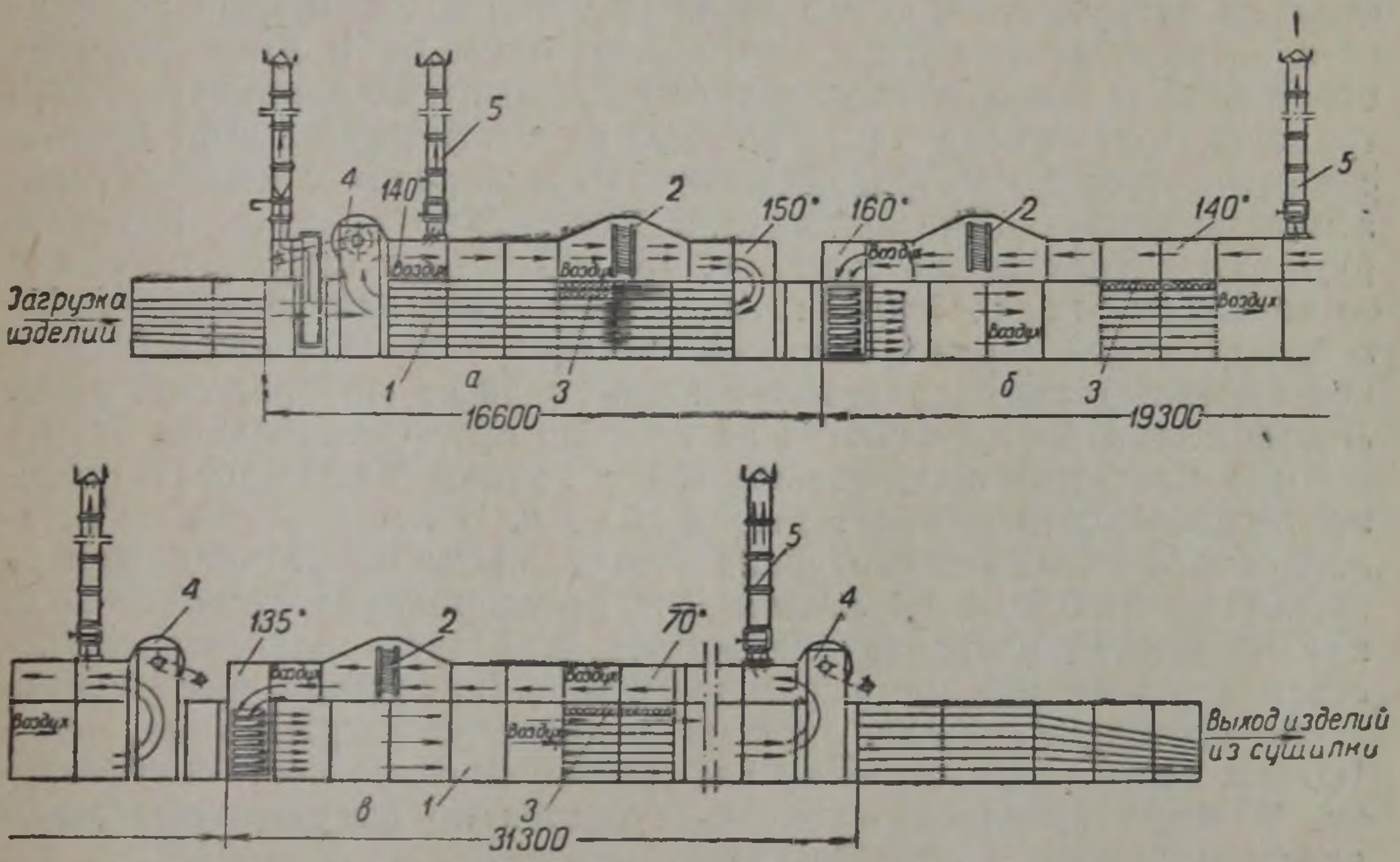


Рис. 69. Шестиярусная сушилка для сухой гипсовой штукатурки

а, б, в — зоны сушилки; *1* — сушильный туннель; *2* — калориферы для подогрева воздуха; *3* — радиаторы; *4* — вентиляторы рециркуляции воздуха; *5* — трубы для выброса отработавшего воздуха

сушки. Листовые материалы во избежание коробления должны сушиться весьма осторожно равномерно подводимым по ширине и длине сушильным агентом. Конструкции сушилок должны обеспечивать точное регулирование температуры, влажности и скорости агента.

В зависимости от схемы применяемой сушилки сушка листовых изделий может производиться конвективно воздухом, дымовыми газами и инфракрасными лучами. На рис. 69 представлена схема шестиярусной сушилки для сухой гипсовой штукатурки. Сушилка работает на воздухе и разделена на три зоны (*а*, *б*, *в*), каждая из которых имеет рециркуляцию со своим внешним и внутрен-

ним подогревом. Производительность сушилки 950—1 000 *м²/час*. Длина сушилки 67 *м*, ширина 3,7 *м*, высота 3,5 *м*. Первая зона по ходу листов противоточная, вторая и третья — прямоточные.

Радиаторы, расположенные в туннеле, выполнены в виде плоских секций из труб 38×3 *мм*. Поверхность нагрева радиаторов в зоне *а* — 7×68 *м²*, в зоне *б* — 9×68 *м²*, в зоне *в* — 16×68 *м²*. Соответственно этим зонам калориферы имеют поверхность нагрева (в *м²*) 350, 280, 130. Воздух подается в каждую зону двумя вентиляторами. Скорость воздуха в живом сечении сушилки 3—4 *м/сек*. Расход его на 1 *кг* испаренной влаги около 20 *кг/кг*. Со стороны загрузочного конца туннеля установлена секция воздушного затвора с вытяжным вентилятором среднего давления, что ограничивает поступление воздуха из помещения в рабочую часть туннеля. Подача воздуха на каждый из шести ярусов выполняется с помощью сопловых распределительных коробок с индивидуальными регулирующими шиберами. Количество воздуха, циркулирующего в трех зонах сушилки, 150 000 *кг/час* при соотношении по зонам $а : б : в = 0{,}43 : 0{,}41 : 0{,}16$. Стены сушилки представляют собой стальной каркас, обшитый листовой сталью. Между обшивкой закладывается теплоизолирующий слой из минеральной ваты. Листы штукатурки подаются на каждый ярус специальным загрузочным мостиком и передвигаются с помощью роликовых транспортеров. Высота каждого этажа 305 *мм*. В зависимости от установленного оптимального срока сушки листы могут двигаться со скоростью от 0,9 до 1,4 *м/мин*. Для регулирования скорости хода привод цепной передачи снабжается или электродвигателем постоянного тока, или при переменном токе вариатором числа оборотов. Расстояние между листами необходимо держать не менее 100 *мм*. По ширине сушилки размещается по два листа штукатурки. Часовая производительность сушилки по высушенному материалу вычисляется по формуле

$$F_{час} = \frac{znLF_l}{(l_l+\delta)\tau} \ [м^2/час], \qquad \text{(IV-121)}$$

или

$$F_{час} = 60znb_l \cdot \frac{l_l}{l_1+\delta} v_{мин} \ [м^2/час], \qquad \text{(IV-122)}$$

где z — число ярусов в сушилке в шт.;
n — число листов по ширине сушилки в каждом ярусе;
L — общая длина сушилки в *м*;
F_l — площадь одного листа в *м²*;
l_l — длина одного листа (2,5—3,5 *м*) в *м*;
b_l — ширина одного листа (1,2 *м*) в *м*;
δ — расстояние между листами по длине сушилки (от 0,1 до 0,5 *м*) в *м*;
τ — срок сушки в час; обычно 0,9—1,1 часа;
$v_{мин}$ — скорость движения листов по роликовому транспортеру в *м/мин*. Рекомендуется в пределах 1—1,1 *м/мин*.

Часовую производительность сушилки по испаренной влаге можно определить на основе следующего расчета. Состав штукатурки на 1 $м^2$ (примерный):

	Сырой	Сухой
Гипса в *кг*	7	8,1 (двугидрата)
Картона в *кг*	0,8	0,8
Воды в *кг*	5,2	0,1
	13	9

Испаряется воды 13—9=4 $кг/м^2$.

Начальная влажность листов штукатурки по отношению к весу сухих листов находится в пределах w_1=35—45%, конечная w_2=0,5—1,5%, вес 1 $м^2$ сухого листа при толщине листа 0,01 *м* составляет g_i=8,5—9 $кг/м^2$. Часовое количество испаренной влаги можно определить по формуле

$$W = g_i F_{час} \cdot \frac{w_1 - w_2}{100} \ [кг/час]. \qquad \text{(IV-123}$$

Вся влага испаряется по зонам в соотношении: 35—38% в первой зоне; 40—43%—во второй и 20—25% в третьей зоне. Удельный расход тепла на 1 *кг* испаренной влаги в этой сушилке 1 200—1 400 *ккал/кг*; расход пара при давлении 12 *атм* 2,5 *кг/кг*, или 8—9 $кг/м^2$ штукатурки. Для сушки гипсоволокнистой штукатурки могут также использоваться высокомеханизированные многоярусные туннельные сушилки описанной выше конструкции.

При производстве минерального войлока на связке из синтетических смол последняя в виде водной эмульсии распыляется паровой форсункой в камере осаждения для обволакивания получающихся волокон минеральной ваты. Для испарения влаги и полимеризации смолы, чтобы связать отдельные волокна в войлок и одновременно уплотнить войлок, используют конвейерные сушилки. Сушилка конструкции Строймехмонтажа (рис. 70) представляет собой туннель с габаритами 17 430×5 025×3 092 *мм*, внутри которого расположено два сетчатых транспортера. Рабочая ширина сетки 1 500 *мм*, длина между осями барабанов 15 *м*. Длина туннеля 14 *м*. Ленты транспортеров могут двигаться со скоростью v=0,36—0,51—1,10—2,15 *м/мин*. Движение двух средних по высоте ветвей обоих транспортеров направляется в одну сторону; для придания войлоку нужной толщины с помощью этих ветвей он затягивается и сдавливается. Расстояние между рабочими ветвями транспортеров в зависимости от необходимой толщины войлока может устанавливаться от 40 до 90 *мм* (чаще 40 *мм*). Сушка минерального войлока в этой сушилке происходит воздухом или бессернистыми дымовыми газами с температурой их при входе от 130 до 180° (для смол фенолформальдегидной группы бо́льшая, для карбамидной — меньшая температура). Туннель двумя наклонными перегородками разделен на две сушильные зоны. Газы входят в сушилку посередине и проходят снизу вверх через слой движущегося к выходу войлока, окончательно подсушивая его. На

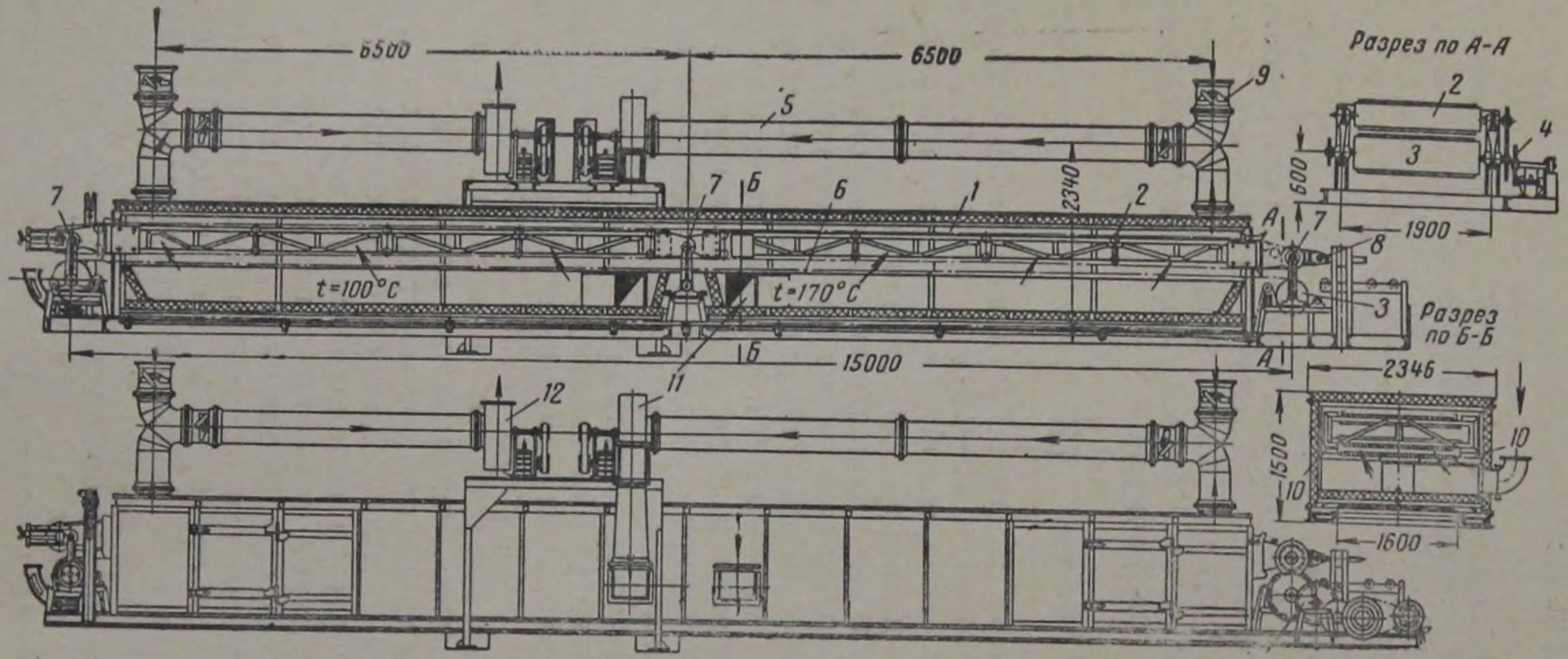


Рис. 70. Конвейерная сушилка для минерального войлока

1 —камера; *2* — верхний транспортер; *3* – нижний транспортер; *4* — привод; *5* — воздуховоды; *6* – уголки-опоры рабочей ветви транспортера; *7* и *8* — регулятор толщины слоя; *9* — патрубок подсоса холодного воздуха; *10* — подача горячих газов; *11* — вентилятор рециркуляции; *12* — вентилятор выброса

выходном конце прямоточной зоны установлен циркуляционный вентилятор для подачи отработавших газов в первую противоточную зону. Так как температура газов при входе в нее поддерживается порядка 100°, то на всасе вентилятора предусмотрен патрубок подсоса атмосферного воздуха. Поток воздуха, выходящий из сушилки, разветвляется: часть воздуха уходит на новый подогрев в калорифер, часть же удаляется в атмосферу. При сушке дымовыми газами часть их идет на смешение со свежими газами в смесительный колодец после специальной топки или печи, газы из которой используются для сушки войлока. Остальная часть выбрасывается в атмосферу. Начальная влажность войлока до сушки зависит от способа изготовления и обычно не превышает $w_1=30\%$. Конечная влажность $w_2=0{,}2—2\%$. Объемный вес войлока около 250 *кг/м*³. В первой зоне испаряется несколько больше воды (на $30\div50\%$), чем во второй. Температура газов на обоих торцах сушилки превышает температуру материала: в конце сушилки на 20—30°, в начале сушилки на 15—25°, но здесь она должна быть несколько выше, чем температура росы удаляемого сушильного агента. Температура войлока на выходе из сушилки составляет 95—100°, при переходе из первой во вторую зону порядка 60—70°. Удельный расход тепла на 1 *кг* испаренной влаги составляет около 1 200—1 300 *ккал/кг*. Расчет двухзонной сушилки гребует увязки в *Id*-диаграмме параметров сушильного агента обеих зон. Стены конвейерной сушилки выполнены из металлической обшивки на каркасе с засыпкой минеральной ваты в качестве теплоизоляции. Во избежание отравления парами фенолформальдегида сушилка должна работать под разрежением (2—3 *мм* вод. ст.). Сопротивление газов при проходе через лист войлока составляет 0,4—0,6 *мм* вод. ст. на 1 *мм* его толщины. Продолжительность сушки войлока регулируется скоростью транспортеров и составляет в среднем около 15 мин. Производительность конвейерной сушилки определяется по формуле

$$G = 60bhv\gamma_0\ [кг/час], \qquad \text{(IV-124)}$$

где b и h — ширина и толщина войлока в *м*;
v — скорость его передвижения в *м/мин*;
γ_0 — объемный вес в *кг/м*³. Первый сорт имеет $\gamma_0=250$, третий — 300—400 *кг/м*³.

ГЛАВА V

СУШИЛКИ ДЛЯ КИРПИЧА, КЕРАМИЧЕСКИХ КАМНЕЙ И ПЛИТ

1. Основные способы сушки

Штучные формованные изделия: глиняный кирпич, керамические камни, плитки, канализационные трубы, изделия из гипса, теплоизоляционные изделия проходят сушку в искусственных сушил-

ках. Эти сушилки выполняются камерными, туннельными, конвейерными с принудительной подачей и отводом теплоносителя по одному из вышеуказанных вариантов сушки. Наиболее широко распространен способ конвективной сушки, причем сушка в туннельных сушилках непрерывного действия является более прогрессивной, чем в камерных сушилках периодического действия. Производительная скоростная и качественная сушка формованных изделий может быть только при условии выбора рациональной садки изделий, равномерности омывания возможно более полной поверхности каждого изделия при скорости сушильного агента в каналах садки не ниже 2—3 *м/сек* и повышенном его расходе (для керамики до 80—100 *кг/кг* испаренной влаги).

Прочность садки зависит от системы, плотности ее и от той нагрузки, которую может выдержать нижний слой сырца данной влажности при условии передвижения садки на вагонетках (толчки, сотрясения). Чем выше влажность сырца, тем меньшую нагрузку на 1 $см^2$ он выдерживает. Для уменьшения давления на нижние слои садки употребляется садка изделий на полках деревянных, керамических и др. Однако полочная сушка изделий имеет ряд недостатков: она вызывает «рамочные» трещины, сами рамки служат недолго и затраты на них при частой замене довольно велики. Установка сырца на полках по сравнению со штабельной или бесполочной садкой снижает плотность и, следовательно, производительность сушилки на 20—30%, увеличивая одновременно и удельные расходы тепла и воздуха на 1 *кг* испаренной влаги. Согласно исследованиям РОСНИИМСа, прочный штабель из невакуумированного стандартного сырца влажностью 20—23% может быть получен при высоте только в 4—6 рядов, тогда как для вакуумированного сырца высота садки увеличивается до 10 рядов. Садка прямая устойчива, ельчатая и косая неустойчивы. В соответствии с этим высота сушилки для бесполочной сушки ограничивается 10 рядами. Как предварительное решение при недостаточной прочности сырца рекомендуется применение двухъярусной укладки с промежуточной разгрузочной полкой. Вагонетки при этом укорочены до 1 *м* вместо обычной их длины в 2 *м*. Возможна бесполочная сушка керамических камней при снижении их формовочной влажности и глубоком (700—720 *мм* рт. ст.) вакуумировании. В конвейерных агрегатах сушилка — печь, которые сейчас разрабатываются, сырец укладывается на конвейер в один-два ряда по высоте, и предварительная прочность сырца не играет столь существенной роли. Преимущество конвейерных агрегатов состоит в возможности механизации садки и бесперегрузочном направлении сырца в печь для обжига. Кроме того, конвейерный способ удобен для применения интенсивной и экономичной сушки инфракрасными лучами. Канализационные трубы при сушке подвешиваются вертикально на конвейерных тележках.

Плотность садки и равномерность омывания сушильным аген-

том возможно более полной поверхности каждого изделия — два взаимно противоположных требования. С уменьшением плотности садки увеличивается степень омывания поверхности изделий и вначале производительность сушилки растет, а затем начинает уменьшаться.

Максимальная производительность соответствует наивыгоднейшей садке, которую определяют моделированием или предварительными производственными опытами.

Для равномерности омывания садки сушильным агентом необходимо устранить свободный проход газов по линии наименьшего сопротивления около стен и потолка, оставляя зазоры между ними и садкой не более 20—40 *мм*. Нижние ряды садки следует делать на 20—30% менее плотными, чем верхние, выкладывая сплошной канал посередине и внизу садки для прохода газов. Пустоты изделий располагаются осями по движению газов и только верх садки в туннельных сушилках может быть перекрыт изделиями, поставленными поперек. Для равномерности омывания скорость в живом сечении садки должна быть не менее 2 *м/сек*, а высота сушильного туннеля возможно меньше, так как при большой высоте резкое расслоение газов неизбежно. При высоких скоростях движения сушильных газов плотность садки, а следовательно, и производительность сушилки может быть повышена, однако зазоры между изделиями не должны уменьшаться ниже 15 *мм*, так как отвод влаги из таких каналов затруднителен и сушка в этих местах задерживается. Чем выше скорость газов и больше сопротивление садки, тем лучше должна быть уплотнена сушилка.

Количество сушильного агента на 1 *кг* испаренной влаги не должно быть малым, так как при выходе его из сушилки при относительной влажности, близкой к $\varphi=100\%$, на только что введенном в сушилку сырце начинает конденсироваться влага, и сырец разрушается. При сушке изделий из высокочувствительных глин должна применяться рециркуляция отработавших газов, поскольку она не только создает мягкий режим, но и значительно увеличивает скорость сушильного агента.

Сушка инфракрасными лучами от электрических, керамических и металлических излучателей применяется для тонкостенных изделий, например плиток, передвигающихся на конвейере. Для ускорения процесса сушки и повышения его экономичности целесообразно применение способа последовательного короткого облучения для нагрева материала и более длительного перерыва для создания интенсивного движения влаги от центра изделий к периферии. Применение сушки инфракрасными лучами в чистом виде менее целесообразно, нежели использование комбинированного радиационно-конвективного метода. При комбинированной сушке энергия инфракрасных лучей используется для нагревания материала с целью повышения коэффициента потенциалопроводности (влагопроводности), тепло же для испарения влаги берется при

подводе нагретого воздуха, как при обычной конвективной сушке. Качество материала при этом получается лучше и срок сушки меньше. Важным преимуществом метода сушки инфракрасными лучами является гибкость регулирования теплового потока и быстрое распространение тепловой энергии, превращенной из лучистой, к центру изделия. Влагоотдача при этом повышается в 3 раза и более. Производятся опыты по сушке инфракрасными лучами и сложных по форме керамических камней.

Токи высокой частоты применяются в производственном масштабе для сушки древесины, для керамических же и других строительных деталей этот способ еще находится в стадии начального эксперимента. В чистом виде сушка токами высокой частоты неэкономична и она объединяется с конвективной, оставаясь и при этом дороже сушки чисто конвективной в 3—5 раз. При значительной интенсивности сушка токами высокой частоты не обеспечивает достаточной равномерности высушиваемого изделия.

2. Камерные сушилки периодического действия

На кирпичных заводах для сушки глиняного сырца широкое распространение получила камерная сушилка конструкции Росстромпроекта, поперечный разрез которой показан на рис. 71. Длина камеры 8—12 *м*, ширина около 1,5 *м*, высота от пода 3 *м*. Камеры соединяются в блоки, расположенные обычно друг против друга и обслуживаемые общим газоподводящим каналом. От этого канала сушильный агент направляется к камерам и проходит по двум боковым каналам *А*, находящимся под решетчатым подом каждой камеры. Из боковых каналов свежий газ поднимается через садку сырца, способствуя многократной циркуляции газовых потоков в сечении камеры. Охладившиеся и увлажненные газы спускаются и, проходя через средний канал *Б*, удаляются через общий сборный канал вентилятором в атмосферу, а при наличии у блока сушилок рециркуляционного канала частично возвращаются для смешения со свежим теплоносителем перед его поступлением в камеру. Рекомендуется с целью обеспечения устойчивости работы вентилятора для отсоса газов от печи и от подтопков ставить отдельные вентиляторы и подводить теплоноситель к сушильным установкам под небольшим напором во избежание взаимоудара газовых потоков при встрече — под углом около 10—20°. Чтобы каждая камера в

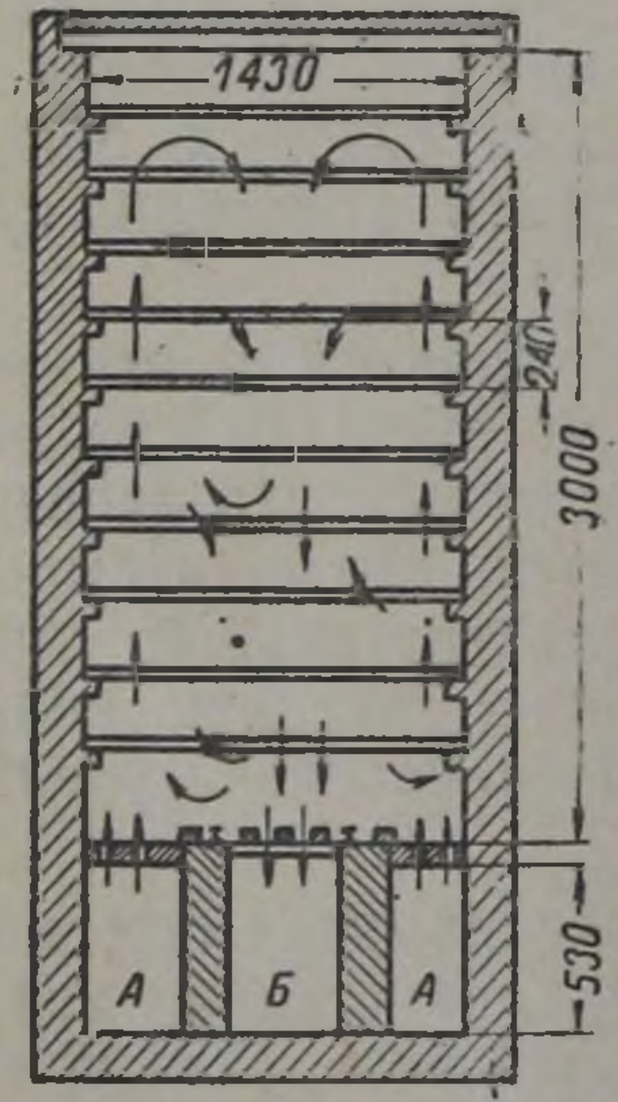


Рис. 71. Камерная сушилка для глиняного сырца (поперечный разрез)

А — каналы подачи газов; *Б* — канал отсоса газов

блоке одинаково снабжалась газом, необходимо иметь сечение общего газоподводящего канала примерно вдвое больше суммарного сечения газовых отводов к камерам. Боковые и центральный каналы перекрываются решетками, задача которых заключается в правильном распределении теплоносителя по длине камеры. Так как в ближайшие щели со стороны подвода газов из боковых каналов стремится пройти больше газов, нежели через щели у отсосного конца центрального канала камеры, то, очевидно, распределение щелей по длине должно быть неравномерным. Согласно опытам РОСНИИМСа при длине камеры в 10 *м* распределение щелей над отводящим центральным каналом принимается следующим: участок № 1 (от торца подвода газов) — длина 3,5 *м* — 4 щели по 25 *мм*, что дает общую их ширину 100 *мм*. Участок № 2—длина 3,3 *м*—12 щелей по 25 *мм*, общая ширина — 300 *мм*. Участок № 3 (сторона отсоса газов) — длина 3,5 *м* — 20 щелей по 25 *мм*, общая ширина 500 *мм*. Температура газов в общем газоподводящем канале поддерживается порядка 120—150° при количестве газов на 1 *кг* испаренной влаги не менее 50 *кг/кг*, но лучше выше. Давление в газоподводящем канале составляет 4—6 *мм* вод. ст., а при достаточно плотном ограждении канала для интенсификации сушки может быть поднято и выше (8—10 *мм* вод. ст.). При скоростном режиме сушки количество теплоносителя остается постоянным в течение всего периода сушки, поэтому клапаны на подводящих каналах камер открываются полностью с самого начала сушки без какой-либо последующей регулировки подачи теплоносителя. Окончание сушки определяется по достижению конечной температуры, после чего клапан на подаче газа закрывается. Начальная температура газов в сушильной камере около 40°, конечная — порядка 55°. Рекомендуемые РОСНИИМСом скорости влагоотдачи сырца приведены в табл. 20.

Таблица 20

Скорость влагоотдачи сырца

Время от начала сушки в час.	Влагоотдача *г сырец*, при общем сроке сушки в час.				Примечание
	72	60	48	36	
8	20	40	70	220	Интенсивность сушки доходит при скоростном режиме до 250—300 *г/м²час*
16	70	105	170	380	
24	120	200	280	540	
32	190	300	400	650	
36	220	360	480	700	
48	340	500	650	—	
60	500	650	—	—	
72	650	—	—	—	

Необходимо помнить, что скоростной режим сушки может быть обеспечен только при условии соответствия потребностям сушилки тепловой и аэродинамической мощности тех устройств, которые эту сушилку обслуживают: подтопки, печи, вентиляторы, газоходы и т. п. Проверка их соответствия заданному режиму делается на основе положений, приведенных в соответствующих разделах книги. В качестве ориентировочных показателей РОСНИИМС реко-

мендует для камерных сушилок на 1 000 шт./час. сырца при температуре в общем газоподводящем канале 140° и отработавших газов 40° следующие величины:

	Без использования газов от печей	С использованием отходящих газов от кольцевых печей
Часовой расход условного топлива в *кг/час*	128	98
Площадь колосниковой решетки подтопка в $м^2$	2,2	1,6
Сечение колодца холодного воздуха в $м^2$	1,3	0,7
Часовая производительность нагнетающих вентиляторов сушилок в $м^3/час$	24 300	От кольцевой печи 13 600, от подтопка 14 750
Часовая производительность отсасывающих вентиляторов в $м^3/час$.	31 200	36 600
Часовая производительность дутьевого топочного вентилятора в $нм^3/час$	2 400	1 840

Количество влаги, удаляемой с каждого сырца, принято в этих расчетах равным около 650 *г*. Для расчетов сушилок принимают: вес влажного сырца без вакуумирования 4,6 *кг*, с вакуумированием 5 *кг*, при сушке удаляется влаги 0,6—0,7 *кг/шт* сырца. Влажность кирпича после сушки 6—8%. Для ускорения сушки глиняного сырца при жирных глинах должны проводиться следующие мероприятия: введение отощителей, применение дегидратированной глины, запрессовка топлива, паропрогрев глины. Все это увеличивает критический градиент влажности. Рациональная садка сырца обеспечивает бо́льшую поверхность его омывания газовым потоком. Так как условия сушки в нижних и средних частях садки хуже верхних и боковых, то внизу, в середине, делается разреженная садка, а вверху и сбоку уплотненная. Количество теплоносителя должно обеспечивать скорости его в каналах садки не ниже 1,5—2,5 *м/сек*. Для этой цели и для смягчения режима рекомендуется применение рециркуляции отработавших газов.

Особенностью камерных сушилок с эжекторами является подача сушильного агента в камеру под напором вентилятора через суживающиеся сопла. Вытекающая из сопел газовая струя обладает большой скоростью (20—30 *м/сек*), вследствие чего она эжектирует находящуюся вблизи массу ранее неподвижного газа и увлекает его с собой, обеспечивая энергичную циркуляцию газов по сечению сушилки. Многократная циркуляция ликвидирует возможность образования застойных участков, способствует хорошему и равномерному обтеканию сушильным агентом всего объема садки изделий и повышению качества сушки. Сопла могут быть расставлены с противоположных сторон сушилки и включаться попеременно. Такой метод позволяет не только создать в объеме

сушилки энергичную циркуляцию, но и делает ее реверсивной. Реверсивность сушильного агента при обтекании изделий способствует особенно качественному, равномерному высушиванию и сокращает общую продолжительность сушки. Конструкция эжекционных сушилок из-за добавления эжекторов, удлиненных воздуховодов и вентиляторов высокого давления сложнее, а затрата электроэнергии выше, чем в обычных сушилках.

Сушка крупных (4×3×0,1 *м*) гипсолитовых изделий производится в периодических сушилках конструкции Теплопроекта с выкатными тележками. Продолжительность сушки (w_1=35%, w_2=3%)—20 час. Температура сушильного агента (воздуха из паровых калориферов)—90°. Рабочие габариты камеры 4,1×6,0×2,3 *м*. Расход тепла на 1 *кг* испаренной влаги 930 *ккал/кг* испаренной влаги.

Воздух подводится в камеру через два канала, расположенных вдоль боковых стен, проходит через садку изделий и удаляется через средний канал из камеры частично в атмосферу, частично возвращается рециркуляционным вентилятором в камеру в смеси со свежим агентом.

3. Туннельные сушилки непрерывного действия

Туннельная сушилка представляет собой закрытый коридор, в который с одного конца подаются через определенные промежутки времени вагонетки с сырыми, а с другого конца выходят вагонетки с высушенными изделиями. Направление сушильного агента может быть противоточное, прямоточное и сложное с использованием прямотока и противотока комбинированно. Туннельные сушилки относятся к непрерывно действующим и имеют все связанные с этим преимущества перед периодическими камерными сушилками. Туннельные сушилки применяются для сушки кирпича, керамических, гипсовых, теплоизоляционных и других изделий. Для удобства компоновки цеха часто туннели соединяются в блоки.

Длина отдельных туннелей 25—50 *м*, высота 1,6—2 *м*, ширина однопутного туннеля 0,9—1,6 *м*. Применение двупутных и многопутных туннелей оправдывается редко, так как широкий туннель способствует расслоению газовых потоков, неравномерности сушки и требует усложненной конструкции уплотнения широких дверей.

Стены туннелей выполняются из сборных железобетонных деталей, из кирпича (250 *мм* внутренние, 380 *мм* и более наружные), из стального каркаса и листовой стали с прокладкой из минеральной ваты.

Перекрытие состоит из железобетонной плиты 60—100 *мм*, пароизоляционного слоя (2—3 листа толя), шлаковой теплоизолирующей засыпки 150—300 *мм*, шлакобетонной корки 20—30 *мм* и слоя руберойда по пергамину на битумной мастике.

Большие тепловые потери через двери сушилок заставляют обращать особое внимание на их конструкцию. При выполнении их из дерева они должны быть снабжены слоем тепло- и гидроизоля-

ции, покрыты стальным листом и для придания жесткости снабжаться каркасом из угловой стали. Запор дверей по своей конструкции должен обеспечивать плотное прилегание двери по всему контуру.

Подача вагонеток осуществляется толкателями: поршневыми (пневматическими и гидравлическими), рычажными (пневматическими и электрическими), винтовыми, реечными и цепными с электроприводом.

Темп проталкивания вагонеток должен соответствовать производительности сушилки. В современных сушилках работа механизмов толкателей и открывания дверей при впуске и выпуске очередной вагонетки сблокированы автоматом.

Подвод теплоносителя к изделиям и отвод его имеют решающее значение для высококачественной сушки. Теплоноситель может быть подан прямотоком, противотоком, а также по смешанной схеме, когда сушилка разделена на зоны, в каждой из которых своя схема взаимодвижения материала и газа. При сушке некоторых изделий при смешанном варианте теплоноситель подается в середину сушилки, после чего, разветвляясь к обоим концам, создает в одной части сушилки прямоток, а в другой части противоток. Это позволяет лучше выполнить требования к сушке изделия в различные периоды. Двигающиеся противотоком газы больше нагревают изделие в конце сушки и лучше используют свое тепло, в то время как прямоток предохраняет от недопустимого перегрева уже выходящую продукцию в конце сушки. Такой перегрев был бы опасен для некоторых изделий (например, гипсовых, поскольку при температуре выше 70° гипсовые изделия начинают дегидратироваться и разрушаться). Для гипсовых изделий применяется прямоток или двухзонный смешанный вариант.

Керамические изделия сушатся обычно противотоком, так как при этом недавно загруженные изделия, особо чувствительные к сушке в первый ее период, встречают газы уже сильно охлажденные и увлажненные. Сушка их при мягком режиме избавляет изделия от перенапряжений и трещин. После того, как влажность изделия снизится до критической, режим сушки керамики может быть более жестким без опасения каких-либо перенапряжений в материале. К этому времени вагонетка с изделиями подойдет к выходному концу туннеля, где вступающие в сушилку газы имеют малую относительную влажность и более высокую температуру, но уже безопасную для подсушенного изделия.

Режим сушки для различных изделий выбирается на основе экспериментальных данных по каждому изделию и материалу.

При сушке глиняного сырца в туннельных сушилках можно принять следующие показатели аэродинамического и теплового режимов.

Давление газов в нагнетательном канале в зависимости от его плотности 1—3 *мм* вод. ст. Разрежение в туннелях 2—4 *мм* вод. ст. Сопротивление проходу газов зависит от плотности садки и при расстоянии между кирпичами 15—20 *мм* оно достигает 0,5—

0,7 *мм* вод. ст. на 1 *пог. м* длины садки. Расход газов на 1 *кг* испаренной влаги 80—100 *кг/кг* испаренной влаги. На 1 000 шт. сырца испаряется в среднем 650 *кг* влаги. Температура газов перед туннелями определяется чувствительностью глин к сушке и составляет 60—120°, температура отходящих газов 25—30° при относительной влажности 85—90%. Удельный расход тепла на 1 *кг* испаренной влаги 1 300—1 500 *ккал/кг* при работе на дымовых газах и 1 900—2 100 *ккал/кг* при работе на калориферном воздухе, считая по теплу топлива.

При ориентировочных подсчетах РОСНИИМС рекомендует следующие укрупненные показатели для туннельных сушилок на каждые 1 000 шт/час строительного кирпича. Температура теплоносителя принимается в центральном канале 65° и отработавших газов в конце сушилки 25°:

	Сушка дымовыми газами	Сушка воздухом
Площадь колосниковой решетки подтопка в $м^2$	2,2	3
Сечение колодцев холодного воздуха в $м^2$	1,3	—
Поверхность нагрева калориферов в $м^2$	—	100
Часовая производительность нагнетающих вентиляторов в $м^3/час$.	47 600	47 600
То же, отсасывающих в $м^3/час$ . . .	55 500	55 500
Часовая производительность дутьевых топочных вентиляторов в $м^3/час$	2 400	2 900

Срок сушки пустотелых изделий по сравнению со сроком для полнотелого кирпича может быть без ущерба сокращен на 25%.

Конструкции туннельных сушилок достаточно разнообразны. Наряду с простейшими противоточными сушилками имеются и сушилки многозонные с рециркуляцией отработавших газов и позонным регулированием сушильной смеси по температуре и влажности. Сушильным агентом для грубых строительных изделий в большинстве случаев служат дымовые газы, для облицовочных и архитектурных деталей — воздух, нагретый в калориферной установке.

На рис. 72 представлена схема противоточной туннельной сушилки конструкции Укрпромпроекта. Число туннелей в блоке 6. Каждый туннель длиной 36,3 *м*, шириной 1,6 *м*, высотой от головки рельса 1,65 *м*. В туннеле помещается 30 вагонеток. По длине туннели разделены на четыре зоны.

В первой по ходу изделий зоне они прогреваются конвекционными токами от паровых ребристых труб, расположенных под входящими вагонетками. Здесь режим первоначального нагрева мягок и не создает в изделиях больших градиентов влажности и температуры. Удаляющиеся из туннеля газы минуют эту зону, проходя под ней к сборному каналу. После прохождения первой зоны изде-

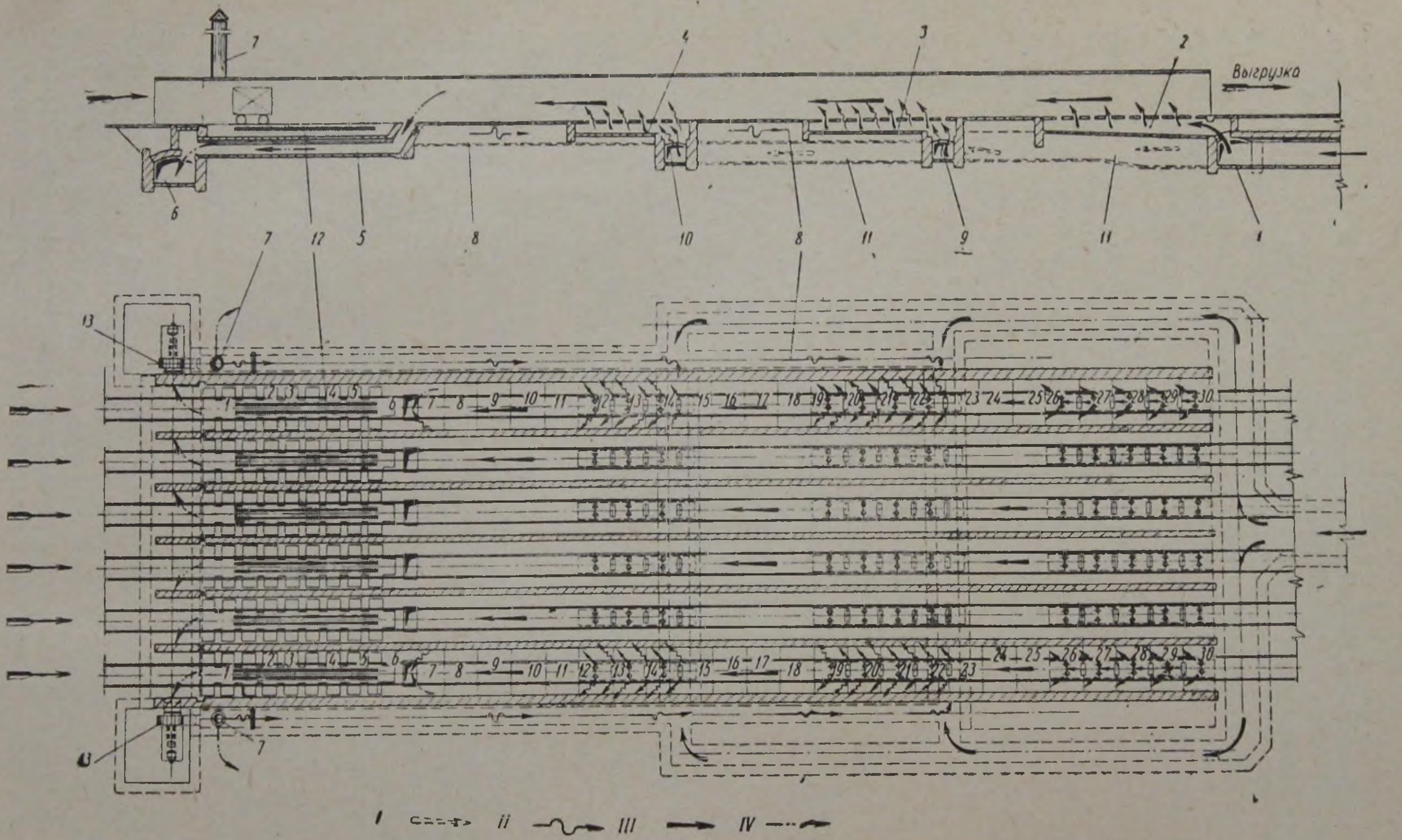


Рис. 72. Туннельная сушилка с рециркуляцией газов

I и *III* — потоки (невидимый и видимый) свежих газов; *II* — поток рециркулирующих газов; *IV* — поток отработавших газов; *1* — канал свежих газов; *2* — место выхода свежих газов; *3—4* — места выхода смеси свежих и рециркулирующих газов; *5* — канал отработавших газов; *6* — сборный боров отработавших газов; *7* — выхлопная труба; *8* — канал рециркуляции; *9—10* — поперечные каналы для подвода смеси свежих и рециркулирующих газов; *11* — боковой канал свежих газов; *12* — паровые ребристые трубы; *13* — вентилятор.

Цифры на боковых туннелях обозначают номера вагонеток

лия встречают газы, отработавшие в последующих трех зонах, — достаточно охлажденные и увлажненные. Режим мягкой сушки продолжается. Самые сухие и горячие газы из подтопков поступают в четвертую зону навстречу изделиям, выходящим из сушилки с небольшой влажностью (w_2=5—8%, т. е. ниже критической влажности), резкий режим для которых уже не опасен. Четвертая зона работает только на топочных газах с температурой их при поступлении 150—180°.

Часть газов из подтопка перед сушилкой поступает прямо к месту выхода изделий из третьей и второй зон. Перед входом в эти зоны топочные газы смешиваются с отработавшими в сушилке газами, подаваемыми из сборного канала на рециркуляцию. Это снижает температуру сушильной смеси и увеличивает ее влагосодержание. Таким образом, при продвижении через туннель изделия постепенно проходят четыре зоны с постоянно повышающейся температурой сушильного агента и с влагосодержанием его, легко регулируемым во второй и третьей зонах путем изменения кратности рециркуляции отработавших газов.

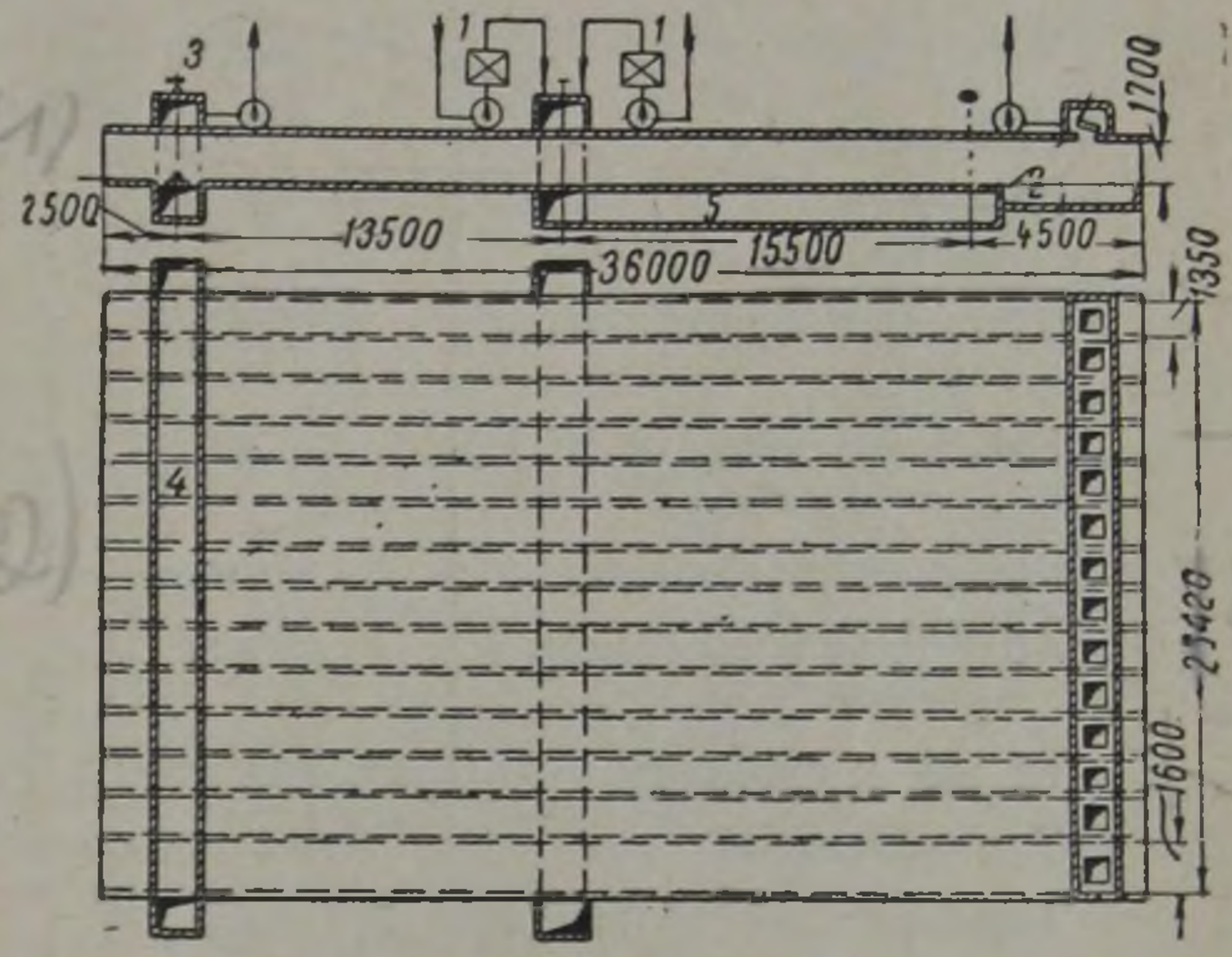


Рис. 73. Прямоточно-противоточная сушилка для гипсовых изделий

1 — калориферы для нагрева наружного воздуха; *2* — место установки толкателя; *3* — регулировочный шибер отсоса; *4* — отсосный канал; *5* — передаточный канал

Туннельная сушилка для гипсовых блоков и архитектурных деталей системы Гипростройматериалы показана на рис. 73. Она запроектирована как прямоточная, но может работать с подачей агента в среднюю часть туннелей. Техническая характеристика представлена в табл. 21. Ограждения выполняются из красного кирпича или сборных железобетонных панелей.

Схема многозонной туннельной сушилки конструкции Теплопроекта для плит из минеральной ваты представлена на рис. 74.

Размер плит 1 000×500×40. Производительность 420 плит/час. при сушке от влажности 70 до 2%. Сушилка состоит из двух блоков по четыре однопутных туннеля длиной сушильной части 46,25 *м*, шириной 1,23 *м* и высотой 1,98 *м*. В каждом туннеле 21 вагонетка длиной 2,2 *м*. Плиты укладываются на дырчатые поддоны, устанавливаемые на горизонтальных полках вагонетки по 48 шт. на вагонетку.

Таблица 21

Характеристики сушилок для гипсовых изделий

Показатели	Единица измерения	Сушилки	
		для гипсовых блоков	для архитектурных деталей
Производительность	*м²/год пог.м/год*	1 000 000	Карнизов 400 000
Число туннелей	шт.	13	1
Срок сушки	час.	28	6
Начальная и конечная влажности	%	35 и 6	50 и 6
Суточный выход вагонеток	шт/сутки	17	72
Габариты туннеля $l \times b \times h$	*м*	36×1,35×1,7	36×1,6×1,7
Габариты вагонеток	*мм*	1 750×1 100	2 000×1 450
Количество вагонеток в туннеле	*шт/т*	20	18
То же, в сушилке	шт. сушилок	260	18
Тип толкателя	—	Цепной, 2 шт.	
Интервал заталкивания	час.	1,4	0,33
Агент сушки	—	Горячий воздух 120° из паровых калориферов	
Температура его на выходе	град.	40—50°	
Количество испаренной влаги	*кг/час*	6 484	
Удельный расход тепла	*кг/кг* испаренной влаги	1 000	
Число вентиляторов и общая мощность	шт. и *квт*	9 шт. и 252	
Расход пара на калориферы	*кг/час*	Зимой 18 300, летом 13 100	
Давление пара и температура конденсата	*ата* и град.	5 и 70	

Туннели оборудованы индивидуальными цепными толкателями и откатчиками. Механизмы подъемных дверей сблокированы с работой толкателей.

Сушилка работает на смеси дымовых (500°) и отработавших газов (80°) с температурой смеси на выходе 150°. Длительность сушки 16 час. По ходу материала сушилка имеет четыре зоны с равным количеством испаренной влаги в каждой зоне, длина каждой из них: *I*—9 *м* (прямоток), *II*—9 *м* (противоток), *III* — 13 *м* (прямоток), *IV*—15,3 *м* (противоток).

Скорость газов в сушилке 2 *м/сек*. Подача в туннель производится через распределительные решетки боковых ниш. Отсос отработавших газов при 80° на рециркуляцию или выхлоп происходит также через боковые ниши. Одноименные зоны четырех туннелей объединены общими трубопроводами и обслуживаются одним общим циркуляционным вентилятором. Вентиляторы установлены между двумя блоками сушилок. Общая установленная мощность 12 электродвигателей вентиляторов 252 *квт*. Часовое количество испаряемой влаги 7 660 *кг/час* при удельном расходе тепла в 1 100 *ккал/кг* испаренной влаги.
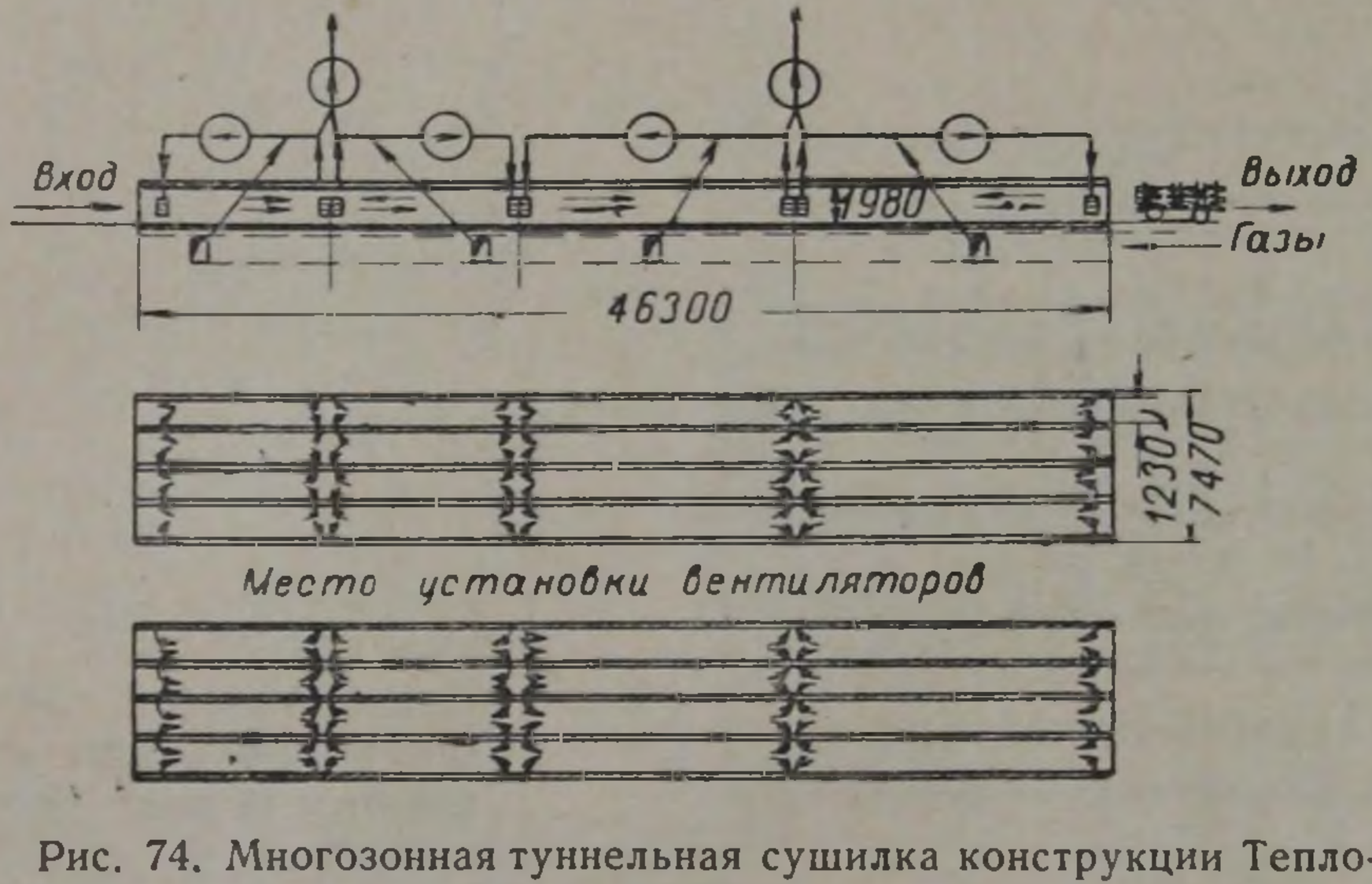


Рис. 74. Многозонная туннельная сушилка конструкции Теплопроекта

Температура сушильного агента при органической связке должна быть не выше 150°, так как плиты состоят из 80% минеральной ваты, 7% трепела и III битума марки 13%. Максимальная температура его при цементной связке может быть порядка 250—300°. Конечная температура отработавших газов должна превышать температуру точки росы, по крайней мере, на 20—30°.

Сушилка для торфоплит состоит из нескольких туннелей по 29 *м*, шириной 1,5 *м* и высотой 2,15 *м*. Сушилка двухзонная. В первой зоне (10 *м*) прямоток, во второй (19 *м*) противоток. Каждая зона работает с рециркуляцией отработавших газов. Температура сушильного агента 150—170°. Срок сушки торфоплит (w_1=85%; w_2=9%) 33 часа. Конструкция сушилок в остальном близка к описанной выше. Удельный расход тепла из-за большой продолжительности сушки и меньшей плотности укладки повышен.

4. Конвейерные сушилки

Конвейерные сушилки для формованных изделий используются для сушки керамических плиток, труб, гипсовых и других изделий. Их преимущество состоит в том, что здесь тепловая обра-

ботка изделий равномерна и для каждого изделия идентична, что отличает ее от сушки в садке. Кроме того, соединение конвейерной сушилки с конвейерной печью дает возможность получить полностью механизированную агрегатную линию, где изделия от формовки до готовой обожженной продукции идут без перекладывания. Такая линия весьма удобна для создания завода-автомата, например, керамических изделий.

По схеме движения конвейеры могут быть с преобладанием горизонтальных или вертикальных перемещений изделий.
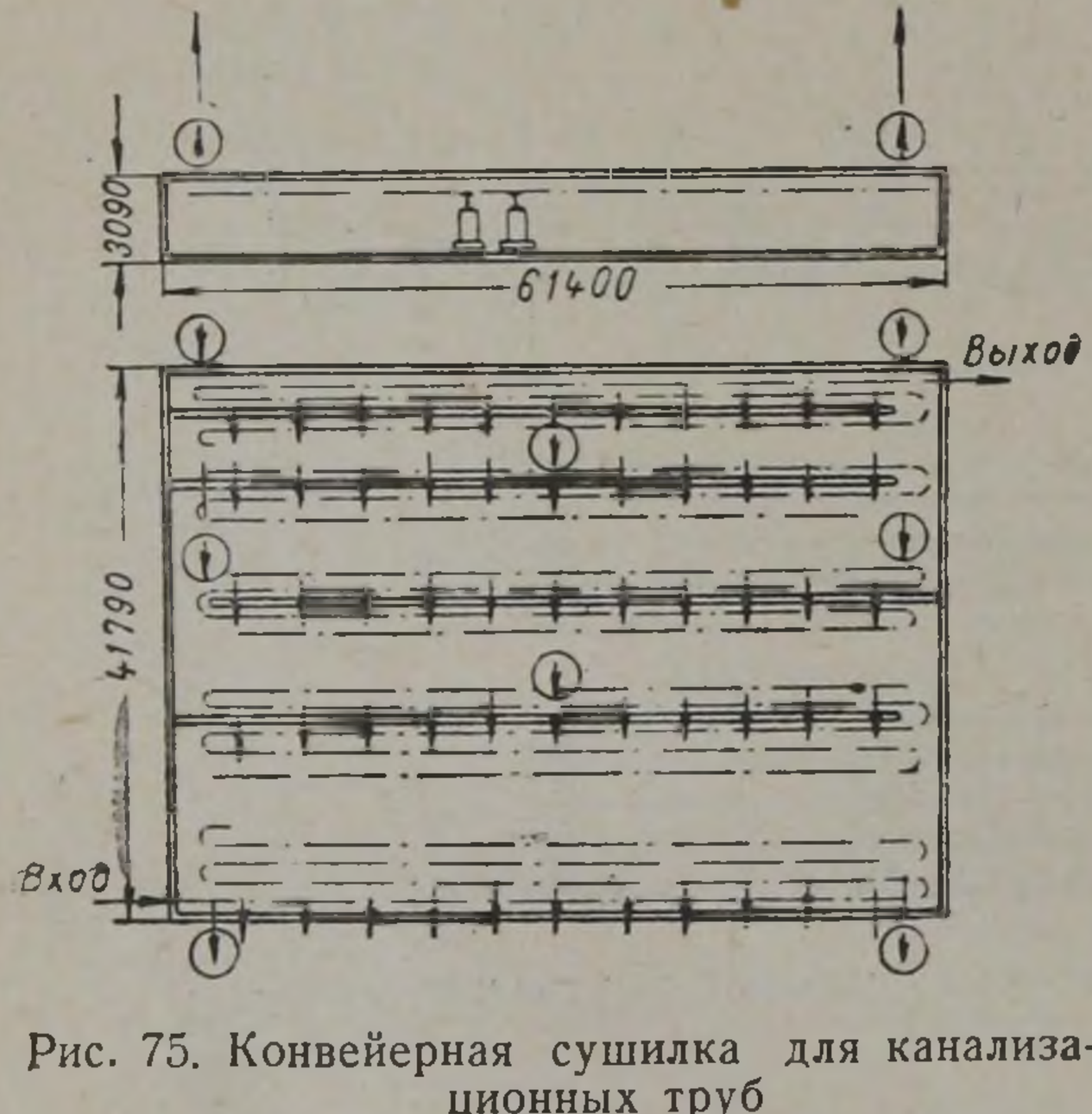


Рис. 75. Конвейерная сушилка для канализационных труб

Для мелких изделий применяется цепной конвейер с люльками, на полках которых и расположены изделия. Крупные изделия подвешиваются на захватах, укрепленных на звеньях цепи.

Теплоноситель, горячий воздух для облицовочных керамических или гипсовых изделий и дымовые газы, движется по заданному пути, эффективно омывая изделия. Для обеспечения мягкого режима сушки часть отработавшего теплоносителя подмешивается к свежему автоматическим регулированием по температуре и влажности теплоносителя при его поступлении в сушилку. Входной и выходной участки сушилки закрыты от проникновения наружного воздуха ширмами или защищены воздушными завесами.

Конвейерная сушилка для канализационных труб диаметром 350—600 *мм* конструкции Гипростройматериалы (рис. 75) производительностью 30 000 *т/год* в плане представляет собой камеру шириной 41,79 *м* и длиной 61,4 *м*, в которой зигзагообразно движутся подвешенные к конвейеру трубы. Всего в камере располагается 31 параллельный участок конвейера. Общая длина конвейера 1 734 *м*. Скорость его 0,83 *м/мин*. Мощность привода 7 *квт*. Шаг расположения кошек для труб диаметром 350—500 *мм* — 960 *мм*, для труб диаметром 600 *мм*—1 920 *мм*. Высота сушилки 3 040 *мм*. Сушильным агентом служит воздух из зоны охлаждения туннельных печей при его начальной температуре 150°. Число вентиляторов 8, установленная мощность 159 *квт*. На выходной стороне работают два нагнетающих вентилятора. В средней части сушилки два средних и два крайних рециркуляционных вентилятора. На входной стороне сушилки работают два отсасывающих

вентилятора. Начальная влажность труб 17,5%, конечная 3%. Расчетный срок сушки 36 час. Для труб диаметром 150—300 *мм* он сокращается до 24 час. Часовое количество испаренной влаги 648 *кг/час*. Удельная затрата свежего воздуха на 1 *кг* испаренной влаги 84 *кг/кг*. Удельный расход тепла 1 650 *ккал/кг*. Ограждения сушилок выполнены из сборных железобетонных конструкций.

5. Новые способы сушки

Теоретические исследования и экспериментальные данные показывают, что достигнутые в настоящее время сокращенные по сравнению с недавним прошлым сроки сушки, например для глиняного сырца со 140—100 час. до 48—16 час., не являются пределом. Наоборот, опыты научно-исследовательских институтов показывают, что можно сократить сроки сушки керамических камней до 4—6 час., облицовочных фасонных плит до 3—5 час., а плит внутренней облицовки даже до нескольких минут. Изделия при правильной организации процесса сушки выдерживают интенсивность сушки до 400 *г/м² час* и выше. Особенно это относится к тонкостенным, не сложным по конфигурации изделиям.

Одним из новых скоростных методов сушки изделий является способ сушки инфракрасными лучами, особенно при прерывистой радиации и в сочетании с конвективной сушкой. Специальные опыты по сушке радиацией керамики были поставлены Государственным керамическим институтом (ГИКИ). Поток инфракрасных лучей создавался электрическими излучателями. Плотность потока составляла 0,1 *вт/см²* на верхней поверхности и 0,05—0,08 *вт/см²* на нижней и боковой поверхности изделия. Продолжительность сушки сырца с 25 до 1% влажности составила всего 7 час., т. е. в 3—4 раза меньше продолжительности при конвективной сушке. В некоторых опытах безопасная интенсивность сушки достигала 3,25 *кг/м² час*. Прерывность инфракрасного излучения, как показали исследования А. В. Лыкова, П. Д. Лебедева и других ученых, экономит энергию на излучение и способствует созданию усиленного потока влаги от центра к периферии как за счет влагопроводности, так и термовлагопроводности при постоянном удержании градиента влажности ниже критического. Весьма экономично в производственных сушилках заменить электроизлучатели металлическими коробами, по которым проходят дымовые газы (400—500°), а для удаления влаги с поверхности изделий пропустить небольшое количество газов в качестве влагоносителя. Комбинированный радиационно-конвективный способ сушки изделий, движущихся на конвейере, позволит сократить сроки сушки в отдельных случаях в 10 раз по сравнению с существующими.

Радиационно-конвективная сушилка, разработанная под руководством Н. Н. Доброхотова, для плоских и тонких строительных изделий показана на рис. 76. Здесь транспортирующим механиз-

мом служит цепной люлечный конвейер, несущий 60 люлек размером 750×250×300 *мм*. Загрузка сырца происходит на верхнюю ленту, выгрузка с нижней ленты с того же конца сушила. Сушилка разделена по высоте металлическими листами на три зоны. Отопление происходит газом, сжигаемым горелкой беспламенного горения в камере, которая одновременно является и смесительной. Смесь газов поступает в верхний дымоход, отдавая часть своего тепла излучением через металлический лист первой зоне. Из верхнего дымохода четырьмя каналами 300×250 *мм* с каждой стороны сушилки газы проходят последовательно через нагревательные горизонтальные каналы двух последующих зон и отсасываются вентилятором, направляясь снова в смесительную камеру и частично в атмосферу. Регулирование газораспределения происходит шиберами на соответствующих участках дымоходов.

Новый периодический процесс сушки теплоизоляционных и других строительных материалов предложен А. В. Лыковым и экспериментально исследован Л. Ф. Янкелевым. Подлежащий сушке материал помещается в герметически закрывающийся стальной сосуд. Сосуд с внешней стороны обогревается, вследствие чего происходит частичное испарение влаги в материале, внутреннее пространство заполняется паром, давление которого доводится до 8—10 *ата*. Затем в течение 1—5 мин. сбрасывают давление в сосуде путем открытия спускного вентиля, примерно до половины максимального. Циклы подъема и сброса давления повторяются 5—10 раз. Таким путем создается градиент общего давления внутри материала, под влиянием которого происходит увеличение скорости переноса пара в десятки раз и резко растет общая интенсивность сушки. Эта интенсивность, если ее отнести только к периоду сброса давления, достигает громадной величины в 100—200 *кг/м² час*, а в среднем за весь процесс, учитывая понижение интенсивности по мере сушки, остается на высоком уровне, порядка 4—5 *кг/м² час* и выше. Преимуществом этого метода является то, что парообразование происходит одновременно во всем объеме материала, интенсивность растет с увеличением толщины материала и не сопровождается возникновением опасных перенапряжений внутри материала, так как перепады влагосодержания в материале незначительны. Технологические качества высушенного материала улучшаются. Так, например, в диатомовых изделиях при таком способе образуются поры правильной геометрической формы с определенной ориентацией макромолекул у стенок пор, частично свободная влага переходит в связанную, прочность изделий возрастает в 2—5 раз.

Таким способом была высушена древесина с 95% влажности до 2% в течение всего 6 час., торф от 550 до 30% — в течение 5,5 час.

А. В. Лыков исследует этот способ для упрочнения бетонных и железобетонных изделий.

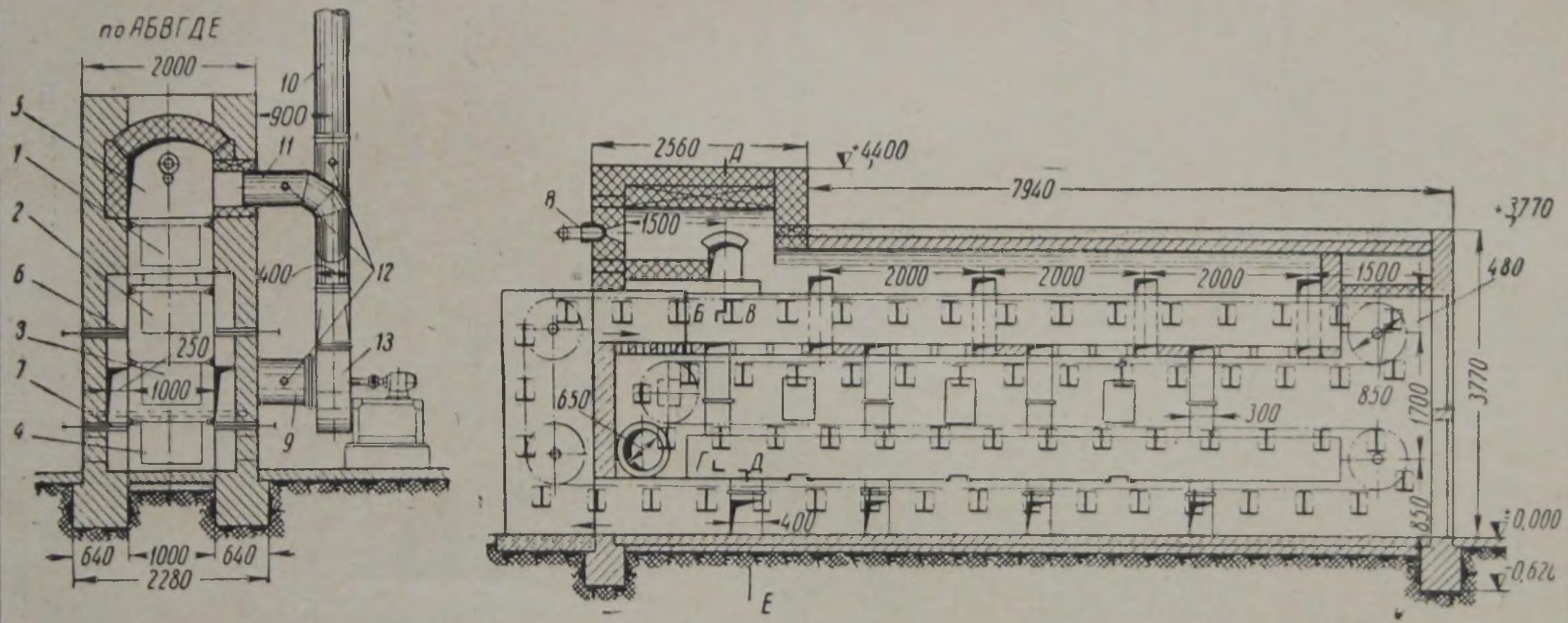


Рис. 76. Радиационно-конвективная сушилка для изделий

1—4 — лента конвейера; *5* — топочно-смесительная камера; *6—7* — регулирующие шибера; *8* — газовая горелка; *9* — отсосный дымоход; *10* — выхлопная труба; *11* — подмешивающий газоход; *12* — дроссельные заслонки; *13* — вентилятор низкого давления № 5

ГЛАВА VI

ПОРЯДОК РАСЧЕТА СУШИЛОК

В основу расчета кладется задание по годовой производительности завода $G_{год}$ шт/год, начальная и конечная влажность изделий и лабораторные и промышленные данные по оптимальному сроку сушки τ час. Суточная производительность сушилок определяется, принимая во внимание годовой фонд рабочего времени $\tau_{год}$ час/год, по нормам (7 368 час. — гипсовые, 8 760 час. — керамические заводы) и процент производственных потерь p также по нормативам (2,5% — гипсовые блоки и сухая штукатурка, 3% — кирпич и черепица и т. д.).

На основе этого выбирается тип и основная конструкция сушилки, а также ее транспортные устройства, обеспечивающие расчетную часовую производительность при непрерывной работе.

Суточная производительность определяется по формуле

$$G_{сут} = \frac{G_{год}\,(1+0{,}01p)\,24}{\tau_{год}}\ [\text{шт/сутки}]. \qquad \text{(IV-125)}$$

Часовая производительность при непрерывной работе равна

$$G_{час} = G_{сут} : 24\ [\text{шт/час}]. \qquad \text{(IV-126)}$$

Производительность за цикл ($\tau_ц$ час.) при периодической работе

$$G_ц = \frac{G_{год}\cdot 100}{(100-p)n}, \qquad \text{(IV-127)}$$

где n — число оборотов камер в год,

$$n = \frac{\tau_{год}}{\tau_ц} = \frac{\tau_{год}}{\tau+\tau_{всп}}, \qquad \text{(IV-128)}$$

где $\tau_{всп}$ — вспомогательное время, затраченное на охлаждение, разгрузку, текущий ремонт камеры и новую загрузку в час; в зависимости от степени механизации этих работ равняется 2—12 час.

τ — рабочее время в час.

Зная наивыгоднейшую плотность садки g *шт/м*^{3}, число камер z, можно определить рабочий объем всех сушил zV:

$$zV = \frac{G_ц}{g}\ [м^3] \quad \text{или} \quad \frac{G_{час}\tau}{g}\ [м^3]. \qquad \text{(IV-129)}$$

Общая длина камер или туннелей

$$zL = \frac{zV}{BH}\ [м], \qquad \text{(IV-130)}$$

Выбирая по компоновке цеха и конструкции сушилки длину каждой камеры L, ее ширину B и высоту H, можно найти и z — число необходимых камер. При этом дополнительно учитываются 1—2 камеры в блоке как резервные.

По величинам производительности, начальной и конечной влажности изделий находится часовое количество испаренной влаги по сушилке в целом и по ее зонам. Делается графоаналитический расчет теоретического и действительного процесса сушки и определяется количество свежего и циркулирующего агента, расход тепла на 1 *кг* испаренной влаги, а также часовой его расход, статьи теплового баланса, часовой расход топлива или пара.

На основе этих расчетов конструируется топка, выбираются газоходы, производится аэродинамический расчет, выбор и расстановка вентиляторов.

Сушильный блок оснащается всеми необходимыми контрольно-измерительными приборами и системой автоматического контроля и регулирования. Разрабатываются мероприятия по технике безопасности, составляются сметы на оборудование, сооружения, а на основе их и расчета годовых эксплуатационных расходов определяется себестоимость сушки единицы продукции, которая должна быть ниже уже достигнутых в производстве показателей.

ГЛАВА VII

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУШИЛОК

При газовом отоплении сушилок необходимо соблюдать все правила техники безопасности в газовом хозяйстве. Необходимо следить за герметичностью газопроводов и не допускать выбивания дымовых газов через дверные щели и другие неплотности ограждений сушилок. До уплотнения перевести работу сушилок на режим с большим разрежением по газовому тракту. Обеспечить надежную вентиляцию помещения. Систематически по графику очищать борова от зольных заносов, нарушающих расчетный аэродинамический режим. Около сушилки должны быть ровные полы, рельсы не должны выступать над полом. Груженные изделиями вагонетки должны вталкиваться осторожно во избежание обрушения садки. Желательно внедрение автоматической блокировки механизмов толкателей и подъема дверей сушилки. В сушилки нельзя заходить без охлаждающей маски, если температура мокрого термометра выше 40°. Работа по ремонтам еще не остывших камер может производиться только в брезентовом костюме, в перчатках и в валенках, так как влажность среды повышает возможность ожогов. Поверхности газопроводов с температурой выше 50° должны иметь теплоизоляцию. Все механизмы привода должны иметь ограждения.

При эксплуатации электрических сушилок соблюдаются правила по электробезопасности.

Правила по технике безопасности вывешиваются в помещении цеха и по ним производится устный и письменный инструктаж всего персонала.

Раздел пятый

ПРОЦЕССЫ ОБЖИГА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И УСТАНОВКИ ДЛЯ НЕГО

ГЛАВА I

ОБЩАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ОБЖИГА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Тепловые установки для обжига строительных материалов и изделий могут быть классифицированы по следующим основным признакам.

1. По виду и роду сырья, поступающему на обжиг: сырье может быть в виде жидкости (шлам), сыпучего тела, в виде кусков или в виде отформованных из сырьевой массы изделий. Сырьем при производстве вяжущих материалов являются известняки, глины, мергели, гипсовый камень и т. д. Сырьем для керамзита служит глина. Обжигаются изделия, сформованные из керамических масс. Отжиг проходят изделия из шлакового литья.

2. По основной конструктивной схеме установки могут быть выполнены в виде вертикальных труб для обжига материалов во взвешенном состоянии, как шахтные и вращающиеся печи, варочные котлы, тарельчатые башенные печи, агломерационные решетки. Такие конструктивные схемы применяются для обжига вяжущих строительных материалов. Для формованных изделий используются однокамерные, многокамерные, кольцевые, туннельные печи. В печах первых трех типов обжигаются и крупнокусковые материалы для производства вяжущих.

3. По периодичности работы печи могут быть периодического и непрерывного действия.

4. По источникам обогрева: обогрев может происходить продуктами горения топлива и значительно реже электроэнергией.

5. По типу топочного устройства и виду топлива, как это было указано в разделе первом, гл. I (с топками полного и неполного сгорания, с засыпкой на материал и т. д.).

Помимо этой основной классификации, установки для обжига отличаются многими другими признаками, присущими отдельным группам конструкций. Внутри этих групп вторичные признаки становятся характерными, например характерными признаками туннельных печей являются: схема движения газа (рециркуляция,

отборы, перемешивание и т. д.), число рабочих каналов и устройство их (одноканальные, многоканальные, муфельные), способ футеровки вагонеток и ряд других признаков. Для шахтных печей — форма шахты (цилиндрическая, биконическая и т. д.), вид дутья (холодное, горячее, обогащенное кислородом), тип загрузочных и разгрузочных устройств. Многочисленны вторичные характерные признаки и аппаратуры для обжига гипса, вращающихся печей и т. д.

ГЛАВА II

ПРОЦЕССЫ ПРИ ОБЖИГЕ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ

При обжиге исходных сырьевых материалов происходят физические и химические процессы (в результате которых образуются вяжущие с определенными качествами): сушка, дегидратация, диссоциация карбонатов, спекание, изменение вида и структуры. Характер процесса зависит от сырья, температуры и иных условий его тепловой обработки.

Исходным сырьем для производства извести является природный известняк с содержанием $CaCO_3$ не менее 40%. При содержании глины более 10% он называется мергелем, при содержании $MgCO_3$ более 20% — доломитом. Часто используемые плотные известняки характеризуются высоким содержанием $CaCO_3$ (82—96%), малым содержанием $MgCO_3$ (1—6%), значительным содержанием примесей $Al_2O_3+Fe_2O_3+SiO_2+SO_3$ (2—15%) и влажностью около 2—5%. Задача обжига извести заключается в разложении карбонатов кальция и магния, так как вяжущими являются CaO и MgO:

$$CaCO_3 \rightleftarrows CaO + CO_2 \mp Q;$$

$$MgCO_3 \rightleftarrows MgO + CO_2 \mp Q.$$

Одновременно при обжиге происходит образование силикатов, алюминатов, ферритов кальция и ряд других второстепенных химических процессов.

Реакции разложения карбонатов являются эндотермическими (затраты тепла на эти реакции указаны в разделе втором, гл. III, теплоемкости — в табл. 22). Температура, необходимая для протекания реакции разложения, зависит от парциального давления углекислоты в среде, повышаясь с увеличением давления. Поэтому для интенсификации обжига в печах должен быть организован быстрый отсос углекислоты разложения из зоны реакции. В условиях шахтной печи разложение основных количеств $MgCO_3$ происходит при 700°, $CaCO_3$ при 900°, начинаясь при температурах соответственно 400 и 600°. В промышленных условиях обжиг известняка производится при температурах 1000—1200°, что обеспечивает устойчивый ход процесса. Отклонение в сторону пониже-

ния температуры ведет к недожогу, повышения — к пережогу материала. На участках, где происходят эндотермические реакции, рост температуры материала при постоянном притоке тепла задерживается, что и отмечается на графике температур $t_м = \varphi(\tau)$.

В процессе обжига известняка удаляется углекислота, происходит усадка и меняется удельный и объемный веса материала.

Таблица 22

Средние теплоемкости материалов в зависимости от температуры*

Материал	Средние от 0° до t теплоемкости материалов $c \cdot 10^3$ в *ккал/кг град* при температуре в град.															
	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
$CaCO_3$ . .	188	205	217	227	239	246	254	262	—	—	—	—	—	—	—	—
CaO	176	187	194	199	202	205	207	208	209	211	213	214	215	216	217	218
Al_2O_3 . . .	167	198	215	229	238	245	252	256	260	263	266	269	272	275	278	280
SiO_2 . . .	170	190	210	234	238	243	247	251	255	258	260	263	265	267	269	271
MgO . . .	208	228	235	245	250	256	262	267	271	274	277	280	283	286	288	290
Цементный клинкер .	190	196	202	208	215	220	225	229	233	236	239	242	249	255	262	270
Доменный шлак . .	203	208	212	216	221	226	230	235	240	244	247	250	253	—	—	—

* С учетом теплоты агрегатных изменений материалов.

При диссоциации выделяется углекислоты на 1 *кг* $CaCO_3$:

$$\frac{CO_2}{CaCO_3} = \frac{44}{100} = 0{,}44 \ \frac{кгCO_2}{кгCaCO_3},$$

$$\text{или на } 1\,кг\,CaO \ \frac{CO_2}{CaO} = \frac{44}{56} = 0{,}786 \ \frac{кгCO_2}{кгCaO};$$

$$\text{на } 1\,кг\,MgCO_3 \ \frac{CO_2}{MgCO_3} = \frac{44}{84{,}3} = 0{,}522 \ \frac{кгCO_2}{кгMgCO_3};$$

$$\text{или на } 1\,кг\,MgO \ \frac{CO_2}{MgO} = \frac{44}{40{,}3} = 1{,}092 \ \frac{кгCO_2}{кгMgO},$$

поэтому объемный вес извести по сравнению с объемным весом известняка (1,5 *т/м*³) уменьшается с учетом усадки (на 10—12%) до

$$1{,}5\,(1 - 0{,}44) : (1 - 0{,}1) = 0{,}9\,т/м^3$$

Удельный вес извести 3,2 *т/м*³, а с учетом внутренних пор 1,7 *т/м*³, известняка 2,6 *т/м*³. Эти данные используются при расчете заполнения объема (шахты) печи.

Для составления материального баланса обжига перед тепловым расчетом установки надо знать выход продукта G, учитывая степень полноты разложения известняка, $\beta = 0{,}93—0{,}97$, и долю уноса его из рабочего пространства, $p_{ун} = 0{,}005—0{,}01$.

Выход активной части продукта ($CaO + MgO$):

$$G_{CaO+MgO} = (0{,}560CaCO_3 + 0{,}478MgCO_3)(1 - p_{ун})\,\beta\,[\%]. \quad (V\text{-}1)$$

Выход продукта, включая примеси:

$$G = [100 - H_2O - \beta(0{,}440CaCO_3 + 0{,}522MgCO_3)](1 - p_{ун})\,[\%]. \quad (V\text{-}2)$$

Активность извести:

$$A = \frac{G_{CaO+MgO}}{G}. \quad (V\text{-}3)$$

Уравнение материального баланса

$$G_{сырья} = G + G_{H_2O} + G_{CO_2} + G_{ун}, \quad (V\text{-}4)$$

или

$$G_{сырья} + G_{топл} + G_{возд} =$$

$$= G + (G_{H_2O} + G_{CO_2} + G_{ун})_{сырья} + (G_{золы} + G_{ух.газ})_{топл}. \quad (V\text{-}5)$$

Сырьем при производстве цементного клинкера служат известняки, глины, мергели, металлургические шлаки и т. п. Цементный клинкер содержит SiO_2 20—24%; Al_2O_3 4—7%; Fe_2O_3 2—4%; CaO 64—67%; MgO 2—3%; прочее — 1%.

Состав сырьевой смеси для получения цементного клинкера заданного состава определяется по химическому анализу компонентов специальным расчетом с учетом присадки золы топлива. Подготовленное сырье подается или в виде брикетов (шахтная печь), или в виде порошка, или в виде шлама (вращающаяся печь). Способ подготовки обусловливает влажность сырья от 10 до 40%. Она должна быть удалена в зоне подсушки печей. После испарения влаги и дальнейшего подогрева материала (600—800°) происходит эндотермическая реакция дегидратации глины. При температуре 900—1000° материал кальцинируется, происходит разложение $CaCO_3$ и $MgCO_3$ и удаление CO_2. Перед спеканием материала его температура резко повышается за счет экзотермических реакций образования силикатов и алюминатов кальция. Температура обжига цементного клинкера 1400—1500°. Затраты тепла на эндотермические реакции дегидратации, декарбонизации, на образование жидкой фазы при спекании с учетом выделения тепла при экзотермических реакциях в сумме составляют теплоту клинкерообразования. Материальный баланс составляется по формулам (V-4 и V-5). Пример материального баланса при обжиге

клинкера в шахтных (Ш) печах (кусковое сырье) и во вращающихся (В) печах (сырье в виде шлама) на 1 *кг* клинкера приведен ниже.

Приход	Ш	В	Расход	Ш	В
Сухая часть сырья .	1,58	1,66	Клинкер	1	1
Вода сырья	0,26	0,91	Углекислота сырья .	0,55	0,6
Топливо	0,17	0,22	Вода сырья . . .	0,27	0,93
Воздух для горения .	1,81	2,36	Унос сырья	0,01	0,06
			Продукты сгорания	1,99	2,56
			В том числе CO_2 . .	0,45	0,57
	3,82	5,15		3,82	5,15

Сырьем для производства гипсовых вяжущих является природный гипсовый камень и в некоторых случаях отходы химической промышленности. Основной составляющей сырья служит минерал $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ — двуводный гипс. Химически чистый $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ содержит 32,56% CaO, 46,51% SO_3 и 20,93% H_2O.

Природный гипсовый камень имеет также и примеси: $Al_2O_3 + Fe_2O_3$ в пределах от 0 до 2,6%; MgO от 0 до 1,6%; SiO_2 от 0,10 до 2,5%. В сумме эти примеси составляют от 0,25 до 5%. Вяжущее — полуводный гипс — получается по формуле

$$CaSO_4 \cdot 2H_2O \rightleftarrows CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O + 1{,}5H_2O \mp Q. \qquad (V\text{-}6)$$

Химически чистый $CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$ состоит из 38,63% CaO; 55,16% SO_3 и 6.21% H_2O. Процесс дегидратации является эндотермическим. Затрата тепла относительно невелика и процесс проходит при невысоких температурах 100—170°.

Первый период—период подогревания камня и испарения свободной гигроскопической влаги. Скорость подъема температуры может быть здесь большой.

Во втором периоде происходит основная реакция дегидратации и подъем температуры резко замедляется. В этом периоде температура увеличивается всего на несколько (примерно на 10) градусов. Средняя величина температуры во втором периоде зависит от конструкции аппарата и находится в пределах 90—125°.

После отделения от гипса 1,5 молекулы H_2O наступает третий период, который характеризуется из-за снижения теплоемкости гипса более быстрым ростом температур, чем в первом периоде. В третьем периоде выделившаяся на поверхность частиц гипса вода интенсивно испаряется и удаляется и тем самым обратной гидратации гипса в камень не происходит.

При повышении температуры гипса в пределах 160—200° полуводный гипс начинает переходить в растворимый ангидрит, и скорость подъема температур замедляется. Это четвертый период. Варка строительного гипса заканчивается, не переходя в четвертый период, и он должен быть выгружен до перегрева ($\leqslant 160°$),

приводящего к браку. После 200° до 300° весь гипс практически становится ангидритом, дальнейший же подъем его температуры и особенно в пределах 450—700° переводит его в нерастворимый намертво обожженный гипс, который не обладает свойствами вяжущего. После 700° гипс снова приобретает некоторые вяжущие свойства. Если гипс обжигается при 900—1000°, то получается кальцинированный гипс или эстрих-гипс — вяжущее, уже не требующее добавок активизаторов. В зависимости от среды, в которой происходит обезвоживание гипса, он имеет шесть различных модификаций, отличающихся своими показателями. Для расчета процессов тепловой обработки необходимо знать величины теплоемкостей основных его модификаций (формулы V-7—V-10) и затрату тепла на дегидратацию (табл. 23).

Величина теплоемкости гипса c в *ккал/кг град** составляет для:

$$CaSO_4 \cdot 2H_2O - c = 0{,}127 + 0{,}0442 \cdot \frac{273+t}{100}, \qquad (V\text{-}7)$$

$$\alpha\ CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O - c = 0{,}1165 + 0{,}0268 \cdot \frac{273+t}{100}, \qquad (V\text{-}8)$$

$$\beta\ CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O - c = 0{,}079 + 0{,}0419 \cdot \frac{273+t}{100}, \qquad (V\text{-}9)$$

$$CaSO_4 - c = 0{,}1035 + 0{,}0242 \cdot \frac{273+t}{100}. \qquad (V\text{-}10)$$

Теплота дегидратации зависит от того, в какой фазе выделится вода, и от других условий этого процесса.

Таблица 23

Теплота дегидратации
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (*ккал/кг*)

Реакция идет до	На 1 *кг* двугидрата		На 1 *кг* продукта	
β $CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$	26,6	118	31,4	139,5
α $CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$	23,8	115	28,1	136
β $CaSO_4$ (растворимый) .	41,8	163,1	53	206,5
α $CaSO_4$ (растворимый) .	35,6	157,1	45,1	199
$CaSO_4$ (нерастворимый)	23,4	146,5	29,6	185,5
Вода уходит в виде . . .	Жидкости	Пара	Жидкости	Пара

Образование α-полугидрата происходит в аппаратах, среда в которых насыщена влагой (автоклавный способ), преобладание же в продукте β-полугидрата характерно для дегидратации в относительно сухой среде, когда влага из продукта выделяется в виде пара (шахтные печи, варочные котлы, обжиговые трубы).

* На основе данных Келли и Сутхарда.

ГЛАВА III

ШАХТНЫЕ ПЕЧИ

1. Схемы, принцип работы и теплообмен в печи

Шахтной печью называется печь с шахтой круглого или иного сечения, где происходит обогрев материала при передвижении его вниз за счет собственного веса (рис. 77).

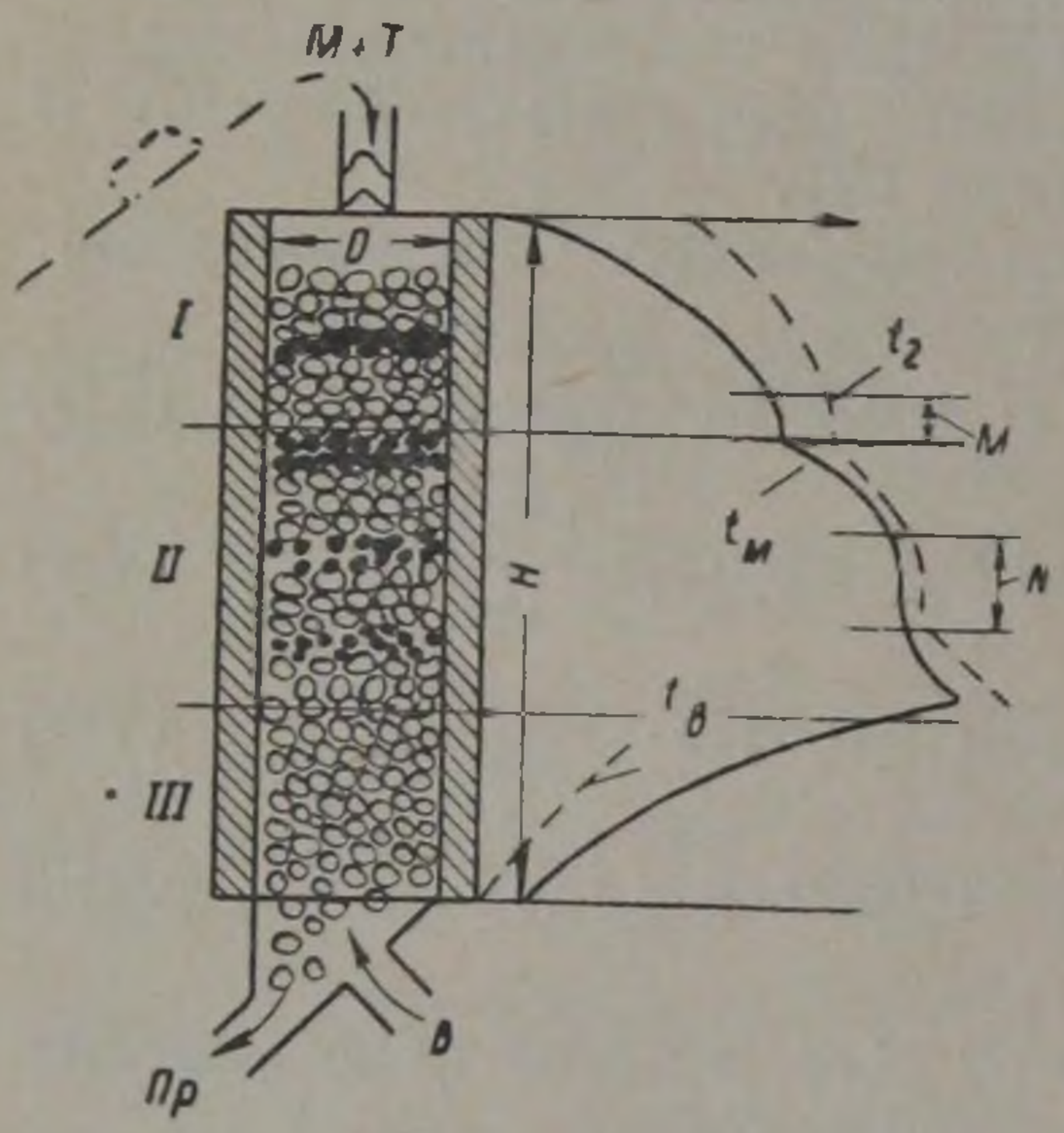


Рис. 77. Схема шахтной печи

М+Т — материал и топливо; *Пр* — продукция; *В* — воздух

Шахтные печи используются в производстве извести, цемента, гипса, шамота и ряда других материалов. Если температура материала доводится до его расплавления (горные породы, шлаки), то такие печи относятся к плавильным и рассматриваются ниже (вагранки).

Сырье в шахтные печи механически загружается сверху. Скорость его передвижения вниз зависит как от изменения объемного веса материала в результате обжига и постепенного сгорания топлива (в пересыпных печах), так и от скорости разгрузки продукции из нижних сечений шахтной печи, которая в современных печах механизированная и непрерывная. Скорость опускания материала в шахте при достаточной тепловой мощности обусловливает производительность печи.

Вся высота шахтной печи сверху вниз условно делится на три главные зоны: зона подогрева материала *I*, зона обжига *II* и зона охлаждения *III*. Чем более влажен материал и крупнее его куски, тем больше зона подогрева; чем выше температура обжига, тем относительно больше зона охлаждения. Навстречу материалу снизу вверх движутся газы: в зоне охлаждения — воздух, идущий на горение, охлаждающий примерно до 100° продукцию перед выходом ее из печи и нагревающийся сам до температуры 300—500°. В зоне обжига в нижней ее части происходит почти полное сгорание топлива и продукты сгорания с высокой температурой, двигаясь вверх между кусками материала, окончательно обжигают его. По выходе из зоны обжига газы еще больше охлаждаются при встрече с движущимся сверху сырьем, их состав меняется, к продуктам сгорания присоединяются газы — продукты подсушки и разложения сырья: водяные пары и углекислота. Нагрев поступившее сырье и охладившись до температуры 200—400°, газы

выходят из печи в атмосферу. Таким образом, шахтная печь представляет собой противоточную тепловую установку, в которой может быть достигнут сравнительно высокий тепловой к.п.д.

Составление материального баланса предшествует всем остальным стадиям расчета, так как в результате его выясняется количество материала, находящееся в различных зонах при продвижении в печи. Основное соотношение главных размеров шахтной печи — это отношение высоты печи к ее диаметру. Чем больше абсолютная величина поперечного сечения шахты, тем при одинаковой скорости опускания материала и достаточной тепловой мощности больше производительность печи. Чем больше высота печи, тем при тех же условиях продолжительнее время пребывания материала в печи. Время пребывания материала в печи должно быть больше или равно времени полного завершения всех стадий тепловой обработки. Первые две стадии — подогрев и обжиг — являются главными для получения продукта, тогда как зона охлаждения служит только теплотехническим целям: подогреву воздуха и экономии топлива. В процессе обжига должны завершиться химические реакции (дегидратация глин или гипса, диссоциация известняка) по всей толще куска. Время на эту стадию тепловой обработки будет тем меньше, чем выше температура греющих газов, чем меньше размер куска. Для различных материалов оно, естественно, будет разное. Так, например скорость продвижения зон диссоциации в куске известняка по Фурнасу определяется логарифмической зависимостью:

Таблица 24

Зависимость времени полной диссоциации $CaCO_3$ от температуры и размеров кусков

Размер куска в *мм*	Время диссоциации $CaCO_3$, *т* в час. при температуре в град.			
	1 100	1 000	900	800
40	1,5	2,8	5,5	11
80	3	5,5	11,5	Более 20
120	4,5	9	18	То же
160	5,5	11,5	Более 20	»

$$\lg v_p = 0{,}003145t - 3{,}3085\,, \qquad \text{(V-11)}$$

а время полной диссоциации — по табл. 24.

Интенсификация процесса обжига, таким образом, может производиться за счет уменьшения размера кусков до наивыгоднейшего и повышения температур процесса. Последняя, однако, не может быть поднята выше оптимальной для каждого вида сырья, так как наличие плавней в сырье приводит при превышении температуры обжига к оплавлению материала, «закозлению» печи, к снижению производительности и к остановке печи.

Время прогрева куска связано с условиями теплообмена на данном участке печи, с соотношениями температур газов и материала, а при наличии химических реакций и с величиной затрат тепла на совершение этих реакций. Распределение температур

материала и газов в шахтной печи может быть представлено следующим образом. Вся печь разделена на три зоны (см. рис. 77). Зона подогрева для известняка продолжается до температуры нагрева сырья до 850—900°, т. е. до того момента, когда диссоциация $CaCO_3$ начинает происходить очень быстро. Аналогично и зона обжига заканчивается условно там, где материал после максимальной температуры обжига (1100—1200°) охладился встречным холодным воздухом до 850—900°, когда все реакции диссоциации фактически прекращаются. Готовая продукция охлаждается в последней зоне до температуры 60—100° воздухом, идущим на горение. На участке *M* кривой обжига (рис. 77) при большом содержании $MgCO_3$ заметен период его разложения при почти постоянной температуре. На участке *N* аналогично отражается диссоциация $CaCO_3$. Кривая температур газов связана с кривой обжига соотношением количеств тепла в материале и в газах на данном участке или так называемых «водяных чисел» *W* (соответственно для материала и газа):

$$W_м = G_м c_м \; [ккал/час \; град], \qquad (V\text{-}12)$$

$$W_г = G_г c_г \; [ккал/час \; град], \qquad (V\text{-}13)$$

где $G_м$ и $G_г$ — количество материала и газов на данном участке в *кг/час*;
$c_м$ и $c_г$ — средние удельные теплоемкости материала и газов в *ккал/кг град*.

В среднюю удельную теплоемкость для материала условно включается полный расход тепла на данном участке печи, отнесенный к 1 *кг* (или 1 $м^3$) шихты и к 1°С. В этот полный расход тепла входят не только затраты тепла на нагрев материала, но и затраты тепла на испарение его влаги, на эндотермические реакции, на потери в окружающую среду рассматриваемым участком печи. Экзотермические реакции, имеющие место, например, при получении цементного клинкера, включаются в расчет потерь с обратным знаком. В зоне подогрева и в зоне охлаждения $W_г > W_м$ и поэтому, как это известно из курса теплопередачи, кривые будут взаимно расположены так, как показано на рис. 77: чем больше водяное число *W*, тем меньше падение температур Δt, если отнять равное количество тепла *Q*:

$$\Delta t = Q : W \; [град]. \qquad (V\text{-}14)$$

Соотношение температур газов и материала при входе и выходе для каждой зоны определяется решением уравнений тепловых балансов.

При расчете необходимого времени пребывания материала в печи составляется уравнение теплообмена применительно к условиям каждой зоны печи. Так, например, для зоны подогрева можно составить ряд расчетных уравнений, исходя из следующих соображений. Материал и газы движутся противотоком с превышением здесь водяного числа для газов над водяным числом для материала. Ввиду незначительности количества тепла, идущего

в известняках на диссоциацию $MgCO_3$, можно форму кривой обогрева материала в зоне подогрева принять плавной, без участка с постоянной температурой. Разница температур газ—материал может определиться так из следующих расчетов. Количество переданного тепла от газов к материалу равно:

$$dQ = \alpha_{\Sigma} F_{м} (t_{г} - t_{м}) d\tau, \qquad \text{(V-15)}$$

$$dQ = c_{м} G_{м} dt_{м}, \qquad \text{(V-16)}$$

откуда дифференциальное уравнение теплообмена

$$\alpha_{\Sigma} F_{м} (t_{г} - t_{м})\, d\tau = c_{м} G_{м} dt_{м}, \qquad \text{(V-17)}$$

или

$$\alpha_{\Sigma} (t_{г} - t_{м})\, d\tau = \frac{c_{м} G_{м}}{F_{м}}\, dt_{м}. \qquad \text{(V-18)}$$

Если отвлечься предварительно от потерь в окружающую среду, то при противотоке разность теплосодержаний между газом и материалом будет постоянно равна теплосодержанию газа при его выходе из зоны подогрева (считая, что теплосодержание материала при входе в печь равно нулю):

$$G_{г} c_{г} t_{г} - G_{м} c_{м} t_{м} = G_{г} c_{г}'' t_{г}''. \qquad \text{(V-19)}$$

Допустив, что $c_{г}'' = c_{г}$, получим

$$t_{г} = t_{г}'' + \frac{G_{м} c_{м}}{G_{г} c_{г}}\, t_{м} = t_{г}'' + \frac{W_{м}}{W_{г}}\, t_{м}. \qquad \text{(V-20)}$$

Подставив значение $t_{г}$ в уравнение V-18, получим

$$dt_{м} + \alpha_{\Sigma} F_{м} \left[\frac{1}{W_{м}} - \frac{1}{W_{г}}\right] t_{м} d\tau - \frac{\alpha_{\Sigma} F_{м}}{W_{м}}\, t_{г}'' d\tau = 0. \qquad \text{(V-21)}$$

Решив это уравнение, получим температуру материала для любого момента времени

$$t_{м} = t_{г} \left[1 - e^{-\frac{\alpha_{\Sigma} F_{м}}{W_{м}} \left(1 - \frac{W_{м}}{W_{г}}\right) \tau}\right] =$$

$$= t_{г} \left\{1 - \exp\left[-\frac{\alpha_{\Sigma} F_{м}}{W_{м}} \left(1 - \frac{W_{м}}{W_{г}}\right) \tau\right]\right\}. \qquad \text{(V-22)}$$

Температура газов при выходе из печи равна

$$t_{г}'' = t_{г}' \left(1 - \frac{W_{м}}{W_{г}}\right). \qquad \text{(V-23)}$$

В этих формулах:

α_{Σ} — суммарный условный коэффициент теплопередачи газов материалу, учитывающий и внутреннее тепловое сопротивление материала, когда теплопроводность материала $\lambda_{м} \neq \infty$.

По исследованиям Б. И. Китаева можно принимать для шара:

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{\alpha}{1+0,2\mathrm{Bi}} = \frac{\alpha}{1+0,2\,\frac{\alpha r}{\lambda_{м}}} \; [ккал/м^2\,час\,град]. \qquad (V\text{-}24)$$

Для цилиндра

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{\alpha}{1+0,286\mathrm{Bi}} = \frac{\alpha}{1+0,286\,\frac{\alpha r}{\lambda_{м}}} \; [ккал/м^2\,час\,град], \qquad (V\text{-}25)$$

α — коэффициент теплоотдачи от газов к поверхности материала в *ккал/м²час град.*

Этот коэффициент растет с увеличением скорости газов v_0 *нм/сек*, определяемой по живому сечению шахты печи, с ростом абсолютных температур газов T°К и с уменьшением диаметра кусков шихты d *м*. Ввиду затруднительности определения истинной поверхности материала в слое, омываемой газами, F *м²* экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи, как сказано выше, делают по условному коэффициенту теплоотдачи α_v, отнесенному к объему, занимаемому материалом при данном коэффициенте пустотности $k_п$ (см. раздел второй, гл. III), поэтому в формуле вместо $\alpha_{\Sigma} F$ надо подставить:

$$\frac{\alpha_{v\Sigma} V_{м}}{W_{м}(1-k_{п})} \text{ или } \frac{\alpha_{v\Sigma}}{c_{м}(1-k_{п})}.$$

Время прогрева материала до температуры $t_м$

$$\tau = \frac{c_{м}(1-k_{п})}{\alpha_{v\Sigma}\left(1-\frac{W_{м}}{W_{г}}\right)} \; 2,3 \lg \left(1-\frac{t_{м}}{t'_{г}}\right) [час]. \qquad (V\text{-}26)$$

В вышеприведенных формулах:

τ — время, по истечении которого рассматривается процесс, в час.;

$t'_{г}$ — начальная температура газов при входе их в зону в град.;

$c_{м}$ — теплоемкость материала в *ккал/м³град.*

Для зоны подогрева можно принять $t''_{м} = 0,95—0,97 t_{г}$ или $t'_{г} - t''_{м} = 30—100°$.

Для верхней части зоны обжига ввиду значительных затрат тепла на диссоциацию $W_{г} < W_{м}$.

Если, как это имеет место в нижней части зоны обжига, теплообмен в меньшей степени зависит от теплопроводности материала, то суммарный коэффициент теплоотдачи $\alpha_{v\Sigma}$ при расчете зоны может быть заменен коэффициентом α_v.

В некоторых случаях для расчета температур материала и времени его пребывания делят всю высоту печи на ряд участков, для которых принимают температуру газов постоянной и равной

средней для данного участка. Это упрощение дает возможность получить время для нагревания материала от $t'_м$ до $t''_м$ из формулы (V-22):

$$\tau = \frac{W_м}{\alpha_у F_м} \ln \frac{t_г - t'_м}{t_г - t''_м} \,|час|. \qquad (V\text{-}27)$$

Высота печи прямо связана со временем пребывания материала в печи. Если считать, что напряжение сечения печи по объему материала, равно v_F $м^3/м^2$ *час*, то, очевидно, расчетная высота каждой зоны получится по формуле

$$H = v_F \tau \,|м|. \qquad (V\text{-}28)$$

В шахтной печи происходят сложные физико-химические процессы, различные на каждом участке по высоте печи. В нижней половине зоны обжига завершаются все процессы, связанные с обжигом материала. Так как воздуха здесь достаточно, температуры газов и материала здесь наивысшие и в газах содержится большое количество углекислоты. При продвижении продуктов сгорания топлива, а также углекислоты и водяных паров, выделившихся из сырья, в верхних зонах шахтной пересыпной печи происходят реакции восстановления, напоминающие по своему характеру реакции в газогенераторе, и горючие газы (содержащие CO=5—12%; CH_4=0,1—1,5%; H_2=0,1—2,5% от объема уходящих газов) выходят из печи без использования в атмосферу.

Исходя главным образом из этого, пересыпные печи работают на топливе с малым выходом летучих (антрацит, кокс и т. п.). При попытке же перейти в шахтных печах на местные виды топлива с большим выходом летучих еще в большей степени увеличилась бы химическая неполнота сгорания топлива. Необходимость работы на местных видах топлива вынуждает применять известеобжигательные шахтные печи с выносными топками. Эти печи, однако, значительно дороже и, кроме того, требуют увеличенного на 20—25% расхода топлива. Физико-химические процессы при обжиге в шахтных печах таких материалов, как цемент, шамот, гипс, отличаются от процессов, описанных для извести, однако их теплотехническая сторона остается в основном той же.

2. Производительность и аэродинамическое сопротивление печи

Характеристикой шахтной печи по производительности является съем продукции с 1 $м^2$ сечения шахты g_f *кг/м² час* и с 1 $м^3$ активного объема g_v *кг/м³ час*.

Общая производительность G зависит от располагаемой тепловой мощности печи Q *ккал/час*:

$$G = Q : q \,[кг/час], \qquad (V\text{-}29)$$

где q — удельный расход тепла на 1 *кг* продукции в *ккал/кг*.

Необходимая тепловая мощность и интенсивный теплообмен могут быть развиты только при пропуске через слой материала расчетного количества воздуха для горения и горячих газов — продуктов сгорания. Последнее возможно при обеспечении тягодутьевыми средствами достаточного перепада давления на каждый метр высоты шахты, поэтому

$$G = AF\left(\frac{\Delta p}{H}\right)^n \eta_э \ [кг/час], \qquad (V\text{-}30)$$

где A — коэффициент, зависящий от формы заполняющих шахту кусков и от самой конструкции печи; для цементных печей он равен в среднем 150;
F — площадь свободного сечения печи в $м^2$;
n — показатель степени, близкий к 0,5;
$\eta_э$ — коэффициент, зависящий от равномерности загрузки печи и других условий эксплуатации. Он находится в пределах 0,7—1;
$\frac{\Delta p}{H}$ — перепад давления газов на каждый метр высоты слоя в *мм вод. ст/м.*

Удельная весовая производительность печи по сечению g_f находится в такой зависимости:

$$g_f = \frac{G}{F} = \frac{V\gamma_м}{\tau F} = \frac{H}{\tau}\gamma_м \ [кг/м^2час], \qquad (V\text{-}31)$$

где V — объем печи в $м^3$;
$\gamma_м$ — объемный вес материала в $кг/м^3$;
τ — время, необходимое для полной тепловой обработки материала, в час.

τ — определяется по теоретическим расчетам теплообмена, скорректированным по опытным данным. В частности, для цемента время тепловой обработки при обычно принятом температурном режиме зависит от скорости газов v_0 *нм/сек* по свободному сечению шахты и эквивалентного диаметра куска материала d *мм* и может быть определено приближенно по формуле

$$\tau_{теор} = 0{,}0125 d^{1{,}25} \cdot v_0^{-0{,}65} \ [час.]. \qquad (V\text{-}32)$$

Ввиду неравномерности распределения воздуха и газов в слое шихты для действительной печи фактическое время тепловой обработки всей массы материала больше теоретического

$$\tau = \tau_{теор} : \eta_р \ [час.]. \qquad (V\text{-}33)$$

Коэффициент равномерности $\eta_р$ меньше единицы. Чем больше диаметр шахты, тем хуже равномерность распределения газов по сечению. Значительная часть газов проходит по линии наименьшего сопротивления около стенок, в центре же наблюдается кислородное голодание, относительное снижение содержания углекислоты и возрастание доли окиси углерода. Перепад давления в слое можно представить по формуле

$$\frac{\Delta p}{H} = \frac{1000a}{d} \cdot \frac{(v_0/k_п)^2}{2g}\gamma_0\left(1 + \frac{t_{ср}}{273}\right) \approx B \cdot \frac{v_0^2}{d}, \qquad (V\text{-}34)$$

где $a=f$ (Re, d и формы куска шихты);

γ_0 — приведенный удельный вес газов в *кг/нм³*;

$t_{ср}$ — средняя температура газов в слое шихты в град.

$B=\frac{1\,000\ a}{(k_п)^2 2g}\cdot\gamma_0\left(1+\frac{t_{ср}}{273}\right)$ — величина, которую для первичного анализа можно принять за постоянную.

Удельная объемная производительность печи определяется по формуле

$$g_v=\frac{g_f}{H}=\frac{\gamma_м\eta_р}{\tau_{теор}}\ [кг/м^3час]. \qquad (V\text{-}35)$$

Для случая цементной шахтной печи

$$g_v=80\eta_р\gamma_м v_0^{0,65}\ \ d^{-1,25}\ [кг/м^3час]. \qquad (V\text{-}36)$$

А так как $v_0=\left(\frac{\Delta p}{H}\cdot\frac{d}{B}\right)^{0,5}$,

то

$$g_v=80\eta_р\gamma_м\left(\frac{\Delta p}{H}\right)^{0,325}d^{-0,925}B^{-0,325}. \qquad (V\text{-}37)$$

Анализ этой формулы показывает, что для повышения удельной производительности печи при той же величине перепада давлений дутья Δp, необходимо стремиться к возможно совершенной равномерности работы слоя, т. е. к повышению $\eta_р$. Далее, необходимо избегать высоты печи H, значительно большей, чем это достаточно для завершения всего процесса тепловой обработки $\left(\frac{H}{D}=2—3\right)$. Для интенсификации теплообмена размеры кусков материала не должны быть большими. При изменении условий теплообмена в сторону его интенсификации за счет применения горячего дутья, обогащения дутья кислородом, специального фракционирования и подсушки сырья, использование объема печи и общая производительность печи возрастают, что и характеризует современное направление в развитии шахтных печей.

3. Конструкции шахтных печей

В зависимости от технологических требований и вида применяемого топлива шахтные печи работают: с выносными топками, с установкой горелок для газа или форсунок для мазута непосредственно в зоне обжига, с запрессовкой топлива в брикеты, или пересыпным методом. Метод сжигания топлива обусловливает основную конструкцию шахты. При выносных топках и относительно большой производительности печи шахта имеет прямоугольное или овальное сечение. Газы из выносных топок поступают с длинных сторон сечения, что улучшает равномерность распределения газов в сечении. Малые печи имеют круглое сечение с подводом полугаза через центрально расположенный газораспределитель — ядро или керн. Большие печи для природного или генераторного газа имеют круглое сечение с подводом газа как через керн, так и через пери-

ферийно расположенные горелки. Круглое сечение имеют пересыпные печи для извести и печи для обжига цементного черного брикета. Сечение шахты в вертикальной плоскости представляет собой или прямоугольник, или две трапеции, соединенные широкими основаниями. В верхней части цементообжигательных печей делается расширение для снижения скорости уходящих газов, а в нижней небольшое увеличение диаметра для устранения закозления шихты. Футеровка шахтных печей, помимо теплового и химического, испытывает еще и механическое воздействие: удары загружаемых кусков шихты и их истирающее действие при спуске вниз. В верхней части шахта выкладывается шамотным кирпичом повышенной прочности, клинкерным или хромомагнезитовым кирпичом. Иногда футеровка здесь выполняется из чугунных плит. Зона обжига выкладывается хромомагнезитовым или многошамотным (доменным) кирпичом. Зона охлаждения — шамотным кирпичом, а в последнее время в СССР и в США начинают находить применение и монолитные жаростойкий и огнеупорные бетоны. В цементообжигательных печах в нижней части шахты около разгрузочных решеток устанавливают вместо кирпичной футеровки чугунные плиты, увеличивающие стойкость низа шахты. Между футеровкой и кожухом печей делается теплоизоляционная засыпка из шлака, вермикулита или диатомита. Шахтная печь, работающая при значительном давлении дутьевого воздуха, одевается в стальной сварной кожух. Шахтные печи снабжаются механизмами для подъема материалов (обычно скиповыми) и шихтораспределительными загрузочными устройствами. Задача последних заключается в создании слоя шихты с одинаковой газопроводимостью как в центре шахты, так и по периферии. С этой целью распределительный механизм должен насыпать крупные куски в центре, а мелкие к стенкам печи. Конструкция распределительного механизма может быть в виде конуса с отражателем, поворотного рукава, тарелки со сбрасывающим ножом и т. д. От правильного распределения шихты зависит равномерность работы печи. Современные печи должны оборудоваться и механизмами разгрузки.

Для шахтных цементообжигательных печей требуются разгрузочные механизмы, одновременно дробящие спекшиеся массы клинкера. Вальцовый разгрузочный механизм состоит из двух-трех пар зубчатых валков. В каждой паре валки вращаются в разных направлениях. Привод осуществляется через редукторы. Скорость вращения регулируется по производительности печи. Выгрузочный механизм, выполненный в виде круглой вращающейся решетки, дает большую равномерность разгрузки. На решетке расположены дробящие зубья, которые имеют к периферии меньшую высоту, чем в центре, что компенсирует разницу в их окружных скоростях. Механизмы в виде зубчатых колосниковых решеток, состоящих из двух возвратно-поступательно движущихся частей, дают высокую степень равномерности разгрузки по сечению. Во избежание прорыва дутьевого воздуха разгрузочные механизмы шахтных печей выдают продукцию через автоматически действующие трехшлюзо-

вые или другие уплотняющие затворы. На рис. 78 показана пересыпная печь для извести производительностью 200 *т/сутки*, конструкции Росстромпроекта. Для смягчения режима обжига и интен-

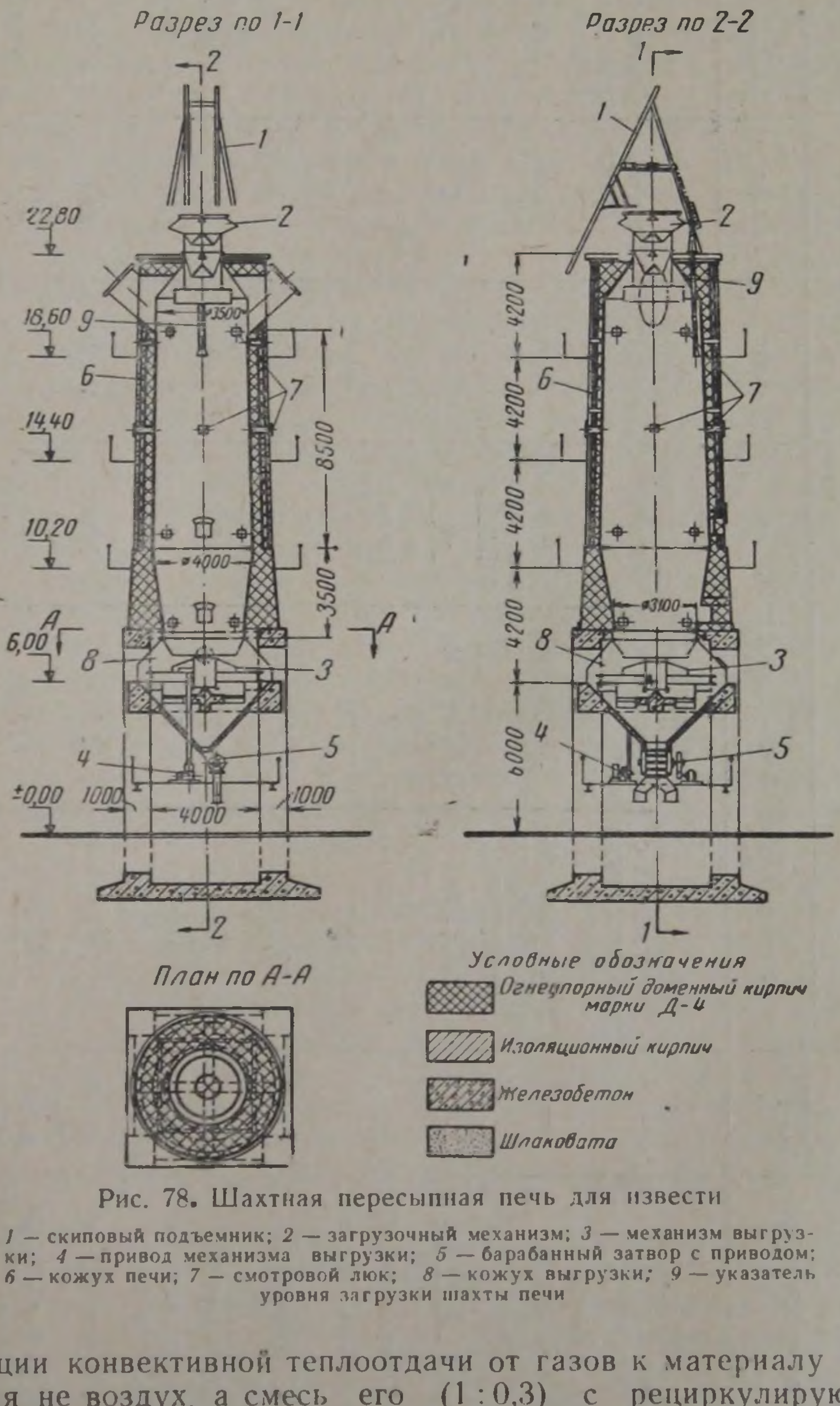


Рис. 78. Шахтная пересыпная печь для извести

1 — скиповый подъемник; *2* — загрузочный механизм; *3* — механизм выгрузки; *4* — привод механизма выгрузки; *5* — барабанный затвор с приводом; *6* — кожух печи; *7* — смотровой люк; *8* — кожух выгрузки; *9* — указатель уровня загрузки шахты печи

сификации конвективной теплоотдачи от газов к материалу в печь подается не воздух, а смесь его (1 : 0,3) с рециркулирующими дымовыми газами. Обжиг известняка производится пофракционно после рассортировки его на куски 80—120, 40—80 *мм*, что позво-

Таблица 25

Характеристики шахтных печей

Наименование показателей	Единица измерения	Материал					
		Известь в кусках δ=40—80 *мм* и 80—120 *мм*			Гипс	Шамот	Цемент, черный брикет d=25 *мм*
		Росстромпроекта					
Тип печи	—	Полугазовая с аэрофонтанными топками	Пересыпная с рециркуляцией дымовых газов	Газовая	С выносными топками	Системы Гросса	Гипроцемента с кислородным обогащением дутья
Топливо	—	Длиннопламенный, подмосковный уголь	Антрацит	Природный или генераторный газ	Дрова	Газ	Антрацит
Диаметр $\left\{\frac{\text{вверху}}{\text{внизу}}\right.$ или размеры сечения	*м*	2/3×7,6	3,5/4+3,1×3,1	4 / 6—3 (керн)	—	2	2,85
Высота шахты активная	»	12,7	12	12	8,1	13,1	8
Площадь поперечного сечения	$м^2$	15,2/24	11,2	21	2	3	6,4
Производительность	*т/сутки*	200	200	200	48	22	240—290
Аэродинамическое сопротивление	*мм* вод. ст.	300	500	300	—	35	3 000
Съем продукта с 1 $м^3$	*кг/м³ сутки*	1 000	1 500	1 000	3 000	540	4 700—5 700
Съем продукта с 1 $м^2$ сечения зоны обжига	*т/м² сутки*	13,2 / 8,3	17,8	9,5	24	7,4	37,5—45,5
Удельный расход условного топлива	*кг/т*	152	165	136	80	150	150

ляет каждую партию из одноразмерных кусков сжигать с наибольшим эффектом. Печь снабжена устройством для автоматического дозирования и контроля за уровнем загрузки шихты, который обеспечивает загрузку известняка и топлива в нужной пропорции в ковш скипового подъемника *1*. Загрузочный аппарат *2* состоит из вращающейся чаши, низ которой закрывается конусом. Дно расположенного над чашей бункера также закрывается конусом. Попеременное открывание обоих конусов обеспечивает герметичность шахты. Вращение чаши на различные углы поворота дает равномерную загрузку шихтой сечения печи. Открывание конусов сблокировано с движением ковша подъемника, но может также производиться самостоятельно. Печь выполняется с выгрузочным механизмом *3* в виде ступенчатого пода с возвратно-поступательным движением или в виде опрокинутой вращающейся чаши с центральным отверстием и скребками на периферии чаши. Известь спускается через трубу, вставленную в отверстие и вращающуюся вместе с чашей, и поступает на разгрузочный стол, с которого сбрасывается скребками, укрепленными на трубе, в бункер. В низу бункера устанавливается или трехшлюзовой затвор, или затвор барабанного типа. Через отверстие в барабане известь насыпается в него, а при обороте на 180° высыпается в отводящие рукава. Точная пригонка барабана к чугунному неподвижному корпусу, имеющему верхнее и нижнее отверстия, обеспечивает герметичность печи, работающей под давлением в 500—700 *мм* вод. ст.

На рис. 79 представлена печь Росстромпроекта, работающая на мелкозернистом длиннопламенном топливе. Газ из пристроенных аэрофонтанных полугазовых топок или мелкое топливо через торцовые окна поступает в объемы шахты, образованные сверху нишами, а снизу слоем извести, продукты сгорания топлива поступают в слой известняка, находящегося в шахте печи. Печь имеет прямоугольное сечение с укрепляющими шахту разделительными стенками.

На рис. 80 показана печь конструкции Росстромпроекта, работающая на газе. Так как проникновение газа на глубину более 700—800 *мм* затруднено, то для равномерности обогрева в центре установлен керн. Газ подается через керн и периферийно расположенные горелки. Ниже газовых влетов сечение печи переходит в прямоугольное, подводящее к двум четырехочелковым выгрузочным механизмам системы Антонова (ступенчатые каретки с возвратно-поступательным движением). Печь работает под разрежением дымососа. Данные о печах Росстромпроекта и других приведены в табл. 25.

Имеются печи небольшой мощности с полугазовыми топками, в том числе для обжига мелочи известняка размером кусков 10—20 *мм* и 20—40 *мм* (конструкции Голубкова, Маркелова и др.). Коэффициент полезного действия печей с полугазовыми топками 45—55% против 65—70% для пересыпных печей, что объясняется большими потерями тепла в выносных топках во внешнюю среду и с очаговыми остатками. Кроме того, использование тепла остываю-

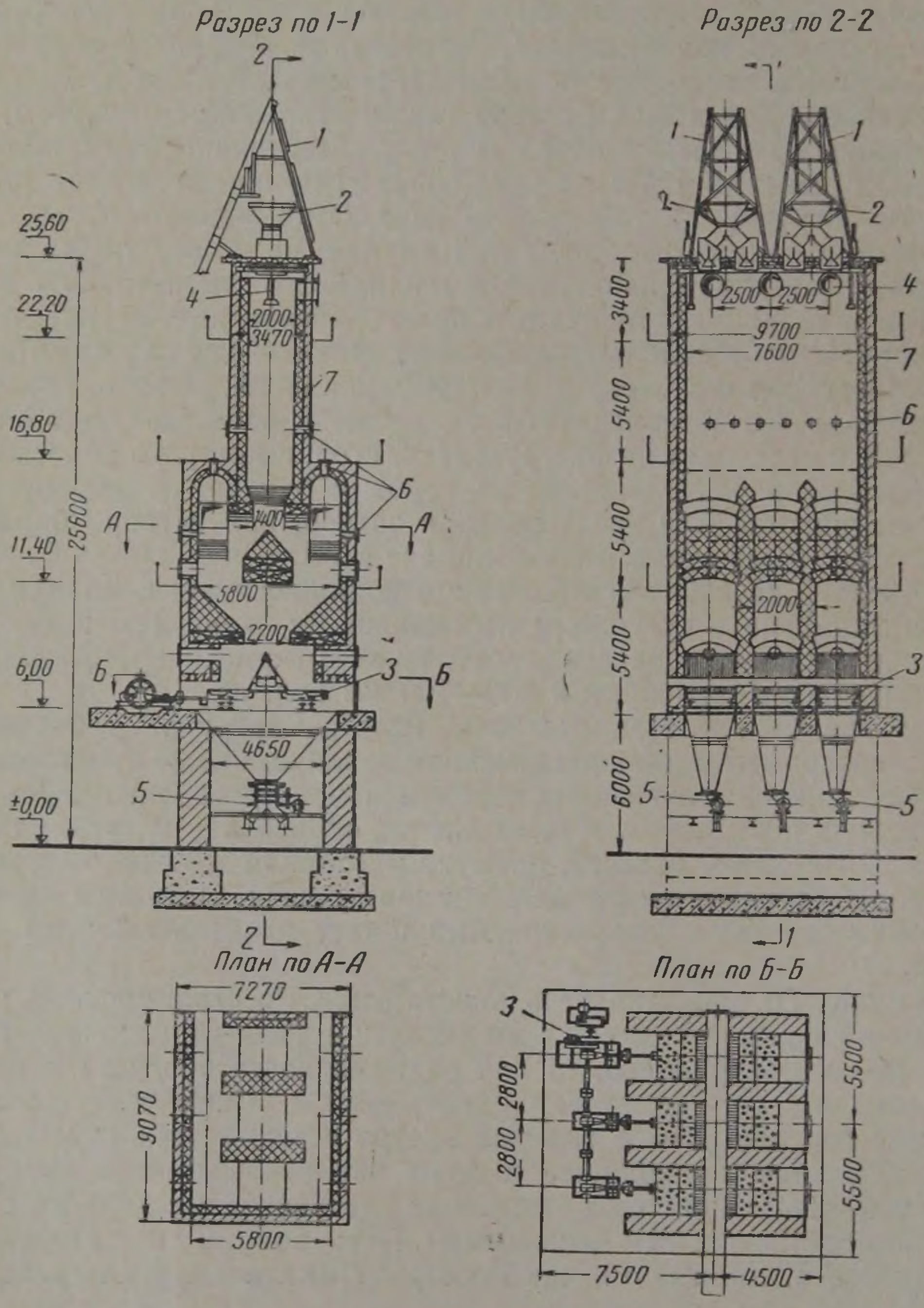


Рис. 79. Шахтная печь с полугазовыми аэрофонтанными топками

1 — скиповый подъемник; *2* — механизм загрузки; *3* — механизм выгрузки; *4* — указатель уровня загрузки шахты печи; *5* — барабанный затвор; *6* — смотровой люк; *7* — корпус и каркас печи

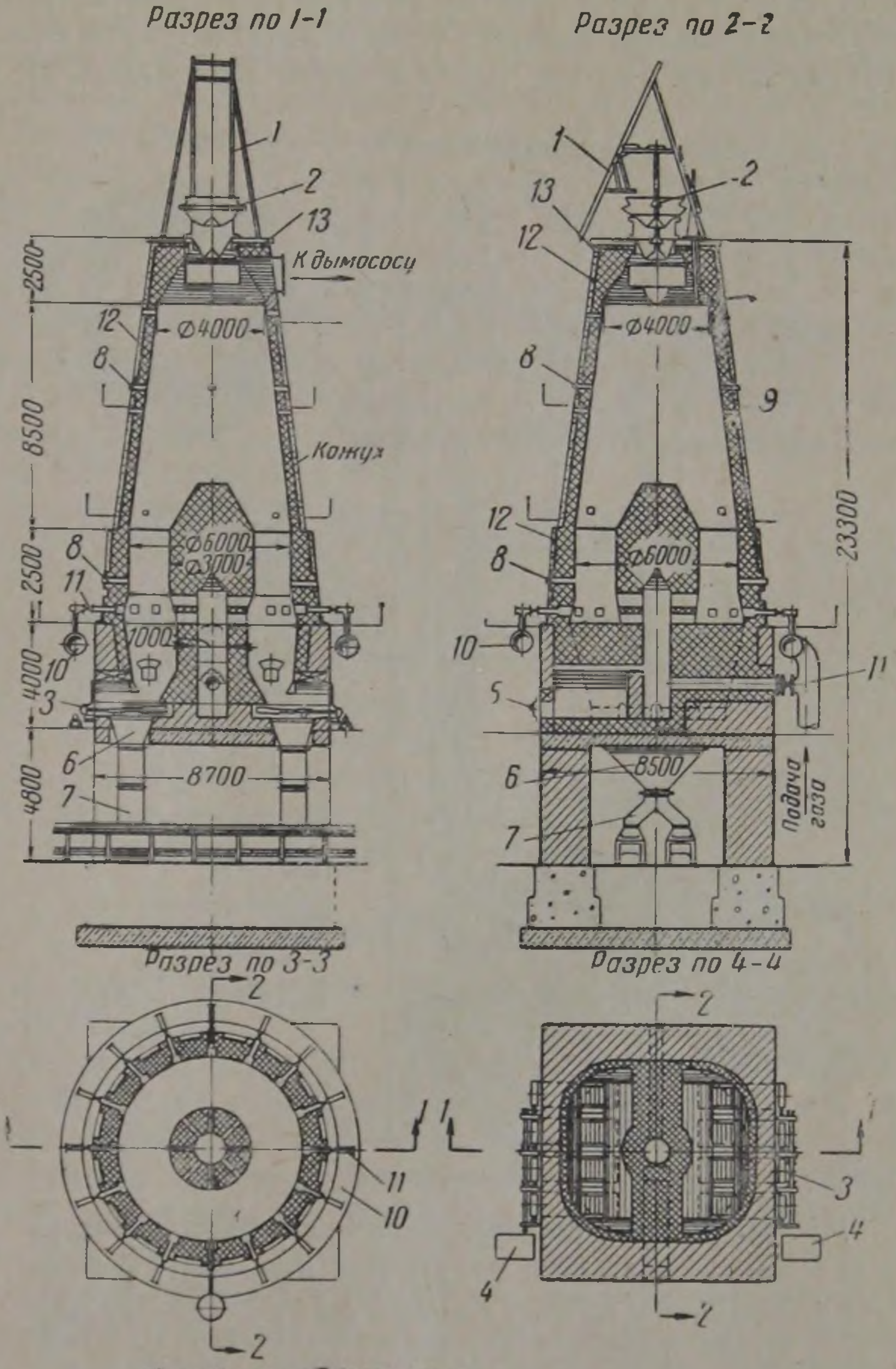


Рис. 80. Шахтная печь для работы на газе

1 — скиповый подъемник; *2* — загрузочный механизм; *3* — механизм выгрузки; *4* — привод механизма выгрузки; *5* — люк; *6* — бункер; *7* — течка на два транспортера; *8* — смотровой люк; *9* — указатель уровня загрузки шахты; *10* — коллектор для подачи газа; *11* — патрубок подачи газа; *12* — корпус печи; *13* — плита перекрытия

щего продукта в этих печах затруднено. В печах, работающих на газе и полугазе, потери тепла от химической неполноты сгорания из-за отсутствия восстановления углекислоты в шахте меньше, чем в пересыпных печах. Газовые печи в связи с увеличением в СССР

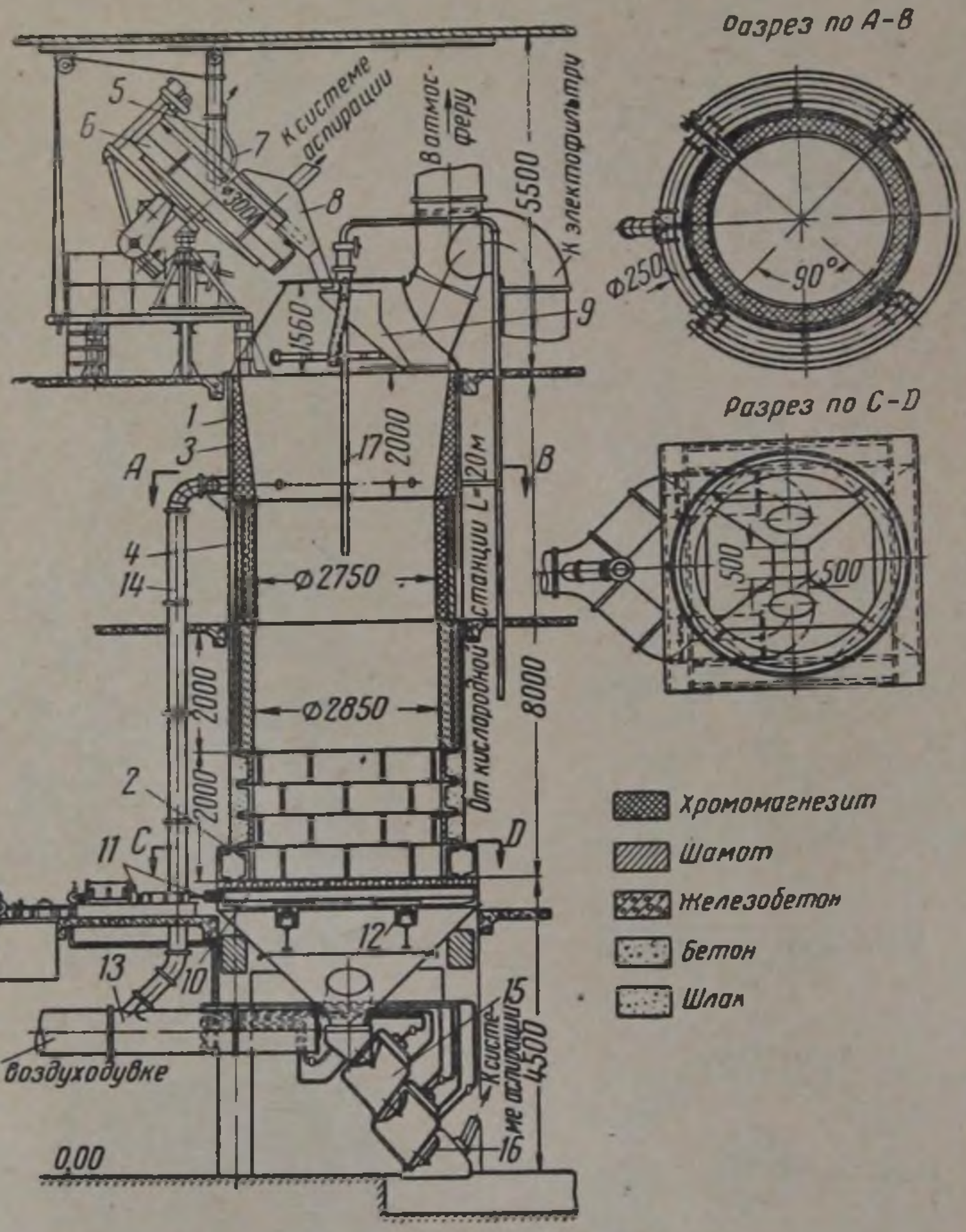


Рис. 81. Шахтная печь для обжига цементного клинкера

1 — корпус печи; *2* — рама; *3* — шамотная футеровка; *4* — хромомагнезитовая футеровка; *5* — течка для подачи сырьевой смеси; *6* — тарельчатый гранулятор; *7* — подача воды; *8* — течка для гранул; *9* — загрузочное устройство; *10* — разгрузочная решетка; *11* — гидропривод; *12* — ролики опорные; *13* — воздухопровод; *14* — подача воздуха к фурмам зоны кальцинирования; *15* — трехшлюзовый затвор; *16* — клапаны затвора; *17* — труба подвода кислорода

выработки природного газа, будут получать все большее распространение. Продукция газовых печей отличается чистотой и высоким качеством.

Шахтная цементная печь (рис. 81) работает на гранулах размером около 25 *мм*, для изготовления которых над печью расположен тарельчатый гранулятор с наклонным вращающимся диском. В нижнюю часть зоны горения подается по трубе под высоким давлением кислород для обогащения дутья (O_2 до 25 ÷ 30%). Труба

изготовлена из высокотемпературного огнеупора или из стали с водяным охлаждением. Разгрузочное устройство — зубчатая из двух частей колосниковая решетка с размером отверстий 100×200 *мм*, скорость движения 20—50 *м/час*; привод гидравлический. Шлюзовый затвор имеет меньшие, чем обычно, размеры за счет включения электромагнитного питателя в качестве одного из элементов затвора. Так как давление дутья доходит до 4000 *мм* вод. ст., у печи для подачи воздуха установлена воздуходувка. Управление печью автоматизировано.

Шахтные печи применяются для обжига гипсового камня на эстрих-гипс. Топки для них могут быть полного сгорания и полугазовые. Применение шахтных печей для получения строительного гипса нерационально, так как это приводит к большому пережогу продукции и к перерасходу топлива.

При конструировании печи для обжига глины на шамот Г. О. Гросс стремился предотвратить слипание при оттаивании в верхних слоях печи мерзлой в зимнее время глины подводом в зону подогрева из зоны охлаждения части горячего воздуха. Усовершенствованная печь работает на искусственном побуждении с щелевыми газовыми горелками, температура обжига 1200—1350°. Шахтные печи для магнезита работают на мазуте при температуре обжига 1600°, удельная производительность $g_{\text{п}} = 1200$ *кг/м³ сутки*; удельный расход условного топлива $b_{\text{у}} = 0{,}22—0{,}25$ *кг/кг*; давление воздуха для форсунок 350—500 *мм* вод. ст.

4. Порядок расчета шахтных печей

Порядок расчета шахтной печи заданной производительности состоит в следующем.

1. Составляется подробная характеристика обжигаемого материала: состав, форма и размеры кусков, насыпной вес и т. д., а также топлива: марка, состав, теплота сгорания.

2. Выбирается основная конструкция печи и ее рабочие характеристики по нормативным или литературным данным: удельная производительность g_v *кг/м³ сутки*, g_F *кг/м² сутки*, общий объем печи V *м³*, соотношение H/D в целом и по отдельным зонам.

3. Задаются по тем же данным избытком воздуха и температурой отходящих газов, температурой выходящего продукта, химической неполнотой сгорания или степенью полноты сгорания углерода.

4. Составляется материальный баланс обжига, откуда выявляются количества и характеристики действующих масс в целом и в каждой зоне печи.

5. Составляются расчет горения топлива и предварительный тепловой баланс. Определяется расход топлива. Выявляются количества воздуха и дымовых газов и их скорости по сечениям печи в каждой зоне.

6. Проверяется действительная температура газов и ее соответствие температуре обжига материала.

7. Задаются долей диссоциации $CaCO_3$ (например, 25%) и и $MgCO_3$ (100%)и долей топлива, сгорающего в зоне подогрева (~ 10%). Химическая неполнота горения относится к зоне обжига. Перепад температур между газами и материалом в зоне обжига принимают 40—80°. Указанные величины ориентировочны и более точно для каждого материала и конструкции выбираются по результатам уточненных расчетов теплопередачи и испытаний аналогичных шахтных печей.

8. Составляются тепловые балансы для каждой зоны печи или для зоны охлаждения отдельно, а для зон подогрева и обжига совместно. В уточненных расчетах каждая зона делится по высоте на ряд участков, для которых составляются расчетные уравнения теплового баланса и теплопередачи.

9. По температурам материала и газов на каждом участке, определяемым из тепловых балансов, строится кривая температур материала и газов и находятся их средние температуры. При этом для каждого участка находятся: условная теплоемкость материала, количество получаемого или отдаваемого им тепла, средние скорости газов и количество тепла, отдаваемого газами в зависимости от их скорости, теплофизических свойств и размера кусков материала. Определяется время пребывания материала на каждом участке и во всей печи и сравнивается теоретическое расчетное время с действительным временем, определяемым принятым объемом печи и заданной производительностью. Действительное время пребывания материала в печи должно быть больше теоретического расчетного за счет фактически имеющей место неравномерности работы слоя шихты.

10. Производятся аэродинамический расчет печи и выбор дутьевых и дымососных устройств.

11. Конструктивно оформляется печь и вся ее строительная часть, механизмы загрузки, выгрузки, система автоматизации печи. Составляется схема контрольно-измерительных приборов.

12. Составляется спецификация, смета. Проводятся технико-экономические расчеты для определения себестоимости обжига 1 *т* готовой продукции и сравнения ее с наименьшими уже достигнутыми показателями себестоимости.

В расчетах шахтных печей избыток воздуха при обжиге извести принимается 1,2—1,3; при обжиге цементного клинкера 1,1—1,2. Температура отходящих газов 200—400° (тем выше, чем суше поступающее сырье). Унос сырья составляет 0,5—1,5% в зависимости от интенсивности дутья. Потери тепла от химической неполноты сгорания для извести в пересыпных печах 5—10%, в печах на газе и полугазе 2—4%, в печах для цемента 20—40%. Тепло уходящих газов 17—25%. Механическая неполнота горения для пересыпных печей 1—3%, для печей с выносными топками на твердом топливе 10—16%. Тепло выходящей продукции 1—4%. Потери в окружающую среду 3—12% (бóльшие величины для печей с выносными топками). В полезное тепло (к. п. д. печи) входит тепло испарения влаги: для извести 3—4%, для цемента 10—15% и тепло

химических реакций: для извести в пересыпных печах 65—70%; в полугазовых 45—55%, для цемента 30—35%. В полезное тепло процесса обжига входит только тепло химических реакций.

5. Пути повышения производительности и экономичности шахтных печей

Этому важному вопросу посвящены труды как в СССР (работы Б. И. Китаева и др. ученых, а также Росстромпроекта, НИИЦемента), так и за рубежом (Ансельма в Германии, Гумца, Азбе в США и др.). Основными путями повышения удельной производительности шахтной печи при снижении удельных расходов топлива являются следующие мероприятия.

Определение оптимальных соотношений основных размеров печи. Например, для цементной печи производительностью до 220 *т/сутки* Ансельм рекомендует принимать диаметр 2,3 *м*, высоту 9—10 *м*, расширение верхней части шахты на высоте 1 *м* до диаметра 3,3 *м*. При этом зона спекания располагается почти целиком в расширенной части, а остальная, нижняя, часть представляет собой зону охлаждения. Сужение в этой зоне диаметра способствует увеличению скорости газов и ускорению теплообмена. Скорости воздуха должны быть в пределах 0,5—0,7 *нм/сек* по полному сечению шахты.

Наиболее целесообразная величина гранул сырьевой смеси 5—15 *мм*. Небольшой разброс в размерах гранул снижает пустотность с 45 до 30—35% и оказывает благоприятное влияние на теплообмен. Уменьшение диаметра гранул вызывает увеличение давления дутьевого воздуха, однако относительное увеличение давления уменьшается при переходе к малым размерам гранул и если, например, при уменьшении размера кусков с 80 до 40 *мм* давление увеличивается вдвое, то при переходе от 10 до 5 *мм* оно растет только на 28%.

Современные шахтные печи для цемента должны быть снабжены воздуходувками с вращающимися поршнями, так как эти воздуходувки не снижают производительности при росте сопротивления. Напор воздуходувок для цементных печей доходит до 4 000 *мм* вод. ст. и выше. Затрата на повышенное давление окупается экономией топлива, так как удельный расход тепла в интенсивно работающих печах снижается до 950 *ккал/кг* клинкера.

Важное значение имеет снабжение шахтной печи высококалорийным топливом, поскольку опыты показали, что снижение теплоты сгорания топлива с 7 000 *ккал/кг* до 5 000 *ккал/кг* ведет к снижению производительности на 32% и увеличению удельного расхода тепла на 42%. Так как брикетирование мелочи повышает ее теплоценность, в США антрацитовая мелочь брикетируется перед использованием в шахтных печах.

Оптимальное соотношение размера топливных кусочков и сырьевых: для цементных печей оно должно быть от 0,1 до 0,5; для известковых от 0,2 до 0,5.

Ансельмом проведены удачные опыты по увеличению производительности печи (на 5%) путем небольшого увлажнения дутьевого воздуха простым распыливанием воды. Этим достигалось снижение температуры диссоциации $CaCO_3$.

Интенсификация теплообмена в печи и увеличение производительности достигается при повышении температур газов в зоне обжига. Наиболее эффективным мероприятием для этих целей является обогащение дутья кислородом. Для экономии огнеупоров высокого качества при высокотемпературных процессах рекомендуется применение в зоне обжига водяной рубашки. Это способствует и уменьшению приваров шихты и связанных с ними потерь в производительности печи. Если рубашка включена в систему циркуляции пристроенного парового котла, то потери тепла через водяную рубашку используются для производства пара. Если в шахтной печи вынуждены сжигать топливо с большим выходом летучих, то в пристроенном котлоагрегате с успехом дожигаются (и используется их тепло) выходящие из печи горючие газы.

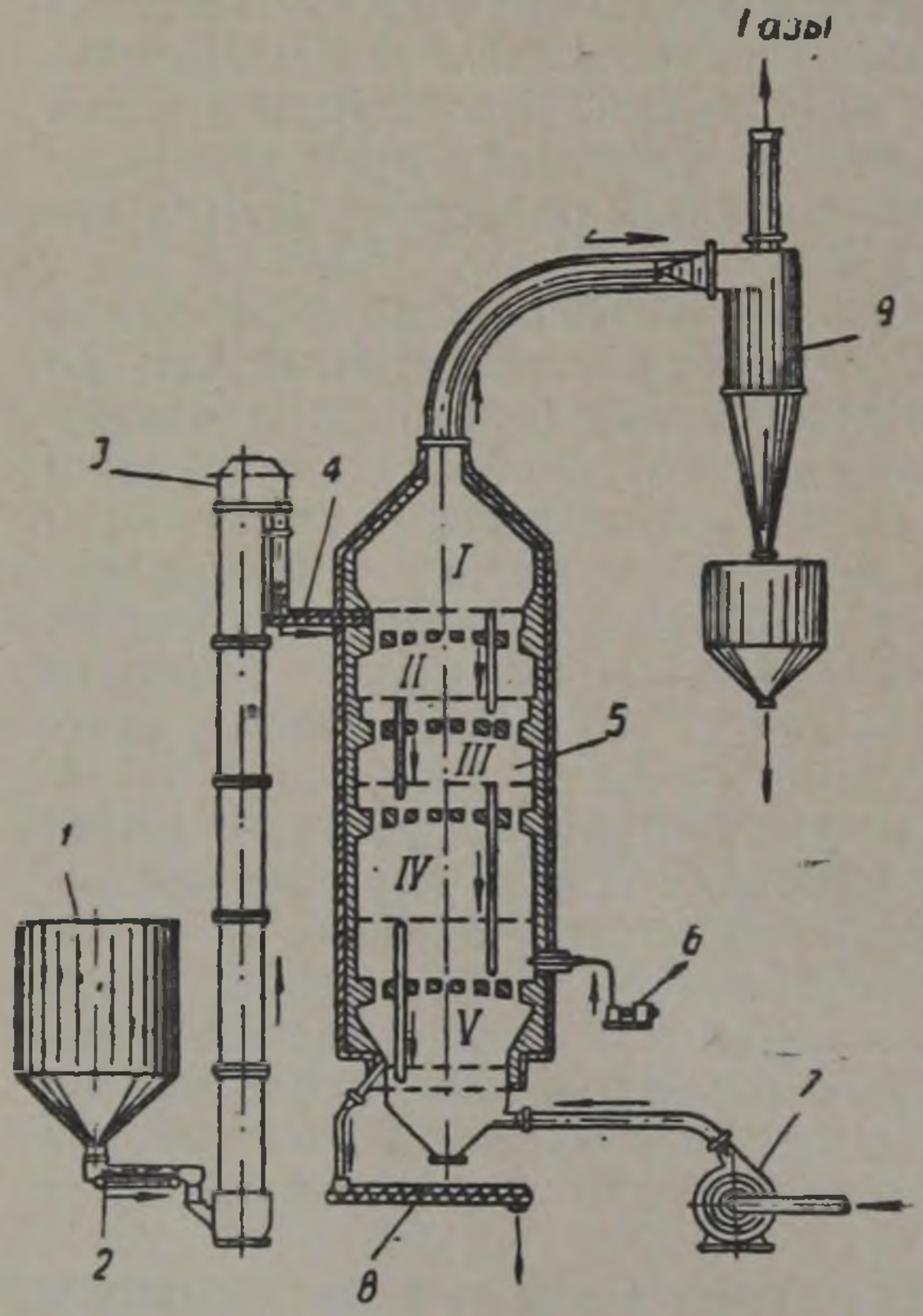


Рис. 82. Печь для обжига извести в кипящем слое

1 — бункер для измельченного известняка; *2* — шнек; *3* — элеватор; *4* — шнек; *5* — печь; *6* — мазутный насос; *7* — дутьевой вентилятор; *8* — шнек выгрузки; *9* — циклон; *I — III* — зоны подготовки; *IV* — зона кальцинирования; *V* — зона охлаждения

Газы из шахтных печей, содержащие большое количество CO_2, должны использоваться для карбонизации и для других целей.

Другим вариантом использования горючих и отходящих газов является комбинированная цементно-известковая шахтная печь конструкции Г. С. Палагина, состоящая из двух шахт. Горючие газы из первой шахты, загруженной послойно сланцем и известняком для производства цемента, направляются во вторую, заполненную только известняком, где используются как газовое топливо для обжига известняка.

Одним из вариантов решения вопроса обжига мелочи известняка в шахтной печи является сконструированная в США пятиэтажная печь (рис. 82). Производительность печи 150 *т/сут*. Удельный

расход тепла на 1 *т* извести 1,2 млн. *ккал*. Воздух в печь подается в количестве 100 *м*³/*мин* воздуходувкой с электродвигателем 110 *квт*. Обжиг происходит в «кипящем слое», когда частицы материала «плавают» под действием пронизывающих слой струй газа. Все частицы равномерно омываются теплоносителем, что улучшает качество продукции при ускорении процесса обжига. Промышленный образец такой печи имеет диаметр стального корпуса 4 *м* и высоту 13,5 *м*. Печь футерована огнеупором. Под каждого этажа имеет отверстия со вставленными в них соплами диаметром 90 *мм*, через которые газы с большой скоростью проходят из нижних этажей в верхние, поднимая частицы известняка в слое. Три верхних этажа являются зоной подготовки, четвертый сверху этаж является зоной кальцинирования, пятый — зоной охлаждения. Температура в зонах соответственно: 450, 730, 850, 1050 и 355°. По окружности четвертой зоны расположены 12 горелок и дополнительная мощная горелка в пятой зоне.

Шахтные печи современных конструкций являются высокопроизводительными и экономичными установками. Совершенствование их возможно при условии дальнейшего исследования кинетики горения топлива в среде материала, теплообмена при различных скоростях газов и размерах зерен материала и при решении ряда других вопросов.

ГЛАВА IV

ВРАЩАЮЩИЕСЯ ПЕЧИ

1. Основные понятия и определения

Вращающейся печью называется полый стальной барабан, вращающийся вокруг своей оси, слегка наклоненной к горизонтали, в котором происходит обжиг при пересыпании и движении материала с одного конца до другого. Внутри барабан в большинстве случаев футеруется огнеупором и бронеплитами. Исключение представляют ранее упомянутые вращающиеся печи для низкотемпературного обжига гипса. В отличие от сушильных барабанов, вращающиеся печи характеризуются значительно бо́льшим отношением длины к диаметру, которое достигает для печей 35—40, а в некоторых конструкциях и выше. Это объясняется большей сложностью происходящих в них тепловых процессов и необходимостью получения в них материалов с особенно высокой равномерностью тепловой обработки каждой частицы материала. Осевое сечение барабана может быть прямоугольное или с расширенными на входе и выходе участками. Отношение диаметра концевых частей к диаметру центральной части составляет 1,1—1,3 (рис. 83). В соответствии с этим печи условно обозначаются произведением их диаметров на длину (в *м*), например: 3,6/3,3/3,6×150. Схема вращающейся печи приведена на рис. 83.

Сырьевой материал поступает обычно в верхний конец печи и движется навстречу продуктам сгорания топлива, сжигаемого в горелках, установленных на нижнем торце барабана. Однако часть сырья в подсушенном виде может быть подана и со стороны горелки или через нее. Эта часть материала в значительной мере проходит тепловую обработку во взвешенном состоянии, в прямотоке, сразу попадая в зону высоких температур. После выпадения из потока и этот материал с определенного участка печи движется вместе с основной массой противотоком. В нижнем конце печи и в добавочном холодильнике готовый продукт охлаждается частью (65—85%) воздуха, поступающего на горение. Первичный воздух подается через горелку.

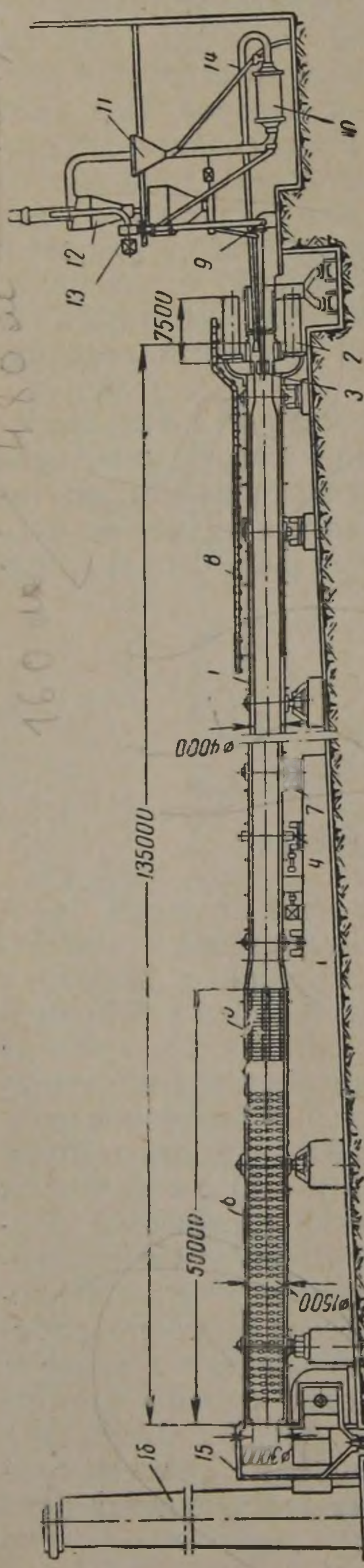


Рис. 83. Вращающаяся печь

1 — печь; *2* — рекуператоры; *3* — горелка; *4* — привод; *5* — теплообменники; *6* — цепная завеса; *7* — упорные ролики; *8* — трубопровод для отбора охлаждения печи; *9* — вентилятор горячего воздуха; *10* — шаровая мельница; *11* — сепаратор; *12* — циклон; *13* — вентилятор; *14* — трубопровод для отбора горячего воздуха из головки печи; *15* — пылеосадительная камера; *16* — дымовая труба

Как тепловой агрегат вращающаяся печь несовершенна и уступает шахтным печам, имея более низкий к.п.д. и, следовательно, повышенные удельные расходы топлива на единицу продукции. Это объясняется худшими условиями теплопередачи в печи, заполненной материалом только на 8—10%. Особенно это относится к хвостовой «холодной» части печи, где теплоотдача от газов к материалу происходит главным образом конвекцией. Вращающаяся печь требует больших капиталовложений на оборудование и сооружение. Металлоемкость печи значительна, например вес металла печи длиной 150 *м* и диаметром 3,5 *м* превышает 1 200 *т*.

Непрерывность действия (коэффициент использования печи в годы, средний в 1956 г. — 86,2%, доходит в отдельных случаях до 96—98%); высокое, равномерное качество продукции, сосредоточение в одном агрегате больших мощностей и высокая

поэтому выработка на 1 рабочего делают вращающиеся печи основными тепловыми агрегатами в производстве цемента.

Небольшие вращающиеся печи начинают применять для вспучивания глин на керамзит. Значительно реже они используются для обжига извести (1250—1300°), эстрих-гипса (900—1000°) и других материалов, которые не требуют повышенного качества, как, например, цемент для гидросооружений. Применение вращающихся печей для этих материалов оправдывается в случае обжига больших количеств мелочи и при использовании газообразного топлива. Во вращающихся печах производится также обжиг каустического магнезита (1000°) и металлургического магнезита (1600°), а также шамота (1300°), идущих для производства огнеупоров.

2. Процессы обжига материалов во вращающейся печи

Процессы, происходящие при обжиге материалов во вращающейся печи, несколько отличаются от процессов в шахтной печи, где горение топлива и химические реакции в материале происходят в непосредственном контакте топлива и материала в среде, насыщенной углекислотой и окисью углерода. Вращающиеся печи оборудуются горелками полного сгорания высококалорийного топлива.

Рассмотрим в качестве характерных процессы обжига во вращающихся печах цементного клинкера, извести и керамзита.

В большинстве случаев в СССР и в некоторых других странах вращающиеся печи для обжига цементного клинкера работают по мокрому способу, при котором сырье подается в виде хорошо подготовленного шлама. Влажность шлама в среднем составляет 33—38%, колеблясь в широких пределах в зависимости от вида сырья и применения специальных разжижителей (сульфитно-спиртовая барда и т.д.). При так называемом сухом способе влажность подаваемого сырья уменьшается до 8—15%, сильно сокращая расход тепла на подсушку материала в печи. Наиболее распространенная печь, работающая по мокрому способу, в холодном конце которой внутри навешены цепи для улучшения теплоотдачи конвекцией, может быть по длине условно разбита на следующие семь зон (рис. 84).

1. Зона подсушки. Здесь на начальной по ходу материала длине печи, составляющей около 20%, происходит падение влажности сырья до 0% и затрачивается примерно 40% всего тепла. Температура встречных газов падает с 800—900° до 300—450°. Температура материала поднимается незначительно (до 180—200°) вследствие большого расхода на скрытую теплоту испарения влаги.

2. Зона подогрева. Ее длина около 25%. Температура газов перед этой зоной около 1200°, материал по выходе из зоны имеет температуру порядка 600°. Здесь заметных химических реакций в материале не происходит, и кривая обжига идет круче, чем в первой зоне. Затрата тепла в зоне подогрева примерно 25%.

3. Зона кальцинирования. Длина около 35%. Температура газов перед зоной 1400—1500°, материал в зоне 600—1000°. На этом

участке печи происходит сначала дегидратация глины, затем диссоциация карбонатов и другие менее характерные процессы. Вследствие эндотермичности реакций подъем кривой обжига более пологий. Затрата тепла около 27%. Дегидратация глины приводит к тому, что плотные гранулы материала рассыпаются в порошок, склонный к пылению и поэтому к повышенному уносу.

4. Зона экзотермических реакций. Зона относительно короткая (5%). Здесь температура материала быстро поднимается на 200—300° за счет экзотермических реакций образования силикатов и алюминатов кальция.

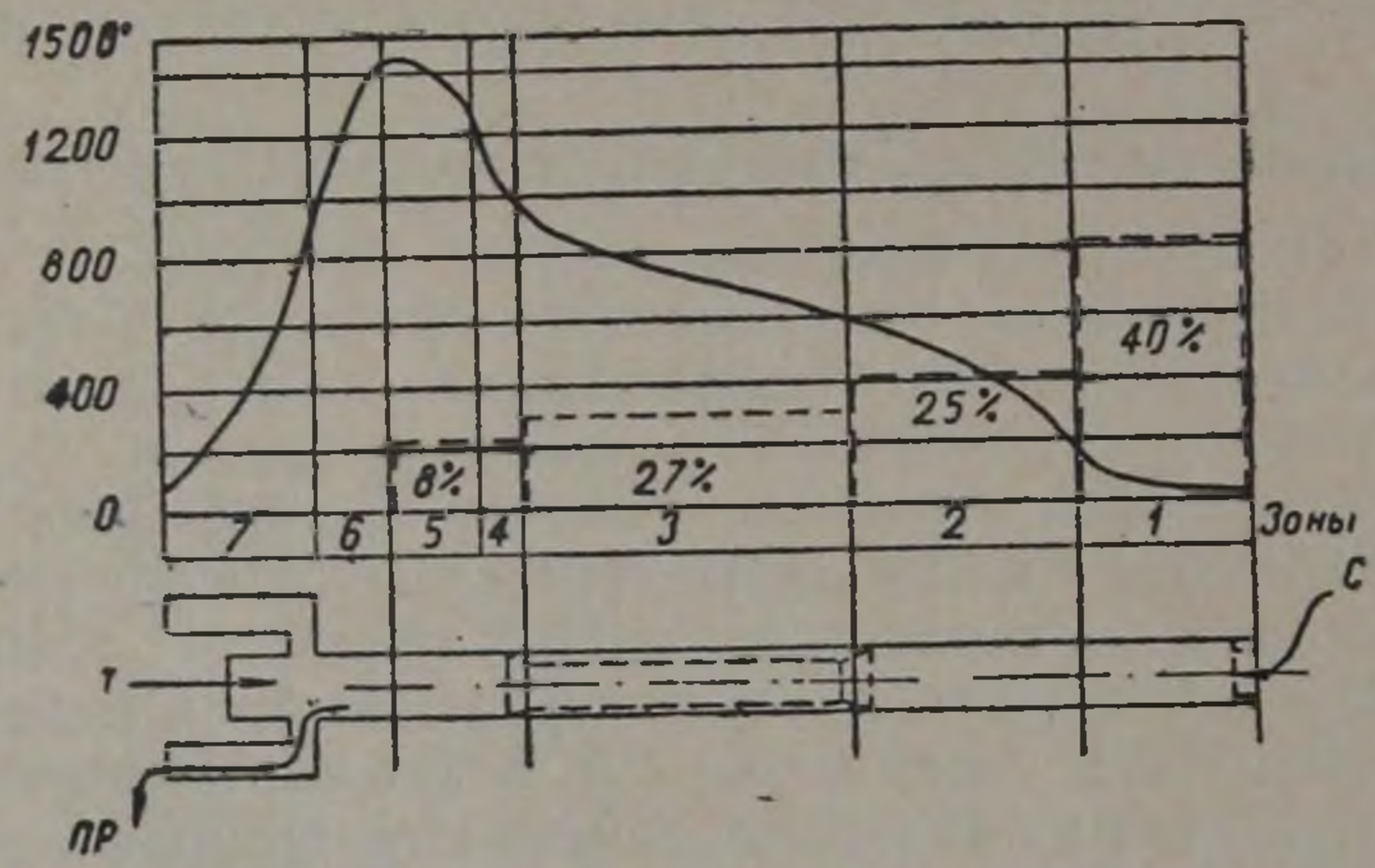


Рис. 84. График температур и затрат тепла по зонам печи

С — сырье; *Т* — топливо; *Пр* — продукция

5. Зона спекания. Длина ее порядка 10%. Температура газов достигает 1600—1700°, материала 1400—1450°. Затрата тепла на подъем температуры и частичное оплавление материала (спекание) составляет около 8% .

6. Первая зона охлаждения расположена в самой печи. Ее длина составляет около 7% длины печи. Здесь готовый продукт охлаждается до температуры 1000—1100°.

7. Вторая зона охлаждения вынесена во внешний холодильник, расположенный или на печи, или под печью. По выходе из этого холодильника клинкер имеет температуру около 100°. Через холодильник проходит вторичный воздух, который, охлаждая клинкер, нагревается до температуры 300—450°, способствуя повышению температуры факела и интенсификации процесса теплопередачи лучеиспусканием.

При обжиге известняка во вращающейся печи отсутствуют зоны спекания, экзотермических реакций, а если обжиг происходит в кустах, то резко сокращена зона подсушки.

Процесс получения во вращающейся печи керамзита значительно меньше исследован, чем обжиг клинкера. По предложениям Н. А. Попова и С. П. Онацкого, процесс обжига керамзита должен производиться двумя последовательными ступенями:

Первая ступень — тепловая обработка полуфабриката с нагревом его до 300—700° в зависимости от свойств глины. Полуфабрикатом являются, например, гранулы глины, обкатанные в противоточном сушильном барабане и высушенные в нем до влажности 7—10% теплом газов, отходящих из вращающейся печи. Целью первичной тепловой обработки является высвобождение избытка газообразных продуктов и придание материалу термической стойкости перед обработкой во второй высокотемпературной ступени. Здесь же должно происходить насыщение его сажистым углеродом в восстановительной среде. Во избежание потери газообразующей способности материала он не должен быть перегрет, для сохранения же термической стойкости, его нельзя недогревать.

Вторая ступень — дальнейший нагрев и обжиг при температурах вспучивания 1050—1300°. Время пребывания 7—10 мин. При недожоге в этой зоне поры керамзита будут недоразвиты, при передержке при высоких температурах начнется недопустимое оплавление глины с образованием крупных кусков. К тепловым установкам для керамзита предъявляется требование точной регулировки создаваемого режима. Вращающиеся печи для обжига керамзита, поскольку он длится всего 30—80 мин., имеют длину 10—35 *м* при диаметре 1,8—2,5 *м*. Большие из этих величин требуются при совмещении обеих ступеней тепловой обработки в одной вращающейся печи. Печи с расширенной зоной для обжига керамзита нежелательны, так как в них материал задерживается и легко может перегреваться. Готовый продукт поступает из печи в бункер охлаждения, во вращающийся или иной холодильник.

Процесс тепловой обработки керамзита при проведении обеих ступеней процесса в одном агрегате и внешнем холодильнике может быть условно разделен на такие зоны.

1. Зона дегидратации, насыщения углеродом и начала диссоциации карбонатов. Длина около 50% всей печи. Нагрев материала от температуры в момент его поступления в печь до 700°. Охлаждение газов от 1000 до 400—500°.

2. Зона восстановительных реакций, диссоциации карбонатов, размягчения и вспучивания глин. Длина около 30—35%. Достижение материалом наивысших температур вспучивания 1050—1300°. Температура газов соответственно на 150—250° выше.

3. Зона отжига и первого охлаждения. Длина 15—20%. Температура материала при выходе из печи 800—1000°.

4. Вторая зона охлаждения во внешнем холодильнике. Воздух, идущий на горение в печь, нагревается в нем остывающим керамзитом до температуры 250—300°.

3. Особенности теплопередачи во вращающейся печи

Материал, передвигающийся по вращающейся печи, занимает в ее поперечном сечении площадь, не превышающую десятой доли этого сечения; остальное пространство печи заполнено газовым потоком со взвешенными частицами топлива, золы и уноса материа-

ла. В зоне высоких температур основная доля тепла газов передается поверхности материала и футеровки лучеиспусканием. Расчетные формулы теплопередачи лучеиспусканием при запыленном потоке газов приведены в разделе втором, гл. II. Там же указаны и мероприятия по повышению интенсивности отдачи тепла лучеиспусканием. В отдельных случаях для увеличения разницы температур газ — материал температура обжига снижается введением в сырье плавней.

Материал получает тепло не только от газов, но и от разогретой поверхности футеровки при непосредственном контакте с ней. Температура футеровки всегда выше температуры материала. При вращении печи она циклически меняется: от максимальной в начале насыпания на нее материала до минимальной при ссыпании с нее. Для увеличения передачи от футеровки к материалу иногда применяется оребрение ее или установка экранирующих из жароупорной стали (Х28 и др.) башмаков, закладываемых хвостовиками в огнеупор. В конце зоны кальцинирования, а также в зоне подогрева устанавливаются винтолопастные завихрители, направляющие горячие газы к поверхности материала. Это повышает передачу тепла конвекцией, но одновременно требует больших затрат на привод дымососов. В зоне подсушки температуры газов невысокие, и условия работы зоны приближаются к условиям работы барабанной сушилки, т. е. основная доля тепла передается конвекцией и при непосредственном контакте с нагретыми частями печи. В «холодном» конце печи навешиваются цепи, увеличивающие теплообменную поверхность зоны в 3—5 раз. Цепи обволакиваются жидким шламом. Это приводит и к уменьшению сечения для свободного прохода газов, к увеличению скорости газов и к усилению теплопередачи конвекцией. Длина цепной зоны при мокром способе производства составляет в среднем 3—7*D*. Длина и плотность навески цепей проверяются на каждой печи в зависимости от свойств шлама. Увеличение диаметра печи *D* позволяет создать большую поверхность цепной зоны при укороченной ее длине, что благоприятно с точки зрения уменьшения сопротивления проходу газов.

Вопросам расчета теплопередачи во вращающейся печи при производстве цементного клинкера посвящен ряд трудов как отечественных, так и зарубежных ученых*. Предложенные до сих пор расчетные формулы в силу введенных в них упрощений сложного процесса теплообмена во вращающейся печи не могут полностью учесть всех действительных условий теплопередачи во вращающейся печи и поэтому при проектировании печей в первую очередь пользуются анализом работы существующих печей в СССР и за рубежом и методом теплового моделирования для решения вопросов, связанных с конструированием отдельных узлов новых печей.

---

* Это отражено, в частности, в сборниках трудов Всесоюзного научно-исследовательского института цементной промышленности (НИИЦемент), в книге Е. И. Ходорова «Печи цементной промышленности» и др.

4. Производительность вращающейся печи

Производительность вращающейся печи как всякого непрерывно действующего теплового агрегата зависит от двух главных факторов: от транспортирующей способности агрегата и от его тепловой мощности. При этом, очевидно, чго тепловая мощность агрегата должна осваиваться в нем с нормальными для данного процесса коэффициентами полезного действия.

Транспортирующая способность вращающейся печи определяется по формуле

$$G = 60 \cdot 0{,}785 D^2 \psi v_м \gamma_м \ [кг/час], \qquad (V\text{-}38)$$

где D — внутренний диаметр печи в *м*;
ψ — коэффициент заполнения сечения материалом, обычно 0,08—0,1;
$v_м$ — скорость осевого передвижения материала в *м/мин;*
$\gamma_м$ — насыпной вес материала в *кг/м*^{3}.

Рассмотрение движения частицы в наклонном вращающемся барабане дает возможность определить приближенную зависимость скорости $v_м$ от числа оборотов n и угла наклона барабана к горизонту α по формуле

$$v_м = \pi D n \operatorname{tg}\alpha, \qquad (V\text{-}39)$$

где n — число оборотов вращающейся печи, равное 0,5—2 об/мин;
α — угол наклона, равный 3°—5°.

С другой стороны, производительность печи как теплового агрегата вычисляется по формуле

$$G = \frac{Q}{q} = \frac{\alpha_{ср}(t_{г.ср} - t_{м.ср})F}{q\eta}, \qquad (V\text{-}40)$$

где Q — тепловая мощность агрегата в *ккал/час*;
q — удельный расход тепла на 1 *кг* клинкера в *ккал/кг*;
$\alpha_{ср}$ — условный средний по всей печи коэффициент теплоотдачи от газов к материалу в *ккал/м*^{2}*час град*;
$t_{г.ср} - t_{м.ср}$ — условная средняя разность температур между газами и материалом в град.;
F — условная поверхность нагрева материала в печи в *м*^{2};
η — коэффициент, учитывающий долю всей тепловой мощности печи, переданную материалу в процессе тепловой обработки в ней.

Рассмотрение условий улучшения теплопередачи во вращающейся печи было сделано выше. Всякое повышение транспортирующей способности печи за счет увеличения числа оборотов, диаметра или угла наклона должно сопровождаться увеличением величины $Q\eta$ или уменьшением удельных расходов тепла q. В качестве одной из практических формул, дающих возможность приближенного расчета производительности печи для цементного клинкера по некоторым факторам, укажем на следующую:

$$G = \frac{a\dfrac{F}{F_в} \cdot D^{1,5} L t_{ух}^{m}}{1 + \dfrac{w - 35}{100}\Delta q}, \qquad (V\text{-}41)$$

где a — коэффициент, равный 5—5,5 при мокром способе производства для печей с внутренними теплообменными устройствами; он равен 2—2,2 при мокром способе без внутренних устройств или при сухом способе производства;

$\frac{F}{F_в}$ — отношение полной поверхности нагрева к внутренней поверхности печи;

D — внутренний диаметр печи в *м*;

L — длина печи в *м*;

$t_{ух}$ — температура уходящих газов в град.;

m — показатель степени, равный 0,25 для печей с внутренними устройствами при мокром способе производства и равный 0,5 для остальных случаев;

w — заданная влажность шлама в %;

35 — нормативная влажность его в %;

Δq — изменение количества тепла, передаваемого материалу для получения 1 *кг* клинкера при отклонении влажности шлама на 1%; обычно q=1,6%.

Для точного расчета производительности печи при получении керамзита данных еще недостаточно, тем более, что эта производительность в сильной степени зависит от состава сырья, разной температуры его вспучивания и ряда других причин. В качестве первого приближения расчет удельной объемной производительности можно делать так:

$$v_V = A\frac{D_0}{L}\beta n \operatorname{tg}\alpha = 1\,440\beta/\tau \ [м^3/м^3 сутки], \qquad \text{(V-42)}$$

где A — коэффициент, зависящий от состава сырья, в среднем равен 5 000;

$\frac{D_0}{L}$ — отношение диаметра в свету к длине печи, 1 : 12 до 1 : 22;

β — степень заполнения сечения материалом, около 0,10;

n — число оборотов печи в об/мин;

tg — наклон печи, 0,05—0,1;

τ — время нахождения материала в печи, обычно 30—80 мин.

5. Основные конструкции вращающихся печей

Наиболее распространенными в СССР печами являются печи, работающие главным образом по мокрому способу, размерами 3,6/3,3/3,6×150 *м*, производительностью 600 *т/сутки*. За рубежом в последние годы введены в эксплуатацию печи 3,65×152,5 с суточной производительностью G=730 *т/сутки* (США); 4/3,5×125,5, G = 740 *т/сутки* (Канада); 4,5/4×165, G = 1 200 *т/сутки* (Бельгия); 4,64/3,75×135, G=1 020 *т/сутки* (Франция) и т. д. В СССР проектируются печи 5×185, G = 1 800 *т/сутки*.

Корпус современных вращающихся печей выполняется сварным из отдельных обечаек. Толщина листа обечайки достигает 50—60 *мм*. Корпус 150 *м* печи имеет 7—9 бандажей, которыми печь опирается на ролики. Ось печи и оси опорных роликов расположены под углом 4° к горизонту. Подшипники роликов установлены на фундаментных рамах, жестко связанных болтами с железобетонными фундаментами печи. На средней опоре установлены конт-

рольные ролики, на которые начинает сильно давить печь при ее сдвиге вдоль оси. Вращение одного из контрольных роликов служит сигналом о ненормальной работе печи. Вблизи этой опоры расположен и зубчатый венец, при помощи которого печь через редуктор электродвигателем приводится во вращение. Число его оборотов можно менять, чтобы регулировать ход печи. Мощность электродвигателя печи 3,6/3,3/3,6×150—180 *квт*.

Во избежание проникновения наружного воздуха в печь, что уменьшает производительность и повышает удельный расход топлива, холодный и горячий концы печи имеют специальные уплотнения при входе соответственно в пылеосадительную камеру и в откатную головку печи.

Питание шламом производится через верхний конец печи по течке от ковшового питателя. Для увеличения производительности и экономичности печи за счет снижения среднего процента влажности в шламе со стороны форсунки отдельно или через нее может быть подана часть подсушенной сырьевой смеси. Так, на печи 4/3,5/4,2×120 на одном из заводов Голландии с холодного конца печи подается шлам с влажностью 38%, а через топливную горелку вдувается смесь, состоящая из пылеугольного топлива, цементной пыли, возвращаемой из электрофильтров, и тонкомолотого глинистого сланца. При такой двусторонней подаче средняя влажность сырьевой смеси уменьшена до 28%. Опыты на Кузнецком цементном заводе с двусторонним питанием печи, работающей по сухому способу, подтверждают целесообразность двустороннего питания вращающихся печей сырьевой смесью.

Помимо способа подачи шлама наливом через течку имеется способ подачи шлама с несколько повышенной влажностью (40—42%) через специальную распыливающую шлам под давлением 5—8 *ати* форсунку с холодного конца печи. Резкое повышение поверхности тепловосприятия от газов к материалу при подаче его в виде мелких капель сокращает зону испарения, увеличивает производительность печи примерно на 15%, снижает температуру уходящих газов на 120—150° и удельный расход топлива на 10—12%. Однако при разбрызгивании шлама повышается в 1,5—2 раза процент уноса и добавляется затрата энергии на насосы для разбрызгивания шлама. Кроме того, появляется необходимость частой очистки форсунки для ее бесперебойной и равномерной работы.

Для беспрерывной высокопроизводительной работы вращающихся печей большое значение имеет подбор огнеупоров и тщательное выполнение ее футеровки. Апробированной системой футеровки является следующая: в холодной зоне, где температура газов не выше 700°, учитывая механическое воздействие на футеровку цепей, ставится клинкеро-цементный бетон. Для повышения теплообмена и упрочения футеровки здесь применяются также стальные или чугунные ребристые бронеплиты. В зоне температур 700—900° укладывается шамотный кирпич класса Б, 1-го сорта; в зоне 900—1100° шамотный кирпич класса А. В пределах печи, где температура газов 1100—1400°, ставится тальковый кирпич, в зоне макси-

мальных температур 1400—1700° — хромомагнезит. В сторону падения температур к головке печи снова ставятся тальковый и шамотный кирпичи класса А, 1-го сорта.

Для увеличения стойкости футеровки с 1951 г. в СССР было введено водяное охлаждение наружной поверхности корпуса на участке зоны спекания путем разбрызгивания воды из форсунок или способом закрытого охлаждения корпуса водяной рубашкой. Количество воды, которое требуется на охлаждение корпуса, рассчитывается из условия теплосъема 2 000—3 000 *ккал/м² час* и нагрева воды на 20—30°. Чтобы избавить поверхность корпуса от накипи, которая сильно снижает его теплоотдачу, необходимо на охлаждение подавать очищенную воду или с добавкой к ней гексаметафосфата натрия из расчета 3—5 *г/м³* воды. Очистка от накипи при охлаждении разбрызгиванием производится при вращении печи прижимными стальными щетками. Успешное применение водяного охлаждения корпуса вращающихся печей возможно лишь при полной герметизации корпуса, при отсутствии накипеобразующих солей в охлаждающей воде и при хорошей вентиляции цеха.

Выходящий из печи горячий продукт направляется в холодильники. Применяются холодильники различных типов: рекуператорные (расположенные вокруг печи), барабанные (под печью) и колосниковые. Колосниковые холодильники могут выполняться в виде переталкивающих, расположенных под печью, и скребковых, устраиваемых на печи.

Кроме того, вращающиеся печи могут снабжаться вибрационными, цепными и др. типами холодильников.

Тепловой к. п. д. холодильников колеблется от 70 до 90% в зависимости от типа. В последнее время Южгипроцементом разработан гидровоздушный холодильник, в котором клинкер охлаждается водой от 1350 до 950°, а с 950 до 50—60° на переталкивающей решетке воздухом. Опыты показывают улучшение качества клинкера при резком водяном его охлаждении и сохранение удельных расходов тепла при подаче воды из расчета 150—200 *кг/т* клинкера.

Газовые и пылеугольные горелки или мазутные форсунки устанавливаются с фронта горячей головки печи. Они описаны в разделе первом, гл. III.

Большое значение для нормальной и экономичной работы печи имеет вопрос об организации улавливания уноса цементной пыли, который может достигать в отдельных случаях до 25% веса готового клинкера (сухой способ, короткие форсированно работающие печи и т. д.). Поэтому совершенно обязательна установка за печами горизонтальных электрофильтров или других эффективных пылеуловителей и с возвратом уловленной пыли во вращающуюся печь для обжига. В США пыль вводят за цепной завесой специальными черпаковыми устройствами, так как подача возврата в шлам вызывает его загустение. Как указано выше, есть возможность вводить эту пыль с горячего конца печи.

6. Особые типы вращающихся печей

Помимо основной конструкции вращающейся печи для цементного клинкера, описанной выше, имеется целый ряд других конструкций, ставящих своей целью улучшить тепловую работу печи, ускорить процесс обжига, снизить удельные расходы топлива, сократить габариты печей и т. д.

Для заводов, работающих по сухому способу, устанавливаются печи, уменьшенные по длине примерно в 3 раза, т. е. с отношением $\frac{L}{D}$ 10—15. Так как процесс обжига клинкера не может полностью закончиться в такой короткой печи, то он проходит в двух агрегатах. Низкотемпературная половина процесса обжига: подсушка, подогрев и кальцинирование происходят на движущейся решетке—

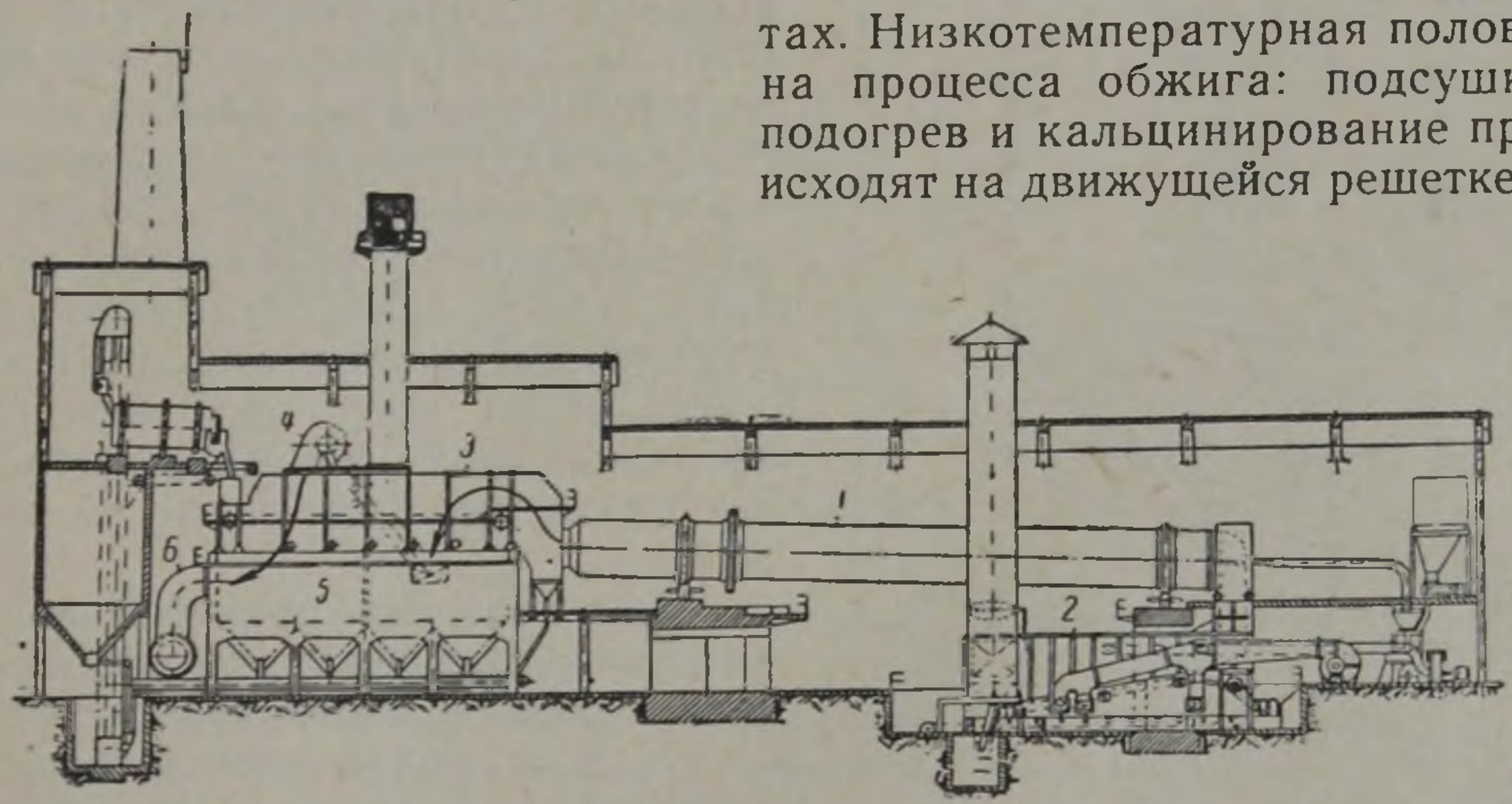


Рис. 85. Установка печи Леполь с двойным прососом газов

1 — короткая вращающаяся печь; *2* — холодильник колосниковый Фулера; *3* — кальцинатор с двойным прососом газа; *4* — вентилятор, отсасывающий газы из камеры кальцинирования и подающий их в камеру подсушки; *5* — пылеосадительные камеры; *6* — труба отсоса газов в дымовую трубу

конвейерном кальцинаторе, а высокотемпературные процессы: окончание кальцинирования, экзотермические реакции и спекание— в последовательно расположенной за кальцинатором короткой вращающейся печи. Газы из печи системы Леполь* дважды просасываются через слой гранул, находящихся на решетке, подготавливая их к обжигу (рис. 85). В СССР вводятся новые печи 4×60 *м* с кальцинаторной решеткой площадью $3{,}9 \times 25$ *м*. Теплообмен при просасывании газов через слой очень эффективен и процессы подготовки происходят на кальцинаторе значительно скорее, чем во вращающейся печи. Температура газов после печи с кальцинатором меньше 200°, что экономит топливо. При просасывании газов сверху вниз через слой влажных гранул унос материала с уходящими газами резко снижается.

---

* Изобретатель Лелеп, фирма «Полизиус».

Короткие печи, имеющие высокие (более 600°) температуры уходящих газов, для использования их тепла могут снабжаться котлами-утилизаторами. Выработанный в них пар используется и для энергетических целей. При температуре газов более 800° выработанная на таком паре электроэнергия может полностью покрыть потребности завода. Однако котлы-утилизаторы после печей работают неинтенсивно и с непостоянной производительностью. Газы при невысоких температурах передают тепло в основном путем конвекции, и котлы характеризуются низкими удельными паросъемами и, следовательно, большой металлоемкостью. Унос цементной пыли и осаждение ее на поверхностях нагрева котлов снижают тепловосприятие в котле и увеличивают сопротивление проходу газов. Это сравнительно быстро уменьшает паропроизводительность котла по мере его загрязнения. Эффективная очистка котла на ходу еще не освоена.

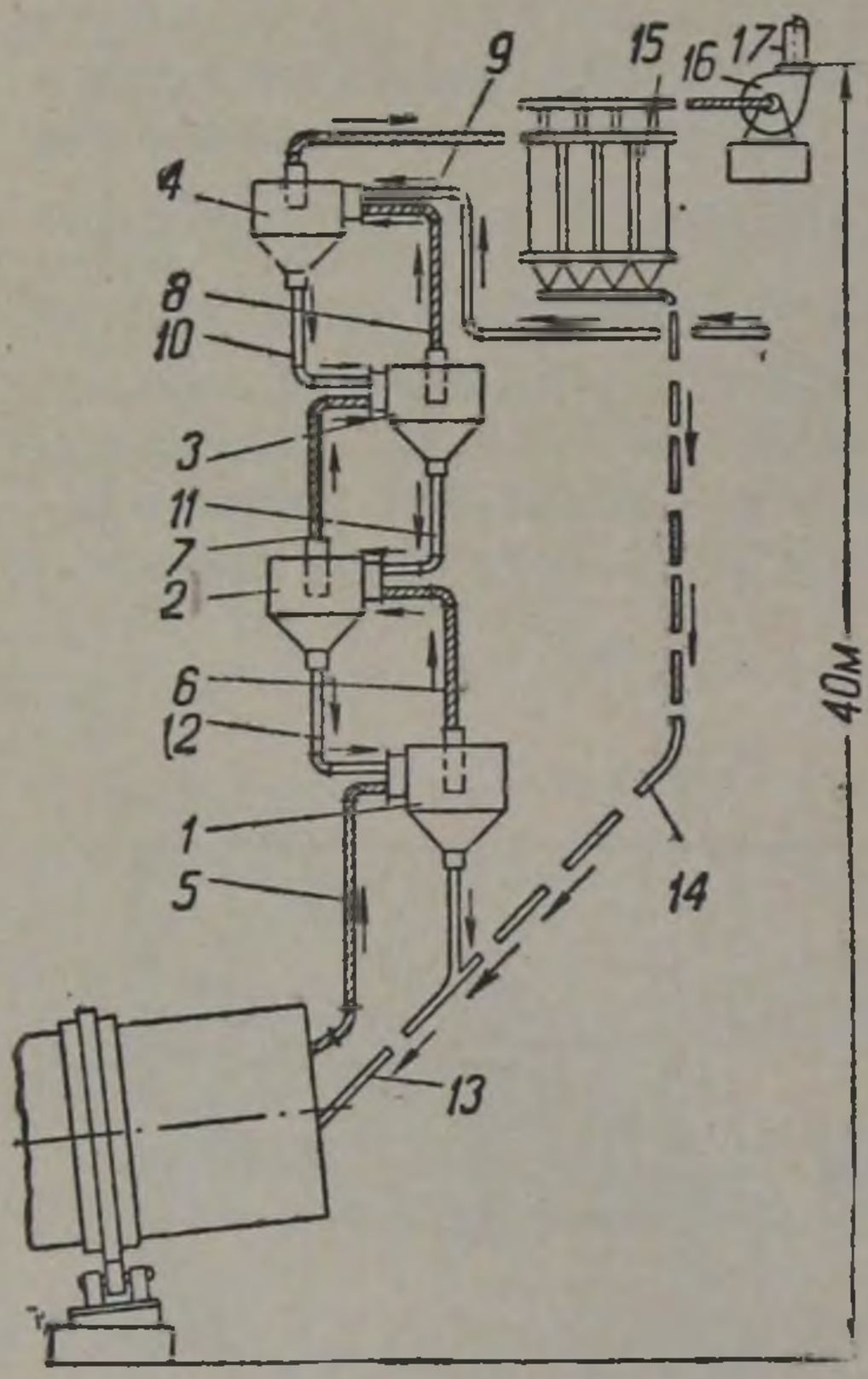


Рис. 86. Пылеулавливатели-теплообменники за вращающейся печью

1, 2, 3, 4 — циклоны; *5, 6, 7, 8* — газопроводы к циклонам; *9, 10, 11, 12* — трубопроводы сырьевой муки; *13, 14* — трубопроводы муки из циклонов и батарейного фильтра *15*; *16* — дымосос; *17* — труба выброса газов

Для переноса процесса испарения из неэффективно работающей концевой части вращающейся печи в более компактный и эффективный аппарат за печью, работающей по мокрому способу, устанавливают испарители, а при сухом способе — подогреватели, несколько отличающиеся по конструкции от испарителей. Испаритель представляет собой барабан, вращающийся около горизонтальной оси со скоростью 1—2 об/мин. Диаметр его 2—3 *м*, длина 1,5÷2,5 *м*. Торцовые поверхности глухие. Боковые поверхности образованы стальными колосниками с отверстиями. Барабан заполнен наполовину стальными кольцами 120×150 *мм*. Испаритель закрыт кожухом и соединен снизу с холодным обрезом печи. Шлам подается по верхней образующей барабана через отверстия в колосниках и обволакивает сильно развитую поверхность колец, через слой которых дымососом оттягиваются газы из печи. Производительность печей с испарителями возрастает на 20—25% и соответственно снижаются удельные расходы топлива.

Новый комбинированный метод повышения теплоиспользования и пылеулавливания из вращающихся печей разработан в Германии

(ф. Гумбольдт) (рис. 86). Производительность короткой печи 2,5×
×40 после пристройки этой установки (конструкция 1950 г.) повысилась с 140 до 200 *т/сутки*. По этой схеме пятая часть всех дымовых газов уходит прямо в трубу, а их основная масса — в пылеуловитель-теплообменник, который состоит из четырех циклонов, расположенных ступенями один над другим. Сырьевая мука в сухом виде подается в верхний циклон и, проходя в течение 15—25 сек. вниз к печи, нагревается до 800° при тесном контакте с дымовыми газами и частично декарбонизируется. Температура газов

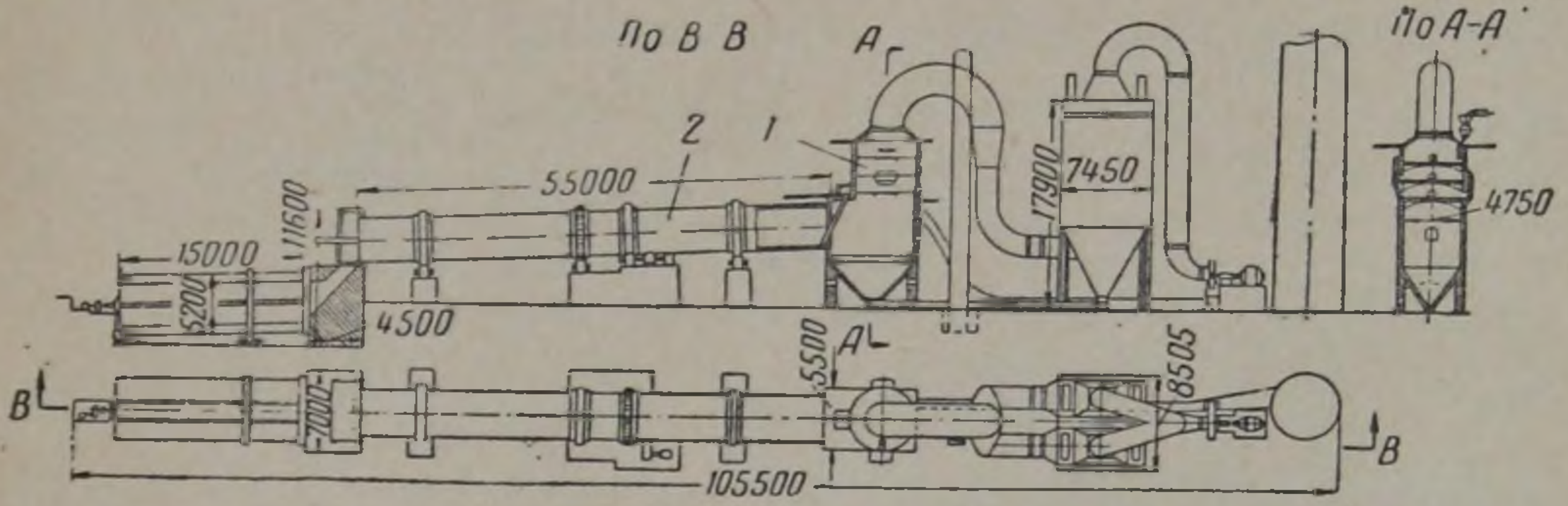


Рис. 87. Вращающаяся печь с шахтой кипящего слоя

1 — шахта кипящего слоя; *2* — укороченная вращающаяся печь

по выходе из печи около 1000°, поэтому циклоны имеют огнеупорную футеровку. Удельный расход тепла в печи снизился до 1 070 *ккал/кг*, затрата электроэнергии на пылеуловитель 9,9 *квт-ч/т* клинкера. Разрежение у вентилятора 500—600 *мм* вод. ст. Помимо Германии, подобные установки были выполнены в последующем в США на печах 2,13×38 производительностью 255 *т/сутки* и 3,35×
×53,5 производительностью 510 *т/сутки*. Эта система теплоиспользования относительно проста и целесообразна.

Положительные результаты работы установок с укороченной вращающейся печью и вынесением низкотемпературных процессов из неблагоприятных условий конвективного теплообмена печи в аппараты с интенсивной теплопередачей показывают полезность дальнейших исследований в этом направлении. Применяя схему действия распылительной сушилки, можно низкотемпературные процессы печи перенести в пристроенную за короткой печью башню, куда и подавать шлам центробежным распылителем. Можно использовать для этой же цели пристроенную к печи шахту, где производить тепловую подготовку мелкогранулированной сырьевой смеси в кипящем слое, как это описано в разделе шахтных печей для извести (см. рис. 82). Печная установка с шахтой кипящего слоя производительностью 13 и 45 *т/час* спроектирована в СССР (рис. 87). Размеры печи соответственно 3 × 30 и 4 × 55 *м*, диаметр шахты 2,5 и 5 *м*. Высота кипящего слоя 900 *мм* (по 300 *мм* в каждой из трех камер). Температура газов за шахтой 200°. Расчетный удельный расход тепла около 1 000 *ккал/кг*.

7. Схема расчета и тепловые балансы вращающихся печей

На основе изучения характеристики сырья и анализа работы существующих печей выбирается тип печи, и по вышеприведенным формулам предварительно определяются основные размеры печи. Задаются температурами отходящих из печи газов, продукта, коэффициентом избытка воздуха, соотношением между количествами первичного и вторичного воздуха. Температура отходящих газов (в град.) может быть принята (при обжиге цементного клинкера):

за короткими печами при питании сухой смесью	900—1 000
за длинными печами при влажности сырья 15% (сухой способ)	700— 800
за печами с цепной завесой (мокрый способ)	250— 350
то же, но при разбрызгивании шлама	200— 250
за печным агрегатом печь – котел-утилизатор	150— 200
за печами с испарителями или кальцинаторами	100— 150
температура продукта перед холодильником	800—1 000

Коэффициент избытка воздуха в зоне горения 1,0 (газ) — 1,1 (угольная пыль), за печным агрегатом: при кальцинаторах 1,5; за котлами-утилизаторами 2—2,5. Соотношение между количествами первичного и вторичного воздуха 1 : 2 — 1 : 3 (угольная пыль).

Температура отходящих газов за короткими печами при обжиге извести и при вспучивании глин 500—700°.

Расчет печей начинается с расчета материального баланса по принятым составам сырья и продукта. Далее составляется тепловой баланс печи по зонам и в целом по всему агрегату, включая теплоиспользующие установки. Температура горения топлива определяется с учетом нагрева воздуха, идущего на горение, за счет тепла остывания продукта, выходящего из печи. Длина зоны горения, по А. Н. Иванову, равна

$$L = 4{,}9D\ [м]. \qquad \text{(V-43)}$$

При этом тепловое напряжение зоны горения принято 300 000 *ккал/м³ час.*

Тепловой баланс определяет расход топлива в час и на единицу продукта, длину и температурные границы зон. Удельные расходы тепла, полученные из расчета теплового баланса, сверяются с расходами, приведенными ниже (*ккал* на 1 *кг* продукта) *q ккал/кг*:

печи короткие (60—80 *м*) с цепями на 1 *кг* клинкера . .	1 800—2 100
печи длинные (100–150 *м*) с цепями на 1 *кг* клинкера . .	1 600—1 800
печи с испарителями на 1 *кг* клинкера	1 500—1 600
короткие печи с кальцинаторами на 1 *кг* клинкера . . .	1 100–1 200
короткие печи с теплообменниками-пылеуловителями на 1 *кг* клинкера	1 000–1 050
печи Леполь с двойным прососом газа на 1 *кг* клинкера	850— 900
печи короткие (18—45 *м*) на 1 *кг* керамзита	650— 750

печи длиной 50—75 *м* на 1 *кг* магнезита	2 800—3 500
печи для обжига извести в кусках 10—60 *мм* на 1 *кг* извести	1 750 – 2 100
то же, при обжиге извести (сырье в виде шлама) на 1 *кг* извести	2 900 – 3 300

Тепловая мощность печи и диаметр ее находятся в соотношении:

$$Q = 1{,}1D^3 \text{ [млн . ккал/час]}. \qquad \text{(V-44)}$$

Подбор вентиляторов и дымососов производится на основе результатов аэродинамического расчета. Для расчетов сопротивлений можно принять следующие данные: пылеугольные горелки работают под давлением первичного воздуха 600—700 *мм* вод. ст. Холодильники закрытого типа скребковые под давлением 50—80 *мм* вод. ст., переталкивающие 100—150 *мм* вод. ст. Сопротивление цепной зоны составляет 80% сопротивления всей печи и равно 0,8—2 *мм* вод. ст. на 1 *пог. м* длины зоны. При замазывании цепей сопротивление цепной зоны в целом доходит до 100 *мм* вод. ст. Сопротивление испарителей 35—60 *мм* вод. ст., кальцинаторов 60—100 *мм* вод. ст.; электрофильтров 5—10 *мм* вод. ст., котлов-утилизаторов — 60—100 *мм* вод. ст., теплообменников ф. Гумбольдт 500—550 *мм* вод. ст. Общий напор дымососа вращающейся печи при обжиге клинкера доходит до 300 *мм* вод. ст., при вспучивании глины на керамзит сопротивление сушильного барабана, печи и дымоходов 100—120 *мм* вод. ст.

Пример теплового баланса для печи 150 *м* можно привести по данным НИИЦемента (расходная часть баланса): 1) испарение воды шлама 632 *ккал/кг* (36,27%); 2) клинкерообразование 411,2 *ккал/кг* (23,6%); 3) с уходящими газами 268,8 *ккал/кг* (15,43%); 4) в окружающую среду 226,7 *ккал/кг* (12,9%); 5) теплосодержание уноса 88,3 (5,08%); 6) теплосодержание клинкера 51,4 *ккал/кг* (2,96%); 7) прочие потери 34,4 *ккал/кг* (1,98%); удельный расход тепла 1 742,8 *ккал/кг* клинкера.

При производстве керамзита печи выбираются укороченные до 35—45 *м* с диаметром до 2,5 *м*. Толщина огнеупорной футеровки 230 *мм*. Начальная влажность гранул 7—12%. Во избежание комкования глины тепловые напряжения в зоне горения принимаются примерно вдвое ниже по сравнению с печами для цементного клинкера. Воздух в печь поступает нагретым до 200—300° за счет тепла остывающего керамзита. В качестве примера можно привести тепловой баланс печи $2{,}4/2{,}1 \times 35$ при получении керамзита. Топливом служит мазут.

Приход тепла: 1) теплота сгорания мазута 695 *ккал/кг* керамзита (87%); 2) теплосодержание мазута 31 *ккал/кг* (3,8%); 3) теплосодержание сырья 15 *ккал/кг* (1,9%); 4) теплосодержание воздуха при 250° 60 *ккал/кг* (7,3%).

Расход тепла: 1) эндотермические реакции с учетом экзотермии образования алюмоферратов и метакаолина или тепловой эффект

образования керамзита 150 *ккал/кг* (18,8%); 2) испарение воды сырья 95 *ккал/кг* (11,7%); 3) с уходящими газами 230 *ккал/кг* (28,8%); 4) теплосодержание керамзита перед холодильником при 1000° 210 *ккал/кг* (26,3%); 5) теплосодержание уноса 15 *ккал/кг* (1,9%); 6) потери в окружающую среду 100 *ккал/кг* (12,5%); удельный расход условного топлива около 100 *кг/т*, или 60 *кг* на 1 $м^3$ керамзита.

При обжиге извести во вращающихся печах главными расходными статьями теплового баланса являются: тепло диссоциации карбонатов 35%, с уходящими газами 35%, в окружающую среду 12%, с выгружаемой известью 10%.

Обжиг магнезита во вращающихся печах производится в кусках 20—30 *мм*. Более мелкие фракции при вращении печи быстро истираются, вызывая повышенный до 30% и выше унос пыли. Отношение длины печи к диаметру составляет 20—30. Время пребывания материала в печи 2—2,5 часа. Для обжига магнезита до спекания он должен быть нагрет до 1500—1600°, поэтому действительная температура горения в печи 1700—1800° должна быть обеспечена малыми избытками воздуха, его высоким подогревом и сжиганием высококалорийных топлив. Многозольное топливо применять не рекомендуется, так как присадка золы в продукт снижает его качество. Съем продукта с 1 $м^3$ печи 25—30 *кг/м³ час.* С 1 $м^2$ внутренней поверхности печи 10—12,5 *кг/м² час.*

8. Техника безопасности

При обслуживании шахтных печей необходимо следить за полнотой загрузки печи, не допуская опускания уровня материала и обнажения ее футеровки. Если печи работают под давлением, то перед открыванием смотровых лючков во избежание ожогов надо уменьшить дутье, следить за плотностью затворов загрузочных и разгрузочных механизмов. При работе печи на газообразном топливе соблюдать правила, разработанные для газостанций.

При обслуживании вращающихся печей, работающих на угольной пыли, устраняются места возможного скопления пыли, поддерживается хорошее состояние тепловой изоляции пылепроводов, регулируется процесс горения для устранения выноса искр в пылеосадительную камеру, тщательно контролируется действие взрывных клапанов, мигалок и т. д. Кольцевые привары в печи надо немедленно отжигать, так как они приводят к уменьшению прохода для газов и к разогреву переднего конца печи. Запрещается работать при прогарах футеровки, отдулинах на корпусе, при стреле прогиба > 2,5% диаметра и если бандаж печи не прилегает к роликам на какой-либо части оборота. При наличии хотя бы 10% ослабленных заклепок печь выводится в ремонт. Все механизмы печи должны быть закрыты. При обслуживании электрофильтров соблюдаются правила эксплуатации электрических устройств.

ГЛАВА V

УСТАНОВКИ ДЛЯ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ ГИПСА

1. Способы тепловой обработки гипса

Тепловая обработка строительного гипса происходит при невысоких температурах, поэтому способы тепловой обработки гипса разнообразны. Обжиг гипсового камня может происходить в шахтных, напольных, камерных печах; во вращающихся барабанах (специальные печи и сушильные барабаны); во взвешенном состоянии и обжиговых трубах, при совмещении помола и обжига в мельничных агрегатах; в варочных котлах, в автоклавах и самозапарниках и, наконец, в жидких средах.

Если гипсовый камень обжигается крупными кусками (70—300 *мм*) в шахтных, камерных и других подобных печах, то качество гипса невысокое, а удельный расход тепла на единицу годной продукции повышенный. Все это объясняется тем, что обжиг газами обязательно предполагает передачу тепла при охлаждении дымовых газов от сравнительно высоких температур (600—800°) до температур не ниже 120—200°. Столь высокие начальные температуры вызывают пережог и переход в ангидрит поверхностных слоев кусков гипса, т. е. фактический брак продукции. Средние слои при недостаточном прогреве, что иногда делают во избежание затягивания обжига и снижения производительности установки, остаются недожженными (двугидрат). Отсюда неравномерное качество гипса в одном и том же куске. Обжиг кусков гипса разных диаметров приводит к увеличению неравномерности качества в общем объеме продукта.

Так как брак при неравномерном обжиге растет, это вызывает повышенные удельные расходы топлива на единицу годной продукции.

Второй причиной увеличения удельного расхода тепла на обжиг гипса в таких печах является необходимость снижать температуру газов, выходящих из топки около 1000°, присадкой холодного воздуха до 400—500°. Этот добавочный воздух уносит из тепловой установки тем больше тепла, чем ниже начальная температура газов после смешения и чем выше температура уходящих из установки газов.

При схеме передачи тепла от газа к гипсу через нагревательную поверхность начальная температура газов может быть принята выше, особенно если гипс, соприкасающийся с раскаленной поверхностью, интенсивно перемешивается, и поэтому отдельные его частицы не успевают на этой поверхности пережигаться. Это позволяет иметь увеличенную разность температур газов при входе в установку и при выходе из нее, т. е. ведет к увеличению теплового к. п. д. установки и снижению удельных расходов топлива на единицу продукции.

Передача тепла от газов через разделяющую поверхность создает благоприятные условия для получения чистого, не сме-

шанного с золой и сажей топлива продукта, что имеет особое значение для архитектурного гипса. Однако такая система теплообмена ставит металл поверхности нагрева в чрезвычайно тяжелые температурные условия: снизу на металл воздействует топочная температура в 1000—1200°, а сверху лежит слой гипса, имеющий невысокую теплопроводность ($\lambda = 0{,}25$ *ккал/м час град*) и представляющий собой фактически тепловую изоляцию. В этих условиях металлические поверхности сравнительно быстро выходят из строя, вызывая большой годовой расход металла, частые остановки на ремонт и, следовательно, понижение годовой производительности установки (варочные котлы, вращающиеся печи и т. д.).

Обжиг гипса во взвешенном состоянии, при котором мелкие частицы гипса после размола уносятся снизу вверх по вертикальной трубе горячими дымовыми газами, обжигающими при этом гипс, с точки зрения теплообмена, представляет собой совершенный процесс. Длительность такого обжига всего 2—4 сек. С точки зрения технологии этот способ имеет крупные недостатки: гипс получается неравномерного качества, сроки схватывания его (1—2 сек.) значительно ниже нормативных, в продукте много ангидрита, регулирование процесса затруднено. Кроме того, транспортом для частиц гипса служат газы, последующее отделение которых от порошкообразного продукта требует громоздкой осадительно-фильтровальной аппаратуры. Степень очистки в этой аппаратуре недостаточна, и поэтому большое количество продукта вылетает из вентиляционных труб, увеличивая потери продукта и загрязняя атмосферу.

Достаточно хорошие результаты дает обжиг в автоклавах и самозапарниках. Здесь тепловым агентом является водяной пар, непосредственно воздействующий на материал. Большим недостатком этих методов тепловой обработки гипса является периодичность работы, сравнительная длительность цикла, трудность регулирования и сложность операций.

Поэтому необходимо дальнейшее совершенствование способов тепловой обработки гипса.

2. Установки для тепловой обработки гипса

Варочные котлы. Варочные котлы широко используются для тепловой обработки тонкоизмельченного до 120—150 μ гипсового камня. Гипс из варочных котлов получается чистый и более высокого качества, чем из большинства других установок.

Варочный котел (рис. 88) представляет собой сварной цилиндр с вогнутым днищем, обогреваемый снаружи газами из топки. Диаметр котла 1—3 *м*, отношение высоты H к диаметру D обычно в пределах 0,5—1. Чтобы обогрев был равномерным, котел снабжается мешалкой. С той же целью при больших емкостях котла через него пропускают жаровые трубы, по которым дымовые греющие газы проходят через толщу материала. Емкость котла, изображенного на рис. 88, 14 *т* гипса. Диаметр котла 3000 *мм*, высота

2 450 *мм*. Число оборотов вала с мешалкой около 20 об/мин. Электродвигатель для привода мешалки имеет мощность 19 *квт*. Жаровых труб четыре, их диаметр 400 *мм*. Под днищем котла расположена механизированная топка мощностью около 5 млн. *ккал/час*. Тип топочного устройства выбирается применительно к виду топлива.

Газы из топки с температурой около 1000° омывают днище котла и проходят через газовые влеты в боковой канал, далее в

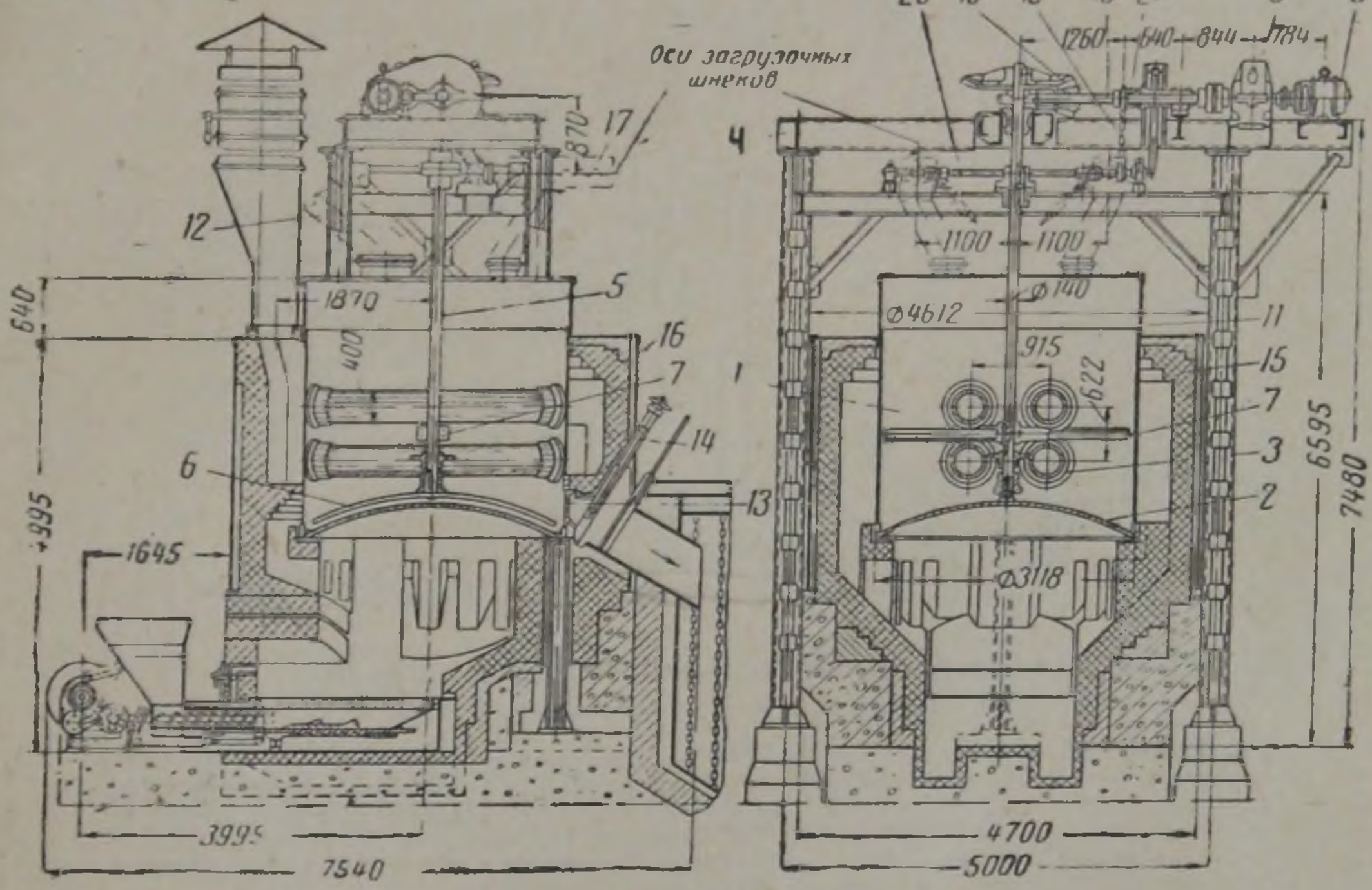


Рис. 88. Варочный котел для гипса

1 — цилиндр котла; *2* — сферическое днище; *3* — жаровые трубы; *4* — рама; *5* — вал мешалки; *6—7* — лопасти; *8* — электродвигатель; *9* — редуктор; *10* — зубчатая передача; *11* — крышка; *12* — патрубок; *13* — загрузочный люк; *14* — шибер течки; *15* — обмуровка; *16* — кожух; *17* — загрузочные шнеки; *18* — приводной вал шнеков; *19* — цепная передача; *20* — вал шнеков; *21* — кулачковые муфты для включения и выключения шнеков

жаровые трубы и уходят при температуре 400—500° в дымовую трубу или в мельницу для подсушки гипсового камня при его размоле.

Так как металл варочного котла работает в тяжелых температурных условиях, то для облегчения замены днище делается разъемным, а для удлинения срока службы оно выполняется из специальной жароупорной стали толщиной 35 *мм*. Толщина стенок котла 16 *мм*.

Варка в таких большеемкостных котлах продолжается при горячем порошке 1,5 часа, загрузка в течение 0,25 и выгрузка 0,1 часа. Готовый гипс при температуре 150—170° разгружается по течке в находящуюся рядом камеру томления гипса, где происходит

выравнивание качеств и нарастание прочности гипса. Продолжительность процесса томления около 2—3 час.

Показателями работы варочного котла служат съем гипса с 1 $м^3$ емкости котла в час и удельный расход условного топлива в *кг/т*. Съем продукции зависит от качества перемешивания и от степени предварительного подогрева гипсового порошка до поступления в котел (от 600 до 1 000 *кг/м³ час*). Удельный расход топлива 55—60 *кг/т*.

Помимо описанной конструкции варочного котла, на заводах работают котлы небольшой емкости (например, $D = 2000$ *мм*; $H = 1000$ *мм*; $V = 2{,}5$ $м^3$) без жаровых труб.

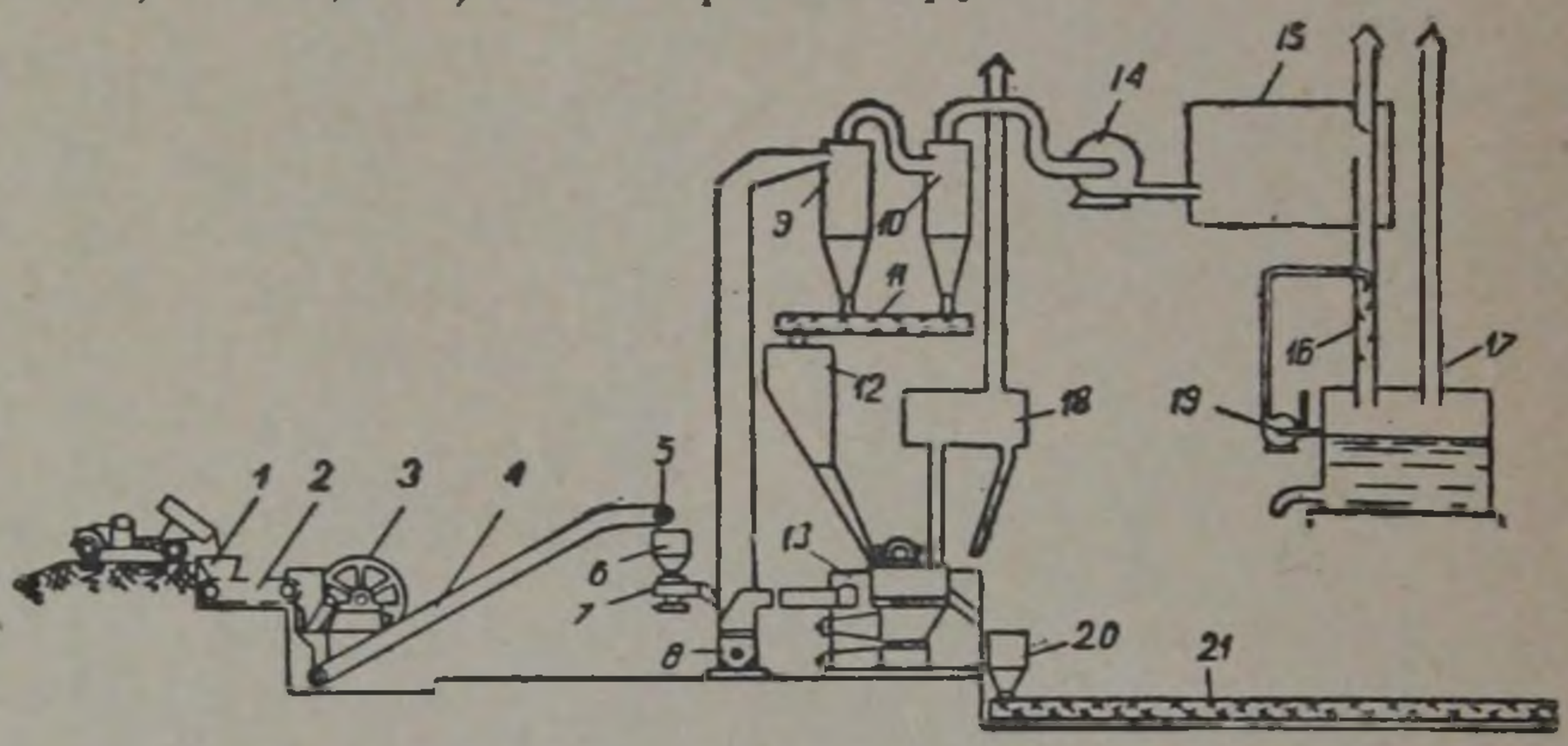


Рис. 89. Схема последовательной тепловой обработки гипса в мельнице и в варочном котле

1 — бункер; *2* — питатель; *3* — дробилка; *4* — транспортер; *5* — магнитный сепаратор; *6* — бункер; *7* — питатель; *8* — шахтная мельница; *9*, *10* — циклоны; *11* — шнек; *12* — бункер; *13* — варочные котлы; *14* — вентилятор; *15* — пылеосадительная камера; *16* — водяной пылеосадитель; *17* — выхлопная труба; *18* — пылеосадительная камера над котлами; *19* — насос; *20* — бункер томления; *21* — шнек на склад продукции

Комбинированная схема. В настоящее время варочные котлы в большинстве случаев работают в последовательном соединении с шахтными мельницами, где домалывается гипсовый камень после щековой дробилки и подсушивается гипсовый порошок (рис. 89). Горячие газы для подсушки подаются в шахтную мельницу *8* из гипсоварочных котлов *13* при температуре их около 400°. Шахтная мельница представляет собой молотковую мельницу, над которой расположена высокая (6—15 *м*) выполненная из стальных листов шахта. Газы проходят через мельницу и уносят с собой в шахту измельченные частицы гипса, размеры которых меньше размеров, соответствующих скорости витания при данном расходе газов и сечении шахты (см. четвертый раздел, гл. III, 2). Крупные частицы, выброшенные в шахту, выпадают из потока и возвращаются обратно в мельницу. Горячие газы не только сушат, но и уносят гипс от мельницы к варочным котлам. Чем лучше теплоизоляция мельницы и шахты, тем выше температура измельченного гипса, поступающего в варочные котлы, тем больше съем продукции с 1 $м^3$ котла.

Для отделения газов от транспортируемого ими гипсового порошка между мельницей и варочным котлом устанавливается циклон *9*, батарейный циклон *10* и рукавный фильтр, после чего отработавшие газы через выхлопную трубу *17* выбрасываются в атмосферу. Комбинирование варочных котлов с шахтными мельницами позволяет снизить расход электроэнергии на помол и расход тепла на тепловую обработку гипса.

Варка гипса в процессе помола и перемещения во взвешенном состоянии. Варку гипса до полугидрата можно проводить в самом помольном агрегате без последующей доварки в котле. С этой целью в барабанно-шаровую мельницу подводятся горячие газы при температуре более высокой, чем в предыдущем случае, обычно 500—700°. Газы уходят из мельницы с температурой около 150°, унося с собой измельченный готовый гипс.

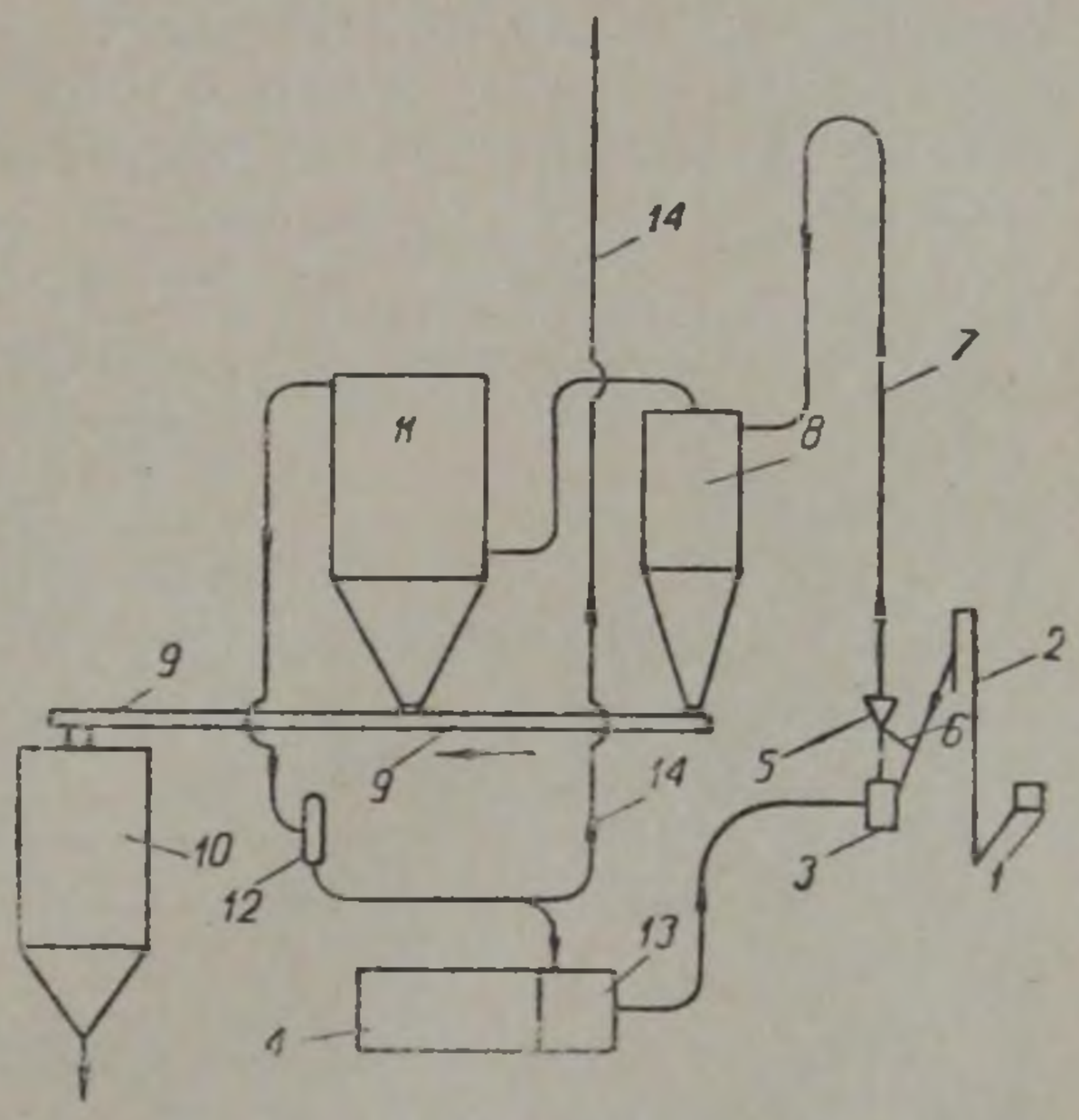


Рис. 90. Схема обжига гипса во взвешенном состоянии

1 — дробилка; *2* — элеватор; *3* — аэробильная мельница; *4* — топка; *5* — сепаратор; *6* — труба возврата; *7* — обжиговая труба; *8* — циклон; *9* — шнек; *10* — бункер; *11* — фильтр; *12* — вентилятор; *13* — смесительная камера за топкой; *14* — выхлопная труба

Газы из топки поступают во входной патрубок мельницы. Сюда же направляются вентилятором часть газов из циклона, дробленый гипсовый камень и возврат из сепаратора. Из выходного патрубка мельницы газы через сепаратор уносят гипсовый порошок в циклон, где происходит отделение газов от готового порошка.

При использовании для помола быстроходной шахтной мельницы сырье в ней не успевает дегидратироваться до полуводного гипса и поэтому в этих случаях после мельницы устанавливают шахту или обжиговую трубу, пролетая в которой снизу вверх размельченный гипсовый порошок дополнительно обжигается горячими газами, подаваемыми из топки снизу. Такие схемы обжига разработаны Б. А. Козловым, одна из них представлена на рис. 90.

В быстроходную мельницу из щековой дробилки подается гипсовый камень с размерами кусков от 10 до 25 *мм*. Газы, выходящие из топки при температуре 1100—1200°, разбавляются холодным воздухом в смесительной камере топки, после чего при температуре 450—700° направляются частично под ротор мельницы и частично в обжиговую трубу над ротором. Обычно длина трубы 15—25 *м*, диаметр 500—700 *мм*. После обжиговой трубы гипсовый порошок

с газами проходит в циклон, где происходит их первичное разделение, затем в фильтр, откуда часть воздуха через пылеуловитель выбрасывается в атмосферу, а часть направляется в смесительную камеру топки.

Свежеобожженный в такой установке продукт состоит из 50—60% растворимого ангидрита, 35—40% полугидрата, остальное (2—3%) — недегидратированные частицы. Недостатками обжига во взвешенном состоянии являются: неравномерность процесса обжига, трудность регулирования времени обжига частиц, необходимость добавления большого количества воздуха к газам для обжига и транспортирования, вследствие чего тепловой к. п. д. процесса не может быть высоким, а, кроме того, требуется громоздкая пылеосадительная аппаратура. Продукт обжига получается невысокого качества.

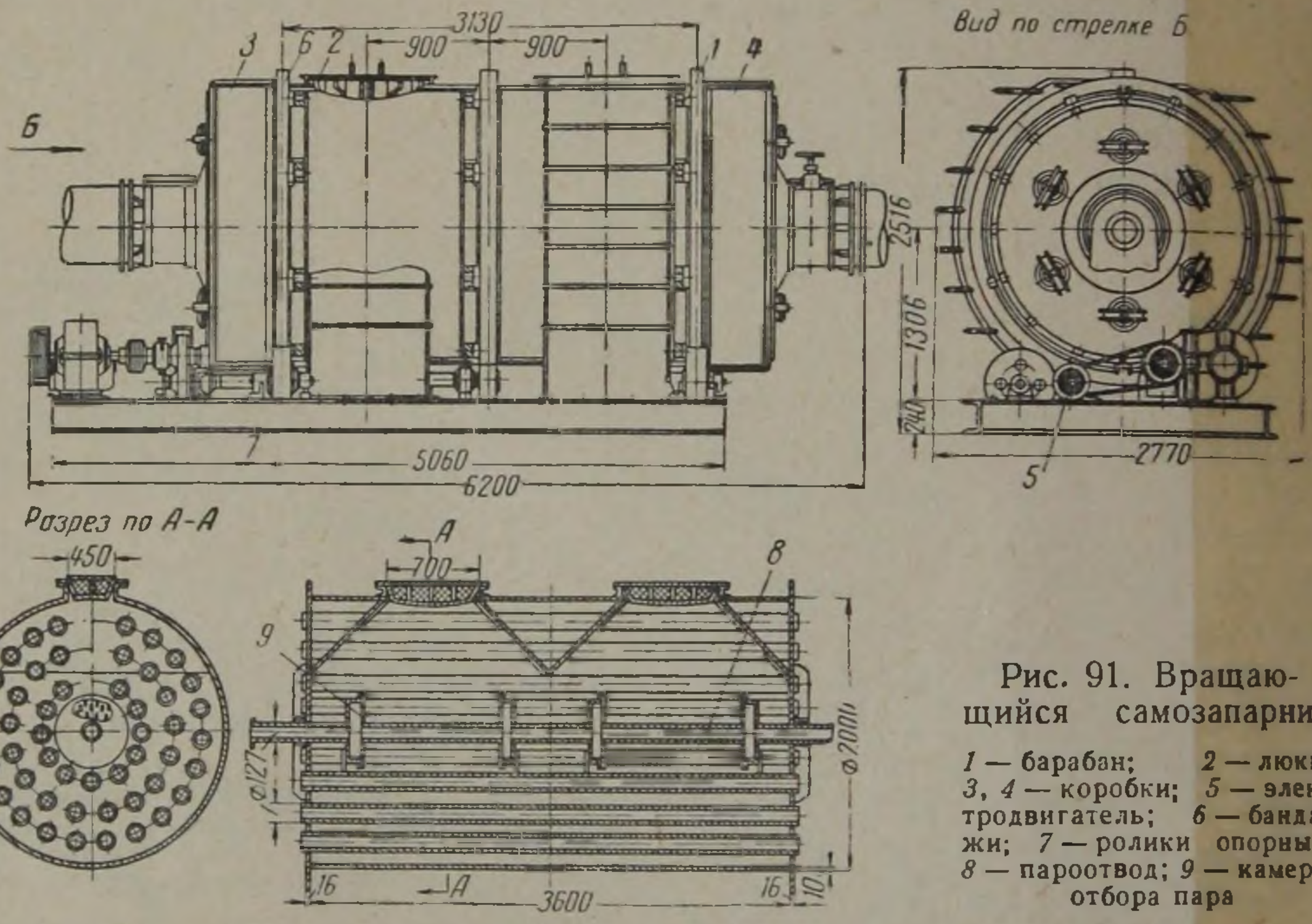


Рис. 91. Вращающийся самозапарник

1 — барабан; *2* — люки; *3*, *4* — коробки; *5* — электродвигатель; *6* — бандажи; *7* — ролики опорные; *8* — пароотвод; *9* — камеры отбора пара

Прочие установки для тепловой обработки гипса. Для обжига гипса могут быть использованы сушильные барабаны. Преимуществом их является непрерывность процесса, компактность установки, отсутствие громоздкой кирпичной кладки, хорошее перемешивание материала при его обжиге. К недостаткам надо отнести неизбежное загрязнение продукта золой и сажей при непосредственном омывании его дымовыми газами, повышенный унос мелочи при обжиге, необходимость предварительной присадки холодного воздуха к топочным газам и понижение к. п. д. тепловой установки и, как следствие этого, невысокое качество продукции. Во избежание больших потерь в окружающую среду сушильные барабаны должны быть надежно изолированы.

где b — расход условного топлива на

воздуха. Действительная температура горения должна быть на 150—250° С выше температуры обжига. Для высокотемпературных процессов избыток воздуха в зоне горения близок к единице (1,05—1,15), для керамзита он может быть больше (1,3—1,5). Избыток воздуха за печной установкой возрастает в зависимости от газовой плотности запечных элементов иногда до 1,8—2,5. Температура уходящих газов за печью при сухом способе производства клинкера составляет 800—1000° С, при мокром 200—350° С; при обжиге извести и вспучивании глин эта температура, если взять зависимость ее от длины печи $L_м \leqslant 60$ *м*, выразится формулой $t_{ух} = 820 - 9L$° С.

Далее составляется материальный баланс обжига (см. стр. 218). Тепловые балансы (см. стр. 119) определяют расход топлива в 1 *ч* и на единицу продукта, а также температуры газов и материала по границам зон. Удельные расходы условного топлива на 1 *кг* продуктов, полученные из расчетов, не должны превышать следующих величин $b_у$ (в *кг/кг*):

длинные печи (L=130÷185 *м*) с цепной зоной	0,23—0,25
короткие печи (L=30÷60 *м*) с эффективными теплообменниками	0,12—0,15
печи для керамзита (L=12÷40 *м*)	0,08—0,12
печи для извести (L=50÷75 *м*, 1250—1300° С, сырье в кусках 10—60 *мм*)	0,2—0,3
печи для извести (сырье в виде шлама) . . .	0,4—0,45

Расходные статьи теплового баланса печей приведены в табл. 19.

Таблица 19

Расходные статьи теплового баланса вращающихся печей (в %)

Статьи баланса	Печи		
	для цемента	для извести	для перлита
Испарение и перегрев влаги	35—40	2—6	8—12
Реакции образования продукта	20—25	30—40	16—32
Потери:			
от неполноты горения	1—3	1—3	2—4
с уходящими газами	12—16	25—40	25—35
в окружающую среду	10—15	12—16	15—25
Теплосодержание уноса	3—6	1—2	3—5
Теплосодержание продукта после холодильника	1—4	5—10	3—8

Для расчетов аэродинамических сопротивлений можно принять следующие данные: пылеугольные горелки работают под давлением первичного воздуха 6000—7000 *н/м*^{2}, холодильники

где b — расход условного

закрытого типа скребковые — под давлением 500—800 *н/м²*, колосниковые — под давлением 1000—1500 *н/м²*. Сопротивление цепной зоны составляет 80% от сопротивления всей печи и равно 8—20 *н/м²* на 1 *м* длины зоны. При замазывании цепей сопротивление цепной зоны в целом доходит до 1000 *н/м²*. Сопротивление кальцинаторов 600—1000 *н/м²*, электрофильтров 50—100 *н/м²*, теплообменников фирмы «Гумбольдт» 5000—6000 *н/м²*. Общий напор дымососа вращающейся печи при обжиге клинкера доходит до 3000—6000 *н/м²*; при вспучивании глины на керамзит сопротивление сушильного барабана, печи и дымоходов лежит в пределах 1000—1200 *н/м²*.

6. ПУТИ РАЗВИТИЯ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ

Поскольку вращающиеся печи в настоящее время дают наивысшее качество цементного клинкера при наибольшей производительности труда, они имеют перспективы к развитию. Пути их развития можно определить следующими положениями: увеличение агрегатной производительности G для экономии удельных расходов топлива и повышения производительности труда; увеличение отношения D^2/L для повышения удельного съема продукции и экономии металла; использование апробированных мероприятий по улучшению конвективной теплоотдачи от газов к материалу в «холодной» части печи; переход на двухстадийную схему теплоиспользования — укорочение вращающихся печей с целью их использования только для передачи тепла лучеиспусканием; замена «холодной» части вращающейся печи эффективными теплообменниками с прососом газов через неподвижный, кипящий или взвешенный слой; замена неэффективных холодильников (барабанных и т. д.) для продукта слоевыми колосниковыми; работа на высококалорийных топливах, дающих светящееся пламя, повышение температурного уровня, обогащение дутья кислородом; применение регулируемых в широком диапазоне горелочных устройств с определенным запасом тепловой мощности и обеспечением вентиляционно-дымососной мощности; установка эффективных пылеуловителей и возврат пыли в печь; полная автоматизация процесса.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ЦИКЛОННЫЕ ПЕЧИ

Существенные теплотехнические недостатки наиболее мощной установки — вращающейся печи, несмотря на частичные мероприятия по их устранению (установка внутренних и запечных теплообменников различных типов), делают необходимым раз-

b — расход условного топлива на варку гипса, обычно равный 0,05—0,06 *кг/кг*. При более высокой температуре подогрева гипсового порошка перед котлом эти величины несколько меньше.

Топка подбирается по максимальному часовому расходу топлива. По количеству газов при соответствующих избытках воздуха выбираются сечения дымоходов. Дымоходы варочного котла должны обеспечивать омывание возможно большей поверхности варочного котла при скорости вдоль этой поверхности не ниже 5—6 *м/сек*. Дымоходы между варочным котлом и шахтной мельницей во избежание потерь тепла делаются короткими с небольшими скоростями газов и надежной тепловой изоляцией.

В табл. 26 приведены тепловые балансы при обжиге гипса.

В комбинированной схеме с шахтной мельницей для повышения ее производительности температура газов перед ней не должна быть ниже 400°. Кроме того, отсасывающий вентилятор должен быть выбран с запасом, чтобы мельница не стесняла общую производительность системы мельница — варочные котлы. Разрежение перед вентилятором около 500 *мм* вод. ст., в шахте 80—90 *мм* вод. ст. Скорость газов в шахте мельницы должна быть несколько выше скорости витания частиц получаемого порошка.

ГЛАВА VI

СПЕКАТЕЛЬНЫЕ РЕШЕТКИ

1. Определение и основные схемы

Спекательными, или агломерационными, решетками называются колосниковые решетки, на которых сыпучий материал обжигается до частичного или полного спекания при просасывании горячих газов обычно сверху вниз. На агломерационных решетках производятся спекание шлаков и зол, вспучивание глин для получения легких заполнителей бетонов, дегидратация глин для ускорения сушки и обжига кирпича, обжиг цементного клинкера, а также обжиг известняка. На рис. 92 показаны основные схемы спекательных решеток.

Общая схема подготовки процесса для всех агломерационных машин такова. На колосниковую решетку прежде всего насыпается подстилающий слой из недожженного материала или готового продукта толщиной 20—30 *мм*. Величина зерен его 10—25 *мм*. Назначение подстилающего слоя: предохранение колосников от перегрева, равномерное распределение газов при прохождении их через слой, удержание в слое провала и уменьшение уноса. Равномерность и высокая газопроницаемость слоя, а также поддержание высоких температур при агломерации имеют решающее значение как для производительности машины, так и для получения однородного и высококачественного продукта. На подстилающий слой насыпается основной слой шихты. Шихта состоит из гранул шаро-

видной или цилиндрической формы диаметром 8—10 *мм* (в среднем), представляющих смесь спекаемого материала и топливной мелочи. Для повышения газопроницаемости и спекаемости в шихту добавляется возврат — мелочь размером меньше 5 *мм*. Спекание шлаков и зол происходит за счет содержащихся в них остатков углерода. Зажигание горючих в шихте выполняется внешними горелками, расположенными над слоем шихты. Горячие газы проходят через слой шихты и отсасываются, проходя вакуум-камеры,

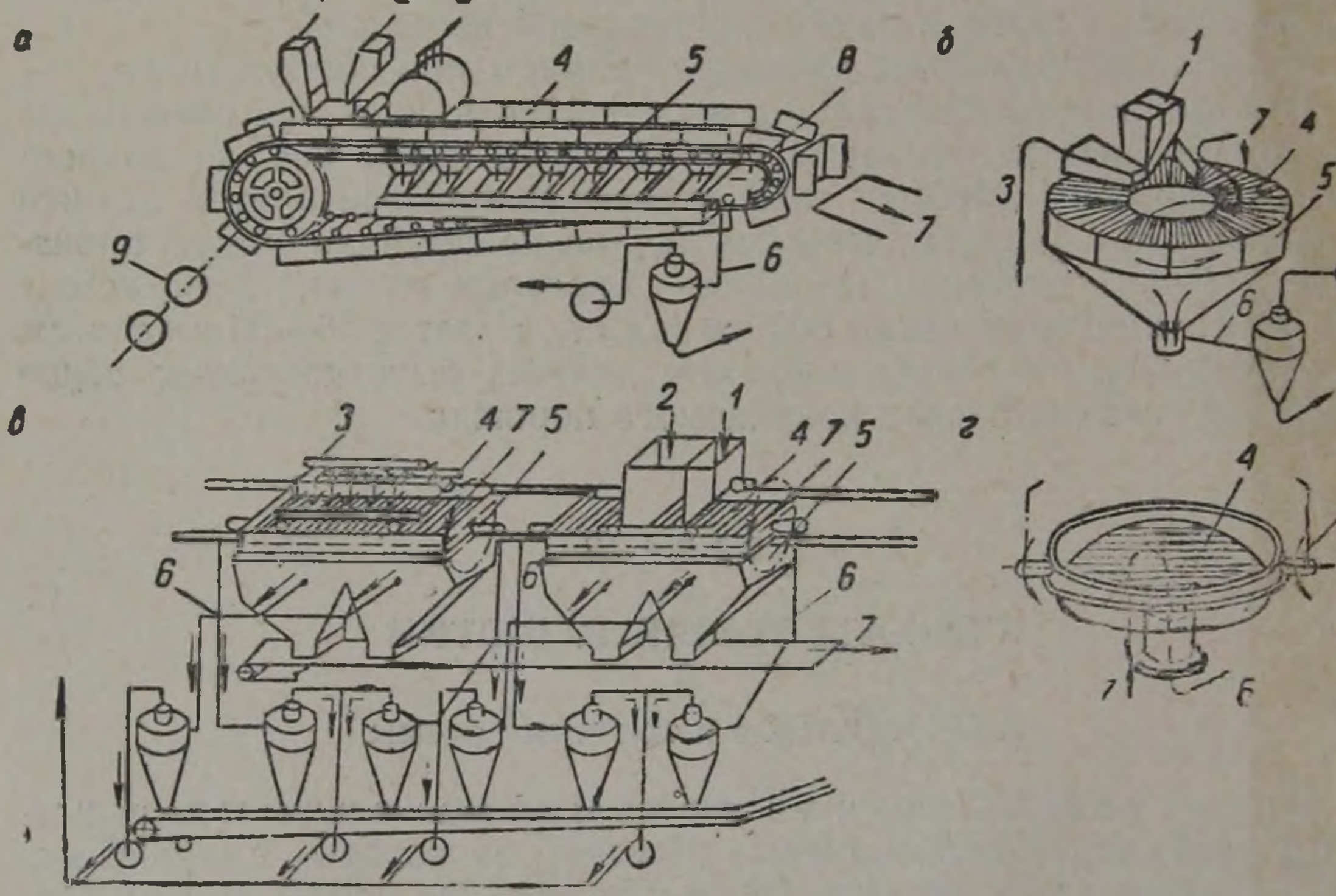


Рис. 92. Схемы спекательных решеток

а — ленточного типа непрерывного действия; *б* — карусельная непрерывного действия; *в* — стационарные чаши периодического действия; *г* — переносная чаша периодического действия; *1* — подача подстилающего слоя; *2* — подача шихты; *3* — зажигательный горн; *4* — колосники; *5* — отсосные камеры; *6* — отсосные линии в циклон и к вентилятору (дымососу); *7* — разгрузка агломерата; *8* — направляющие; *9* — привод

дымососом в атмосферу. Поскольку отходящие газы содержат частицы уноса, перед дымососами устанавливаются пылеулавливающие аппараты.

Обжиг материала в тонком слое (200—300 *мм*) на решетке при высоких температурах и скоростях газов очень интенсивен и заканчивается за 10—25 мин. Гранулы имеют малые размеры, что обусловливает большую поверхность тепловосприятия. Незначительная высота слоя и направление газов сверху вниз позволяют иметь повышенные скорости газов без резкого увеличения сопротивления слоя и при незначительном уносе, процент которого на хорошо налаженных агломерационных решетках не превышает 0,6—1%. Большое значение имеет и быстрое удаление из слоя продуктов

реакции. На агломерационной решетке используется тепло отходящих газов для подогрева и тепловой подготовки нижних слоев сырья, а также тепло остывающих верхних слоев для предварительного подогрева воздуха, идущего на горение. Тепловая экономичность подобного процесса очень высока.

Отличительные особенности агломерационных машин заключаются в следующем. Ленточная машина непрерывного действия (см. рис. 92,*а*) имеет решающие преимущества по сравнению с другими типами машин, поэтому она получила наибольшее распространение. Эти преимущества состоят в полной механизации работы и возможности автоматизации ее, что и применяется в СССР и в зарубежной практике. Выработка на 1 рабочего выше, чем для спекательных чаш периодического действия. Качество продукции высокое, равномерное. Регулирование хода процесса легко достигается изменением скорости передвижения спекательных тележек (палет), величины разрежения в отдельных вакуум-камерах и высоты насыпаемого материала. Производительность ленточных машин из года в год растет, достигая в настоящее время 250 *т/час* и выше (площадь решетки 180—200 $м^2$). Относительным недостатком ленточных прямолинейных машин является то, что в них фактически используется только около $^1/_3$ всей площади колосников, тогда как остальные $^2/_3$ находятся без материала на холостой ветви.

В этом отношении круглая машина (см. рис. 92,*б*) имеет преимущество перед прямолинейной, так как вся площадь ее находится одновременно в работе. Карусельные машины, однако, пока трудно конструировать большой производительности, максимальная площадь спекания у них 20 $м^2$ и поэтому область их распространения — заводы небольшой производительности. Круглые машины при равной производительности имеют вес примерно вдвое меньший, чем машины прямолинейные.

У спекательных чаш стационарных и переносных (см. рис. 92,*в, г*) процесс периодический: заполнение постелью, затем шихтой, для чего над чашей устанавливается загрузочная тележка, зажигание с помощью передвижной тележки с горном и спекание. По окончании спекания чаша переворачивается, и готовый продукт разгружается в находящийся под чашей бункер. Отсос продуктов сгорания во время работы у стационарных чаш происходит через полые цапфы, у переносных чаш — через нижний патрубок. При разгрузке агломерата производится отсос газов в систему обеспыливания. Преимуществом переносных чаш перед стационарными является вынесение разгрузки, вызывающей пылеобразование, из главного зала, улучшение компоновки производственного корпуса и возможность лучшей герметизации чаши и трактов отбора газов. Однако их производительность снижается за счет затраты времени на перемещение чаш. Некоторые преимущества стационарных и переносных чаш перед ленточными машинами, заключающиеся в устранении больших вредных прососов воздуха вне слоя и некотором уменьшении начальных капиталовложений на оборудование и сооружения, уступают в условиях СССР их недостаткам: перио-

дичности процесса, невозможности комплексной механизации и автоматизации и большей затрате тяжелого труда. Несмотря на распространение заводов со спекательными чашами в некоторых странах (США, Япония), основное направление в развитии спекательных машин в СССР — улучшение конструкций и увеличение площади спекания непрерывно действующих машин ленточного типа, которыми в настоящее время оборудовано подавляющее большинство (более 90%) всех аглофабрик.

2. Процессы вспучивания глины на спекательных решетках

Процесс вспучивания глины на спекательной решетке отличается от процесса вспучивания глин во вращающейся печи, и сам продукт получается с качествами, отличными от качеств керамзитового гравия, выходящего из вращающейся печи. Керамзитовый гравий имеет окатанную форму зерен с количеством замкнутых ячеек свыше 80%, с объемным весом около 500 *кг/м*^{3}, в то время как после дробления агломерационного «пирога», снимаемого с агломерационных решеток, получается щебенка сквозно-пористого строения, с количеством замкнутых ячеек не более 50%, с объемным весом около 900 *кг/м*^{3}. Продукт вспучивания на аглорешетках носит название аглопорита.

Сырьем для получения аглопорита на решетках могут быть глины более широкого ассортимента, чем глины, пригодные для вспучивания во вращающихся печах. На аглорешетках вспучиваются с хорошими результатами и глины с коротким интервалом вспучивания (50° и меньше).

Быстрота протекания процесса на решетках в 3—5 раз большая, чем во вращающихся печах, позволяет выбирать для решеток сырье с коэффициентом вспучивания менее 2,5, поскольку при быстром процессе в большей степени совпадают состояние пропластичности глины, ее оптимальной вязкости и момент наибольшего выделения перегретых водяных паров и газов из сырья, обеспечивающих вспучивание.

При вспучивании глины на решетке слой ее относительно решетки неподвижен, горение запрессованного топлива в массе глины постепенно переходит из верхних слоев к нижним. Горение топлива диффузионное, зависящее от скорости подвода кислорода и отвода продуктов сгорания. Для горения поступает воздух, нагретый остывающим материалом верхних слоев. Это обеспечивает высокую температуру горения, несмотря на повышенные избытки воздуха, на аглорешетках для обеспечения необходимой скорости горения в диффузионной области. Расположение зон процесса при вспучивании глин показано на продольном и поперечных сечениях слоя материала, лежащего на движущейся со скоростью $v_д$ решетке, на рис. 93. Скорость движения составляет в среднем 0,5—2,5 *м/мин*. Она пропорциональна отношению длины активной части решетки к толщине слоя и вертикальной скорости спекания $v_c^в$. Вертикальная скорость спекания зависит от вида глин,

газопроницаемости слоя, степени вспучиваемости глин и находится в пределах 0,01—0,025 *м/мин.* На рис. 93: *I* — слой холодного сырья, *II* — слой сырья, подогретого колосниками решетки, *III* — слой возврата, *IV* — слой конденсации паров, выходящих из верхних слоев шихты, зона распаренного материала. Исследования процесса спекания показывают быстрое нарастание процента влажности в этой зоне, поэтому во избежание разрушения гранул и замедления и даже остановки процесса необходимо готовить прочные гранулы, способные выдержать повышенную влажность и температуру, а также давление вышележащих слоев. Высота слоя делается обычно небольшой, 200—300 *мм*, так как бóльшая высо-

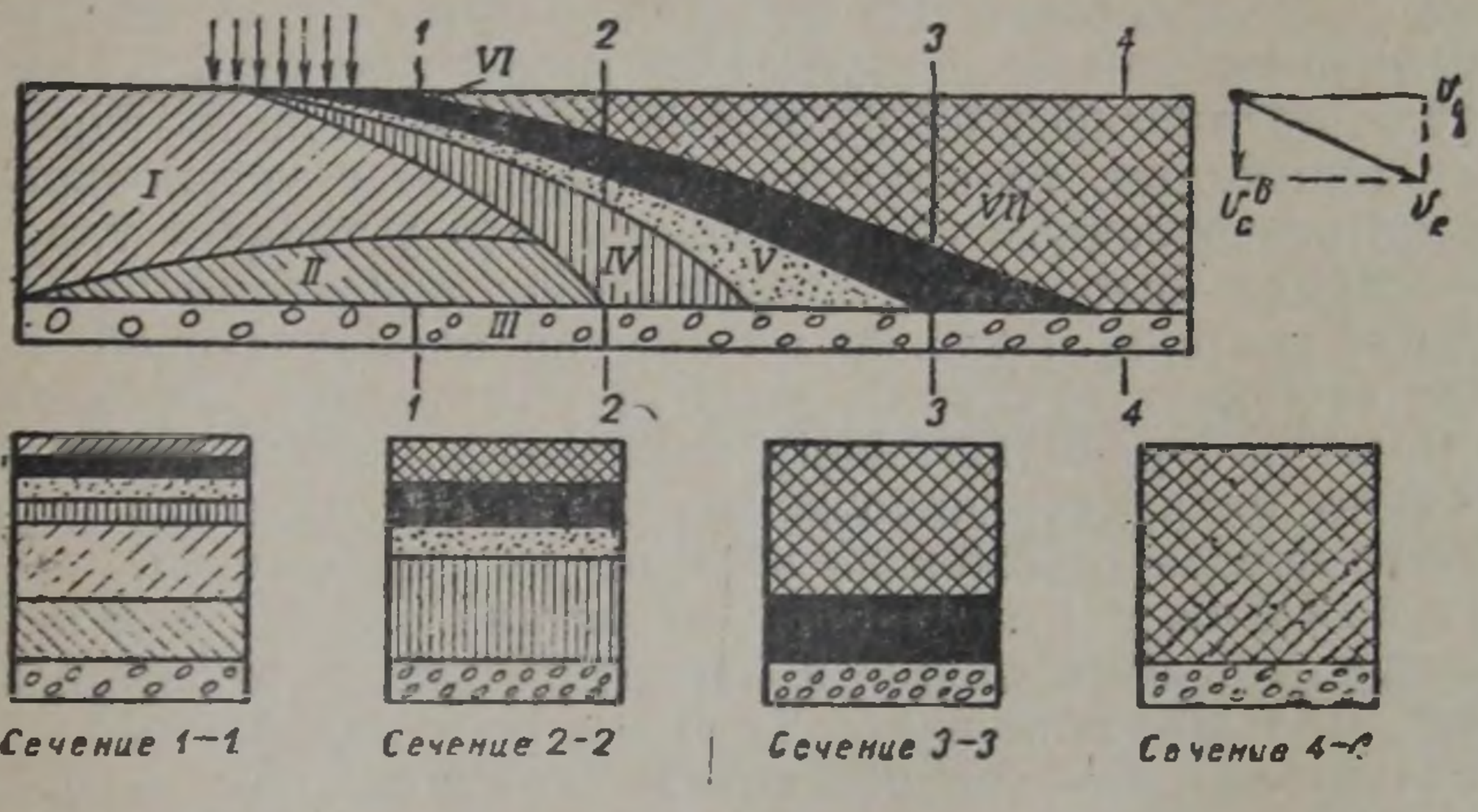


Рис. 93. Расположение в слое зон процесса вспучивания глины

та слоя ухудшит газопроницаемость и увеличит давление на нижние гранулы. К этому давлению добавляется и давление газов, проникающих через слой, тем большее, чем выше сопротивление слоя. *V* — зона сушки, пирогенетического разложения и подготовки к спеканию, *VI* — зона горения и спекания. В этой зоне происходит быстрое повышение температуры, переход глины в пиропластическое состояние и одновременное выделение перегретых водяных паров остатков гидратной влаги минералов и газов, что и приводит к вспучиванию материала. *VII* — зона охлаждения готового агломерата. В верхней части зоны охлаждение более резкое, чем в нижней, куда воздух приходит уже подогретым. На рисунке стрелками обозначено место зажигания шихты внешними горелками. Продолжительность зажигания 0,5—2 мин.

3. Выполнение отдельных частей ленточной машины

Агломерационная машина состоит из следующих основных элементов: каркаса, комплекта спекательных тележек-палет, направляющих для движения по ним палет, питателей для загрузки

постели и шихты, зажигательного горна, газоотсосных вакуум-камер и электропривода движения решетки.

Каркас представляет собой стальную пространственную конструкцию, на которой монтируются все узлы машины. Спекательная тележка имеет четыре ходовых ролика, которыми она перекатывается по направляющим. Дно тележки состоит из колосников, выполняемых из жаростойкого чугуна или стали. Борта тележки съемные чугунные. Палеты передвигаются по направляющим, не будучи как-либо скреплены одна с другой, что обеспечивает свободное падение в направляющих каждой палеты на разгрузочном конце. Между палетами при их повороте на разгрузке образуется разрыв около 200 *мм*, палеты ударяются в соседние, что облегчает сбрасывание аглопорита с тележек. Так как удары тележек изнашивают их торцы и на машине образуются пути для просасывания воздуха вне слоя шихты через стыки между тележками, то имеются конструкции с установкой звездочек и на разгрузочном конце машины, что устраняет удар. Облегчение схода аглопорита достигается при этом тщательным подбором постели. Тележки по нижней направляющей перекатываются свободно за счет наклона ее к горизонту. Звездочки, установленные на приводном валу машины, захватывают тележки и поднимают их на верхнюю ветвь, чем обеспечивается передвижение всего поезда тележек по верхним направляющим.

Питателями для шихты и постели служат или качающиеся рукава, или вращающиеся барабаны, расположенные под бункерами. Для широких палет 2,5 *м* и более барабанный питатель предпочтителен, так как обеспечивает равномерное распределение шихты на колосниках.

Зажигательный горн представляет собой камеру, футерованную огнеупором, предназначенную для сжигания в ней топлива. Камера защищается стальным кожухом. Топливом для аглорешеток служит мазут, газ и, реже, пылеугольное топливо. Длина горна рассчитывается, исходя из времени зажигания и скорости движения решетки. Объем топочного пространства рассчитывается по допускаемым тепловым напряжениям для соответствующих топлив и по расходу топлива в горне, который составляет примерно 10% от всего тепла, требующегося на процесс спекания.

Газоотсосные камеры сварной конструкции устанавливаются по всей длине рабочей части решетки. Они снабжаются газорегулирующими шиберами, управление которыми выведено на площадку обслуживания. В контакте между боковыми фланцами вакуум-камер и движущимися палетами предусмотрено эластичное уплотнение с резиновыми шлангами, наполненными водой под давлением около 0,3 *кг/см*^{2}. Напором воды шланг прижимает лежащую на нем пластину к пластине палеты. Для уменьшения трения между уплотняющими пластинами подается смазка от автоматической станции, работа которой сблокирована с работой питателя и электродвигателей привода. Вакуум-камеры внутри футеруются. Приводной вал машины имеет число оборотов, ре-

гулируемое в пределах 1:5 — 1:3. Электродвигатель постоянного тока соединяется с приводным валом через редуктор. Этим обеспечиваются необходимые скорости движения палет, обычно 0,34—1,7 (машина СМ-427) или 1,5—4,5 *м/мин* (АМК-1-75).

В качестве пылеосадителей в последнее время устанавливаются мультициклоны на газопроводе между камерами и дымососом. Недостаточно высокая степень очистки ускоряет износ ротора дымососа, поэтому состояние пылеуловителей систематически проверяется. В отличие от эксгаустеров рудоспекательных машин, при вспучивании глин можно ограничиться дымососами, создающими разрежение 500—700 *мм* вод. ст. Так как в первых камерах поддерживается разрежение 50—100 *мм* вод. ст., в средних 200—300 *мм* вод. ст., а в последних 450—500 *мм* вод. ст., то на американских машинах «Мосс лайт вейт агригейт» вместо одного общего дымососа и системы газопроводов с регулирующими задвижками у каждой вакуум-камеры (их всего 6) установлен индивидуальный дымосос. Температуры газов в вакуум-камерах растут от 50—100° в первых камерах до 250—400° в последних.

4. Производительность агломерационных машин

Производительность непрерывной ленточной машины по объему готового продукта равна

$$V = 0{,}6BLv_c^в p \ [м^3/час], \qquad (V\text{-}49)$$

$$V = 0{,}6BHv_д p \ [м^3/час]. \qquad (V\text{-}50)$$

Время спекания

$$\tau = \frac{H}{v_c^в} \ [мин]. \qquad (V\text{-}51)$$

Длина активной части решетки

$$L = \tau v_д \ [м]. \qquad (V\text{-}52)$$

В этих формулах:

B и L — ширина и длина решетки в *м*;

$v_c^в$ — вертикальная скорость спекания в *м/мин*;

H — высота слоя продукта в *м*·

$v_д$ — скорость движения решетки в *м/мин*;

p — процент выхода годного продукта.

Для периодических машин производительность будет меньше из-за наличия в цикле их работы дополнительного времени $\tau_{всп}$ на вспомогательные операции. Это учитывается введением в формулу (V-49) и (V-50) коэффициента рабочего времени машины

$$k = \frac{\tau}{\tau + \tau_{всп}}, \text{ который обычно равен } 0{,}7—0{,}84, \qquad (V\text{-}53)$$

По данным американской практики, удельная производительность агломерационных машин составляет 0,43—1,61 $м^3/м^2$ *час*.

Интенсивность процесса спекания увеличивается при предварительном подогреве шихты, при увеличении до оптимального значения количества воздуха, просасываемого в 1 мин. через 1 $м^2$ решетки, при повышении температуры процесса. Аглорешетки дают щебенку более низкого качества, чем керамзитовый гравий из вращающихся печей но вдвое его дешевле, поэтому в США вращающиеся печи используются для получения керамзита только для бетонов, предназначаемых для особо ответственных сооружений. Аглорешетки особенно пригодны при спекании сырья, содержащего горючие (глинистые сланцы). Решетки занимают мало места, имеют малую тепловую инерцию из-за отсутствия громоздкой футеровки. Однако они требуют вдвое большей затраты электроэнергии на 1 $т$ продукта.

Раздел шестой

ПЕЧИ ДЛЯ ОБЖИГА СТРОИТЕЛЬНОЙ КЕРАМИКИ

ГЛАВА I

ПРОЦЕССЫ В МАТЕРИАЛЕ ПРИ ОБЖИГЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Условия работы в зданиях различных керамических изделий обосновывают выбор сырьевого материала и метод тепловой обработки изделия.

Для стеновых блоков и кирпича выбираются легкоплавкие глины. Плитки для полов и канализационные трубы изготовляются для повышения их механической прочности из тугоплавких глин. Для глазурованных плиток используют огнеупорную глину, образующийся при этом пористый черепок покрывается глазурью.

Температуры обжига различных изделий указаны в табл. 27. Кирпич полусухого прессования, масса которого крупнозерниста, требует более высоких температур обжига (на 50—80°), чем кирпич пластического формования. Клинкерный кирпич для образования сильно спекшегося черепка обжигается при температурах 1200—1350°.

Важным показателем для глин является «интервал спекания», т. е. интервал температур между началом спекания и началом плавления глин. Чем меньше этот интервал, тем меньшая разница температур газов допускается в печи по высоте или ширине сечения, тем точнее должно быть регулирование режима в печи.

При обжиге керамические изделия проходят следующие стадии.

1. Досушка. Сырец поступает в печь из сушилки с влажностью для кирпича до 6—8%, плиток до 1—2%, пустотелых камней 1—5%. В последнее время в кольцевые печи начинают загружать и сырец повышенной формовочной влажности. Для ускорения и автоматизации процессов сушки и обжига оба процесса объединяются в одном туннельном агрегате, в печи-сушилке, куда также поступают изделия с начальной влажностью около 20%. Если влажность изделий больше критической, то сушка их ведется осторожно, не переходя допустимую скорость сушки. После достижения критической влажности рост температуры изделия может достигать 80—100° в час. При температуре около 120° рекомендуется выдержка с замедленным подъемом температуры для удаления остаточной гигроскопической влаги. Скорость подъема темпера-

туры может быть тем больше, чем проще по форме изделие и тоньше его стенки. На этом участке затрачивается значительное количество тепла на испарение влаги.

2. **Обжиг.** При дальнейшем нагреве изделия при температурах 450—650° удаляется основная часть гидратной влаги глинообразующих минералов типа $Al_2O_3 m SiO_2 n H_2O$ и происходит разрушение их кристаллической решетки, с чем связан основной эндотермический эффект, ясно отмечаемый термограммой. Последние остатки гидратной влаги уходят лишь при температурах 900—1000°. При температурах 500—950° диссоциируют молекулы $MgCO_3$ и $CaCO_3$ с выделением углекислоты, а также разлагаются гидраты железа. Так как пористость материала при этом растет, то заметной усадки материала при температурах до 700—800° не происходит, но прочность повышается. Поэтому скорость подъема температуры для большинства глин в пределах 200—900° можно увеличить до 100° в час и выше. При температурах выше 900° начинается образование жидкой фазы и происходят интенсивная усадка, снижение пористости и дальнейший рост прочности изделий. Если к моменту образования жидкой фазы газообразные продукты разложения не успеют выйти, а глины высокопластичны (и не отощены для увеличения пористости), то материал вспучится, и изделие выйдет в брак. Для устранения внутренних напряжений в изделии и выравнивания в нем температур рекомендуется выдержка при 950—1050° в течение 1—4 час. в зависимости от сорта глины, формы изделия и конструкции печи. Чем меньше интервал спекания глин, тем медленнее должен быть подъем температуры в области, близкой к спеканию глины.

3. **Охлаждение.** Первое охлаждение на 100—150° следует вести замедленно со скоростью, не превышающей 30° в час, так как здесь начинается затвердевание жидкой фазы и продолжается образование кристаллических решеток новых соединений (муллита и др.) Дальнейшее охлаждение изделий, за небольшим исключением, может проходить форсированно со скоростью до 200° в час и выше, что ведет к сокращению общего периода обжига и повышению производительности печи. Скорость обжига и охлаждения пустотело-пористых изделий выше, чем полнотелых кирпичей вследствие большой поверхности их для теплообмена на единицу их веса.

Н. Н. Доброхотов, С. Н. Деликишкин и И. М. Семенюк предложили аналитическое решение некоторых зависимостей при нагреве и охлаждении керамических изделий. Так, например, допустимая скорость нагрева равна

$$\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = \frac{[\sigma](1 \quad \mu)a}{k_1 E S^2} \approx 40 \frac{\Delta \nu}{S^2} \text{ [град/час].} \qquad \text{(VI-1)}$$

Время выдержки изделия при температуре обжига определяется по формуле

$$\tau_{выд} = m \frac{S^2}{a} \approx (0{,}07 \div 0{,}08)\, S^2 \text{ [час.]}, \qquad \text{(VI-2)}$$

а общее время обжига

$$\tau_{общ} = 6lS^3 \cdot 10^{-4} \text{ [час.]}. \qquad \text{(VI-3)}$$

Необходимая температура газов в зоне обжига равна

$$t_г = \frac{\Delta v}{\Phi(Bi)} + t_{нач} \text{ [град.]}. \qquad \text{(VI-4)}$$

В этих формулах:

[σ] и E — допускаемое напряжение на разрыв и модуль упругости данного материала в *кг/см²*, [σ] =3—6 *кг/см²*; E для необожженного материала равно 40 000—70 000 *кг/см²*; E для обожженного материала равно $100 \cdot 10^3$—$1 \cdot 10^6$ *кг/см²*;

μ — коэффициент поперечного сжатия (Пуассона), равный 0 25—0.3:

a — коэффициент температуропроводности в *м²/час*, равный 0,001—0,002 *м²/час*;

k — коэффициент, учитывающий форму тела: для пластины 0,5; для куба 0,2: для цилиндра 0,2—0,25;

α — коэффициент термического расширения, равный $2 \cdot 10^{-6}$—$20 \cdot 10^{-6}$;

m — коэффициент пропорциональности, получаемый опытным путем;

Δv — допустимые перепады температур в изделии в град. определяются экспериментально. В среднем они принимаются для периода когда температура материала 100—700° Δv = 100—120°; для 700—1200° Δv =70—85°; для 1200—850° Δv =25—30°; для 850—100° Δv = =120—140°;

t — температура обжига в град.;

$t_{нач}$ — начальная температура в град.;

Bi — критерий Био.

Приведенная толщина изделия S определяется по формуле

$$S = \frac{V}{F} 100 \text{ [см]}, \qquad \text{(VI-5)}$$

где V — объем стенок изделия в *м³*;

F — активная поверхность теплообмена стенки в *м²*.

Значения функции Ф (Bi)

Bi	0,2	0,5	1	2	3	4	6	8	10	14	20	32	60
Ф(Bi)	0,08	0,19	0,30	0,46	0,55	0,62	0,71	0,77	0,8	0,85	0,88	0,92	0,96

Для установления чисто аналитическим путем наивыгоднейшей кривой $t = \varphi(\tau)$ при обжиге изделий разной формы и из различных глин пока не имеется достаточных данных, поэтому в основу построения каждой кривой обжига должны быть положены результаты тщательно поставленных опытов скоростного обжига этих изделий из данной глины. Экспериментальные исследования по обжигу керамических изделий показывают возможность резкого сокращения продолжительности цикла при переходе от тепловой обработки в садке к индивидуальной обработке изделия в непрерывно действующих агрегатах (многоканальные, муфельные печи, конвейерные печи-сушилки и т. п.).

В последние годы начинает широко применяться способ обжига строительной керамики с запрессовкой части топлива, идущего

на обжиг, в массу сырца. Основная цель запрессовки — устранить при ускорении процесса неравномерность обжига изделий по сечению печи, расположить очаги горения в самом материале и сделать это по возможности равномерно в объеме изделия. Количество топлива, запрессованного в сырец, доходит до 80% и более от всего топлива, потребного на обжиг. На основании работ советских ученых процесс обжига сырца с запрессованным топливом может быть представлен в следующем виде.

Топливо размалывается до размеров не крупнее 2 *мм*. Большие кусочки топлива не сгорят к моменту развития максимальной температуры. Во-первых, неполное сгорание топлива вызовет вспучивание легкоплавкой глины и брак изделия, во-вторых, это приведет к недожогу топлива или к горению его уже в зоне охлаждения печи. Топливо в сырце должно, сгорая, выделять тепло по заданной кривой обжига. В начальной стадии, когда сырец обогревается уходящими из зоны обжига дымовыми газами, происходит и нагрев топлива. При повышении его температуры до 200—300° начинается выделение летучих без доступа заметного количества кислорода в сырец. В зависимости от состава топлива выделение летучих будет или быстрым (древесина, торф), или более медленным (каменные угли). Слишком бурное выделение летучих может разрушить изделие и вызвать сильный недожог и перерасход топлива из-за несгорания большого количества летучих в зоне печи, где температура ниже температуры их воспламенения (см. стр. 30).

Для увеличения степени сгорания выделяющихся летучих надо стремиться получить достаточно пористую массу сырца. При этом летучие, проходя сильно развитую нагретую поверхность пор, сгорают в беспламенном процессе уже при низких температурах 350—400°. В этом случае не используется и уходит из печи с газами только та незначительная часть летучих, которая выделялась при температурах до 350°.

С целью интенсификации процессов горения летучих на поверхности сырца и кокса в его середине при запрессовке топлива в сырец необходимо обеспечить подвод к поверхности каждого сырца больших количеств кислорода. Это достигается: укладкой сырца с большой газопроницаемостью садки, увеличением скорости и равномерности омывания поверхности сырца дымовыми газами и увеличением в них избытка воздуха. Процессы сгорания топлива будут легче и полнее совершаться в изделиях пористопустотелых и с развитой поверхностью.

Время выгорания горючих топлива и углерода кокса связано со скоростью диффузии кислорода внутрь сырца к отдельным частицам топлива, расположенным на разной глубине от наружной поверхности сырца. В шихте сырца содержатся окислы железа и других минералов, горючие топлива вступают в реакцию с кислородом окислов, паров воды и углекислоты. По мере проникновения кислорода из дымовых газов внутрь сырца, происходит горение углерода топлива. Если сгорает топливо близко к поверхности сыр-

ца, где среда окислительная, то продуктом сгорания является в основном углекислота. По мере диффузии газов к центру сырца и нехватки кислорода начинает преобладать окись углерода за счет восстановления углекислоты углеродом топлива. Углекислота продолжает диффундировать далее к центру сырца, окись углерода — наружу, где она догорает на раскаленной поверхности сырца вместе с выделяющимися летучими топлива. Поскольку в центре черепка среда восстановительная, здесь появляются закисные соединения железа — сильные плавни, могущие при затягивании процесса дать повышенное количество жидкой фазы, прекращение выхода наружу выделяющихся газов и вспучивание глины. Чтобы не допустить этого, надо при особо легкоплавких глинах уменьшить размеры частиц топлива, не доводить запрессовку его в сырец до больших величин (< 75—80%), не вводить топливо с малым выходом летучих и поэтому медленным его сгоранием, обеспечить высокую пористость сырца и обеспечить подвод к запрессованному топливу кислорода. Эти мероприятия обеспечат полное выгорание топлива до достижения жидкой фазы и конечной температуры обжига. Газопроницаемость черепка увеличивается вводом ококсованного шлакового топлива, которое понижает объемный вес черепка, и устройством сквозных отверстий в сырце.

Выгорание топлива, введенного в сырец, при наличии дополнительно заброшенного на садку топлива, недостаточной скорости дымовых газов и недостаточного подвода кислорода к сырцу может сильно замедлиться и даже на некоторое время прекратиться. Так как это дополнительное топливо располагается у ножек садки, где вообще пониженный газообмен, то сырец нижних рядов по выходе из зоны обжига может содержать в центре невыжженное топливо, в то время как в верхних рядах сырца топливо сгорит полностью. Устройство нижних каналов в садке для более свободной циркуляции газов у ножек и применение топлива с малым количеством золы и с высокой температурой ее размягчения в значительной мере устраняет недожог топлива, находящегося в нижних рядах садки.

ГЛАВА II

ОДНОКАМЕРНЫЕ ПЕЧИ

1. Область применения

Однокамерные печи показаны на рис. 94. В однокамерных печах или горнах со стационарным подом (рис. 94, *а*, *б*) все стадии периодического процесса происходят в самой печи. В печах с выдвижным подом (рис. 94, *в*) загрузка и выгрузка производятся вне печи, что ускоряет оборот печи и облегчает условия ее обслуживания. Периодичность работы однокамерных печей обусловливает большие затраты тепла на аккумуляцию тепла ограждениями, по-

вышенные удельные расходы топлива, сложность схемы использования тепла отходящих газов и невозможность включения в автоматическую линию непрерывного технологического потока. К достоинству периодических печей относится возможность приспособить их к различному режиму обжига. Вытесняемые туннельными печами, они еще используются для обжига архитектурных и огнеупорных изделий сложных форм и больших размеров, а также на заводах с переменной и разнообразной продукцией при относительно небольшой их производительности.

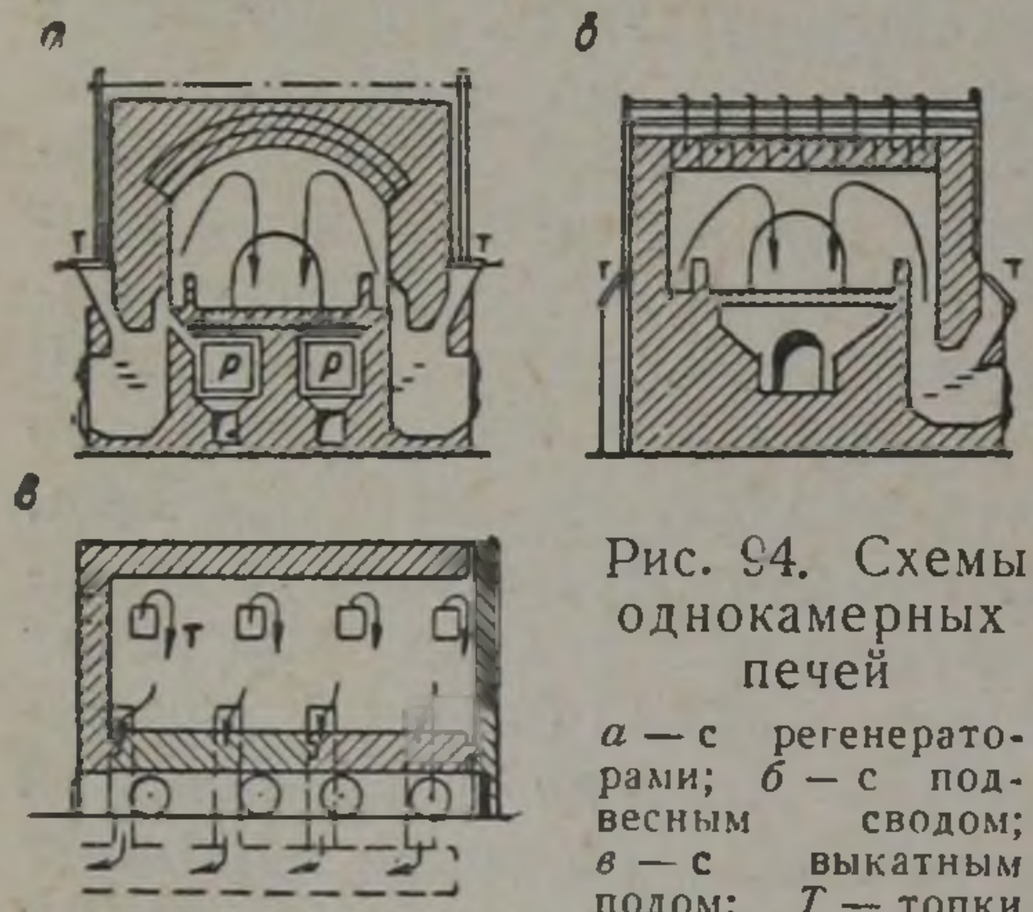


Рис. 94. Схемы однокамерных печей

а — с регенераторами; *б* — с подвесным сводом; *в* — с выкатным подом; *Т* — топки

2. Основные конструкции однокамерных печей

Однокамерные печи для строительной керамики имеют объем от 10 до 200 *м*³. Печи с круглым подом экономичнее печей с прямоугольным подом, но последние легче компонуются в блоки.

Диаметр печей в огнеупорной промышленности при объеме 500 *м*³ доходит до 12 *м*. Отношение длины прямоугольного пода к его ширине обычно 1,5÷2,5. Для равномерности прохождения газов из топок последние располагают вдоль длинных сторон пода. Ширина больших печей при двустороннем расположении топок доходит до 8—10 *м*. Высота печи 2,5—4 *м*. Большая высота печей затрудняет садку небольших изделий, но она необходима для обжига в вертикальном положении труб и других высоких изделий.

Свод печей выполняется лучковым или плоским, подвесным. Внедрение подвесных сводов целесообразно, так как стены при этом изготовляются из огнеупорных и теплоизоляционных легковесов толщиной всего 380—500 *мм*, что снижает потерю тепла на аккумуляцию кладки. Горизонтальный распор тяжелых лучковых сводов при их разогреве требует большой толщины опорных стен (1 *м* и выше) и прочного каркаса.

Для соблюдения переменного по периодам режима горны снабжаются большей частью полугазовыми топками, число которых в крупных печах более 12. Это усложняет обслуживание печей. Печи работают по схеме с обратным пламенем. Для подачи газов из топки под свод против топок устанавливаются ширмы или экраны из огнеупорного кирпича. Для частичного подсасывания газов, прошедших садку, ширмы у пода имеют отверстия. Равномерное омывание газами садки изделий оказывает решающее влияние на экономичность и высококачественность обжига. Чтобы затруднить прямой проход газов через рабочее пространство в случайных направлениях, величину подовых отверстий печи выбирают из рас-

чета повышенных до 2—4 *нм/сек* скоростей газов, а распределение их по поду определяют моделированием или измерением поля температур на поду. Сопротивление подовой решетки в периодических печах составляет основную долю общего сопротивления, в отводящих же каналах скорости газов выбираются пониженными.

В печах с выдвижным подом он выполняется или цельным на шаровых катящихся опорах, или он составляется из подов отдельных вагонеток (см. рис. 94, *в*). Под выдвигается специальным механизмом. Для уплотнения стыка по бокам служит песочный затвор, состоящий из металлического корыта, заполненного песком и скрепленного с рамой сплошного пода, и металлической полосы, погруженной ребром в песок затвора и скрепленной с неподвижной боковой стенкой печи.

Стыки между торцами вагонеток уплотняются замком футеровки пода, для чего на одном торце делается выступ, а на соседнем — углубление. Стык обмазывается огнеупорной глиной с закладкой асбестового шнура.

По бокам печи располагаются топки. Продукты горения выходят из топок по вертикальным каналам под свод печи и затем оттягиваются равномерным потоком через садку на поду к вытяжным отверстиям. Далее дымовые газы проходят к рекуператору, используются непосредственно в другой тепловой установке или уходят в дымовую трубу.

Для отбора горячего воздуха при охлаждении изделий в задней стенке вверху делаются отверстия, а внизу — окно для охлаждения ходовой части вагонетки.

3. Расчетные характеристики

Как указано выше, в основу расчетов печей кладутся кривые обжига, проверенные в производственной практике. В качестве примера в табл. 27 приводятся некоторые из них.

Рабочий объем периодической печи находится по формуле

$$V = \frac{G_{год}(1+0{,}01p)\tau_{ц}}{\tau_{год} g} \ [м^3], \qquad \text{(VI-6)}$$

где $G_{год}$ — годовой выпуск продукции в *т/год*, для кирпича $G_{год}$ выражается в шт/год, для плит в $м^2$/*год*;

p — доля, допускаемая на отбраковку изделий, в %;

$\tau_{ц}$ — продолжительность цикла в час., $\tau_{ц} = \tau_{раб} + \tau_{всп}$, где $\tau_{всп}$ — время на загрузку, разгрузку, ремонт в час.;

$\tau_{год}$ — календарное время работы печи в году в час., обычно 8 760 час/год;

g — плотность садки или вес изделий, размещенных в 1 $м^3$ рабочего объема печи, в $т/м^3$, $шт/м^3$, $м^2/м^3$.

Плотность садки зависит от вида и формы изделий; если мелкие изделия обжигаются в капселях, то g по изделию очень невелико. Так как садка должны быть не только плотной, но и равномерно обтекаемой газами, то на нахождение наивыгоднейшего

Таблица 27

Значение температурных перепадов по кривым обжига для периодических печей

Многошамотные бытовые изделия (ванны, мойки)	$t_i' - t_i''$ в град.	20—200	200 - 600	600—900	900—900	900—1 320				
	$\Delta t/\Delta\tau$ в град/час	26	80	20	2 часа*	60				
Архитектурная фасонная керамика	$t_i' - t_i''$ в град.	25—110	110—400	400—700	700—1 000	1 000 1 000	1 000—50			
	$\Delta t/\Delta\tau$ в град/час	8,5	26,5	40	21,5	2 часа*	40			
Однократный обжиг облицовочных плиток (по опытам НИИ-Стройкерамики)	$t_i' - t_i''$ в град.	0—120	120—370	370—710	710—1 000	1 000—1 180	1 180—1 240	1 240—700	700—320	320—80
	$\Delta t/\Delta\tau$ в град/час	60	125	85	72,5	30	15	270	48	20
Облицовочные плиты МК	$t_i' - t_i''$ в град.	40—200	200—410	410—650	650—980	98—1 180	1 180—1 180	1 180—750	750—300	300—50
	$\Delta t/\Delta\tau$ в град/час	16	30	40	55	67	4 часа*	50	42	15

* Выдержка.

способа садки в производственных условиях обращается самое серьезное внимание. В табл. 28 приведены расчетные данные по камерным печам.

Таблица 28

Расчетные показатели камерных печей

Изделие	$t_{обж.}$ в град.	$\tau_{обж.}$ в час	g в $т/м^3$	$p_н$ %	$b_у$ в $кг/кг$
Кирпич и керамические камни	900—1 050	48—60	0,7—0,8 200—230 $шт/м^3$	2	0,06—0,08
Плитки для полов 100×100×10 *мм*: 25 $кг/м^2$	1 150—1 300	55—60	0,42—0,48 или 17—19 $м^2/м^3$	6	0,35—0,4 9—10 $кг/м^2$
Плитки облицовочные 150×150×6 *мм*; 12 $кг/м^2$					
утильные	1 250—1 320	72	одно-кратный	8	0,8—0,9
политые	1 100—1 250	40	42—50	4	9—11 $кг/м^2$
			0,78/0,4 или 65/33 $м^2/м^3$		
Канализационные трубы	1 150—1 280	40—50	0,2—0,26	8	0,35—0,4

После определения по формуле (VI-6) полезного объема печи вычерчивается эскиз печи с ограждениями и топками. Размеры топок выбираются по максимальному часовому расходу топлива $B_{макс}$, превышающему средний $B_{ср}$ в 2—3 раза в зависимости от вида изделий. Средний расход за время работы топок ($\tau_{р.т}$)

$$B_{ср} = \frac{b_у G}{\tau_{р.т} k_у} \; [кг/час]. \qquad (VI\text{-}7)$$

Максимальный и средний расходы топлива в периодических печах определяются наиболее точно расчетом тепловых балансов по отдельным периодам обжига, на которые он разбивается. Пример таких балансов по периодам и за цикл приведен в табл. 29 для печи, обжигающей канализационные трубы.

В периоды выхода из топок продуктов полного сгорания отдача тепла от газов к изделиям происходит только за счет снижения температуры газов. В периоды перенесения полугаза в рабочее пространство печи и догорания его между изделиями полугаз отдает и свою теплоту сгорания. Температура газа всегда выше температуры материала и отличается от нее на величину, которая может быть определена путем совместного решения уравнений теплоотдачи и теплового баланса.

Пусть средняя по высоте садки температура материала за какой-либо период по кривой обжига равна $t_м$. Допустимая разница между верхом и низом садки $\Delta t_м$. Температура газов вверху садки равна

$$t_{г_1} = t_м + 0{,}5\Delta t_м + (\Delta t^г_м)_1. \qquad (VI\text{-}8)$$

Таблица 29

Тепловые балансы периодической печи

(Статьи баланса даны по четырем периодам и за цикл в %)

Статьи расхода	Температуры по кривой обжига в град.				
	0—200	200—400	400—800	800—1200	за весь цикл 0—1200
Нагрев материала	26,15	26,6	19,6	7,55	14,8
Испарение и перегрев влаги .	20,45	0	0	0	1,33
Теплосодержание уходящих газов	21,1	28,85	35,55	58,5	44,12
Потери от механической неполноты горения	8,65	8,65	8,7	8,6	8,65
Потери от химической неполноты горения	9	5,94	5,1	5,1	5,45
Аккумуляция кладкой	14,65	29,96	31,05	20,25	25,65

То же, внизу садки

$$t_{г_2} = t_м - 0{,}5\Delta t_м + (\Delta t^г_м)_2. \qquad \text{(VI-9)}$$

Перепад температур газов определяется по формуле

$$\Delta t_г = t_{г_1} - t_{г_2} = \Delta t_м + [(\Delta t^г_м)_1 - (\Delta t^г_м)_2]. \qquad \text{(VI-10)}$$

Разница температур газов и материала $\Delta t^г_м$ в град.

Можно принять $\Delta t_м$ в начальные периоды в пределах 30—50°, в конечные 10—20°. Меньшие цифры для более сложных изделий. Величина $[(\Delta t^г_м)_1 - (\Delta t^г_м)_2]$ в начальные периоды от [80—20°] до [120—40°], т. е. 60÷80°; в конечные периоды от [30—20°] до [40—10°], т. е. 10÷30°. Таким образом, газы охлаждаются в начальный период на $\Delta t_{г_{нач}} = 90 \div 130°$, в конечный период на $\Delta t_{г_{кон}} = 20 \div 50°$ и при известном расходе тепла Q это определяет теплосодержание газов J_1 и их температуру $t_{г_1}$ при входе в рабочее пространство печи

$$Q = B(J_1 - J_2) \approx V_г B c_{г_{ср}} (t_{г_1} - t_{г_2}) \; [ккал/час]. \qquad \text{(VI-11)}$$

Сумма расходных статей в рабочем пространстве Q определяется из их расчета за рассматриваемый период, теплосодержание J_2 берется по температуре газов по выходе из садки $t_{г_2}$. Величина избытка воздуха α в расчете $V_г$ при данном J_1 зависит от $t_{г_1}$. При малой $t_{г_1} - t_{г_2}$ увеличивается расход топлива B.

Для проверки правильности полученных температур $t_{г_1}$ делается расчет количества переданного за данный период тепла от газов материалу по формулам теплопередачи. Известными являются: размеры каналов для газов в садке, тепловоспринимающие поверхности их, скорости и температуры газов, температуры садки и количество тепла, которое надо сообщить садке при данной скорости подъема температуры с учетом затрат тепла на испарение, эндо-

термические реакции в материале и допустимых перепадов температур на поверхности и в центре изделия. Количество переданного тепла материалу $Q_м$ определяется по формуле

$$Q_м = G_м c_м \cdot \frac{\Delta t_м}{\Delta \tau} + Q_{исп} + Q_{энд} = \alpha F_м \Delta t_{ср}^{лог} \ \ [ккал/час], \quad \text{(VI-12)}$$

где величина $\alpha = \alpha_л + \alpha_к$ выбирается по формулам раздела второго, гл. II, $\Delta t_{ср}^{лог}$ — средняя логарифмическая разность температур между газами и материалом при проходе садки. Затраты тепла на испарение и эндотермические реакции $Q_{исп}$ и $Q_{энд}$ берутся за рассматриваемый час.

Кривая $t_{г_1} = \varphi(\tau)$ строится над кривой обжига.

В период работы на полугазе его теплота сгорания, реализуемая в рабочем пространстве печи, учитывается уменьшением величины Q в формуле (VI-11).

4. Использование отработавшего тепла камерных печей

Повышенные удельные расходы тепла в камерных печах обусловлены, как видно из их тепловых балансов, большими расходами тепла с уходящими при высокой температуре газами, потерями на аккумуляцию и на нагрев изделий. Основным направлением их уменьшения является замена периодических печей непрерывно действующими, туннельными, сама схема которых предусматривает использование тепла отходящих газов и нагретого материала, а также резкое снижение расхода тепла на аккумуляцию.

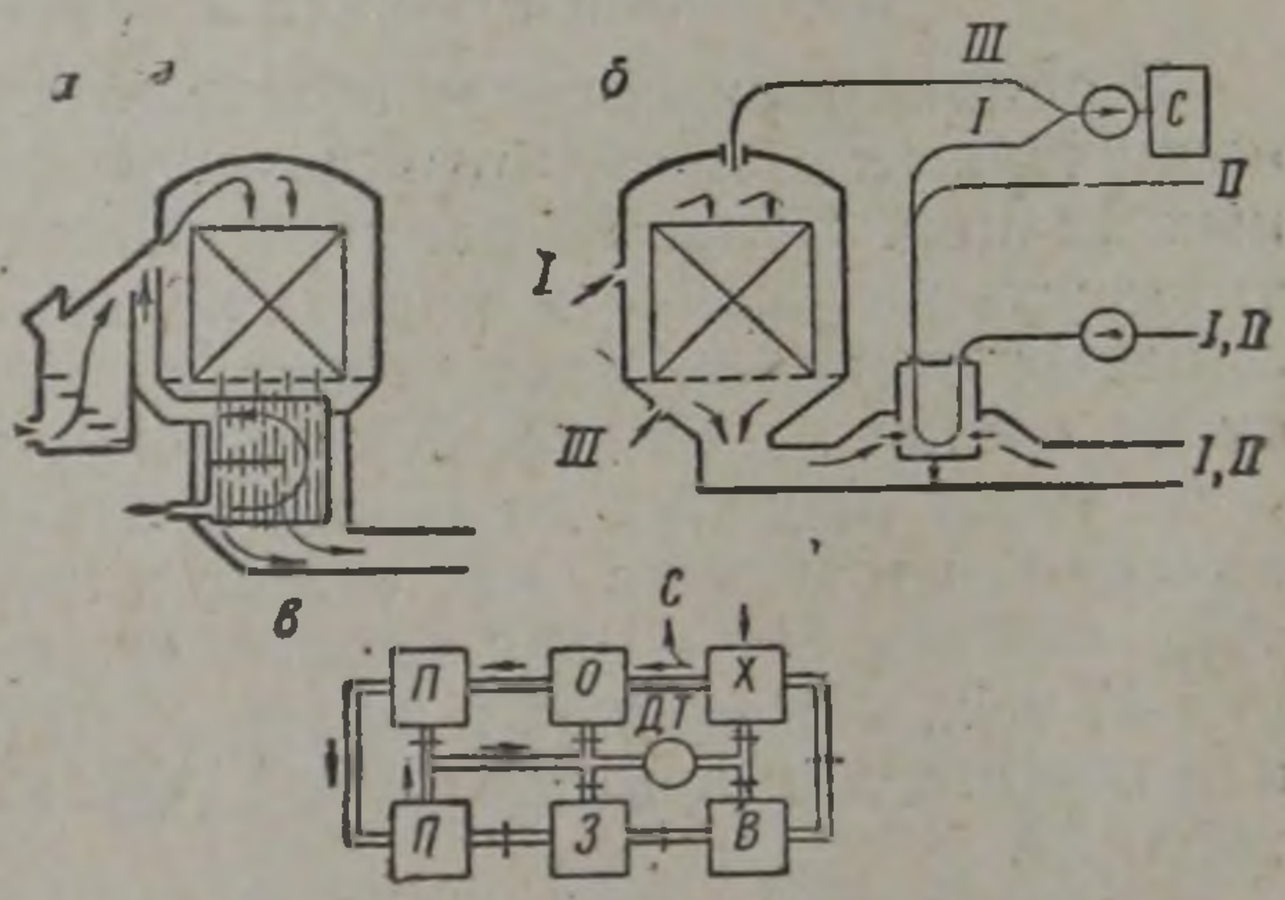


Рис. 95. Схемы использования отработавшего тепла периодических печей

а — для подогрева воздуха, идущего на горение в печь; *б* — для использования тепла на стороне; *в* — блокировка периодических печей; *С* — сушилки; *З* — печь под загрузкой; *В* — печь под выгрузкой; *О* — печь в период обжига; *Х* — печь на охлаждении; *П* — печь на подогреве

Тепло газов, уходящих из действующих камерных печей, должно быть использовано, если температура их превышает 300—400°, для нагрева в рекуператорах воздуха, идущего на горение (рис. 95,*а*), а при низкотемпературном обжиге — на нагрев воздуха для сушки изделий (рис. 95, *б—I*), на нагрев воды для отопления, вентиляции, бытовых нужд и т. д. (рис. 95, *б—II*). Тепло остывающих изделий используется путем продувания через садку в печи воздуха, который нагреваясь, становится эффективным теплоносителем (рис. 95. *б—III*).

Идея использования отработавшего тепла периодических печей привела к блокировке группы камерных печей последовательным

соединением каждой печи двумя газоходами с соседними, а третьим с дымовой трубой (рис. 95,*в*). При этом через печи (*Х*) с остывающим материалом проходит воздух, охлаждая их и нагреваясь сам. Часть воздуха идет подогретым на горение в соседнюю печь (*О*), часть на сушилки (*С*). Дымовые газы из печи (*О*), где сжигается топливо, проходя через печи со свежепосаженными изделиями (*П*), нагревают их, сокращая последующий расход топлива на обжиг. Недостаток этого способа—большие потери тепла и напора в длинных соединительных газоходах, неплотность шиберов и трудность регулирования процесса по оптимальной кривой обжига. Из такой схемы блокировки однокамерных печей возникли конструкции многокамерных печей с короткими внутренними соединительными газоходами и кольцевых печей. Многокамерные печи почти не применяются в настоящее время в производстве строительных изделий, кольцевые широко распространены для обжига строительного кирпича, хотя и вытесняются более совершенными туннельными печами.

5. Применение однокамерных печей для обжига фасадной строительной керамики

В однокамерных печах обжигаются керамические изделия, предназначенные для облицовки многоэтажных жилых и общественных зданий. Большие размеры фасадных керамических плит, пустотелость и сложность формы, недопустимость выцветов и пятен на лицевых сторонах плит ставят повышенные требования к процесу их сушки и обжига. После вакуумирования и весьма осторожной сушки изделий до 1—6% в зависимости от свойств глины, изделия поступают на обжиг в периодические печи. Температура обжига 880—1050° достигается для крупных изделий через 50 час., для мелких в более короткие сроки. Примерная кривая обжига для архитектурной фасадной керамики приведена в табл. 27.

Садка плит-камней в периодической печи должна учитывать сопротивляемость плиты деформациям при высокой температуре и механической нагрузке от вышележащих изделий, направление потока газов и необходимость защиты лицевой поверхности от непосредственного воздействия на нее горячих газов. Наиболее целесообразна садка камней на торец, для чего при резке их необходимо добиваться ровной поверхности торца, так как от этого зависит устойчивость садки. Оси пустот должны совпадать с направлением газов. При вынужденной садке камней плашмя, когда оси их пустот оказываются несовпадающими с направлением потока газов, следует плотность садки уменьшить, оставляя для циркуляции газов зазоры между рядами камней 70—100 *мм*.

Для защиты лицевой стороны от прямого действия огня, помимо соответствующего способа укладки камней, лицевые поверхности иногда покрываются слоем каолиновой суспензии (каолин : песок — 3 : 7), которая после обжига легко удаляется вручную.

При обжиге фасадных камней необходимо особенно следить за тем, чтобы не допустить большие разности температур газов вверху и у пода печи и в горизонтальных сечениях камеры. Эта разница допускается до 40—50°. Против вылетов газов из топок обязательна установка ширм — экранов, защищающих поверхности плит и направляющих газы к своду. При производстве садки плит надо следить, чтобы подовые отверстия оставались открытыми, обеспечивая равномерное омывание газами всего объема садки.

Обжиг фасадных плит из периодических печей должен переноситься в туннельные печи, работающие на чистом холодном газе, так как производство таких плит становится массовым, а туннельные печи совершеннее камерных печей.

ГЛАВА III

КОЛЬЦЕВЫЕ ПЕЧИ

1. Определение и область применения

Кольцевой печью называется печь с длинным обжигательным каналом, имеющим обычно форму вытянутого кольца, работающая при неподвижном материале и с передвигающейся по

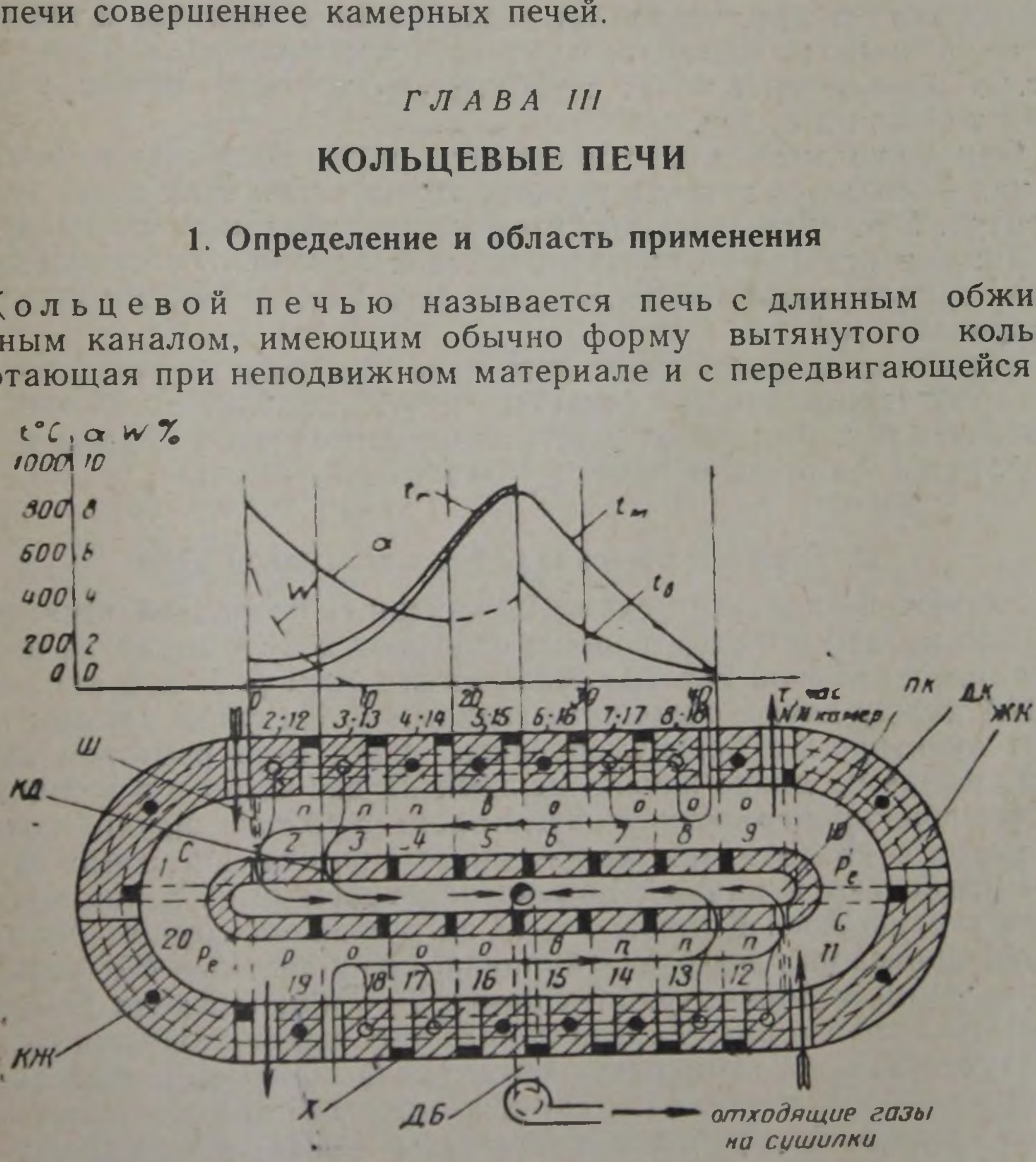


Рис. 96. Схема работы кольцевой печи на два огня

1—20 — номера камер; *ЖК* — жаровой канал; *ДК* — дымовой канал; *ПК* — печной канал; *Ш* — ширма; *КД* — дымовой конус; *КЖ* — жаровой конус; *Х* — ходок; *ДБ* — дымовой боров; *С* — камеры, где производится садка сырца; *П* — камеры на подогреве; *В* — камеры на подаче топлива (на взваре); *О* — камеры на охлаждении; P_e — камеры свободные; *Р* — камеры, откуда разгружается продукция

каналу зоной горения топлива (рис. 96). Скорость передвижения зоны горения топлива, условно называемая скоростью огня, достигает 40 *м/сутки*. Скорость огня является одной из важнейших характеристик работы печи, так как непосредственно связана с производительностью печи. Газы из зоны горения идут по каналу и используют свое тепло для нагревания сырца. Обожженные изделия при остывании отдают свое тепло воздуху, идущему в зону горения. Такое полное использование тепла делает кольцевую печь весьма экономичной в тепловом отношении. Удельные расходы топлива в ней меньше, чем в камерных печах. Достоинством кольцевой печи является и то, что в ней можно сжигать без особенной подготовки все виды твердого и газообразного топлива, в том числе низкосортного: мелочь, отходы углеобогащения, паровозную изгарь и т. д. В кольцевых печах с успехом применяется обжиг с введением топлива в сырец.

Однако кольцевые печи обладают и рядом недостатков. Главный из них — большая затрата ручного труда в условиях высоких температур. Это обстоятельство вынуждает отказаться от их применения: они больше не проектируются и заменяются на новых заводах туннельными печами, хорошо механизированными и автоматизированными.

В настоящее время кольцевые печи еще широко распространены, производительность больших печей доходит до 40 млн. шт. кирпича в год. В них обжигаются главным образом кирпич и черепица, реже кусковой материал (известь, глина).

2. Схема и режимы работы кольцевой печи

На рис. 96 показана схема 20-камерной кольцевой печи, работающей на два огня. Камеры не отделяются друг от друга перегородками, и камерой условно называется объем рабочего канала печи ПК между двумя соседними ходками *Х*. На схеме камеры показаны пунктиром и перенумерованы. Если печь работает на два огня, то она по длине канала делится на две части и в каждой половине проходит самостоятельный процесс обжига, начиная от садки сырца и до выгрузки обожженного кирпича. На схеме камеры *1—10* работают в данный момент на первом огне, а камеры *11—20* на втором огне. Камеры *1* и *11* загружаются сырцом, из камер *9* и *19* происходит выгрузка кирпича. Камеры *10* и *20* свободны или на ремонте. Режим работы камер *2—8* и аналогично *12—18* показан на графике рис. 96, где приведены: кривая обжига $t_м$, температуры газов $t_г$, температуры воздуха $t_в$, кривые влажности сырца w и избытка воздуха α. По оси абсцисс отложено время от начала тепловой обработки и отмечены соответствующие номера камер. В настоящее время режимы обжига кирпича в кольцевых печах строятся на прогрессивных предложениях П. А. Дуванова, И. Я. Мазова, И. Г. Мукосова и других новаторов производства и на исследованиях специальных институтов строительных материалов (РОСНИИМС и др.). Продолжительность рабочего периода

обжига, еще недавно составлявшая 140—150 час., теперь снижена до 42—45 час. Установлено, что весь процесс скоростного обжига кирпича вполне укладывается на длине печи около 55 *м* и поэтому печи, имеющие длину канала 110 *м* и выше, могут работать на два огня, а при длине канала 165 *м* и выше — на три огня.

Как видно из кривой влажности материала w на графике рис. 96 досушка сырца происходит в основном в первой камере и отчасти во второй от начала процесса.

Досушка сырца производится дымовыми газами, идущими из зоны горения топлива, а также нагретым воздухом, направляемым в зону досушки из камер, где горячая готовая продукция охлаждается входящим в зону охлаждения наружным воздухом. В камерах *3* и *4* сырец дымовыми газами нагревается после досушки и, когда температура сырца достигнет температуры воспламенения топлива (на схеме камера *5*), в нее подается топливо. Воздух для сгорания топлива поступает из камер (*8*, *7*, *6*), где находится остывающий кирпич. Так как количество воздуха, потребное для охлаждения горячей продукции, превышает количество воздуха для горения топлива, то часть подогретого воздуха из камер *7*, *8* из печного канала уходит в жаровой канал ЖК, а по нему поступает в камеры, находящиеся на подогреве и досушке. Между камерой, где происходит садка сырца (*1* и *11*) и первой камерой, находящейся на досушке (*2* и *12*) устанавливаются временные бумажные ширмы, которые отделяют рабочий канал кольцевой печи, где происходит процесс тепловой обработки изделий и где движутся под разрежением горячие газы, от камер, где работают люди на загрузке сырца.

После загрузки новой камеры и передвижения зоны горения топлива на одну камеру бумажные ширмы Ш разрываются и они сгорают, включая эту камеру в рабочий процесс. При отсутствии в печи жарового канала весь подогретый в зоне остывания воздух поступает в зону горения, увеличивая избыток воздуха до $\alpha = 5$. При старых режимах работы специально выделялись камеры для работы «на парах» (например, камера *2*). Сюда направлялся сухой горячий воздух из жарового канала с температурой 200—300°. Режим досушки оказывался очень жестким и поэтому Дуванов предложил объединить камеры, работающие «на парах», с камерами, работающими «на дыму», т. е. на отходящих из зоны горения дымовых газах. Это не только смягчило режим досушки, но и выровняло распределение температур по сечению печного канала за счет увеличения количества газов, проходящих по каналу. Отработавшие газы выпускаются из печи через дымовые очелки, расположенные на внутренней стенке печного канала у всех камер, кроме поворотных (*1*, *10*, *11*, *20*), где дымовые очелки расположены на внешней стенке, и подподовым каналом соединяются с дымовым каналом ДК. Это делает более равномерным протекание газов по сечению поворотных камер. Для регулирования выпуска газов в дымовой канал каждая камера имеет один или два дымовых конуса КД, а для перепуска подогретого воздуха камеры соеди-

няются с жаровым каналом сводовыми поперечными каналами, где установлены жаровые конусы КЖ. На схеме закрытые конусы зачернены полностью, приоткрытые зачернены частично. Из дымового канала газы при температуре 100—150° уходят по дымовому борову ДБ к вентилятору, который подает их на использование в сушильные камеры или выбрасывает их через дымовую трубу в атмосферу. График рис. 96 показывает, что воздух, поступающий на горение, может нагреваться до 500°, что обусловливает необходимую действительную температуру горения топлива даже при повышенных в зоне горения избытках воздуха. Вследствие больших присосов воздуха в печной канал величина α вырастает к концу пути газов до 8—12 (бóльшие величины избытка воздуха — при способе Дуванова). Увеличение скорости газов улучшает теплообмен с изделиями и температура отходящих газов при объединении зон на парах и на дыму снижается до 100—80°.

Таким образом, в кольцевой печи воздух проходит следующий путь (см. рис. 96): наружный воздух через открытый ходок в камерах *9* и *8* входит в рабочий канал печи для охлаждения горячей готовой продукции, находящейся в камерах *8*, *7*, *6* и в разгружаемой камере *9*. Часть его после нагрева здесь за счет тепла остывающей продукции идет в камеру *5* для горения топлива, а избыточная часть отбирается через каналы в своде печи, проходит через жаровые конуса камер *8* и *7* по жаровому каналу и направляется через жаровые конуса камер *2* и *3* в эти каналы на досушку сырца и далее через дымовые конуса камер *2* и *3* в дымовой канал для отсоса вместе с дымовыми газами в сушилку или в атмосферу. Каналы и конуса, предназначенные для прохода горячего воздуха, называются жаровой системой, в отличие от дымовой системы, по которой движутся дымовые газы.

Обычная влажность сырца перед поступлением его из сушилок в печь 7—9%. В настоящее время делаются успешные опыты по обжигу в печи сырца повышенной (до 16% и выше) влажности, что оправдывается в случае недостатка сушильных камер и достаточной производительности печи. Относительная величина зоны подготовки при этом увеличивается. Более влажный сырец укладывают в верхние ряды, а подсушенный с влажностью 10—11% — в ножки садки. Мероприятия, рекомендуемые при обжиге сырца с повышенной влажностью, приводятся в специальных инструкциях.

В Китайской Народной Республике применяется режим обжига кирпича с вводом мелкораспыленной воды в зону высоких температур (920—950°). Это создает на данном участке восстановительную среду, способствующую переходу окиси железа в легкоплавкие закисные соединения. Увеличение при той же температуре жидкой фазы в стадии образования черепка приводит к повышению механической прочности и долговечности кирпича. Опыт перевода печи Ивановского завода на подобный режим подтвердил это. Вода подается форсункой из расчета около 30 *л* на каждые 1 000 шт. кирпича через промежутки в 35—50 мин. Распределение

камер по зонам: на подготовке 7,5; на подаче топлива («на взваре») 1,5; на остывании 4; на садке, выгрузке, ремонте 3. Всего в печи 16 камер. В результате прочность кирпича на сжатие возросла на 41%, на изгиб — на 28%. Одновременно снизился на 10% удельный расход топлива. Этот положительный опыт распространен и на других заводах.

Для ускорения охлаждения кирпича после 500° и облегчения работы садчиков РОСНИИМС рекомендует охлаждение сводов и садки водой, разбрызгиваемой форсункой (расход воды 150—250 *л* на 1 000 шт. кирпича). При температуре кирпича ниже 150° разбрызгивание прекращается, чтобы кирпич не выходил из печи влажным.

3. Конструкция кольцевой печи

Конструкция кольцевой сводовой печи показана на рис. 97. Сечение обжигательного канала *1* представляет собой сочетание прямоугольника и полукруга. Длина канала в кольцевых печах 60—180 *м*, ширина 1,7—4,5 *м*, высота 1,8—3 *м*. Объем печного канала 170—2 000 $м^3$. Число камер 12—36. Дымовой канал *2* располагается внизу, а жаровой канал *3* вверху, вдоль большей оси печи, между внутренними стенками обжигательного канала. Размеры сечения дымового канала обычно от 1 200×1 200 до 1 500×1 700 *мм*; жарового от 1 000×1 200 до 1 600×1 700 *мм*. Размеры дымовых очелков *6* от 500×500 до 800×800 *мм*, ходков *4* от 1 100×1 600 до 1 300×1 900 *мм*. Футеровка стен и свода выполняется из огнеупорного или гжельского кирпича на глиняном растворе. Кладка дымового и жарового каналов делается из красного кирпича на глиняном растворе. Своды выполняются как полуциркульные, имеющие наименьший горизонтальный распор. Толщина стен кольцевых печей велика и доходит до 2 *м* и выше. Толщина футеровки 250 *мм*. Наружная часть стен *5* делается из красного кирпича как подпорная стенка разной толщины (к основанию толще) с наклоном. Промежутки между футеровкой и наружной стенкой заполняются глинобетоном. Между огневым и несущим (верхним) сводом для свободного расширения огневого свода делается воздушный зазор около 30 *мм*, который во избежание продольного движения воздуха или газов по нему выполняется с рассечками. Для подачи через свод твердого топлива в нем устраиваются вертикальные трубки *8*. Эти топливные трубки в огневом и несущем своде оформляют в виде фасонных камней, которые делаются из шамотной массы, что предохраняет свод от преждевременного разрушения. Топливные трубочки имеют диаметр 150—200 *мм* (чаще 180 *мм*), они снабжаются плотно пригнанной крышкой. Шаг расстановки трубочек 800—900 *мм* по ширине и около 1 *м* по длине. В зависимости от ширины канала печи на одну камеру длиной 4,2—5,2 *м* приходится 15—30 топливных трубочек. Топливные трубочки соединяются с поперечными каналами *9* в своде, образуя рассыпной строй жаровой системы, по которому движется горячий воздух. Для механизации подачи топлива над топливными трубочками ус-

танавливаются переносные аппараты для непрерывной и равномерной подачи топлива (шур-аппараты), действующие по принципу тарельчатого или винтового питателя. Их дополнительным преимуществом является и бóльшая герметичность. В связи с расширением использования природных газов ряд кольцевых печей (в Татарской, Башкирской АССР, в Куйбышевской и других областях) переведен на газ. Газ подводится перфорированными трубами в разрывы садки, чаще снизу, чем сверху. Трубы проходят поперек камеры. Размеры их: диаметр 25 *мм*, отверстия 8—10 *мм*, шаг перфорации 250 *мм*. Газ из отверстий проходит через вертикальные трубочки, перекрытые на выходе колпачками из жароупорной стали. Трубы засыпают от прогара сухой глиной и мелким боем кирпича.

Помимо основной конструкции сводовых кольцевых печей, существуют конструкции небольших бессводовых печей: вместо свода здесь выполняется временное разборное перекрытие садки сырца. Бессводовая печь неэкономична и малопроизводительна, обслуживание ее трудоемко, поэтому она как дешевая печь используется только в случае производства небольшого количества кирпича (0,5—1 млн. шт в год).

4. Садка

Способ садки сырца имеет важнейшее значение для производительности печи и качества обжига. При излишне разреженной садке заполнение рабочего канала печи будет недостаточным, и за каждый оборот печи количество выданной продукции окажется заниженным. При излишне плотной садке в печи создается большое аэродинамическое сопротивление, и, следовательно, производительность печи падает, равномерность обтекания изделий газами ухудшается, а качество продукции снижается. Для каждой печи должен быть найден наивыгоднейший тип садки в соответствии с применяемым видом топлива, конструкцией печи и мощностью побудителей тяги.

Основой садки служат ножки, образующие продольные и поперечные каналы у пода печи. На них укладывается перекрытие, укрепляющее ножки и служащее основанием для всех вышележащих рядов садки. Кроме того, при спекающемся кусковом топливе в садке оставляются щели шириной 120—130 *мм*, которые перекрываются лентой кирпича через каждые два ряда при топливе средней крупности и через три-четыре ряда при крупном топливе. Так складывается топливная колосниковая решетка, на которой сгорает топливо при свободном подводе воздуха.

На рис. 98 показана имеющая широкое распространение садка по методу Дуванова. Дуванов опытным путем установил, что при малых и средних тяговых мощностях печи оптимальная плотность садки должна быть не 250—300 *шт/м*^{3}, как было принято ранее, а 180—220 *шт/м*^{3}. Разреженной садкой и другими мероприятиями Дуванов увеличил производительность печей вдвое. Для уменьше-

ния аэродинамического сопротивления он устранил большое количество поперечно стоящих кирпичей, как это было в старой садке, расставляя кирпичи основной части садки под небольшим (30°) углом к продольной оси канала. При этом щели между кирпичами он увеличил до 40—50 вместо 20—30 *мм* старой садки. Если печи располагают дымососами большой мощности и хорошо уплотнены от засосов наружного воздуха, высокая производительность печи может быть достигнута при более плотной садке (300—340 *шт/м*³), как это доказано опытом новосибирских заводов.

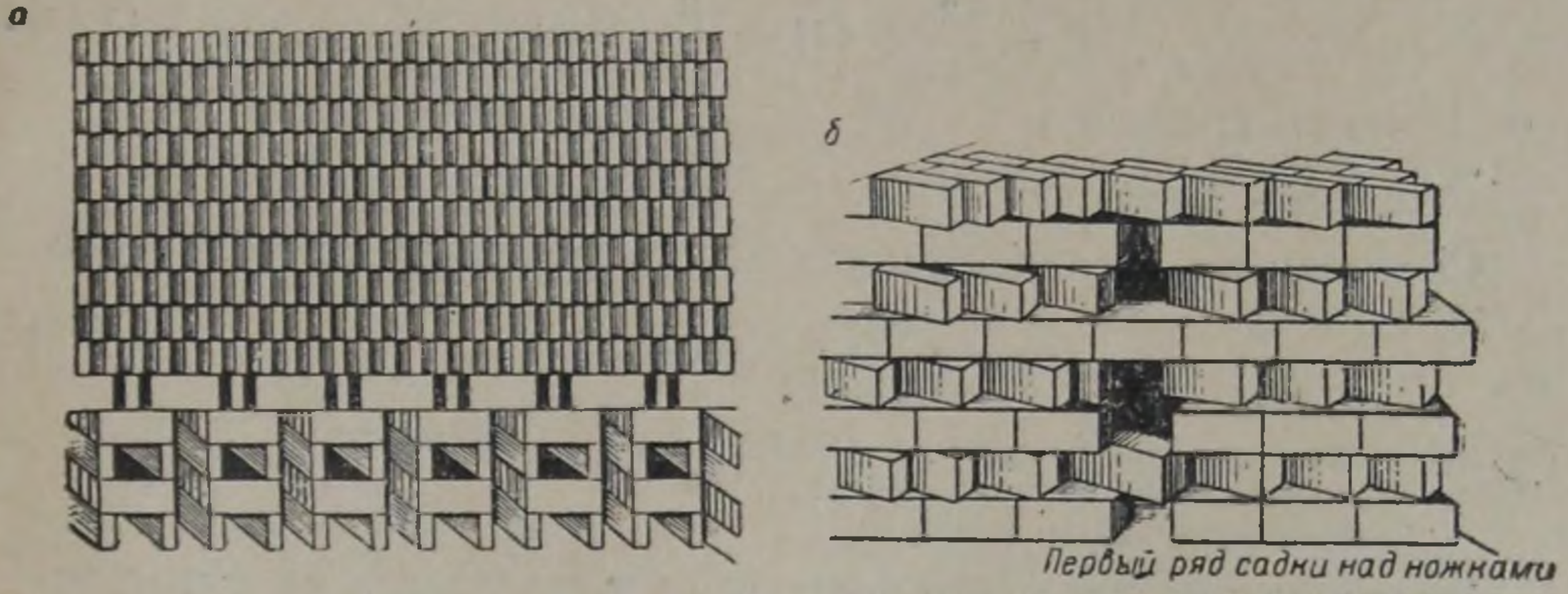


Рис. 98. Садка кирпича в кольцевой печи по методу Дуванова

а — бесколосниковая при сжигании мелкого неспекающегося топлива; *б* — выкладка колосниковой решетки при сжигании кускового спекающегося топлива

Садка по методу Баскакова выполняется однородной, без ножек и перекрытий, с прямыми каналами по длине печи. Плотность ее 230 *шт/м*³. Аэродинамическое сопротивление этой садки ($a_0 = 0{,}046$) еще меньше, чем дувановской ($a_0 = 0{,}11$).

Из существующих способов садки наиболее прогрессивны садки по методу П. А. Дуванова и С. В. Баскакова.

В кольцевых печах обжигается также и архитектурная фасадная керамика. Особенности ее обжига примерно те же, что были указаны для камерных печей. Наивыгоднейшая садка, найденная при обжиге камней-плит на Снегиревском заводе, заключается в следующем. На хорошо выровненный под печи укладывается в один ряд на ребро кирпич или плашмя плита (из брака). Выше выкладываются ножки подсадки из плит плашмя в два-три ряда по высоте. Для лучшей циркуляции газов между ними оставляют зазор шириной 100 *мм*. Подовые каналы подсадки перекрываются плитами плашмя и далее их ставят до самого верха вплотную, пустотами в направлении движения газов. Чтобы избежать повреждения лицевой поверхности ошлаковкой, топливные ряды обкладываются защитной елкой из бракованных плит или кирпича. Топливная решетка делается из кирпича, лицевая поверхность которого защищается также покрытием по каолиновой суспензии. Профиль-

ные камни-плиты, не подвергающиеся в дальнейшем шлифовке, сажают в средних рядах подсадки так, чтобы закрыть их от непосредственного воздействия газов.

5. Расчетные данные и тепловые балансы кольцевых печей

Объем печного канала рассчитывается по формуле

$$V = FL\ [м^3]. \qquad \text{(VI-13)}$$

Площадь его сечения равна

$$F = \frac{\pi B^2}{8} + \left(H - \frac{B}{2}\right) B\ [м^2], \qquad \text{(VI-14)}$$

где L — длина канала в *м*;
B — ширина канала в *м*;
H — высота канала в *м*.

Суточная производительность печи определяется по формуле

$$G_с = \frac{Fv_{ог}g}{1+0{,}01p}\ [\text{шт/сутки}], \qquad \text{(VI-15)}$$

где $v_{ог}$ — скорость огня в *м/сутки*. Обычно $v_{ог}$ =25—40 *м/сутки*;
p — допускаемый процент брака;
g — плотность садки в *шт/м*^{3}.

Месячная производительность печи вычисляется по формуле

$$G_м = 30G_с = \frac{30Fv_{ог}g}{1+0{,}01p} = \frac{30Vv_{ог}g}{L(1+0{,}01p)}\ [\text{шт/месяц}]. \qquad \text{(VI-16)}$$

Продолжительность цикла, включая загрузку, разгрузку и простои, равна

$$\tau_ц = \frac{24L}{v_{ог}}\ [\text{час.}], \qquad \text{(VI-17)}$$

следовательно:

$$G_м = \frac{720Vg}{\tau_ц(1+0{,}01p)}\ [\text{шт/месяц}]. \qquad \text{(VI-18)}$$

Месячный съем годной продукции с 1 *м*^{3} канала печи равен

$$m = \frac{G_м}{V} = \frac{30gv_{ог}}{L(1+0{,}01p)} = \frac{720g}{\tau_ц(1+0{,}01p)}\ [шт/м^3 \text{ в месяц.}]. \qquad \text{(VI-19)}$$

Величина m в среднем составляет 2 000—2 500 *шт/м*^{3} в месяц, в отдельных случаях и выше.

Удельные расходы условного топлива $b_у$ зависят от качества эксплуатации печи и находятся в пределах 110÷150 *кг* на 1 000 шт.

Кольцевая печь работает под разрежением от дымососа или дымовой трубы. Сопротивление садки относительно невелико. Величина разрежения в конце печи перед дымовым каналом у открытых конусов в среднем равна 10—15 *мм* вод. ст; разрежение за конусами 30—40 *мм* вод. ст., перед дымососом 50—60 *мм* вод ст. При относительно заниженных размерах дымовых очелков и конусов и разреженной садке основное сопротивление (50—60%) со-

ставляет сопротивление очелков и конусов. Так как это сопротивление не связано с полезной, с точки зрения теплопередачи, скоростью газов и ведет к бесполезной затрате мощности дымососов, то размеры очелков или их количество при больших перепадах в них разрежения должны быть увеличены.

Таблица 30

Тепловой баланс кольцевой печи

Статьи баланса	Единица измерения		
	ккал/час	*ккал* на 1 000 шт.	%
Приход тепла			
Теплота сгорания топлива . .	3 233 000	842 000	86
Теплосодержание сырца . . .	111 000	29 000	3
Теплосодержание воздуха . .	416 000	108 200	11
Итого . .	3 760 000	979 200	100
Расход тепла			
Испарение влаги	921 500	240 000	24,6
Химические реакции	895 000	233 000	23,8
Теплосодержание выгружаемого кирпича	110 500	28 800	2,9
С отходящими газами	1 597 000	416 000	42,4
В окружающую среду и неучтенные потери	236 000	61 400	6,3
Итого . .	3 760 000	979 200	100

Примечание. Величины расходных статей в тепловых балансах кольцевых печей обычно находятся в пределах: испарение влаги 15—30%, химические реакции 22—25%, теплосодержание выгружаемого кирпича 2—3%, химический и механический недожог топлива 1—5%, с уходящими газами 30—50%, в окружающую среду и на прочие потери 6—10%.

В качестве примера теплового баланса кольцевой печи в табл. 30 приводится тепловой баланс печи Бескудниковского завода, работающей на два огня по скоростному обжигу. Удельный съем кирпича составил 2 008×2 *шт/м*³ в месяц при скорости огня 36 *м/сутки*, плотности садки 200 *шт/м*³, средней влажности сырца ~10%. Расход условного топлива 120 *кг* на 1 000 шт. Температура выгружаемого кирпича 40—50°.

6. Способы улучшения работы кольцевых печей

Одним из способов является увеличение тепловой мощности действующей кольцевой печи до полного обеспечения теплом отходящих из нее газов блока сушилок, связанного с этой печью. Такая блокировка печи и сушилок позволяет:

1) увеличить количество топлива, сжигаемого в кольцевой печи, и, следовательно, скорость газовых потоков в ней. Повышение же

скорости газов обеспечивает бóльшую равномерность омывания садки, интенсификацию теплоотдачи от газов к сырцу и от кирпича к воздуху и в конечном счете ускорение цикла обжига и улучшение качества кирпича. При этом расслоение газов по высоте сечения уменьшается и снижается разность температур между верхом и низом садки;

2) отказаться от применения подтопков. Это приводит к ликвидации расходов топлива на подтопку, обычно более дорогого, чем сжигаемое в кольцевой печи, и высвобождает людей, занятых на работе кочегаров подтопков. Снижает заносы боровов уносом. Делает более короткими, простыми и с меньшим подсосом наружного воздуха борова, подающие дымовые газы к сушилкам. Затрата энергии на вентиляторы при этом заметно уменьшается;

3) снизить суммарный удельный расход топлива на сушку и обжиг кирпича за счет сокращения тепловых потерь в подтопках.

Исследованию сопряженной работы печи и сушилок посвящен специальный труд М. И. Рогового.

Целесообразность этого метода подтверждают недавние опыты РОСНИИМСа. Например, на Нижне-котельском заводе, где суммарный удельный расход условного топлива на сушку и обжиг в результате блокировки был снижен с 240 *кг* на 1 000 шт. до 160 *кг* на 1 000 шт., т. е. на $^1/_3$. Досушка сырца в кольцевой печи при повышенных скоростях газов происходила при усилении влагоотдачи до 500—600 *г/м² час* против обычной для сушилок 150 *г/м² час*.

Тепловая блокировка печей и сушилок на Смоленском заводе позволила получить устойчивый месячный съем с печи 3 000 *шт/м³* в месяц.

Для рационального осуществления тепловой блокировки отсос дымовых газов рекомендуется делать сосредоточенным из последней камеры через удвоенное число конусов. В этом случае досушка сырца с влажностью 6—8% будет происходить при больших скоростях газов без конденсации влаги на сырце. Одновременно надо расширить и сечение дымовых очелков, дымовой канал объединить с жаровым и выявить все другие возможности для уменьшения сопротивления движению увеличенного количества газов в печи. При тепловой блокировке работы печи и сушилок необходимо практически установить равенство количества тепла дымовых газов, уходящих из печи, количеству тепла, потребного для сушилок.

Соблюдение этого равенства возможно при постоянном наблюдении за работой печи и сушилок по контрольно-измерительным приборам. Простейший способ перераспределения количеств тепла между печью и сушилами — изменение температуры отходящих из печи газов.

Другим радикальным способом улучшения работы кольцевой печи является реконструкция ее в туннельную и, следовательно, вполне механизированную печь. Опыт такой переделки с одно-

временным использованием ее для полного совмещения сушки и обжига в одном агрегате проведен на Хмельницком заводе УССР. Сырец влажностью 18—20% сушится и обжигается в печи за 32—36 час., температура обжига 920—940°.

При реконструкции (рис. 99) получилось два туннеля каждый длиной 62 *м*, шириной 3,1 *м*, высотой от пода до замка свода 1,7 *м*, полезным объемом 250,2 $м^3$. В туннеле размещается 20 вагонеток. Длина зон сушки и подогрева, обжига, охлаждения примерно по 20 *м*. Топливо на 80% запрессовывается в сырец, остальные 20%

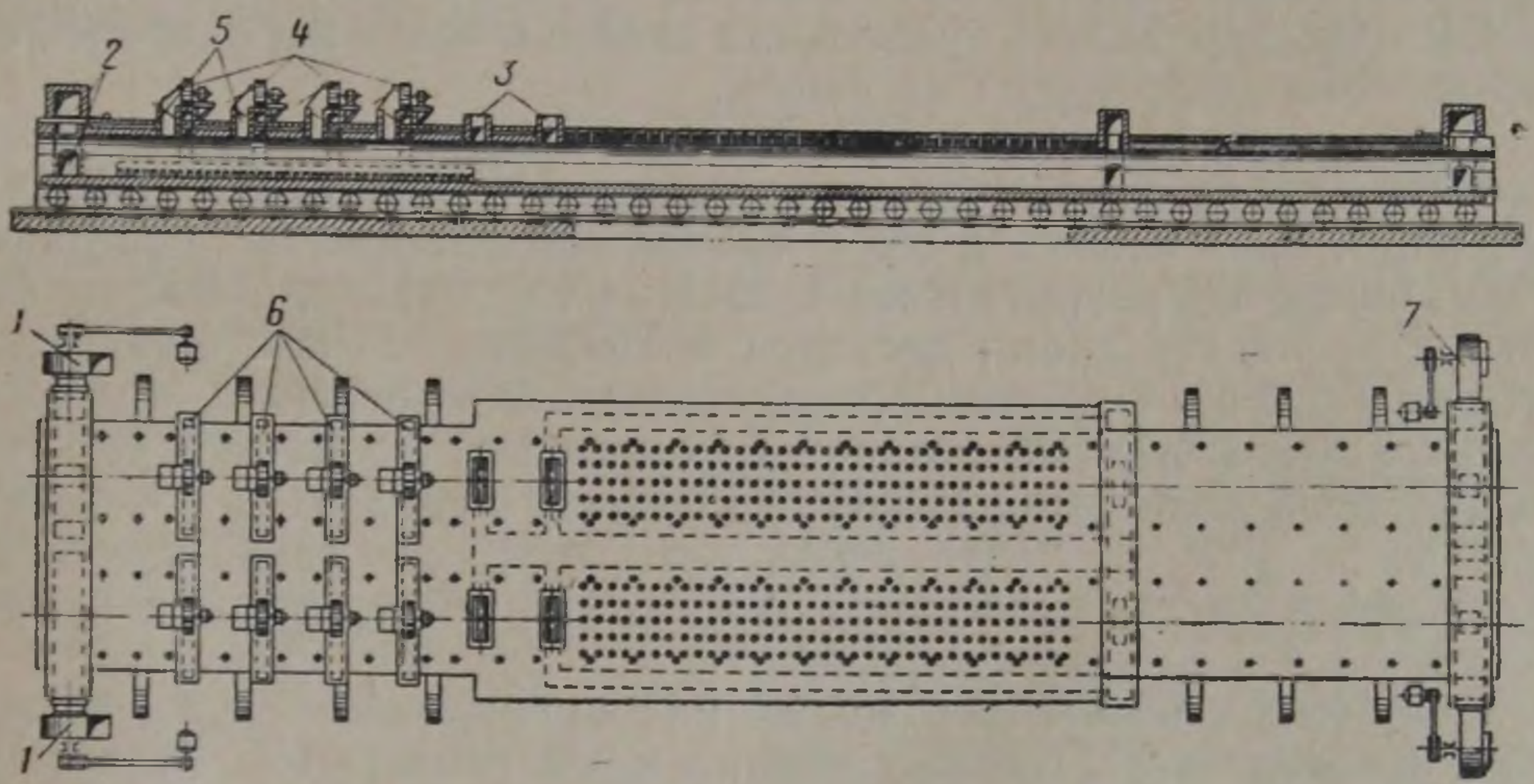


Рис. 99. Туннельная печь, реконструированная из кольцевой

засыпаются через топливные трубочки. Газы из зоны обжига проходят в зону подогрева и сушки. Чтобы добавить наружный воздух к воздуху, идущему из зоны охлаждения, и дымовым газам из зоны обжига перед поступлением их в зону подогрева и сушки, на своде каждого туннеля имеется по два отверстия *3*. Чтобы выровнять температуру по сечению туннеля при поступлении сырца с влажностью более 15—16%, установлено четыре вентилятора № 64, которые отсасывают газы из-под свода туннеля через проемы *5* и нагнетают его по каналам *6* в нижнюю часть садки. Отработавшие газы после сушки отсасываются сосредоточенно через канал *2* вентилятором ВРС-12 *1*. Такие же вентиляторы *7* поставлены в зоне охлаждения.

При испытании печи в качестве топлива использовали (в % к приходу тепла): изгарь 69,5% (запрессована), гречневая шелуха 16,6% и антрацит АШ 13,9%. Величина основных статей расходной части баланса тепла составляла: на испарение влаги 46,2%, на химические реакции 10,8%, на потери с уходящими газами 24,6%. Реконструкция кольцевых печей в туннельные выполняется успешно и на некоторых других заводах.

ГЛАВА IV

ТУННЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ

1. Принцип работы и основные преимущества

Туннельные печи представляют собой непрерывно действующие тепловые установки, где изделия движутся по длинному обжиговому каналу навстречу газам. Канал печи в большинстве случаев прямолинейный, иногда П-образный. За рубежом имеются, а в СССР проектировались туннельные печи с кольцевым каналом, которые пока применения не нашли.

Туннельные печи предназначены для обжига главным образом керамических изделий и имеют три зоны: зону подогрева (включая досушку), зону обжига и зону охлаждения. Изделия поступают в печь после предварительной сушки из туннельных сушилок. Однако в последнее время вводятся в действие печи-сушилки, где процессы сушки и обжига совмещены в одном агрегате, что освобождает технологическую линию от отдельной сушильной установки, от дополнительных перегрузок сырца, приводит к экономии топлива на 30% и более, избавляет сырец от промежуточного охлаждения и вызываемых при этом температурных напряжений.

Туннельные печи имеют целый ряд преимуществ перед камерными и кольцевыми. Процесс обжига в них непрерывен, полностью механизирован и поэтому может быть автоматизирован. В отличие от кольцевых печей, при обслуживании туннельных рабочие избавлены от тяжелого труда по садке и выгрузке горячих изделий в условиях сильно разогретой камеры, насыщенной керамической пылью, потому что загрузка и выгрузка вагонеток изделиями происходят вне туннельной печи. Эти операции при некоторых типах садки могут выполняться механизмами. Контроль и регулирование режима печи удобны и нетрудоемки. Качество кирпича из туннельной печи выше, а продолжительность обжига меньше, чем в кольцевой. Туннельные печи долговечны и работают несколько лет непрерывно, без капитального ремонта. До последнего времени туннельные печи имели тот недостаток, что, в отличие от кольцевых печей, потребляющих любое топливо и даже отходы его, туннельные печи работали в основном на газе, что требовало сооружения дорогостоящих газогенераторных станций.

В настоящее время туннельные печи проектируются с учетом использования местного низкосортного топлива, путем запрессовки большей части его в сырец, засыпкой остального топлива через щели свода или сжигания его в выносных топках. Кроме того, расширяющееся снабжение многих заводов природным газом снимает вопрос о сооружении при них газогенераторных станций.

Дальнейшее мощное развитие электрификации СССР ставит

вопрос о строительстве электрических туннельных печей. За рубежом (Англия и др.) электрические туннельные печи получили большое распространение, особенно при обжиге декоративных глазурованных изделий, так как в этом случае можно отказаться от муфелей и капселей, что ускоряет и удешевляет обжиг изделий.

Бесспорные преимущества туннельных печей, даже если они работают на газе от газогенераторных станций, делают их основными тепловыми агрегатами на кирпичных и других керамических заводах. Туннельные печи применяются при обжиге строительного кирпича, черепицы, керамических камней, плиток, канализационных труб, для обжига литых изделий из шлака, а также для производства вспученной керамики.

2. Схемы туннельных печей

Простейшая туннельная печь (рис. 100,*а*) состоит из прямого канала, по рельсовому пути которого движется поезд вагонеток с садкой изделий. Навстречу готовым горячим изделиям проходит холодный воздух. Этот воздух, охлаждая изделия, нагревается и поступает в зону горения топлива, где через ряд горелок подается топливо. Температура материала в этой зоне достигает максимальной. Газы, продукты горения, переходят в переднюю по ходу изделий часть печи — зону подогрева, где встречают вагонетки со свежепоставленными изделиями, досушивают и подогревают их перед обжигом. Дымовые газы и печи отсасываются дымососом или дымовой трубой. Таким образом, в туннельной печи целесообразно используется тепло дымовых газов из зоны обжига на предварительный подогрев входящих изделий, а тепло от остывания готовых изделий идет на подогрев воздуха, поступающего на горение.

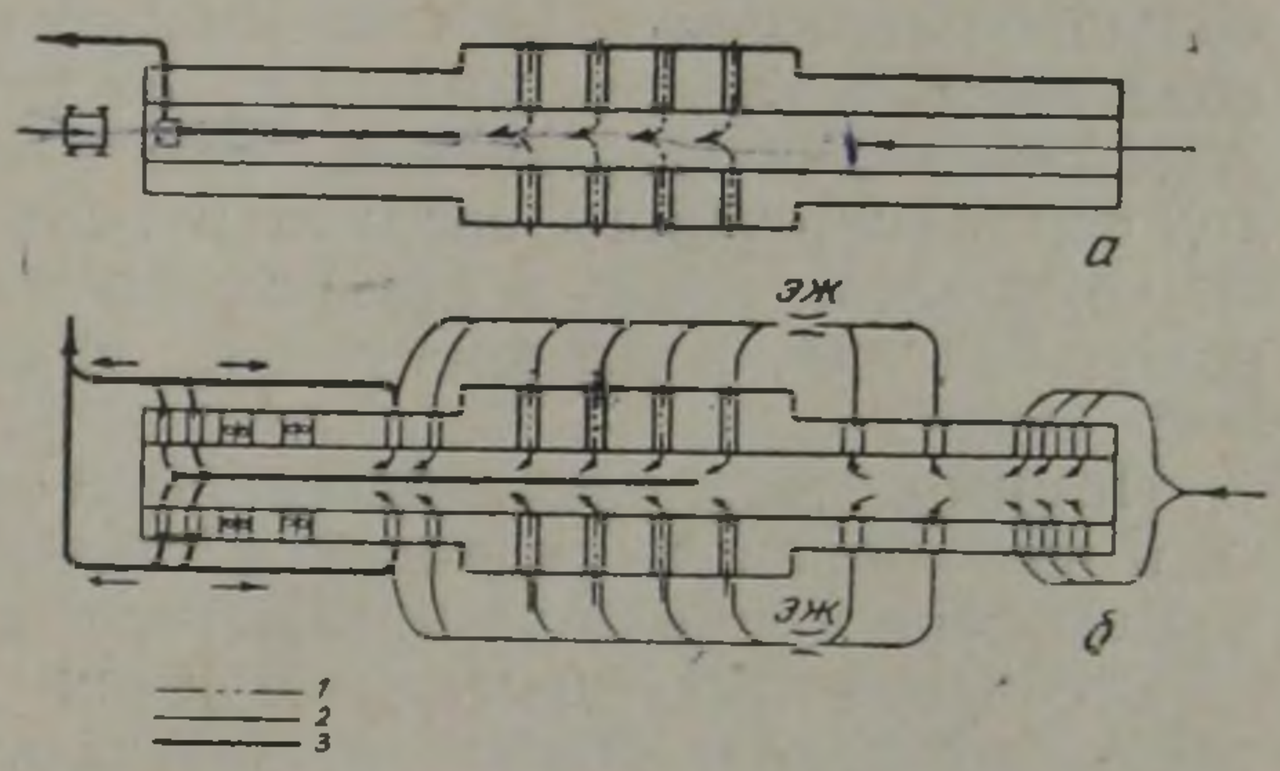


Рис. 100. Схемы туннельных печей

а — простейшая; *б* — с разветвленными газовыми потоками; *1* — топливо; *2* — воздух; *3* — дымовые газы; *ЭЖ* — эжекторы

Однако работа такой простейшей по схеме туннельной печи неудовлетворительна по следующим причинам. Количество тепла остывания готовых изделий значительно больше, чем его требуется на подогрев воздуха для горения, и поэтому передача всего воздуха в зону обжига приведет к большим избыткам воздуха и к падению температуры газов ниже температуры обжига для многих материалов. Подача же в печь малого количества воздуха не обеспечит эффективного охлаждения готовых изделий. Кроме того, воздух, подходящий к горелкам, будет сильно разогрет, что приведет к рез-

кому повышению температуры горения и вызовет оплавление изделий и футеровки печи.

Вторым недостатком простейшей туннельной печи является резкое расслоение газов по высоте сечения печи, вызывающее неравномерность отдельных стадий процесса обжига изделий: горячие газы проходят по верху туннеля, холодные — по низу. Особенно большая разница температур газов в верхней и нижней частях печи наблюдается в зоне подогрева, где она доходит до 300—400°. Такая неравномерность в зоне, где еще находятся сырые изделия, вызывает трещины изделий, их разрушение и завалы, приводящие к остановкам движения вагонеток и нарушению работы печи.

Третьим недостатком простейшей туннельной печи является невозможность регулирования кривой обжига, устанавливающейся в печи. Между тем многие изделия требуют для получения высокого их качества соблюдения на отдельных стадиях процесса обжига различных оптимальных скоростей изменения температур.

Четвертым недостатком простейшей туннельной печи является большое разрежение, появляющееся в печи при необходимости прохода газов в полном объеме через всю печь, и повышенное при этом газовое сопротивление. Это приводит к большим подсосам холодного наружного воздуха в печь через неплотности между стыками вагонеток и в других местах, к переохлаждению нижних рядов изделий, к их браку и к снижению производительности печи.

Помимо этого, простейшая туннельная печь не может обеспечить выполнение и ряда других требований технологии обжига, поэтому она и не нашла практического применения.

В современных туннельных печах имеется возможность регулирования кривой обжига в зависимости от свойств обжигаемого материала. Для этого применяются следующие способы (рис. 100,*б*).

1. Сосредоточенная или распределенная подача воздуха в зону охлаждения. При распределенной подаче возможно регулирование кривой обжига путем изменения количества подаваемого воздуха на отдельных участках зоны охлаждения.

2. Регулируемый по количеству отбор части горячего воздуха из зоны охлаждения до зоны обжига. Этот отбор также делается или в одном месте или через несколько последовательно расположенных отверстий. Во втором случае температура и количество воздуха, отводимого на сторону, регулируется легче, меньше сопротивление проходу воздуха. На участке, где охлаждение может идти интенсивно без опасности появления брака, проходит большее количество холодного воздуха — и наоборот. Медленное охлаждение происходит на участке между началом зоны обжига и местом отбора воздуха из зоны охлаждения, так как здесь проходит только воздух для горения. Отведенный из печи воздух используется для сушки или в качестве первичного поступает к горелкам. Если воздух из зоны охлаждения выходит слишком горячим (более 300°),

то при засасывании перед вентилятором к нему может быть подмешан в нужном количестве наружный воздух, что позволяет применять воздухопроводы из обычной углеродистой стали. Для отвода горячего воздуха употребляются также эжекторы. При высоких температурах смеси они могут быть выполнены из керамических деталей и выложены в кладке печей.

3. Установка в зоне обжига избыточного количества горелок. Это дает возможность регулировать как максимальную температуру, так и распределение ее по длине зоны обжига, выключая или передние, или задние горелки как лишние. Сжигание газа в инжекционных горелках или применение сильно подогретого воздуха повышает температуру продуктов сгорания и дает острое пламя, если же к горелкам подводить холодный газ или отработавшие газы из каналов рециркуляции, то процесс сгорания будет идти замедленно, что соответственно сделает температурную кривую в зоне обжига более пологой и уменьшит расслоение газов по сечению туннеля.

4. Применение в зоне подогрева рассредоточенного отбора дымовых газов, так как отбор газов в большом количестве на каком-либо участке замедляет здесь подъем температуры материала.

5. Применение дополнительного ввода воздуха в зону досушки и подогрева, что дает возможность увеличить количество тепло- и влагоносителя в этой зоне и интенсифицировать тепловую обработку.

6. Применение рециркуляции дымовых газов и воздуха. Вдоль печи устанавливаются рециркуляционные каналы, по которым отработавшие дымовые газы из зоны подогрева могут быть поданы в различные сечения печи. Это увеличивает количество проходящих через садку газов и способствует выравниванию температур. При подаче воздуха и газов в зону обжига температура горения может быть понижена до расчетной без добавки воздуха. При необходимости подачей рециркулирующих газов на стыки зон можно создать между ними газовую завесу.

Для выравнивания температур в зоне охлаждения увеличением скорости движения воздуха через садку печи применяется и рециркуляция воздуха. С этой целью воздух, отсасываемый вентилятором из нескольких участков зоны охлаждения печи, вновь нагнетается этим вентилятором в другие участки зоны охлаждения.

7. Применение перемешивающих вентиляторов. Чтобы устранить расслоение газов по сечению туннеля, в стенах туннеля в зонах подогрева и охлаждения устанавливаются перемешивающие осевые вентиляторы, создающие усиленную на данном участке циркуляцию и ускорение теплообмена между материалом и газом. Вентиляторы, расположенные на участке высоких температур, должны изготовляться из жароупорных сталей, а детали их охлаждаться водой.

Указанные способы регулирования кривой обжига используются в различных конструкциях туннельных печей.

3. Конструктивные элементы туннельных печей

Габариты печей. Длина туннельной печи L обусловлена продолжительностью пребывания в ней обжигаемых изделий и скоростью их движения. Продолжительность пребывания равна циклу тепловой обработки $\tau_ц$, которая зависит от материала, формы изделия и способа подвода к нему тепла. Скорость движения изделий вдоль печи обусловливается допустимой скоростью изменения температур $\frac{dt}{d\tau}$. Кривая обжига и, следовательно, $\tau_ц$ и $\frac{dt}{d\tau}$ обосновываются лабораторными и производственными опытами (см. ниже).

Длина печи по отношению к сечению канала $\frac{L}{F}$ составляет в среднем 30—60 $м^{-1}$, снижаясь до 17 в печи-сушилке и поднимаясь до 400—600 в многоканальной муфельной печи. Длина туннельных печей находится в пределах от 5 до 120 *м*.

Сечение печи зависит от ширины и высоты туннеля. Высота туннеля не может быть большой, чтобы не создавалось резкой разницы в температурах газов в верхних и нижних слоях садки. Для строительного кирпича и блоков высота туннеля от пода вагонеток до замка свода выбирается в среднем 1,6—1,8 *м*. В других случаях высота меньше. Ширина печи зависит от способа отопления и движения газов, а также от возможности допускать некоторую неравномерность обжига изделий, имеющую место в более широких печах. Ширина печей для обжига кирпича колеблется от 1,7 до 3 *м*. В электрических печах ширина туннеля не превышает 1 *м* из-за трудности обеспечения нужной температуры в центре садки.

Скоростной и равномерный обжиг изделий обеспечивается при индивидуальной их обработке, когда по ширине канала помещается 1—2 изделия и не более, что и определяет в этом случае ширину канала конвейерной или многоканальной муфельной печи. Высокая интенсивность теплообмена в таких печах способствует резкому сокращению цикла обжига.

Фундамент и стены. Фундамент туннельных печей делается из бутобетона или основанием печи служит бетонная плита на щебеночной подготовке. Стены укрепляются каркасом из двутавровых балок. Вертикальные стойки каркаса наверху соединяются стяжками. Стены туннельных печей в зоне подогрева и охлаждения, где температура не превышает 600°, выполняются из строительного кирпича толщиной в два кирпича. Свод состоит из слоя шамотного кирпича (230 *мм*) или строительного кирпича (250 *мм*), обмазки из обычной (50 *мм*) или огнеупорной глины (15 *мм*) и засыпки трепелом (100—120 *мм*) или шлаком (200—250 *мм*). Свод может быть выполнен здесь также из двух частей — из шамотного (113 *мм*) и строительного кирпича (120 *мм*) с промежутком (30—40 *мм*). Выше свода насыпается слой трепела (120—150 *мм*). Засыпка перекрывается строительным кирпичом (65 *мм*). В зоне обжига стена (при $t_{обж}$=1000°) состоит из шамотного кирпича

(230 *мм*) и теплоизоляционного кирпича-легковеса (250 *мм*). Если температура обжига выше 1000°, то толщина стен достигает иногда и четырех кирпичей. Своды для низкотемпературных печей ($t_{обж} \leqslant 1000°$) состоят из шамотного кирпича 230 *мм*, обмазки из обычной (50 *мм*) или огнеупорной глины (15 *мм*) и изоляционного кирпича 65 *мм*. Сверху засыпается слой трепела или шлака

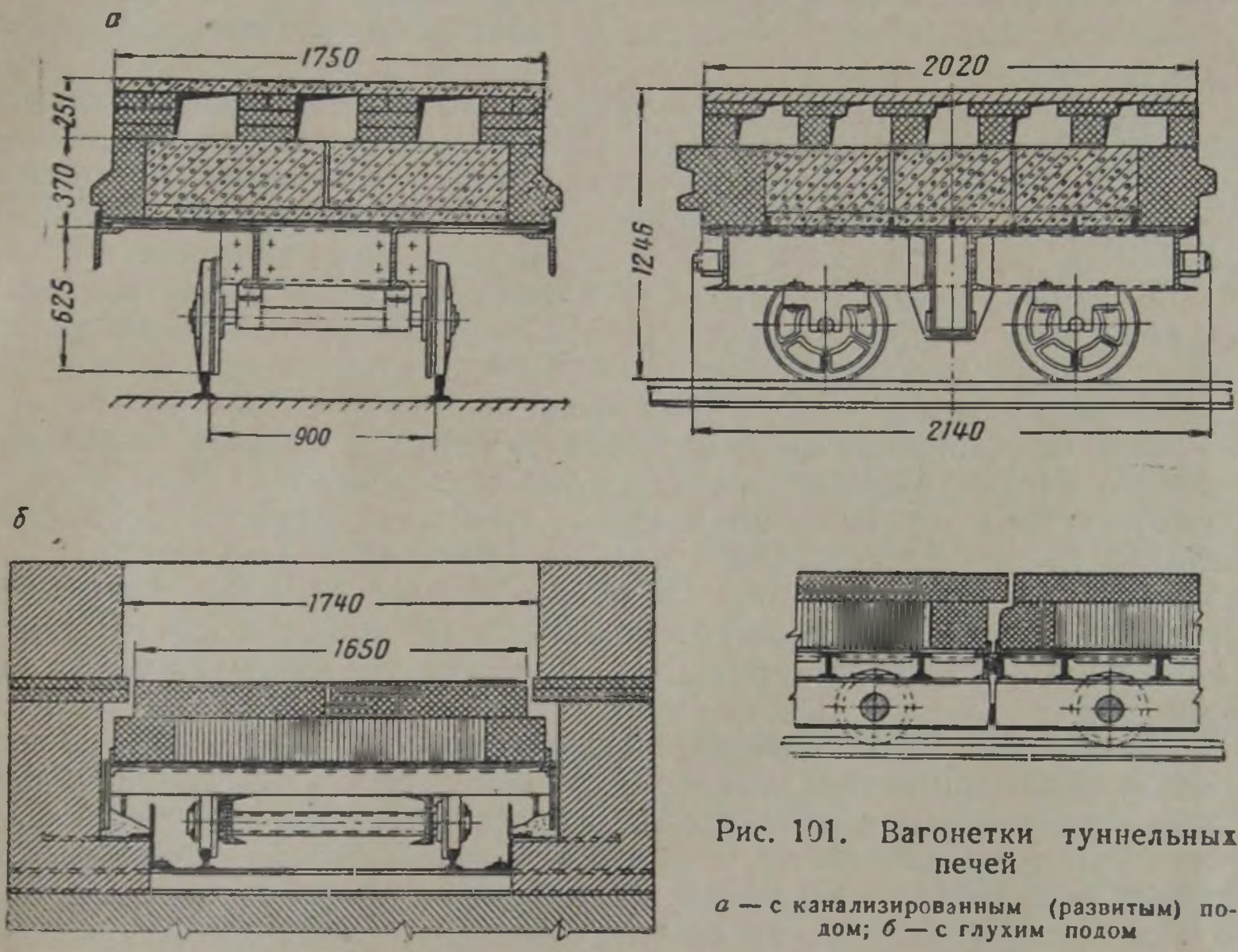


Рис. 101. Вагонетки туннельных печей

а — с канализированным (развитым) подом; *б* — с глухим подом

и кладется слой кирпича. При высоких температурах обжига толщина свода доходит до 2,5 кирпича. Если туннельная печь устанавливается на открытом воздухе, то во все ограждения добавляется теплоизоляция (шлаковая вата). Чтобы обеспечить возможность свободного расширения при нагреве, в кладке печи через каждые 5—8 *м* делаются температурные швы.

Вагонетки. Для передвижения вагонеток на фундамент печи укладывается рельсовый путь с шириной колеи, соответствующей ширине туннеля. Укладка рельсов должна быть точной и прочной, так как неисправность пути приводит к остановке движения в работающей печи и вызывает трудноудаляемые завалы изделий. Для осмотра пути и охлаждения ходовой части вагонеток устраивается подвагонеточный проходной канал или в нижней части боковых стен для этой цели делаются отверстия.

Конструкции туннельных вагонеток (двухосных) представлены на рис. 101.

На металлическую раму вагонетки укладывается огнеупорная футеровка, выполняющая роль пода печи. Под устраивается или глухим, сплошным, или развитым, канализированным. Для вспучивания глин под делается двойным, причем верхний под служит для передачи через него тепла к нагреваемому материалу.

Металлическая рама вагонетки не должна перегреваться ($t \leqslant 200°$) и толщина футеровки выбирается 250—700 *мм* по расчету нестационарного теплообмена в зависимости от температуры и длительности обжига.

Непосредственно на раму укладывается асбестовый лист, затем слой шамотного легковеса. Периферийные участки выполняются из огнеупорного (шамотного) фасона. Основная футеровка делается из плит жароупорного бетона (инструкция У135-54 МСПХП), шамота или при низких температурах из кирпича.

В печи-сушилке конструкции Укрпромпроекта для строительного кирпича футеровка упрощена: по периметру уложен на торец огнеупорный кирпич, середина же выстлана стрсительным кирпичом и заполнена засыпкой из шлака.

Вес футеровки обычно составляет 25—30% от веса садки изделий. Вес металла вагонетки равен 10—15% веса садки. Для уплотнения пода печи на боковых стенках туннеля укрепляется желоб с песком, а на раме вагонетки стальная полоса, скользящая в песке затвора при движении вагонетки. Для уплотнения стыков торцов устраиваются на футеровке одной вагонетки выступы, а на другой впадины, плотно пригоняемые друг к другу.

Толкатели. Передвижение поезда вагонеток в туннеле происходит с помощью толкателей. Толкатели могут быть гидравлические с медленным проталкиванием одной вагонетки в течение около 1 часа, механические (винтовые) с коротким временем толкания (1—2 мин.), на полную длину вагонетки и цепные. Цепной толкатель передвигает вагонетку, зацепляя ее крюками, укрепленными на звеньях цепи.

Гидравлический толкатель СМ-54 имеет усилие толкания 17,5 *т*, ход 2,5 *м*. Насос к толкателю лопастной, давление его 65 *кг/см*^{2}, мощность электродвигателя 2,8 *квт*. Механический винтовой толкатель имеет ход 3,25 *м* и мощность около 25 *квт*.

Уплотнение торцов печи достигается устройством наружных герметических шторных затворов или добавлением предкамер (форкамер) с обоих концов или одного конца печи. Камеры отделены как от помещения цеха, так и от обжигового канала печи шторами и шиберами. Подъем и опускание шиберов синхронизированы с временем работы толкателя с помощью системы автоматического регулирования.

4. Способы садки

На рис. 102 показаны различные типы садки изделий. Садка должна быть прочной, чтобы она не разрушалась при передвижении вагонеток, газопроницаемой для равномерного омывания газа-

ми и интенсивного теплообмена при незначительном аэродинамическом сопротивлении. Она должна быть достаточно плотной, чтобы полнее использовать емкость печи. Чтобы обеспечить возможность механизации загрузки и разгрузки вагонеток, садка выполняется без перевязок, и прочность ее в этом случае обеспечивается только тщательностью изготовления поверхностей изделий. Требования к садке противоречивы и в каждом отдельном случае предварительными расчетами и экспериментами определяется наивыгоднейший способ садки.

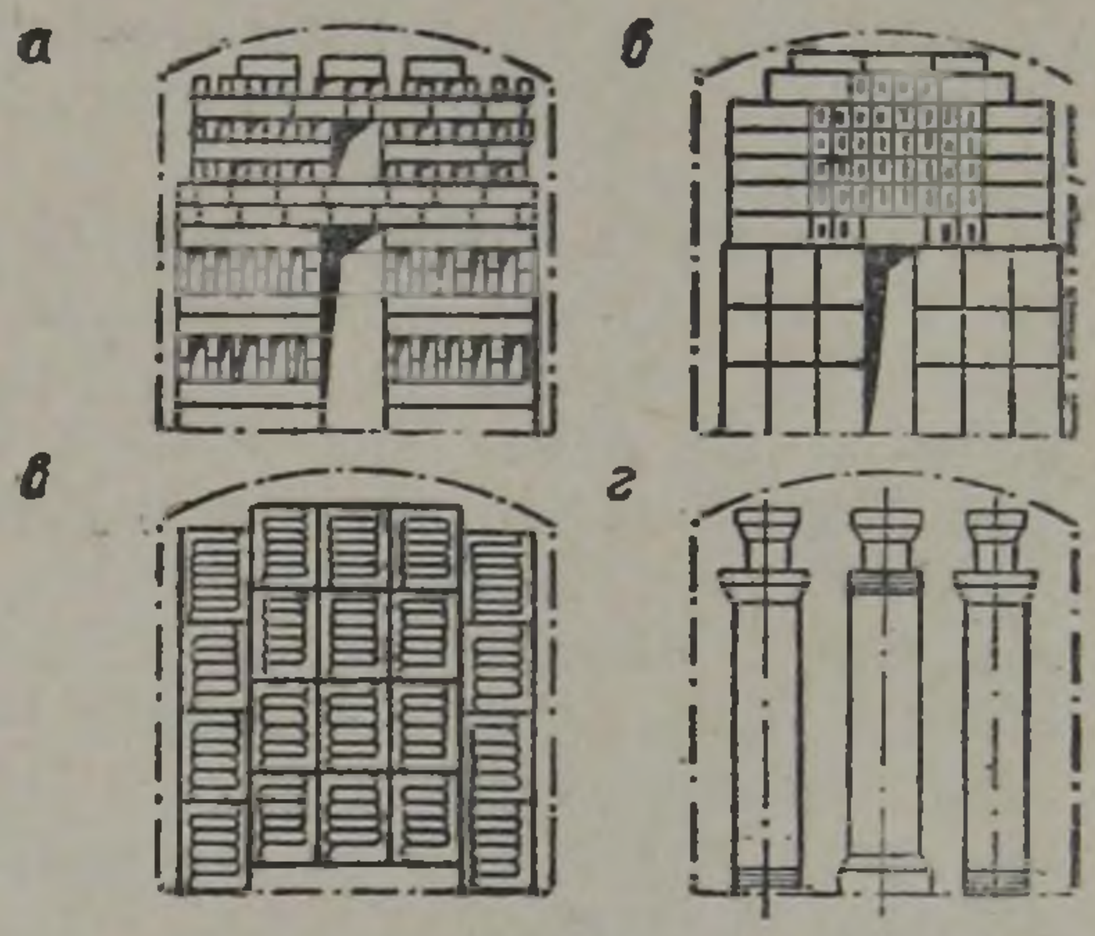


Рис. 102. Садки изделий в туннельной печи

а — кирпича; *б* — пустотелых камней; *в* — облицовочных плиток в кассетах; *г* — канализационных труб

Садка строительного кирпича *g* имеет плотность 170 ÷ 200 *шт/м*³, в электрической печи она ниже 80 ÷ 100 *шт/м*³ из-за необходимости облегчения прогрева средних частей садки (см. рис. 106). В зависимости от размера и ассортимента плотность садки канализационных труб (см. рис. 107)— 250—270 *кг/м*³.

Бескапсельный обжиг облицовочных плиток на сборно-разборных этажерках повышает плотность садки плиток на 10—15%, ведет к повышению производительности печи и экономии топлива. Кроме того, устраняется большой расход капселей, доходящий до 0,3—0,5 *шт/м*² плиток. Плотность садки облицовочных плиток при утильном обжиге 60—65 *м*²/*м*³, при политом 28—33 *м*²/*м*³, метлахских плиток 20—22 *м*²/*м*³.

Для обеспечения равномерной обтекаемости садка наверху делается плотнее, а внизу оставляются каналы: при садке кирпича и керамических камней устраивается сплошной продольный канал высотой до 1 *м* и шириной в 1 кирпич. Кроме серединного канала параллельно ему оставляются каналы шириной ¼ кирпича и высотой ½ кирпича. Керамические изделия ставятся пустотами по оси канала, вверху садки они могут устанавливаться пустотами поперек канала, чтобы затруднить более легкий для газов проход поверху. При сжигании твердого топлива садка выкладывается с высокими ножками с целью облегчения прохода газов и устранения зашлаковки. Для улучшения горения в объеме между изделиями садка выполняется с необходимыми разрывами: против выхода пламени из топок или в месте засыпки твердого топлива. Разрывы садки для размещения пламени особенно необходимы в широких печах, где односторонний обогрев приводит к перегреву периферии садки и недожогу ее центра.

5. Методы сжигания топлива

Газообразное или жидкое топливо в широких (около 3 *м*) печах, а также засыпанное твердое топливо сжигаются в разрывах садки между изделиями. Если канал печи узкий, то устанавливаются коротко-пламенные или беспламенные горелки для газа. Жидкое топливо в этом случае сжигается в выносных топках, а продукты его сгорания выходят к садке через щели. В выносных топках могут сжигаться также газ и твердое топливо. Режим обжига при выходе продуктов сгорания в канал печи через одну щель труднее регулировать, чем распределенный по зоне обжига выход через несколько щелей.

Равномерный обжиг изделий лучше всего достигается при хорошем заполнении всего сечения печи пламенем. Поэтому в широких печах горелки иногда устанавливаются не только по бокам, но и сверху печи. При обжиге керамических камней и кирпичей для равномерного обжига необходимо вводить топливо в сырец. Количество запрессованного топлива доходит до 80% и выше. Муфели туннельных печей обогреваются продуктами сгорания выносных топок. Для повышения температуры сгорания и усиления теплопередачи через муфель в топках муфельных печей часто применяется мазут. С этой же целью сжигание топлива ведется на горячем воздухе.

6. Аэродинамические режимы печи

В туннельных печах вентиляторы используются для подачи холодного воздуха в зону охлаждения, переброса части горячего воздуха перед зоной горения для сушки и в зону подогрева, перемешивания газов в зоне подогрева, а иногда и в зоне охлаждения. У печи устанавливаются также дымососы для удаления из нее газов и для рециркуляции дымовых газов к различным точкам печи.

Для ликвидации расслоения газов по высоте канала и проведения скоростных режимов сушки и обжига количество проходящих через садку газов стремятся увеличить, однако не создавая повышенные давления или разрежения в печи, что привело бы к выбиванию газов или большим присосам наружного воздуха.

Абсолютные значения разрежений и давлений в туннельной печи обычно не превосходят 15—25 *мм* вод. ст., так как, несмотря на большую длину печи, сопротивление самой садки на 1 *пог. м* не превышает 0,1—0,3 *мм* вод. ст., а нейтральная точка располагается обычно на стыке зон охлаждения и обжига. При подаче газов рециркуляции к стыку зон обжига и подогрева здесь может быть создана вторая нейтральная точка.

В зоне охлаждения, где проходит чистый воздух, устанавливается положительное давление с максимумом 20—25 *мм* вод. ст. у места подачи воздуха вентилятором. Эти величины во многих печах значительно ниже. Вся зона обжига находится под неболь-

шим разрежением (0,5—1 *мм* вод. ст.), что облегчает работу температурно-напряженных сводов. Положительное же давление ускоряет разрушение их швов. Кроме того, оно вызывает выбивание горячих газов. Однако небольшое давление 0,5—1 *мм* вод. ст. допустимо при обжиге особо чувствительных глазурованных изделий, так как присосы холодного воздуха вызывают появление трещин на их поверхности.

Зона подогрева находится под разрежением дымососов. Чтобы предупредить подсос наружного воздуха при заталкивании очередной вагонетки, во входном конце печи может быть устроена встречная подача газов дымососом или специальным вентилятором через щели по контуру сечения, близкого к выходу. Встречная подача газов повышает на входном участке давление газов до атмосферного. Газы удаляются в каналы, присоединенные к дымососу. Воздушная завеса может быть устроена и на выходе вагонеток из зоны охлаждения, что, однако, менее важно.

Выбор вентиляторов и дымососов по давлению делается исходя из суммы сопротивлений, зависящей больше от сопротивлений, создаваемых при проходе воздуха и газов через отверстия, каналы и трубопроводы с их арматурой и ответвлениями, чем от сопротивления самой садки. Расход электроэнергии вентиляторами и дымососами в туннельных печах зависит от схемы движения газов и воздуха.

7. Описание некоторых конструкций туннельных печей

В СССР проектированием туннельных печей заняты специальные институты: Росстромпроект, Гипростройматериалы, Укрпромпроект и др. Ранее печи проектировались почти исключительно на газообразном или жидком топливе, в последнее время расширяется применение печей, работающих на твердом топливе и на электроэнергии.

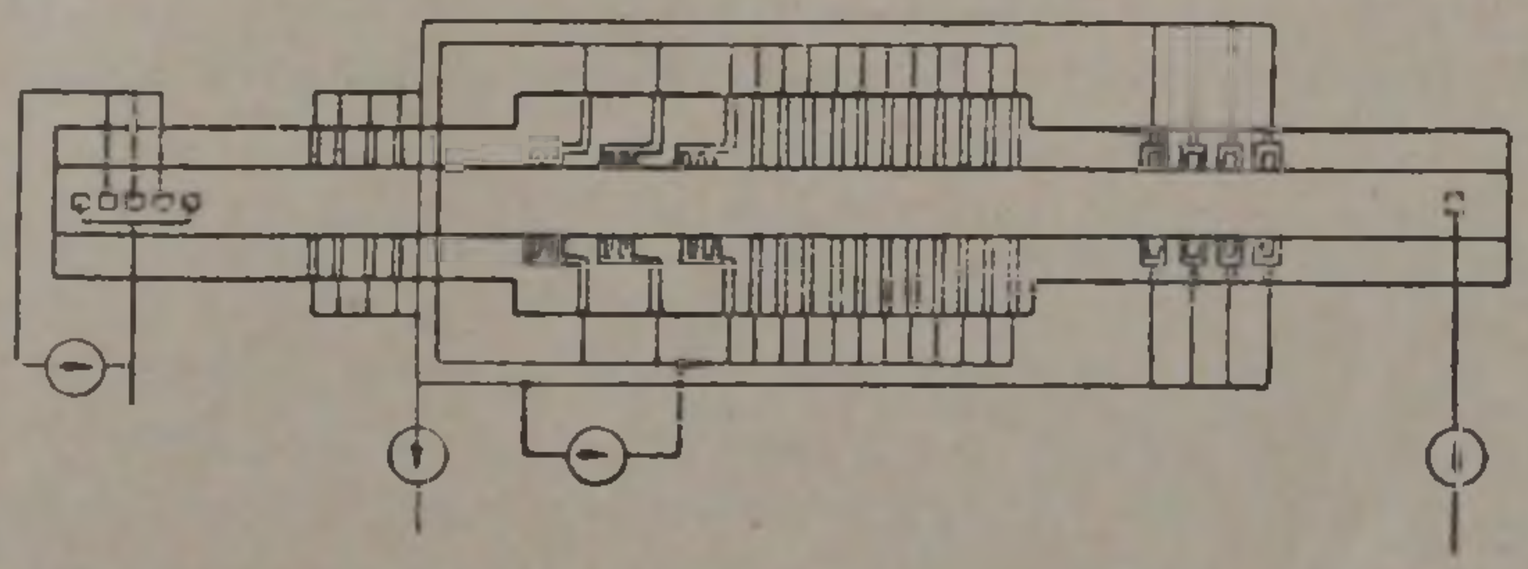


Рис. 103. Схема туннельной печи Росстромпроекта

Туннельная печь Росстромпроекта (конструкция 1953 г.) для обжига керамических материалов с годовой производительностью 14 млн. шт/год условного кирпича предназначена для работы на газообразном топливе. Ее размеры: длина 105 *м*, ширина 1,74 *м*, высота 1,74 *м*. Схема печи представлена на рис. 103. Соотноше-

ние длин зон подогрева, обжига и охлаждения 38 : 31 : 31%. Холодный воздух подается в конечное сечение печи через металлический короб. Горячий воздух отбирается из зоны охлаждения через 16 отверстий и двумя воздухопроводами проходит по верху печи к сушилке. Из этих воздухопроводов горячий воздух отбирается и подается в зону подогрева через 8 нижних боковых отверстий и к горелкам зоны обжига. В зоне подогрева организова-

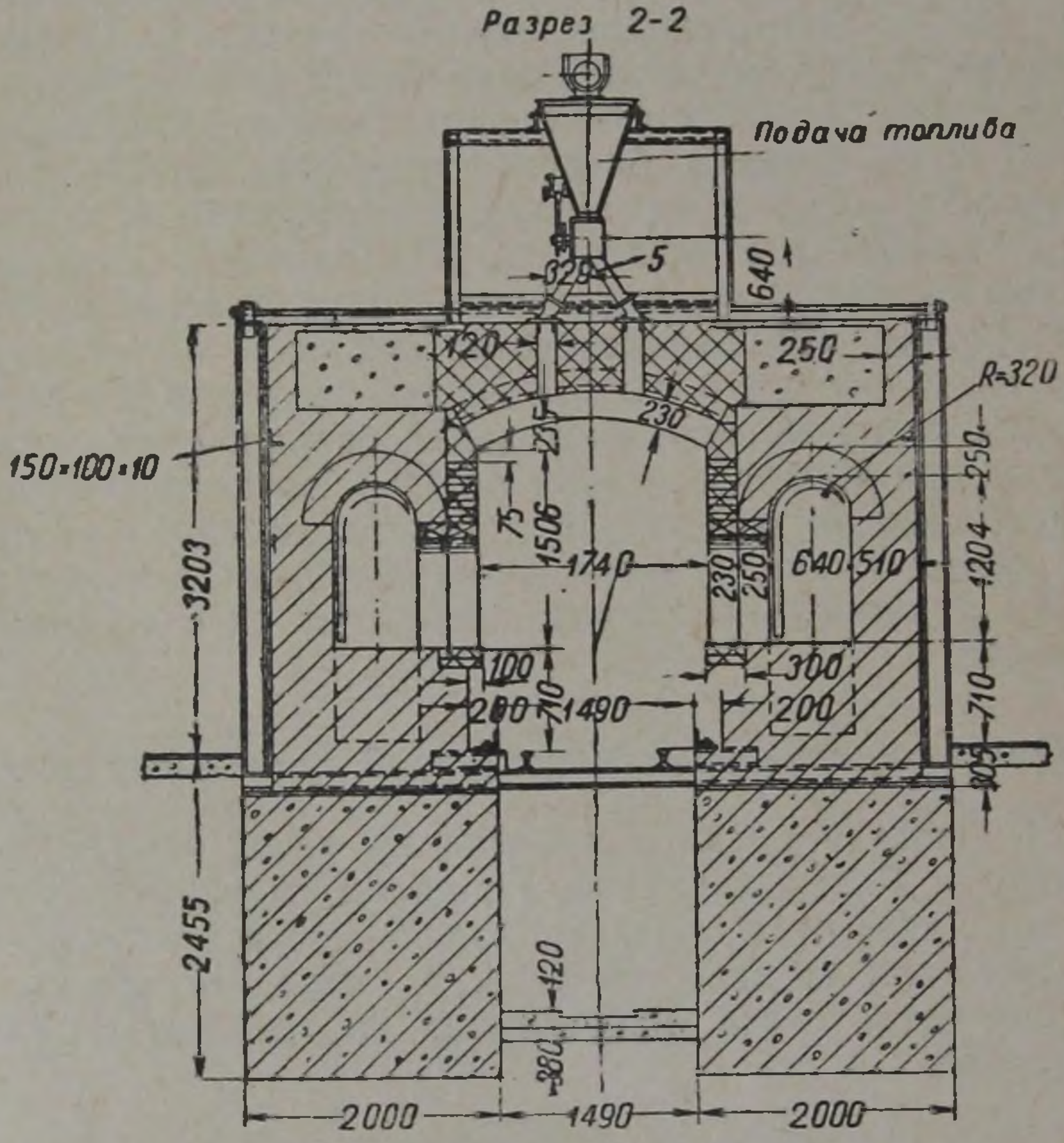


Рис. 104. Туннельная печь для работы на твердом топливе

на рециркуляция дымовых газов, для чего из выхлопного патрубка дымососа отдельным вентилятором часть газов подается в начальной части зоны подогрева в двух местах. Остальное количество дымовых газов идет на сушилки или в атмосферу. Зона обжига имеет 22 горелки острого огня и 6 топок с выходом продуктов горения через щели для мягкого обогрева изделий в первой части зоны обжига. Ширина колеи вагонеточного пути 1 000 *мм*. Печь оборудована гидравлическим толкателем СМ-54.

Туннельная печь Росстромпроекта (конструкция 1956 г.) для обжига керамических изделий производительностью 14 млн. шт/год условного кирпича спроектирована для работы на твердом топливе, ее поперечный разрез дан на рис. 104. Длина печи 108 *м*, сечение 1,74×1,74 $м^2$. Соотношение длин зон 42 : 26 : 32. Число

вагонеток 45. Продолжительность обжига 36 час. Топливо в количестве до 80% запрессовывается в сырец, остальное подается через щели в зоне обжига автоматическими питателями. Топливо по питателям распределяется закрытыми шнеками. Число питателей увеличено, чтобы иметь возможность передвигать зону обжига. Для удаления шлака и золы на выходе из печи пристроена специальная камера обдувки, отделяемая от туннеля и помещения цеха шторными дверьми. Садка готового кирпича в этой камере с двух сторон обдувается от заносов золы автоматически передвигающимися щелевыми насадками со скоростью воздуха в 20 *м/сек*. Загрязненный воздух отсасывается через боковое отверстие в специальное устройство для очистки. От короба холодного воздуха при подаче воздуха в печь сделано ответвление для охлаждения подвагонеточного пространства. Для интенсификации тепловых процессов и сокращения продолжительности нагрева и охлаждения в печи принята повышенная до 5 *м/сек* скорость газов. Горячий воздух из зоны охлаждения в зону подогрева передается по каналам, выложенным в печи. Первый отбор горячего воздуха (150—200°) делается для подачи в зону подсушки. Из второго отбора (600—650°) воздух поступает в конец зоны подогрева. Остальной воздух из зоны охлаждения идет на горение топлива. Садка кирпича прямая, сходная с колосниковой решеткой. Перед зоной подогрева расположена шлюзовая камера. Ширина колеи вагонеточного пути 1 000 *мм*. Толкатель печи гидравлический. После входа вагонетки в шлюзовую камеру и уплотнения ее шторой толкатель, расположенный в камере, передвигая поезд, заталкивает вагонетку с сырцом в туннель и выводит вагонетку с готовыми изделиями в обдувочную камеру. Работа толкателя и шторных дверей сблокирована. Также сблокирована подача топлива и работа вентиляторов. Печь может работать автоматически по заданной кривой обжига.

Туннельная печь-сушилка Укрпромпроекта (конструкция 1955 г.), схема которой представлена на рис. 105, совмещает в себе процессы сушки сырца и его обжига. Расчетная начальная влажность сырца 20%. При недостаточной прочности сырца непосредственно после пресса он проходит подвялку на конвейере или другим способом. Длина печи 87 *м*, сечение 2,95×1,70 $м^2$, отношение $L: F = 17\ м^{-1}$. Сушка совмещена с зоной подогрева. Соотношение длин зон (в %) 39 : 32 : 29. Число вагонеток 28. Продолжительность сушки и обжига 42 часа. Печь предназначена для работы на любых сортах местного твердого топлива с запрессовкой в сырец от 0 до 100% всего потребного количества.

Печь оборудована механическим толкателем с мотором 28 *квт*. Колея вагонеточного пути 1 524 *мм*. Печь спроектирована для установки на открытом воздухе, почему теплоизоляция ее ограждений усилена. Удельный расход топлива на оба процесса — сушки и обжига — по сравнению с раздельными агрегатами резко снижен и составляет 183 *кг* на 1 000 шт. В зоне обжига на своде расположены четыре круглых генерирующие циклонно-вихревые

топки. Три-четыре топки работают, если нет запрессовки топлива в сырец. При 100% запрессовке топлива топки работают только в период растопки печи. Топливо перед поступлением в топки размалывается в бильных мельницах и одновременно просушивается горячим воздухом из зоны охлаждения в пристроенной к мельнице сушильной шахте. Подготовленное топливо в смеси с воздухом

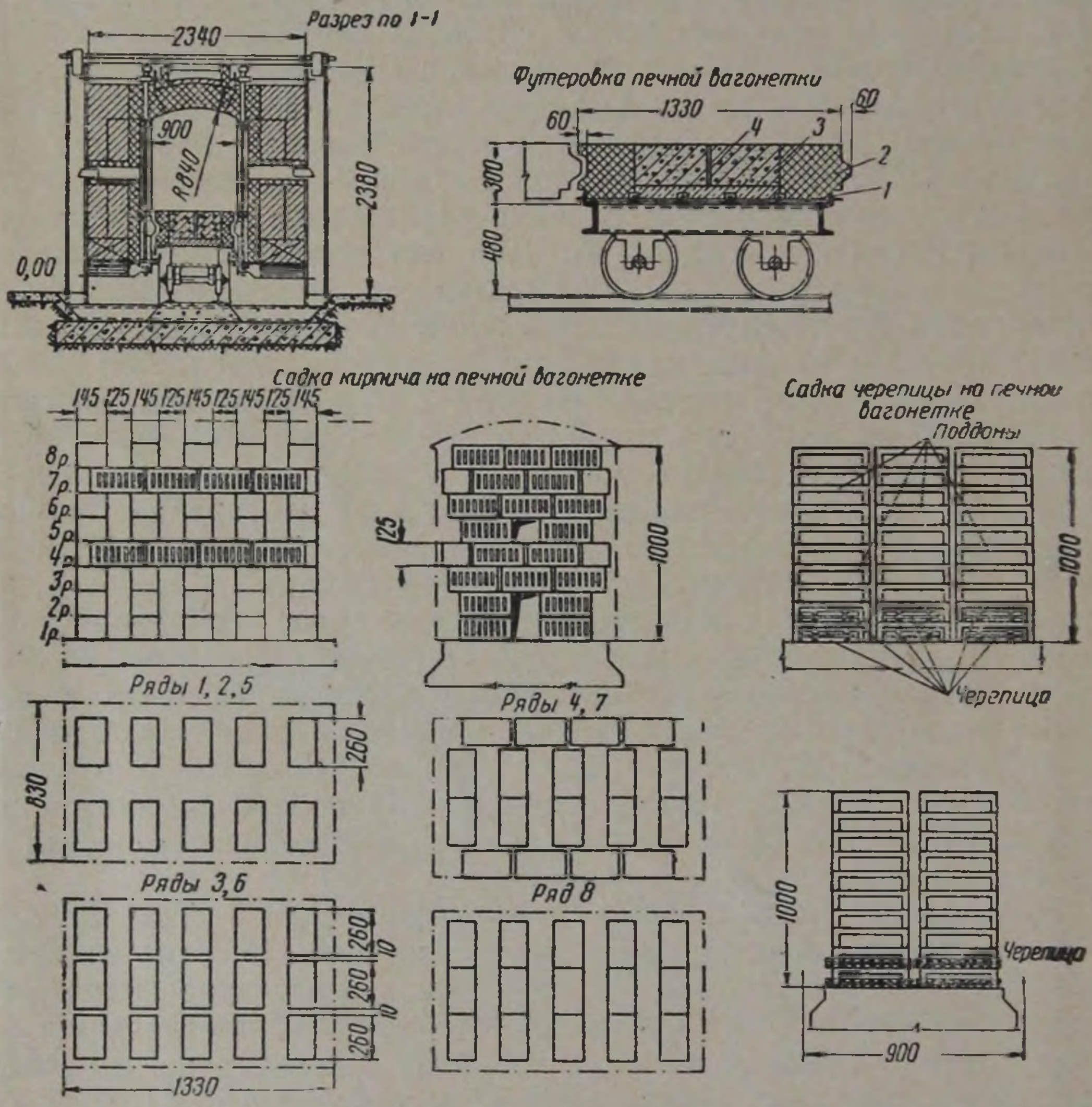


Рис. 106а. Электрическая туннельная печь

тангенциально входит в топки и сгорает при вихревом движении полностью или в полугаз. Выход газов из топок сделан против центра вагонеток, поэтому садка здесь имеет разрыв. Провалы золы в подподовое пространство исключены. Работа топок автоматизирована. Для выравнивания температуры и обеспечения дожорания топлива при максимальном вводе его в сырец в зону обжига через щели свода и стен подводится воздух от двух вентиляторов. Когда топливо, богатое летучими, не запрессовывается, подвод воздуха по этой системе не производится.

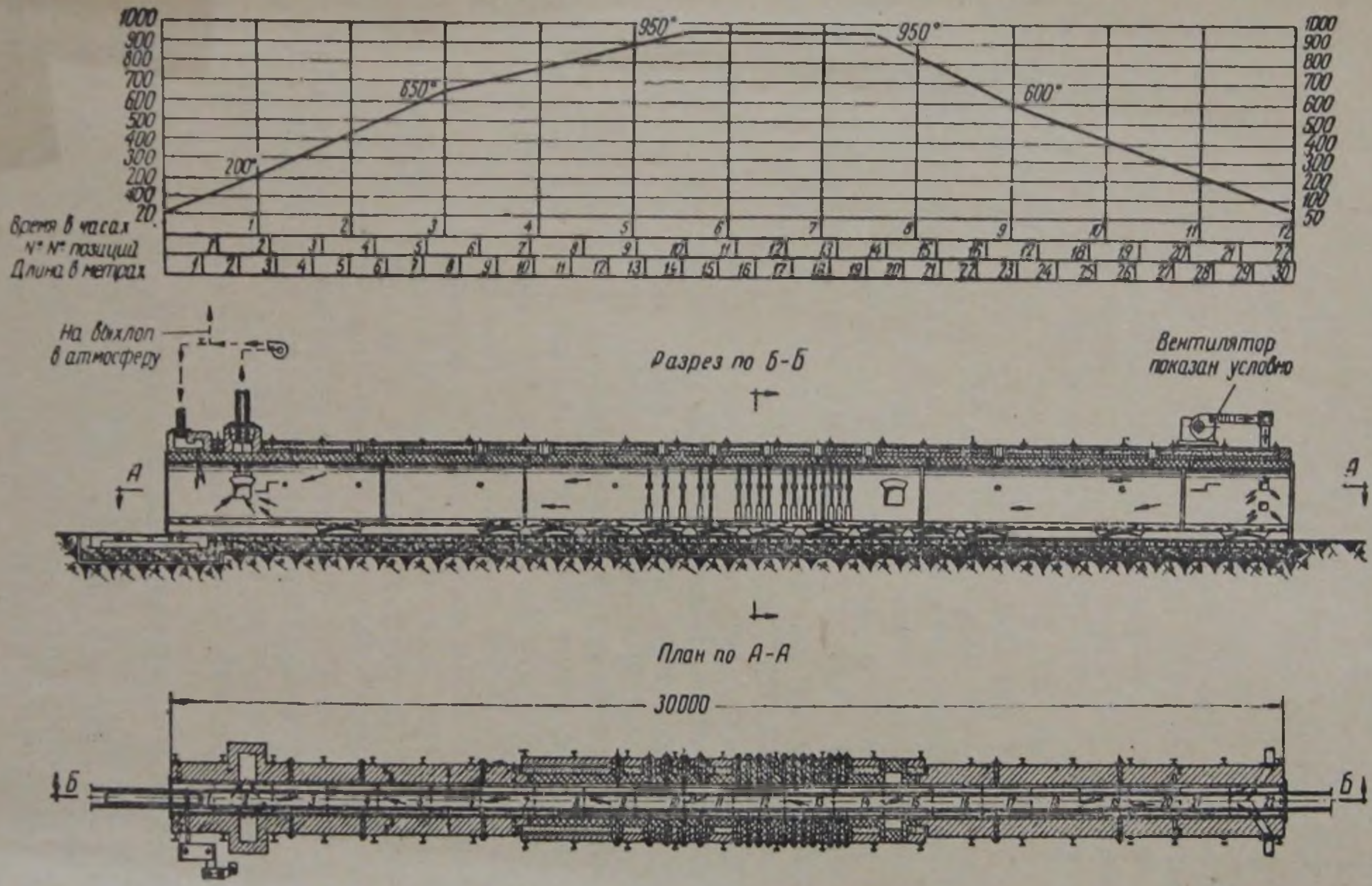


Рис. 106 б. Электрическая туннельная печь

Воздух, прошедший зону охлаждения, кроме подсушки топлива, используется для сушки сырца в смеси с продуктами сгорания. Продукты сгорания из зоны обжига идут в зону подогрева, затем отбираются на позиции *12** вентилятором из канала печи при температуре 400—500°. С целью резкого снижения температур и увеличения количеств тепловлагоносителя на участке сушки вентилятор присасывает воздух из зоны охлаждения и наружный воздух, готовя смесь 200—250°, и подает ее в зону сушки на позиции *8—11*. Дополнительный вентилятор отбирает газы на уровне пода вагонеток позиции *7*, разбавляет их наружным воздухом и нагнетает смесь через свод на позиции *5*.

Туннельная печь Гипростройматериалы (конструкция 1956 г.) для обжига строительного кирпича и черепицы работает на электроэнергии (рис. 106). Длина ее 30 *м*, сечение 0,90×1,14 *м²*, отношение длин зон 42 : 21 : 37%. Число вагонеток 22. Срок обжига 12 час. Садка кирпича разреженная, черепица обжигается на этажерках. В зоне обжига расположены с двух сторон по 15 карборундовых нагревателей диаметром 30 *мм*. Воздух для охлаждения изделий подается двумя вентиляторами ЭВР № 4 с двух сторон выходного сечения печи и проходит полным потоком по всему туннелю к выходу, где двумя вентиляторами ВР № 4 выбрасывается частично в атмосферу, а частично подается в воздушную завесу входного сечения печи.

Электрические печи сопротивления для строительной керамики передают изделиям тепло излучением от боковых нагревателей, поэтому ширина печей не может быть большой и выбирается до 1 *м*. В электрических печах при невысокой температуре обжига (850—900°) применяются и нихромовые нагреватели. Их рабочая температура не выше 1000°, в то время как неметаллические допускают температуру до 1400°. Чем больше разница между температурой нагревателей и обжигаемыми изделиями, тем интенсивнее лучеиспускание и скорее ведется обжиг.

Преимущества применения электрической энергии в печах перед сжиганием топлива состоят в чистоте рабочей атмосферы в туннеле, в легкой регулируемости и высокой интенсивности процесса, в компактности, чистоте и удобстве обслуживания печи, в возможности освободиться от муфелей и капселей при обжиге декоративной керамики. Однако, расход электроэнергии в печах высок и составляет 1 000—1 200 *квт-ч* на 1 000 шт. кирпича.

При обжиге строительного кирпича могут применяться электрические печи, где расход электроэнергии снижен до 100—200 *квт-ч* на 1 000 шт. за счет введения большей части топлива (80—90%), потребного для полного обжига, в сырец. Это топливо должно выгорать к моменту выхода изделий в зону электронагревателей.

---

* Позиции обозначают порядковый номер нахождения вагонетки по длине туннельной печи.

Туннельная печь Гипростройматериалы (конструкция 1956 г.) для обжига канализационных труб работает на газе (рис. 107). Работа печи автоматизирована. Производительность ее 13 000 *т/год*. Длина печи 116,7 *м*, сечение 1,85×1,63 *м²*, число вагонеток 51. Входная камера имеет длину 2 700 *мм*, выходная 4 470 *мм*, поэтому собственно длина печи 109,5 *м*. Соотношение длин зон 37 : 18 : 45%. Продолжительность обжига 49 час. Холодный воздух нагнетается под свод печи у последней вагонетки. Отбор его из зоны охлаждения на сушилки делается у *43*, *35* и *31* позиции. Часть горячего воздуха после отбора из печи отсасывается отдельным вентилятором и нагнетается к газовым горелкам ГЩО-2″ и ГЩК-3″ и в щели на своде туннеля (поз. *28*, *31* и *32*). Продукты сгорания из зоны обжига проходят зону подогрева, в конце которой (поз. *7* и *10*) рециркуляционный вентилятор нагнетает отработавшие дымовые газы через щели свода туннеля. Этот же вентилятор подает газы для создания газовой завесы (поз. *1* и *4*). Два рециркуляционных канала 400×400 *мм* выложены выше свода печи по обеим ее сторонам на конечном участке зоны подогрева. На концах печи пристроены герметически закрывающиеся камеры, где размещается по одной вагонетке.

Туннельные печи для обжига плиток. Плитки обжигаются в обычных, муфельных или многоканальных муфельных туннельных печах. Топливом служит газ или мазут.

В печи Гипростройматериалы (1956 г.) утильный обжиг облицовочных плиток производится без капселей на сборно-разборных этажерках, политой — в капселях. Длина печи 81,7 *м*, сечение 1,4× ,37 *м²*, число вагонеток 44. Продолжительность утильного обжига 50,4 часа, политого — 30,2 часа. Метлахские плитки обжигаются 48 час. Производительность печи 1 млн. *м²/год* утильного обжига и почти столько же для политого обжига. Для метлахских плит производительность 550 тыс. *м²/год*.

В Англии обжиг политых плиток иногда ведется без капселей на очищенном холодном генераторном газе с использованием нового способа его сжигания. Газ под повышенным давлением без первичного воздуха через многочисленные сопла подается с большой скоростью и проникает внутрь садки изделий. Встречая здесь идущий по туннелю горячий воздух, газ сгорает без пламени у поверхностей политых плиток, обеспечивая высококачественный и равномерный их обжиг.

Муфельная печь конструкции Гипростройматериалы (рис. 108) для цветных облицовочных плиток имеет длину 59,5 *м*, сечение 0,95×1,10 *м²*, число вагонеток 32, продолжительность обжига 40 час.

Многоканальная муфельная печь конструкции НИИСтройкерамики для обжига цветной плитки (рис. 109) имеет 24 канала, производительность ее 26 300 *м²/год*.

В этой печи 16 каналов сечением каждый 230×65 *мм²* и 10 каналов по 190×45 *мм²*. Длина печи 5,67 *м*. Соотношение длин зон 33 : 25 : 42%. Каналы образованы муфелями, выполненными из

Температурный режим обжига

Температура t°C

1000

700

500

700

Температура

60

час

Позиц.

длина

к сушилкам

На выхлоп

Подсос холодного воздуха

Хол. возд.

2530

800

1

3

2

к сушилкам

Генераторный газ

На выхлоп

На рециркуляцию

На рецир-куляцию

Горячий воздух

Холодный воздух

2940

1 2 3 4 5 6 11 12 13 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 32

59500

6358

Условные обозначения:

Шамотный легковес БЛ-08

Вермикулит изоляционный

Железобетон

Шамотный кирпич

Шлаковая засыпка

Карборунд

Глиняный обыкновенный кирпич

Высокоглиноземистый кирпич

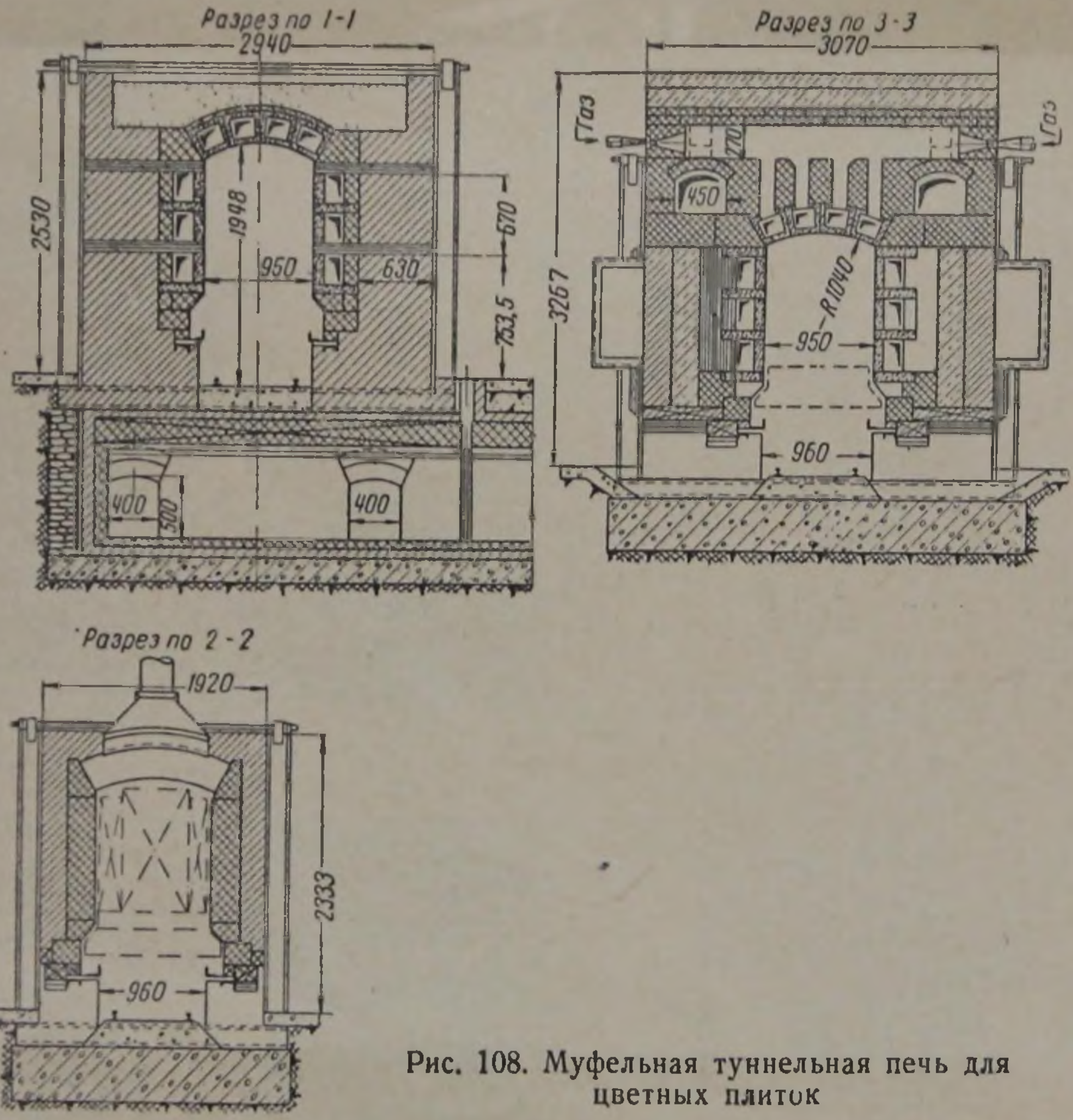


Рис. 108. Муфельная туннельная печь для цветных плиток

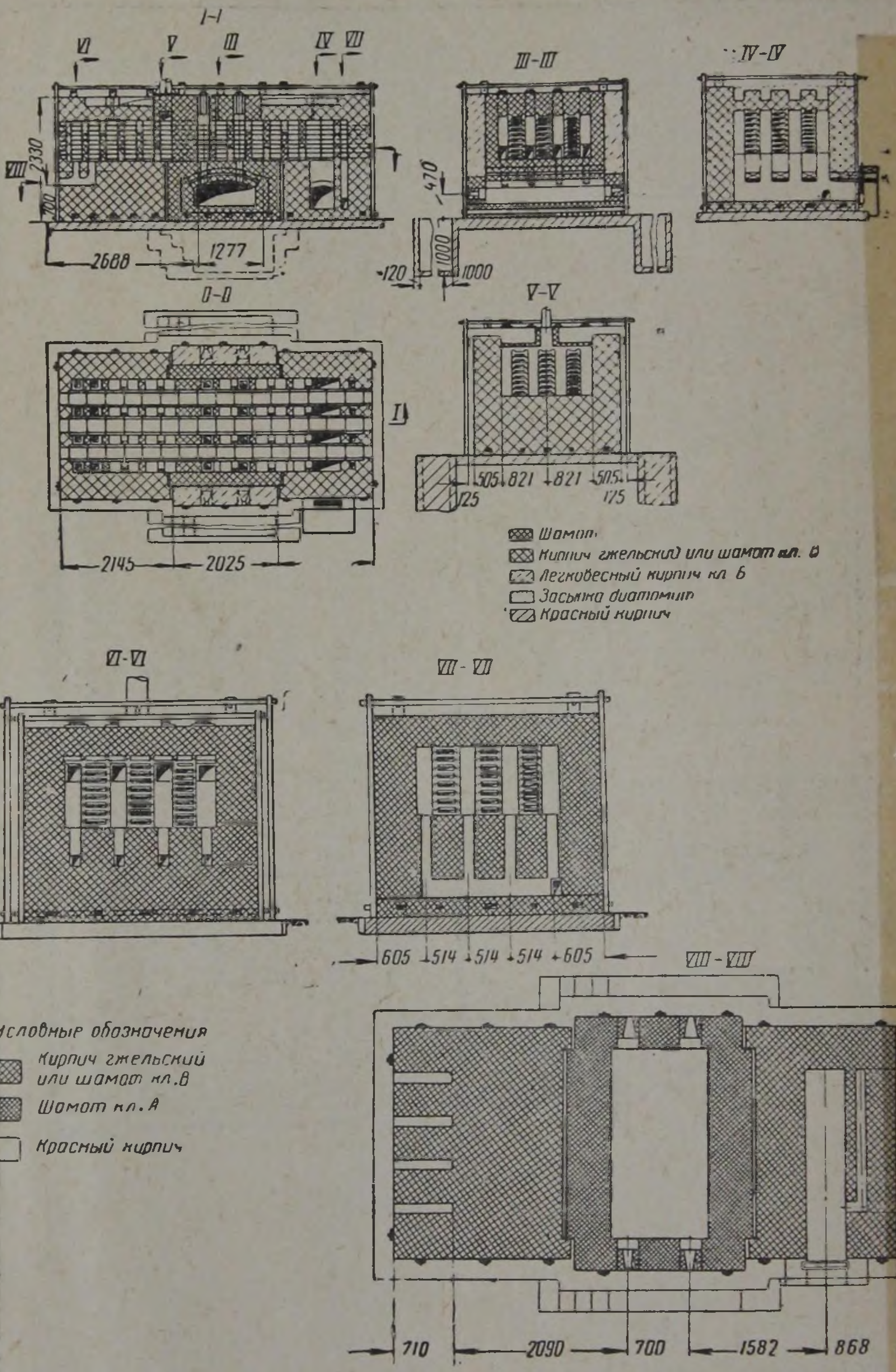


Рис. 109. Многоканальная муфельная печь

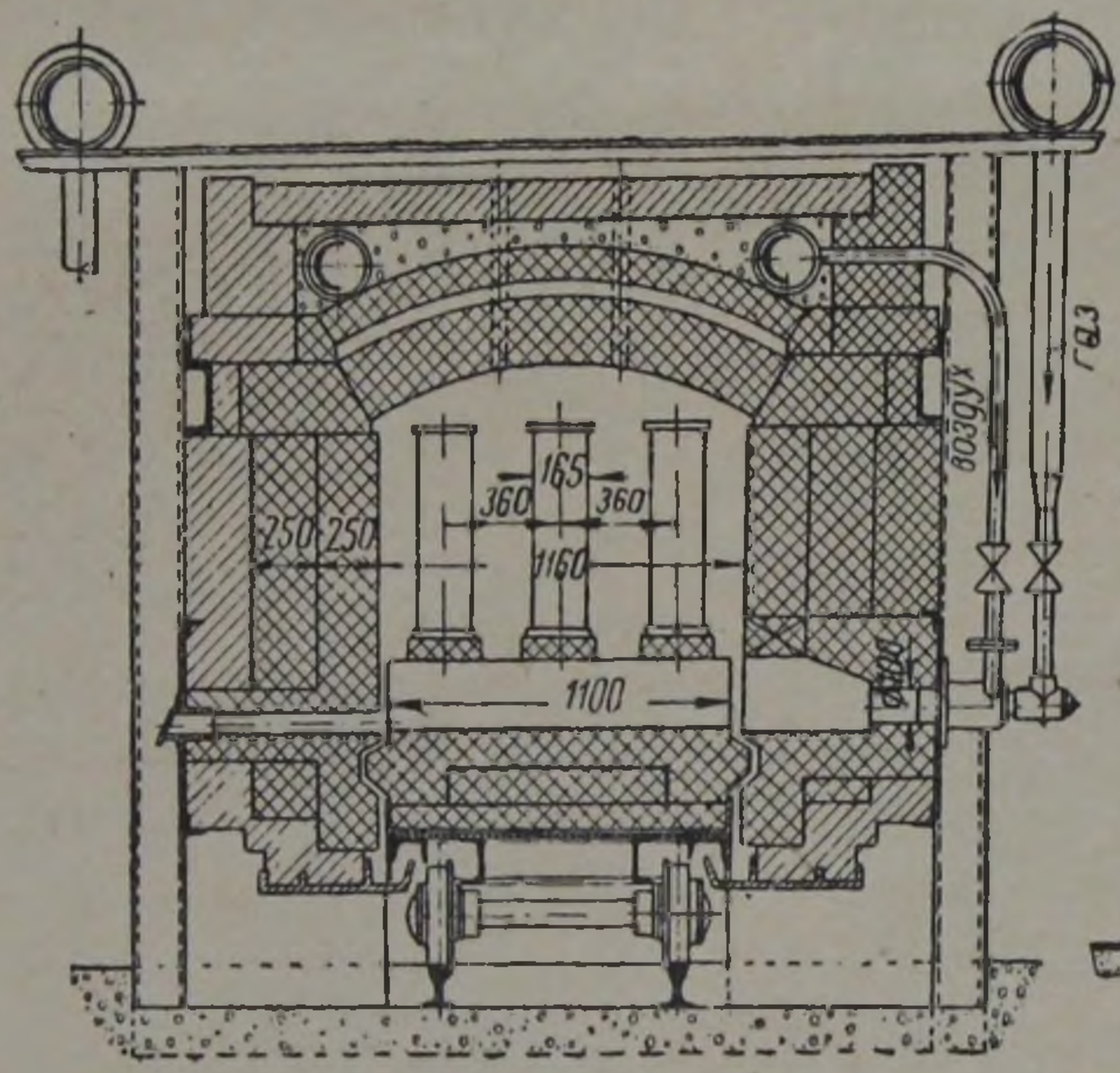
массы, состоящей из кристаллического карборунда (40—50%) и огнеупорной глины (50—60%). Муфельные элементы ставятся на растворе из жидкого стекла, каолина и пресс-порошка плитки (1 : 1 : 1). В каждый канал закладывается 18 подставок 315×165×25 *мм*, на которые укладывается по две плитки. Для облегчения движения в канале поверхность муфеля шлифуется, а установка муфелей выполняется с уклоном в 1° в сторону разгрузки. Плитки передвигаются с помощью пневматического многошпиндельного толкателя. Печь отапливается мазутом. Топки расположены под муфелями с двух сторон. Выходящие из них продукты сгорания, проходя зигзагообразный путь, омывают боковые стенки муфелей в зоне обжига, а затем в зоне подогрева, после чего из сборного борова вентилятором направляются в смесительную камеру для использования в сушилке. Холодный воздух проходит также зигзагообразный путь около стенок муфелей и удаляется из печи по вертикальной трубе.

В других многоканальных муфельных печах число каналов находится в пределах 10—60. Так как в многоканальных муфельных печах каждое изделие получает индивидуальную тепловую обработку, а не в общей садке, то продолжительность обжига сокращена в 10 раз и более по сравнению с обычными печами. В муфельных печах продолжительность обжига 3—6 час.

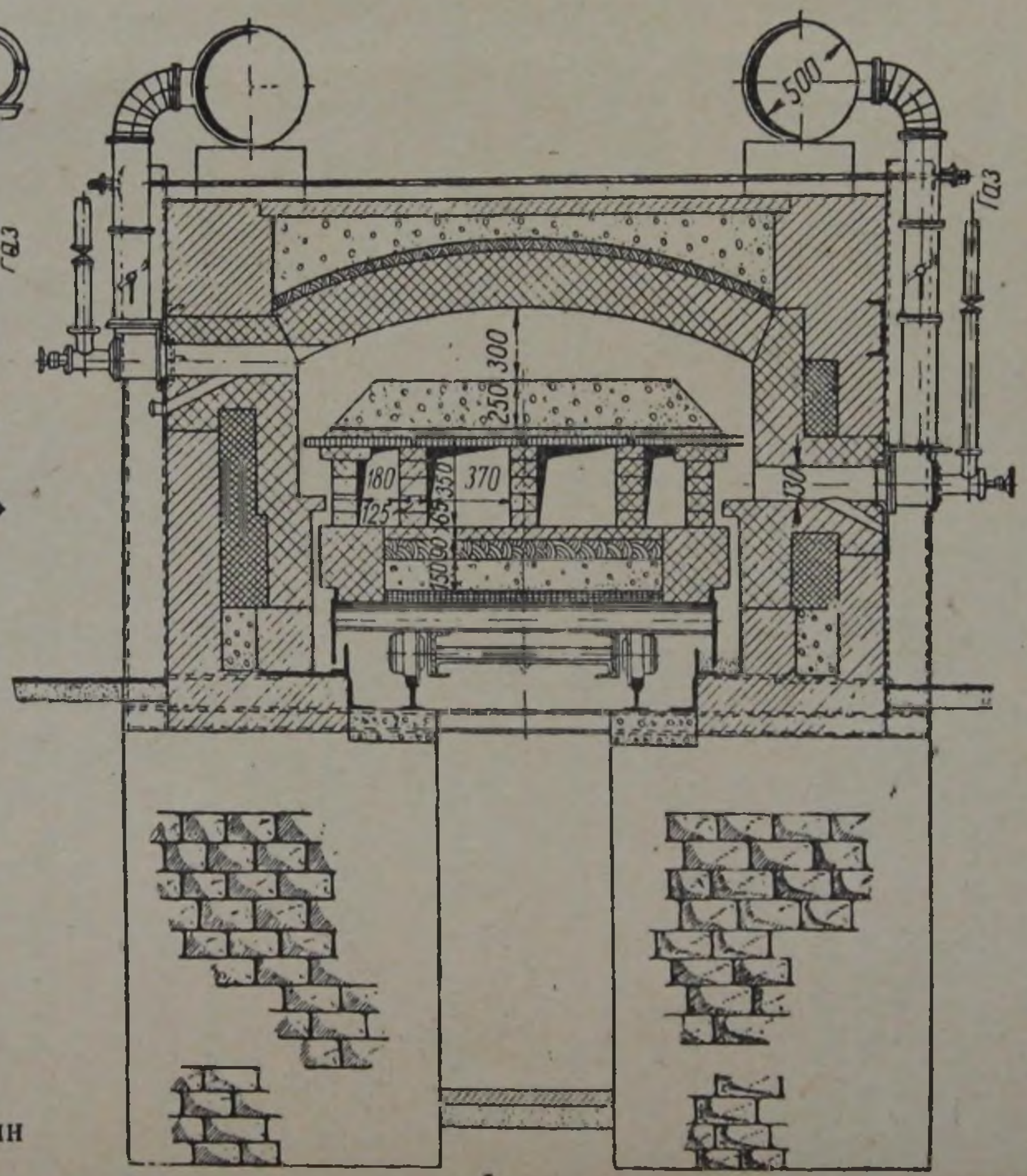
Туннельные печи для вспучивания глин. Вспучивание глин в туннельных печах может быть с применением жаростойких стальных или керамических форм или без форм, когда глина располагается прямо на поду вагонетки слоем.

В печи конструкции Союзтеплостроя. (рис. 110,*а*) на каждой вагонетке длиной 1 500 *мм* и шириной 1 100 *мм* устанавливается три формы размерами 165×1320×650 *мм*, куда и закладывается глина, подлежащая вспучиванию. Длина печи 36 *м*, число вагонеток в печи 24. Сечение туннеля 1 160×900 *мм*. Производительность печи 28 *т/сутки*. Расчетная длительность цикла 6—12 час. Распределение температур газов в печи: вагонетки № 2—4—температура от 600 до 1100°, № 5—7—1100°, № 8—16—1150°, № 17—20—от 1150 до 1000°, № 21—24—от 1000° до 150°. Печь работает на генераторном газе, число горелок 30. Расход газа 1 595 ÷ 965 *кг/час*. Холодный воздух подается вентилятором в выходном сечении печи. Распределенный отбор горячего воздуха происходит на позициях *24—19*; горелки расположены на позициях *18—8*; дымовые газы отбираются на позициях *7—2*. Вагонетка № 1 находится во входной форкамере, герметически отделяемой шиберами от печи и цеха. Под форкамерой установлен гидравлический толкатель.

В туннельной печи ЦНИИСМ МПСМ УССР глина укладывается непосредственно на под вагонеток, который обогревается снизу, независимо от обогрева глины сверху в канале печи (рис. 110,*б*). Длина печи 72 *м*, поперечное сечение 2,1×0,95 *м*. Производительность 30 $м^3$ вспученного материала в сутки. Длительность цикла 24 часа. Число вагонеток 36. Для равномерного нагрева слоя гли-



а



б

Рис. 110. Туннельные печи для вспучивания глин

а — Союзтеплостроя; *б* — ЦНИИСМ МПСМ УССР

ны газ подается отдельными горелками как в межподовое пространство вагонеток, так и над слоем глины. В первой зоне нагрева и вспучивания (поз. *1—13*) глина нагревается до 1200°, первое резкое охлаждение происходит с 1200° до 700—750° во второй зоне (поз. *14—16*), медленное охлаждение с 700—750° до 350° осуществляется в третьей зоне (поз. *17—31*) и второе резкое охлаждение происходит с 350° до 50° (поз. *32—36*). Отбор дымовых газов производится в начале и конце зоны вспучивания, дымовые газы отсасываются также и к горелкам. В зоне первого резкого охлаждения сделаны окна для подсоса холодного воздуха, такие же окна имеются и в зоне медленного охлаждения. В зону второго резкого охлаждения воздух входит через открытый выгрузочный конец печи.

Удельный расход топлива на 1 $м^3$ вспученного материала составляет 192 $кг/м^3$.

Туннельные печи для отжига изделий из шлакового литья. Из расплавленных шлаков путем отливки их в земляные или металлические формы получаются: дорожная брусчатка, тротуарные плиты, пористые блоки и т. д. Для кристаллизации и устранения внутренних напряжений в этих изделиях, имеющих стекловидную структуру, применяются туннельные печи конвейерного или ваготочного типа. Печи для отжига должны обладать широкой возможностью регулирования температурного режима, который устанавливается для каждой формы изделия в зависимости от оптимальной температуры и времени кристаллизации, термического коэффициента расширения, модуля упругости и т. д. Печи с садкой из блоков на вагонетке менее пригодны для равномерной тепловой обработки изделий, чем конвейерные печи, где на конвейере по высоте размещается только одно изделие (рис. 111). В конвейерной печи устанавливается один, два и более конвейеров, каждый длиной в среднем 10—30 *м*. Движение конвейера непрерывное или периодическое. Темп включения и ход конвейера выбираются из расчета времени пребывания изделия в печи.

Отжиг изделий из шлакового литья производится в печах, работающих на жидком или на газообразном топливе, или же в электрических печах.

8. Порядок расчета туннельных печей и их тепловые балансы

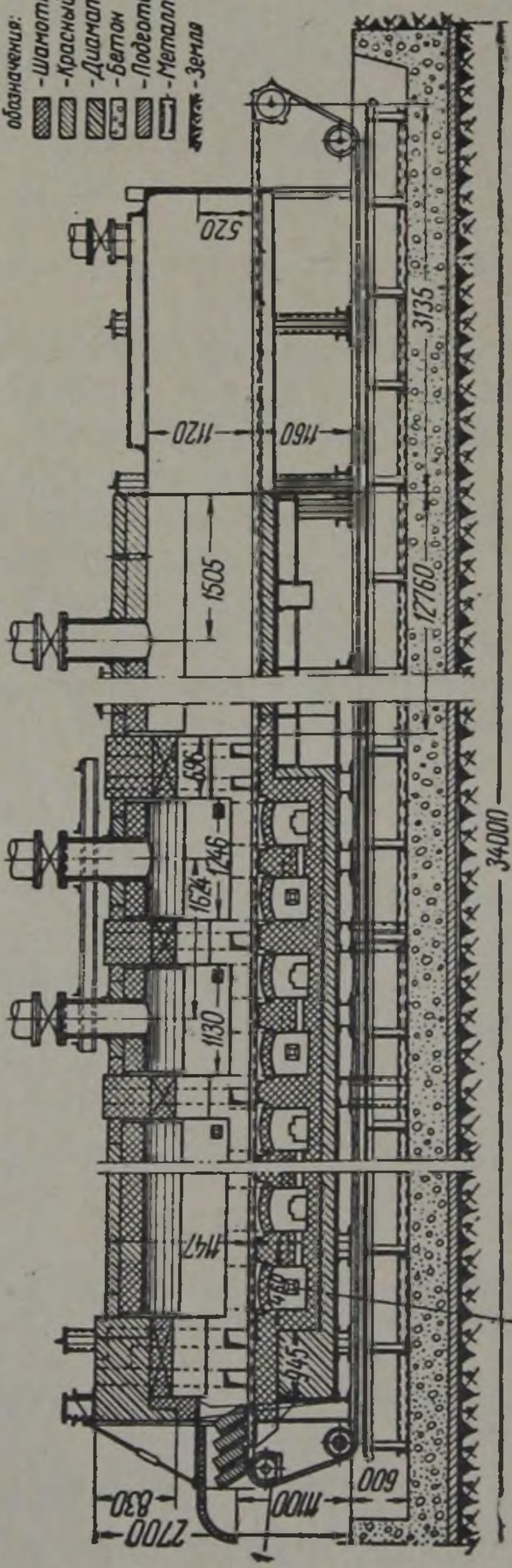
В основу расчета туннельной печи кладется предварительно составленная кривая обжига.

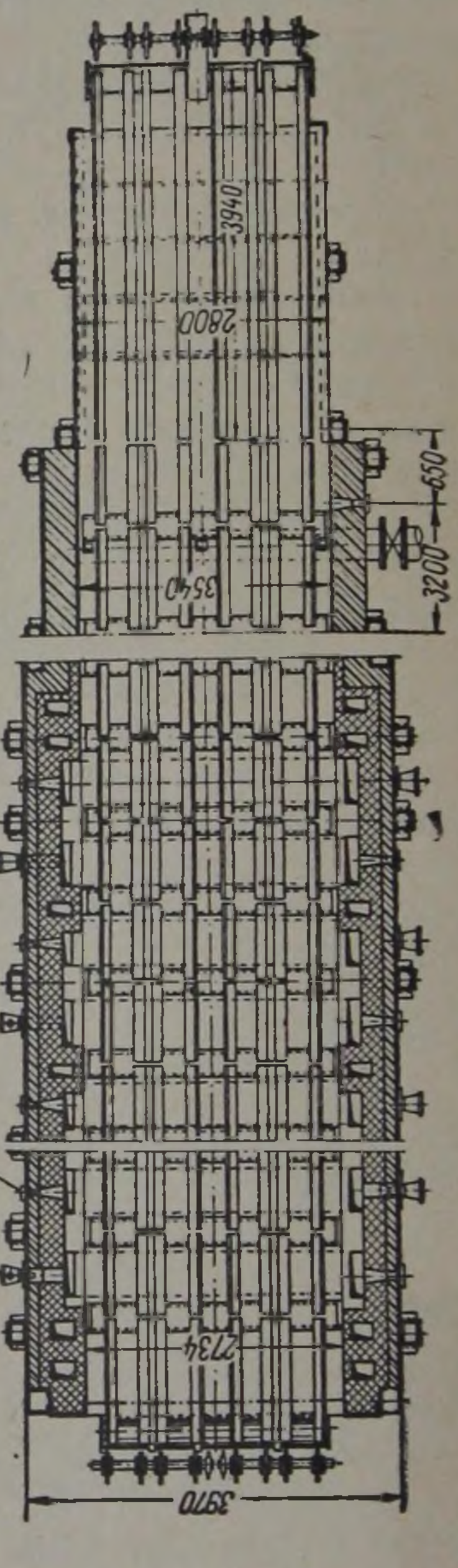
В табл. 31 представлены для каждого изменения температур $t'—t''$ в град. величины $\frac{\Delta t}{\Delta \tau}$ град/час, используемые при построении кривых обжига в некоторых из описанных выше туннельных печах.

По оси абсцисс на графике кривой обжига одна под другой откладываются три взаимосвязанные величины: время в час., дли-

Условные обозначения:

- Шамотный кирпич
- Красный кирпич
- Диаматовый кирпич
- Бетон
- Подготовка
- Металлы
- Земля





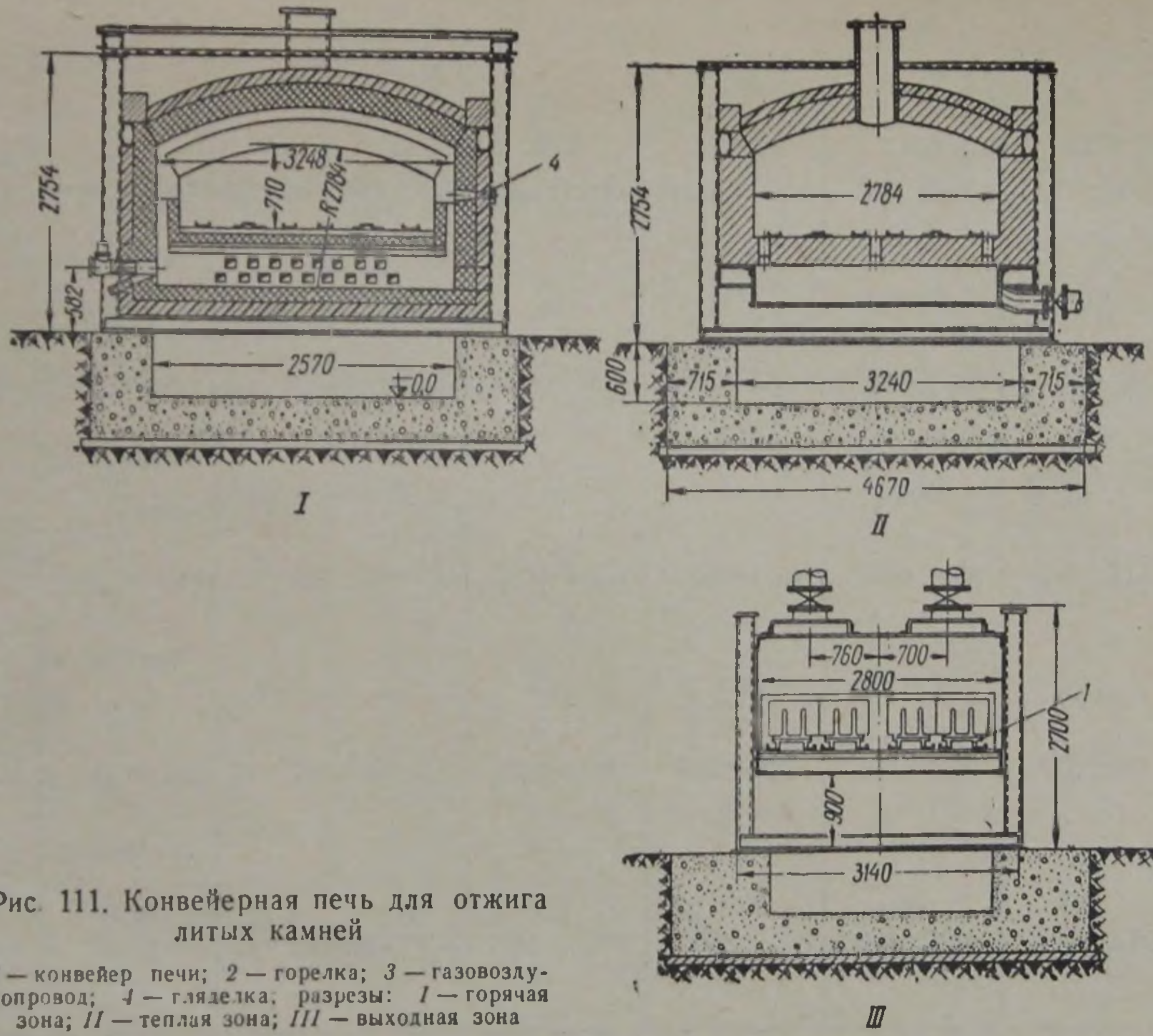


Рис. 111. Конвейерная печь для отжига литых камней

1 — конвейер печи; *2* — горелка; *3* — газовоздухопровод; *4* — гляделка; разрезы: *I* — горячая зона; *II* — теплая зона; *III* — выходная зона

Таблица 31

Значения температурных перепадов по кривым обжига для туннельных печей

Печь РСП, работающая на твердом топливе, для обжига строительного кирпича	$t'—t''$ в град.	20—600	600—800	800—1 000	1 000—1 000	1 000—700	700—300	300—50	
	$\Delta t/\Delta\tau$ в град/час	44,5	56	71	2 часа*	95	98	45,5	
Электропечь ГСМ для обжига строительного кирпича	$t'—t''$ в град.	20—200	200—650	650—950	950—950	950—600	600—50		
	$\Delta t/\Delta\tau$ в град/час	180	225	120	2 часа*	233	183		
Печь-сушилка ЦНИИСМ УССР для обжига строительного кирпича ($\omega_1 = 20\%$)	$t'—t''$ в град.	20—150	150—250	250—1 000	1 000—1 000	1 000—400	400—50		
	$\Delta t/\Delta\tau$ в град/час	10,8	25	94	7 час.*	200	43,5		
Печь ГСМ для обжига канализационных труб	$t'—t''$ в град.	20—200	200—600	600—950	950—1 200	1 200—1 200	1 200—850	850—500	500—50
	$\Delta t/\Delta\tau$ в град/час	30	80	44	41,5	2 часа*	70	43,5	50
Печь ГСМ муфельная для обжига цветных плиток	$t'—t''$ в град.	20—500	500—700	700—1 000	1 000—1 000	1 000—700	700—500	500—60	
		48	40	33,3	2 часа*	100	33,3	88	

* Выдержка.

на участка в м, номер вагонеток или позиций. Кривая обжига разбивается на зоны подогрева, обжига и охлаждения. Соотношение длин зон в различных печах приведено выше, при их описании. Зона обжига в среднем составляет 20—30%, зона подогрева для строительного кирпича около 40%, для бескапсельного обжига плиток около 20%, при муфельном обжиге плиток 33—35%. Остальная длина печи занята зоной охлаждения. Начало зоны обжига выбирается по кривой обжига, где температура материала 600—1000°*.

Затем на графике кривой обжига вычерчивается кривая температур газа и воздуха по результатам расчетов теплопередачи и тепловых балансов по участкам печи.

Основные размеры туннельной печи определяются после того, как найдена ее емкость $G_п$, выраженная в *т* или в других единицах ($м^2$ для плиток и т. д.):

$$G_п = Vg = \frac{G_{год}(1+0{,}01p)\,\tau_ц}{\tau_{год}}\ [т], \qquad \text{(VI-20)}$$

где V — рабочий объем туннеля печи в $м^3$;
g — плотность садки в $т/м^3$ ($м^2/м^3$);
$G_{год}$ — годовая производительность по годной продукции в *т/год* ($м^2$/*год*);
$\tau_ц$ — время пребывания изделий в печи в час.;
$\tau_{год}$ — число часов работы в году в час/год;
p — процент брака изделий и потерь на пути от входа в печь до поступления на склад готовой продукции. В зависимости от вида изделий допустимый процент $p = 2—8\%$.

На основе анализа работы аналогичных печей выбирается ширина туннеля B *м*; высота от пода вагонетки до замка свода H *м* и сечение F $м^2$. Длина одной вагонетки $l_{ваг}$ составляет 1 — 1,5 ширины туннеля. По предварительно выполненному эскизу расположения изделий на вагонетке находят g $т/м^3$, затем объем туннеля V и длину туннеля L:

$$V = \frac{G_п}{g}\ [м^3], \qquad \text{(VI-21)}$$

$$L = \frac{G_п}{gF}\ [м]. \qquad \text{(VI-22)}$$

Число вагонеток в печи вычисляется по формуле

$$n = L : l_{ваг} = G_п : G_{ваг}\ [\text{шт.}], \qquad \text{(VI-23)}$$

где $G_{ваг}$ — емкость одной вагонетки в *т/ваг* ($м^2$/*ваг*).

Часовая производительность печи равна

$$G = \frac{G_п}{\tau_п}\ [т/час]. \qquad \text{(VI-24)}$$

---

* Бо́льшие цифры при высокой температуре обжига и при топливе с бо́льшей температурой воспламенения.

Часовой выход вагонеток из печи определяется по формуле:

$$n_{час} = \frac{n}{\tau_ц} \text{ [ваг/час]}. \qquad \text{(VI-25)}$$

Число вагонеток в каждой зоне: $n_{под}$; $n_{обж}$; $n_{охл}$ находится из соотношений:

$$n_{под} = \frac{\tau_{под} n}{\tau_ц}; \quad n_{обж} = \frac{\tau_{обж} n}{\tau_ц}; \quad n_{охл} = \frac{\tau_{охл} n}{\tau_ц}, \qquad \text{(VI-26)}$$

где $\tau_{под}$, $\tau_{обж}$, $\tau_{охл}$ — время пребывания в соответствующих зонах в час.

Для расчета потерь во внешнюю среду необходимо выбрать конструкцию ограждения печи в каждой зоне и конструкцию пода вагонетки. Чем выше температура в печи и чем продолжительнее время пребывания вагонетки в зонах подогрева и обжига, тем лучшими теплоизоляционными свойствами должна обладать футеровка вагонетки.

Для заданного состава топлива делаются расчеты количества продуктов горения при разных избытках воздуха, увеличивающихся от зоны горения к месту отсоса их дымососом. Желательно в расчетах использовать заранее построенную *JtV*-диаграмму. Избыток воздуха берется у горелок от $\alpha = 1{,}05$ для высокотемпературного обжига до $\alpha = 3$ для низкотемпературного. Величина избытка воздуха уточняется по формуле расчета действительной температуры горения, принимая во внимание степень подогрева в зоне охлаждения воздуха, идущего на горение, при принятой схеме отбора воздуха на сушку. Газообразное топливо при необходимости может быть подогрето при проходе его в газопроводах над сводом печи. Действительная температура горения должна превышать максимальную температуру по кривой обжига не менее чем на 20—100°.

Несмотря на наличие уплотнения пода вагонеток и системы выравнивания давления в подвагонеточном пространстве некоторых печей, присосы воздуха в туннельных печах увеличивают общий избыток воздуха перед дымососом до $\alpha = 3 \div 5$.

Перед тепловыми расчетами намечается схема газовых и воздушных потоков печи, места отбора и подачи горячего воздуха, дымовых газов и т. д. Тепловые расчеты делаются для каждого характерного участка, на которые разбивается вся печь. При точных расчетах таких участков бывает около 10. Упрощенные расчеты могут быть сделаны для зоны охлаждения и для зон подогрева и обжига вместе.

Принимаются, далее, значения температур воздуха и дымовых газов на границах участков и при выходе из печи. Для каждого участка по общей методике составляется тепловой баланс.

Особенностями таких балансов для туннельных печей является расчет тепла, аккумулированного передвигающимися из участка на участок вагонетками. На первых участках зоны подогрева под вагонеток еще не прогрет и потери здесь в основном за счет аккумуляции тепла подом. Время прогрева пода и количество аккумули-

рованного им тепла определяется по формулам раздела второго, гл. II. После прогрева пода основными потерями через него будут потери в окружающую среду. В зоне охлаждения под начнет отдавать свое тепло, кроме окружающей среды, также и воздуху, проходящему в этой зоне по туннелю печи.

Если предварительно выбранные температуры газов на границе участков приведут к несовпадению полученных из расчетов балансов количеств сжигаемого топлива, то температуры газов уточняются и балансы заново пересчитываются. В результате этих расчетов может быть вычерчена на графике кривой обжига кривая температур газов и кривая температур воздуха.

Тепловой баланс составляется для расчетных участков зон и для всей печи в целом. Средними величинами расходных статей теплового баланса туннельных печей при обжиге строительного кирпича и керамических камней можно считать: испарение влаги при досушке сырца 4—8%, химические реакции в глине 8—12%, тепло выгружаемой продукции 1—3%, потери тепла в окружающую среду 10—20%, тепло, аккумулированное вагонетками, 1—4%, потери с уходящими газами 15—25%, тепло воздуха, идущего на сушилки, 30—40%, потери от химической неполноты горения и пр. 1—3%.

При обжиге сырца на твердом топливе могут появиться потери тепла от механического недожога как из-за зашлакования засыпанного топлива у ножек, так и вследствие недожога его при запрессовке в сырец. При неправильной организации обжига эти потери достигают 4—6%.

После определения по тепловым балансам температур газов и воздуха на различных участках необходимо проверить, обеспечат ли эти температуры необходимый теплообмен с обжигаемым материалом при той скорости газов и воздуха, которая обусловливается расчетными количествами продуктов сгорания и воздуха и выбранной системой садки изделий. Экспериментальные данные показывают, что скоростной и качественный обжиг возможен только в том случае, если скорость газов в каналах садки не менее 3—5 *м/сек*. Наоборот, снижение этой скорости приводит к расслоению газов по высоте канала, к проходу более горячих газов по верху садки и замедленному движению охлажденных газов по низу садки. В зоне подогрева, где идет досушка сырца, разница температур вверху и внизу может достигать 200—300° и выше. Тепловая обработка нижней части садки отстает, задерживая весь процесс в целом. Местное повышение скорости газов достигается применением рециркуляции на нужном участке или путем установки вентиляторов, перемещающих газы в поперечном сечении.

Для расчетов теплообмена по эскизу садки изделий определяется их активная поверхность, создающая каналы для прохода газов, и живое сечение этих каналов. Зная количество газов, проходящих по расчетному участку, можно определить скорость газов в каналах садки и рассчитать коэффициент теплоперехода по формулам раздела второго, учитывая как передачу тепла конвекцией, так и пе-

Таблица 32

Сравнительные характеристики туннельных печей для обжига строительной керамики

Тип туннельной печи	Наименование изделий	Температура обжига, град.	Продолжительность обжига, час.	Плотность садки на 1 м³ рабочего канала: кг/м³	шт/м³	м²/м³	Удельный расход условного топлива: кг/кг	кг на 1 000 шт.	кг на 1 000 м²	Месячный съем продукции с 1 м³ рабочего канала печи или муфеля: кг/м³ месяц	шт/м³ месяц	м²/м³ месяц
Печь Росстромпроекта на твердом топливе	Строительный кирпич	1 000	36	630	180	—	0,043	150	—	12 400	3 550	—
Печь Гипростройматериалы на электроэнергии	То же	950	12	210	80	—	—	—	—	12 000	4 600	—
Печь-сушилка ЦНИИСМ УССР	Строительный кирпич Сырец поступает с $w_1=20\%$	1 000	42	620	175	—	0,052	183, включая сушку	—	9 800	2 800	—
Печь Гипростройматериалы	Канализационные трубы	1 200	49	260	—	—	0,25	—	—	3 100	—	—
То же	Метлахские плитки	1 200	48	560	—	22,4	0,21	—	9 200	4 000	—	335
»	Утильный обжиг облицовочных плиток	1 280	50	715	—	59,5	0,174	—	2 090	6 400	—	530
»	Политой обжиг облицовочных плиток	1 180	30	333	—	27,8	0,17	—	2 040	5 750	—	480
Печь Гипростройматериалы, муфельная	Цветные плитки	1 000	40	240	—	20	0,32	—	3 800	4 100	—	340
Печь НИИСтройкерамики, 26-канальная муфельная	То же	1 050	4	64	—	5,3	0,265	—	3 180	15 600	—	1 300

редачу при высоких температурах тепла лучеиспусканием. Для расчетного участка выводится средневзвешенный коэффициент теплоотдачи по всем его поверхностям. Количество тепла, переданное от газов к материалу (или от остывающего материала к воздуху) на данном участке, определенное по величине поверхности теплообмена, коэффициенту теплоотдачи и разности температур между газами и материалом, должно быть не менее количества тепла, найденного при расчете статей в тепловом балансе участка, на нагрев материала и на совершающиеся здесь процессы испарения или химических реакций в материале.

Если это необходимо, при расчете участка должна быть решена и внутренняя задача — определение поля температур в изделии для оценки допустимости принятой скорости нагрева по разнице температур между поверхностью и центральными участками тела изделия. Если теплопередача по расчету окажется недостаточной, то следует увеличить скорости движения газов и поднять их температуру. Для определения снижения температуры газов на участке учитываются все имеющие место на нем тепловые потери. После окончания тепловых расчетов, подтверждающих правильность выбранных схемы движения газов и воздуха, температур и скоростей их, можно приступить к аэродинамическому расчету печи и к выбору вентиляторов, дымососов и эжекторов.

В табл. 32 даны характеристики туннельных печей для обжига строительной керамики по данным проектных организаций и научно-исследовательских институтов СССР, которые могут служить сравнительными при проектировании аналогичных печей.

9. Перспективы развития туннельных печей

Туннельные печи уже в настоящее время в значительной мере вытеснили ранее широко распространенные периодические газокамерные и кольцевые печи. Туннельные печи различных конструкций могут применяться для обжига самых разнообразных изделий, выпускаемых в массовом количестве: кирпича, керамических камней, плиток, труб, архитектурной керамики и т. д.

В дальнейшем будут применяться главным образом туннельные печи, так как их преимущества перед другими бесспорны.

Туннельные печи для грубой керамики могут работать на всех видах топлива, в том числе местного, твердого, без предварительной его газификации сжиганием в выносных топках, при ва-прессовке в сырец и при засыпке на садку. Широкое распространение природного газа, увеличение добычи нефти, рост выработки электроэнергии позволяют применять туннельные печи без сооружения дорогостоящих газогенераторных станций и для облицовочной керамики.

Количество горячего воздуха из зоны охлаждения значительно больше, чем требуется его для сжигания топлива, поэтому он может быть использован для сушки сырца от его формовочной или повышенной влажности в одном туннельном агрегате — в печи-

сушилке. Эти новые агрегаты имеют большое будущее для установки на кирпичных заводах, так как они экономят топливо, ликвидируют перегрузки сырца и подходят и для кирпичных заводов-автоматов.

Недостатком туннельных печей является применение в качестве подвижного пода поезда из вагонеток. Неуплотненность стыков между вагонетками вызывает повышенные присосы воздуха в печь, а большая толщина футеровки вагонеток замедляет обжиг изделий из-за значительной аккумуляции тепла в их поде.

У туннельных печей конвейерного типа нет этого недостатка. Перед вагонеточными печами они имеют ряд преимуществ: устранение тепла, аккумулированного подом вагонеток, высококачественная, индивидуальная теплообработка изделия вместо обработки в садке, ускорение продолжительности тепловой обработки в несколько раз, и наконец, возможность ликвидации участка с ручным обслуживанием — садку изделий на вагонетки и разборку ее.

В конвейерную печь сырец поступает с погрузочного конвейера, а из печи изделия разгружаются на конвейер готовой продукции также без применения ручного труда. Преимущества конвейерных печей делают их особенно перспективными для разработки подходящих конструкций и внедрения на керамических и кирпичных заводах при обжиге изделий небольшого размера.

Наряду с конвейерными печами перспективными являются и многоканальные муфельные печи, сроки обжига в которых в несколько раз меньше, чем в одноканальных печах при обжиге в садке.

Туннельные печи с вагонетками могут проектироваться для обжига крупноразмерных изделий, хотя и здесь возможно применение конвейерных печей при условии нахождения надежной конструкции конвейера для тяжелых изделий, работающего при высоких температурах.

Возможно применение туннельных печей со сплошным движущимся подом. Печной канал в этом случае выполняется в виде кольца, одинарного или двойного.

10. Техника безопасности при обслуживании печей для обжига керамики

Рабочие вынуждены загружать и разгружать камерные печи, не имеющие выдвижного пода, и кольцевые печи, входя в еще неостывшую печь.

Во избежание ожогов запрещается выгружать готовую продукцию, температура которой выше 50°. Рабочим после каждого часа работы предоставляется отдых на 15 мин. Для ускорения остывания продукции иногда применяется искусственное охлаждение печи и садки кирпича разбрызгиванием воды; улучшение условий выгрузки обеспечивается установкой против камеры передвижной вентиляционной установки.

Необходимо следить за исправностью изоляции переносных электроламп, которыми освещается печь при работе в ней, так как высокая температура портит изоляцию, создавая опасность поражения током.

Во избежание травматизма следует соблюдать осторожность при разгрузке высокой садки изделий, проверять исправность рельсовых путей и толкателей туннельных печей, поскольку неплавное передвижение вагонеток может обрушить садку, причинив травмы рабочим. Включение и выключение механизмов печи, подачи и выдачи вагонеток делается при помощи автоматической блокировки или по согласованному графику после звукового или светового сигнала. Если печь работает под давлением, нельзя открывать лючки в ограждениях, не снизив предварительно давление до атмосферного, чтобы не получить ожогов.

При работе печей на газообразном топливе или на электроэнергии необходимо соблюдать соответствующие правила техники безопасности.

Раздел седьмой
ПЛАВИЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

ГЛАВА I
ВАГРАНКИ ДЛЯ РАСПЛАВА ШЛАКОВ И ГОРНЫХ ПОРОД

1. Определение. Сырье и топливо. Процессы плавки

Вагранкой называется шахтная печь, служащая для расплава шихты и выдачи продукции в жидком виде. Расплав, вытекающий из вагранок при высоких температурах, или используется для изготовления отливок, или, будучи раздробленным на тончайшие застывающие в воздухе нити, идет на приготовление минеральной ваты и теплоизоляционных изделий из нее. Сырьем для плавки в вагранках служат металлургические и топливные шлаки, осадочные и изверженные горные породы: доломиты, известняки, глины, мергели, граниты, сиениты, а также отходы производства. Наиболее пригодными для расплава являются доменные шлаки и шлаки цветной металлургии. Мартеновские шлаки используются главным образом для понижения вязкости расплава. Топливные шлаки отличаются разнообразием свойств и ввиду большого содержания глинозема, тугоплавкости и вязкости требуют во многих случаях добавления до 50% плавней (доломит, известняк). Тугоплавкость приводит к снижению производительности вагранок и к повышению удельных расходов топлива. Горные породы обычно применяются в двухкомпонентных смесях с доменными шлаками или в сочетаниях кислой и основной горных пород. Большие затраты топлива на расплав горных пород требуют подбора легкоплавких смесей и составляющих с меньшим содержанием гидратной воды и карбонатов.

В процессе плавки сырья происходят сложные физико-химические процессы, сопровождающиеся эндо- и экзотермическими реакциями. К эндотермическим реакциям относятся дегидратация глин и диссоциация карбонатов. Кроме того, требуется тепло на расплавление шихты (см. раздел второй, гл. III).

К экзотермическим реакциям относятся реакции образования силиката и алюмината кальция. В приходной части материального баланса плавки шихты в вагранке: сырье и зола топлива; в расходной: расплав с включением золы топлива, унос шихты уходящими из вагранки газами (1—4%), гигроскопическая, гид-

ратная влага и углекислота разложения. Последние величины входят в потери при прокаливании. Количество сырья по отношению к расплаву составляет для горных пород в среднем 1,2—1,4, для шлаков коэффициент расхода сырья немногим больше единицы. При раздуве струи расплава получаются дополнительные потери: у летки около 5% и унос корольков около 3%, что дает соответственное увеличение коэффициента расхода сырья по отношению к вате. Практическая температура расплавления для шлаков 1200—1400°, для горных пород 1500—2000°, для смесей 1300—1500°.

Размеры кусков сырья в среднем 50—70 *мм*. Чрезвычайно важно для высокой производительности и равномерного хода вагранки, чтобы максимальный размер куска не превышал минимальный более чем в 1,5—2 раза.

К ваграночному топливу предъявляется ряд требований. Оно должно иметь высокую механическую и термическую прочность, фракционный состав его должен быть однороден, размеры кусков 50—120 *мм*, причем большие при больших диаметрах вагранки, чтобы дутье из фурм достигало ее центра.

Выход летучих при отсутствии использования тепла отходящих газов из вагранки не должен быть большим, так как летучие не сгорают в рабочем объеме вагранки и обусловливают дополнительную потерю от химической неполноты сгорания. Пористость ваграночного кокса не должна быть выше 40%. Реакционная способность во избежание восстановления углекислоты газов в верхних слоях шихты должна быть минимальной (не выше 25%). Зольность топлива влияет на конечный состав расплава, поэтому большое содержание золы в топливе нежелательно. В вагранках для минеральной ваты используется главным образом литейный или металлургический (доменный) кокс. Применение вместо кокса древесного угля ведет к некоторому снижению производительности вагранки, если одновременно не применяется подогрев воздушного дутья. Плавка на смеси кокса и литейного антрацита позволяет заменить часть дефицитного кокса антрацитом без изменения режима и производительности вагранки. Термоантрацит, используемый как топливо вагранок, получается в процессе постепенного нагрева антрацита в специальных печах, в результате чего он становится термостойким и вполне заменяет кокс. Торф машинной формовки размером 150—250 *мм* используется в смеси с коксом.

2. Схема работы вагранки

Вагранка (рис. 112) имеет в основном те же зоны, что описаны в газогенераторах и других шахтных печах. Отличием служит то, что в нижней части вагранки температура материала достигает температуры его плавления, и расплав струйками течет через холостую колошу кокса, собираясь перед выходом из вагранки в горне. Горном называется объем вагранки от пода до

оси первого ряда фурм. Высота его $H_г$ в вагранках для минерального расплава находится в пределах 400—700 *мм*. В горне расплав несколько охлаждается и выравнивает свой состав перед выходом в летку. Выше от оси фурм находится зона окисления, или кислородная зона, где углерод топлива обильно снабжается кислородом и сгорает в углекислоту. В этой зоне, в конце ее, температура газов максимальна и достигает 1500° и выше в зависимости от свойств топлива и характера дутья. За кислородной зоной по ходу газов расположена зона восстановления углекислоты в окись углерода. Размеры этой зоны по высоте зависят от высоты холостой колоши и других условий. Содержание CO_2 здесь, как видно из графика рис. 112, снижается по сравнению с максимальными значениями конца зоны окисления; содержание CO повышается до максимума. Количество свободного кислорода падает до минимума. Температура газов уменьшается, поскольку их теплота частично идет на эндотермические реакции восстановления и частично на нагрев шихты. Выше этой зоны находится зона подготовки, где материал и топливо подсушиваются и подогреваются проходящими к выходу газами. Производительность вагранки и температура расплава в сильной степени зависят от способа розжига и от правильности шихтовки вагранки.

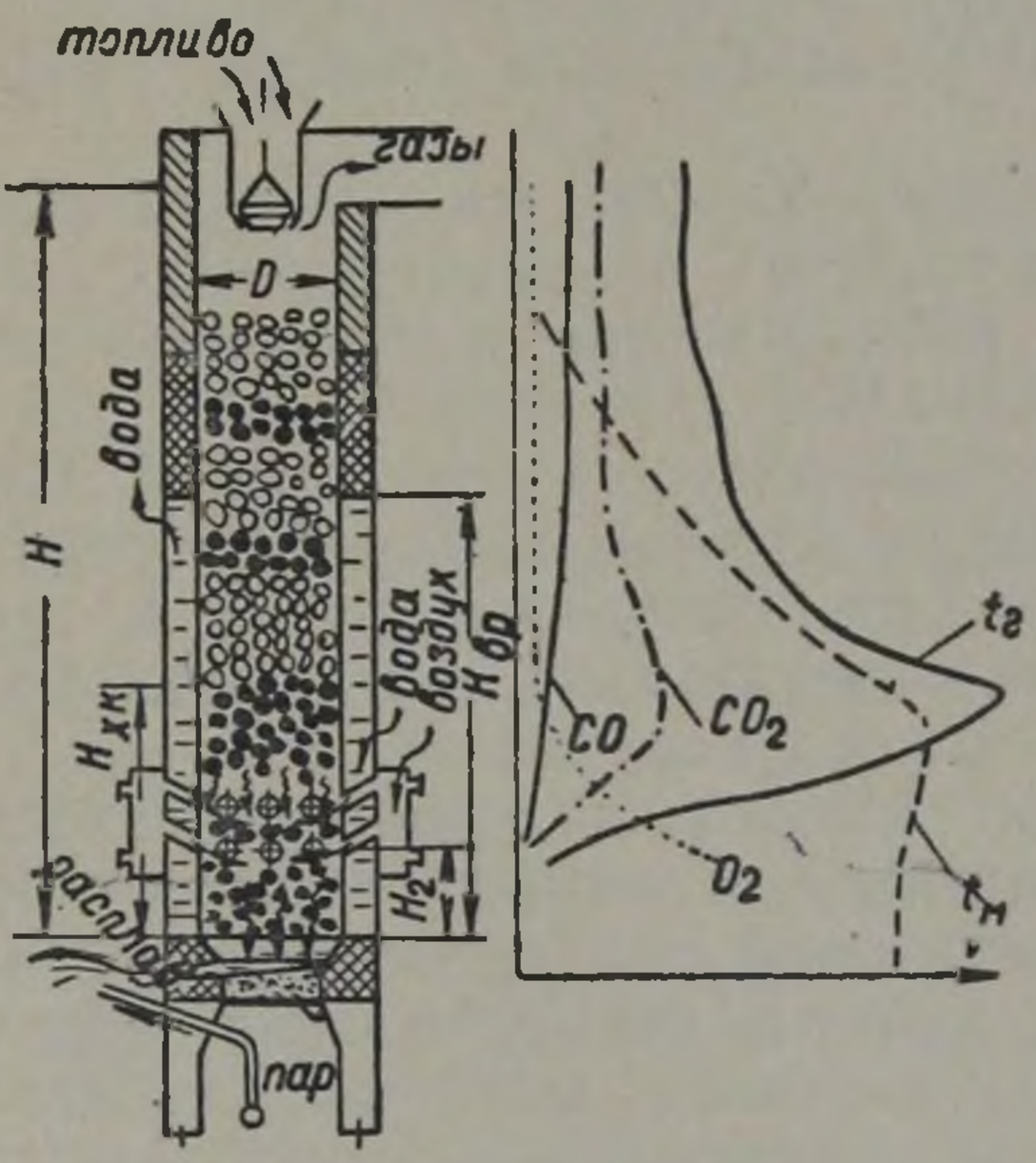


Рис. 112. Схема вагранки для расплава минерального сырья

H — высота вагранки; $H_г$ — высота горна; $H_{в.р}$ — высота водяной рубашки; $H_{х.к}$ — высота холостой колоши

Высота рабочей колоши кокса обычно равна 80—150 *мм*. Высота сырьевой колоши до 500 *мм*. Соотношение весов рабочих колош кокса и сырья, определенное по расчету и проверенное опытом, должно строго выдерживаться во время плавки.

Большое значение имеет и поддержание оптимальной высоты холостой колоши $H_{х.к}$: если ее высота окажется больше высоты кислородной зоны, то в верхней части, очевидно, будут идти интенсивно процессы восстановления, и плавление материала будет сопровождаться как перерасходом топлива, так и понижением температуры расплава. Если же высота холостой колоши будет ниже высоты кислородной зоны, то горение может происходить в пределах уже первой рабочей колоши топлива, что может вызвать спекание вышерасположенной рабочей колоши сырья. Кроме того, расплав будет иметь пониженную температуру и повышенную вязкость при истечении из летки. Холостая колоша

изменяется по высоте во время плавки: избыток кокса в рабочей колоше, помимо пополнения сгоревшего в холостой колоше, постепенно повышает ее высоту, что вызывает увеличение зоны восстановления и потери тепла от химической неполноты горения. Наоборот, при снижении веса рабочих колош кокса против оптимальных высота холостой колоши уменьшается, и температура в зоне плавления упадет, снижая производительность вагранки.

Высота вагранки H по отношению к ее диаметру D в существующих конструкциях колеблется в пределах от 2,5 до 7. Однако повышенное сверх 4—5 $\frac{H}{D}$ не может быть оправдано, так как вызывает и излишнюю затрату электроэнергии на дутье, и неравномерность распределения воздуха по сечению вагранки. Большая доля воздуха, уклоняясь от проникновения в центральные части объема, проходит вдоль стенок. Для улучшения воздухораспределения по объему в современных вагранках делают установку фурм не в один, а в два—три ряда по высоте. Основное количество воздуха (0,6 — 0,7) подается в нижний ряд фурм, тогда как назначение верхнего ряда фурм — выравнивать распределение воздуха в этой зоне.

Помимо загрузки шахты кусками близких размеров, правильного соотношения колош топлива и сырья, равномерной и интенсивной подачи воздуха по сечению с давлением 600 *мм* вод. ст. и выше, повышение производительности вагранки (на 50% и более) может быть достигнуто применением горячего (300—500°) дутья и обогащением его кислородом.

3. Конструкция и основные расчеты вагранок

Основными конструктивными элементами вагранок (рис. 113) являются: стальной корпус, футерованный огнеупором, водяная рубашка и дутьевые фурмы. Внутренний диаметр существующих вагранок 700—1 400 *мм*, высота шахты 2 300—7 000 *мм*. Общая высота вагранки выбирается с учетом необходимости размещения искрогасителя и достигает 20 *м*. На уровне загрузочного отверстия во избежание быстрого износа от ударов при загрузке футеровка выполняется из чугунных плит или клинкерного кирпича. В остальной части футеровка шамотная. В зоне высоких температур вместо футеровки устанавливается водяная рубашка, через полости которой пропускается охлаждающая вода. Сквозь водяную рубашку проходят фурмы. Выходная площадь сечения фурм должна составлять 20—30% сечения шахты вагранки, так как это способствует полноте снабжения воздухом и уменьшает их зашлаковку. Число фурм можно брать из расчета 1 на 300 ÷ 400 *мм* окружности вагранки. Сечение фурм — или круг (∅50 ÷ 150 *мм*), или прямоугольник. При расположении фурм в два яруса сечение верхних фурм составляет 30—40% от их общего сечения. Расстояние между осями горизонтальных рядов фурм 200—300 *мм*.

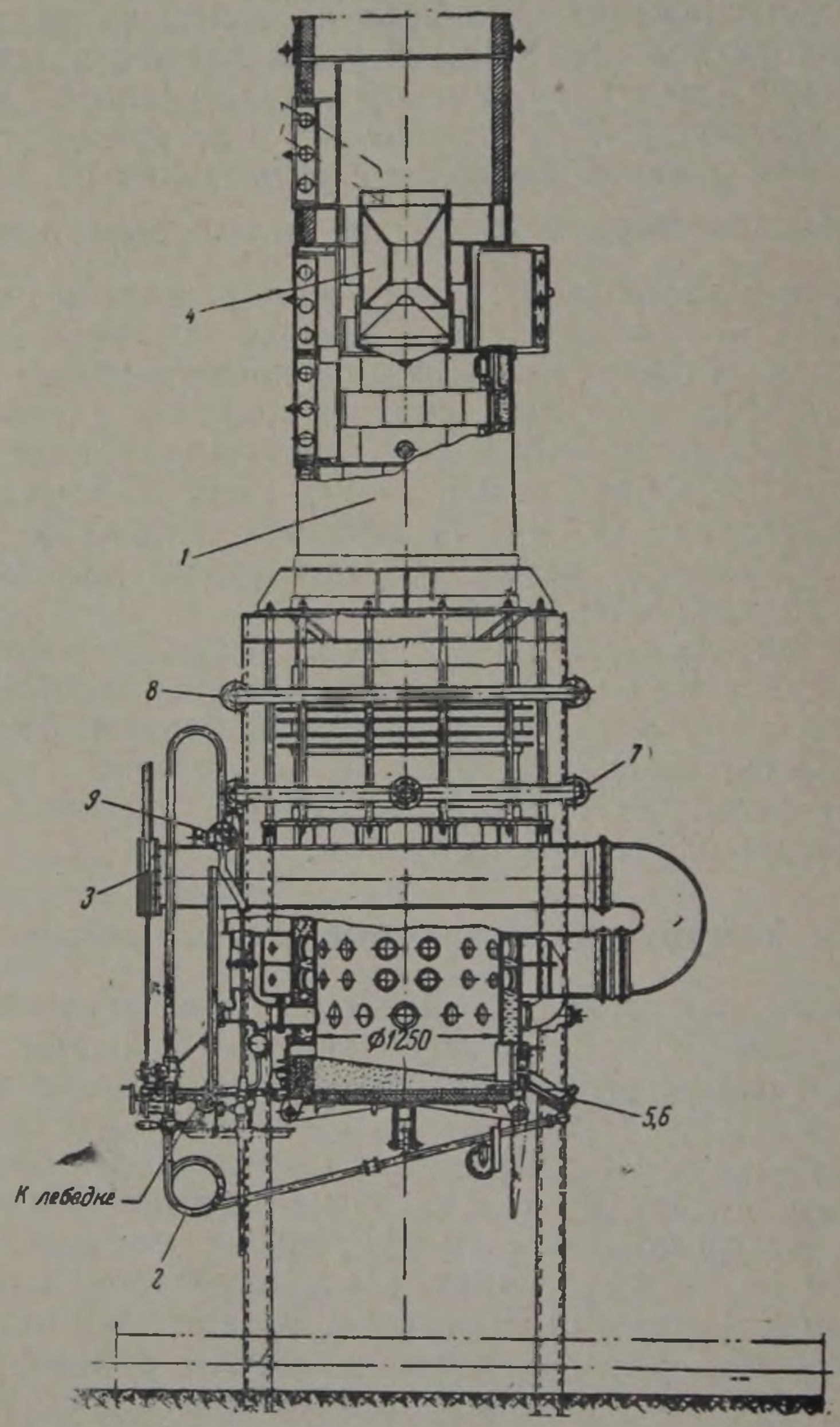


Рис. 113. Конструкция вагранки диаметром 1 250 *мм*

1 — вагранка; *2* — система раздува; *3* — шиберный затвор воздухопровода; *4* — распределитель шихты; *5* — летка с желобом; *6* — делитель на две струи; *7* — подвод воды; *8* — отвод воды; *9* — подвод пара

Если воздух к фурмам подводится от расположенного на корпусе вагранки кольцевого коллектора, то для обеспечения равномерности распределения воздуха по отдельным фурмам сечение этого коллектора должно быть в 1,5—2 раза больше суммы сечений всех фурм; подводящий к нему воздухопровод рассчитывается по скорости воздуха в 15—20 *м/сек*. Фурмы снабжаются смотровыми отверстиями и регулировочными клапанами, чтобы обеспечить возможность изменения расхода воздуха через фурму. Давление воздуха перед фурмами составляет 500—1 000 *мм* вод. ст. Под вагранки, или лещадь, заправляется сухим кварцевым песком с наклоном к летке. Вагранка или подвешивается лапами на перекрытии, или устанавливается на колоннах. Стальной корпус ее внизу имеет толщину 10—14, вверху 8—10 *мм*. Толщина стенки дымовой трубы 6—8 *мм*. Во избежание присосов холодного атмосферного воздуха загрузка вагранки должна производиться не через постоянно открытое окно, а аналогично практике работы газогенераторов, через уплотненные конусные затворы.

Сечение вагранки F выбирается по заданной производительности G *кг/час*, исходя из значений удельного съема расплава g_f *кг/м² час*:

$$F = \frac{G}{g_f} [м^2] . \qquad \text{(VII-1)}$$

Величина g_f зависит от целого ряда факторов. Она тем выше, чем выше (до известных пределов) удельный расход воздуха на 1 *м²* сечения, и уменьшается с увеличением тугоплавкости сырья. Эта величина находится в пределах $1\,000 \div 3\,000$ *кг/м² час*.

Удельный расход воздуха на дутье составляет $60 \div 120$ *нм³/м² мин*.

Удельный съем расплава с 1 *м³* шахты вагранки g_v находится в пределах $500 \div 800$ *кг/м³ час*.

Удельный расход условного топлива на 1 *т* расплава составляет от 120 до 250 *кг/т* в зависимости от плавкости шихты и величины вагранки. Меньшие цифры для больших вагранок и при плавке шлаков.

Часовой расход топлива уточняется при составлении теплового баланса вагранки. По часовому расходу топлива и избытку воздуха ($\alpha = 1{,}2 \div 1{,}3$) находится количество дутьевого воздуха. Полученная величина сверяется с рекомендуемой выше величиной.

4. Тепловой баланс

Тепловой баланс вагранки составляется по общей методике, изложенной выше. В приходе: 1) теплота сгорания топлива (95—98%); 2) теплосодержание топлива; 3) теплосодержание сырья; 4) теплосодержание воздуха; 5) теплота экзотермических реакций образования силикатов и алюминатов кальция.

В расходе: 1) тепло эндотермических реакций (10—20%); 2) теплота плавления сырья (3—5%); 3) теплосодержание уходящего расплава (20—30%); 4) теплосодержание водяных паров из сырья (1—8%); 5) теплосодержание уходящих продуктов разложения сырья и сгорания топлива (7—25%); 6) химическое тепло летучих, уходящих с продуктами сгорания (CO, H_2, CH_4 и т. д.), или химическая неполнота сгорания (15—20%); 7) потеря тепла от механического недожога топлива; 8) теплосодержание уноса материала и топлива; 9) теплота нагрева охлаждающей воды в рубашке (20—30%); 10) тепло рассеивания в окружающую среду (4—6%); 11) невязка баланса и неучтенные потери тепла. При плавке шлаков увеличены потери с уходящими газами и температура газов достигает 400—700°, зато резко уменьшены потери тепла на эндотермические реакции. Особенностью теплового баланса вагранок является следующее.

Вагранки для расплава снабжены водяными рубашками, устанавливаемыми в зоне высоких температур. Поверхность нагрева рубашки $F_{в\,р}$ зависит от диаметра вагранки и высоты водяной рубашки. Высота рубашки $H_{в.р}$ определяется границей, где начинается шамотная футеровка и температура газов около 800—900°. От общей высоты шахты высота рубашки составляет 60—70%. Коэффициент теплопередачи между газами при их средней температуре $t_г$ на этом участке и водой при температуре ее в полостях рубашки $t_в$ может быть принят по опытным данным в пределах $k = 50 \div 60$ *ккал/м² час град*, что определяет потерю тепла через водяную рубашку вагранки:

$$Q_{в.р} = F_{в.р} k\,(t_г - t_в)\,[ккал/час]\,. \qquad \text{(VII-2)}$$

Средняя температура газов на участке водяной рубашки зависит от высоты рубашки, числа рядов фурм и от величины максимальной температуры газов. Средняя температура газов на участке водяной рубашки может быть принята порядка 0,7—0,8 от максимальной температуры газов. Максимальная температура газов в свою очередь должна быть на 75—150° выше максимальной температуры расплава. Что касается средней температуры воды, то она зависит от того, по какой схеме происходит питание рубашки. При обычной проточной схеме без предварительной очистки воды от накипеобразователей температура воды, выходящей из рубашек, не должна превышать 70°, чтобы не допустить выпадения бикарбонатной накипи в полостях рубашки. Накипь, осевшая на горячих поверхностях рубашки, вызывает быстрый перегрев ее металла и образование прогаров, что выводит рубашку из строя.

При включении водяной рубашки в схему циркуляционного контура парового котла, питаемого конденсатом или химически очищенной водой, температура пароводяной смеси в рубашках может быть поднята до температуры кипения воды (120—200°С) при давлениях в котле 2—16 *ата* без заметного понижения эффекта охлаждения металла водяной рубашки. Таким образом может

быть определена величина тепловой потери через водяную рубашку $Q_{в.р}$. Эта величина в процентах к общему расходу тепла топлива в тепловом балансе будет зависеть от величин, входящих в формулу:

$$q_{в.р} = \frac{Q_{в.р}100}{Q} = \frac{\pi D H_{в.р} k\,(t_г - t_в)\,100}{\frac{\pi D^2}{4} g_f b_у \cdot 7\,000} \quad [\%] \qquad \text{(VII-3)}$$

или

$$q_{в.р} = 0{,}057\,\frac{H_{в.р}}{D} \cdot \frac{k\,(t_г - t_в)}{g_f b_у}\,[\%]\,. \qquad \text{(VII-4)}$$

Если в среднем можно принять $\frac{H_{в.р}}{D} = 2$ и $k(t_г - t_в) = 55\,000$ *ккал/м² час*, то потери через водяную рубашку, приведенные ниже, можно вычислить по формуле:

$$q_{в.р} \approx \frac{6\,270}{g_f b_у} \quad [\%] \qquad \text{(VII-5)}$$

Удельный расход условного топлива $b_у$ в *кг/кг* расплава		0,1	0,2	0,3
Удельные съемы с 1 *м²* поперечного сечения g_f в *кг/м² час*	1 000	62,7	31,4	20,9
	2 000	31,4	15,7	10,5
	3 000	20,9	10,5	7

Понижение тепловой мощности и сброс охлаждающей воды без использования ведут к большим потерям через водяную рубашку.

Как и всякая шахтная пересыпная печь, вагранка теряет много тепла от химической неполноты горения из-за восстановления углекислоты в верхних слоях топлива. Содержание CO в отходящих газах по опытам составляет от 6 до 10%. Соответственно потеря тепла от химической неполноты горения доходит до 25% и выше. Так как во многих опытах не делается полного анализа газов и остаточная статья баланса в них составляет 5—10%, то можно предполагать что потеря от химической неполноты часто превышает 30%. Значительный процент составляет потеря тепла с отходящими газами (10—20%).

При плавке горных пород эта величина меньше, что зависит от природной внешней влажности и большого содержания карбонатов в загружаемом камне. За полезное тепло в тепловом балансе вагранки принимаются затраты на эндотермические реакции дегидратации (глин) и диссоциации карбонатов, а также теплота плавления и физическая теплота или теплосодержание расплава. К. п. д. вагранки составляет в среднем 30—40%.

5. Пути усовершенствования вагранок

Существующая схема вагранки, поскольку тепловые потери ее велики, не может считаться совершенной. К тому же она приспособлена для работы главным образом на дорогом коксе, по-

скольку применение топлив с большим выходом летучих еще более увеличит потери от химической неполноты сгорания. Поэтому в СССР и в США предложены котло-ваграночные агрегаты, водяная рубашка которых включена в систему циркуляции пристроенного парового котла, использующего тепло отходящих из вагранки газов. Тепло химической неполноты горения переходит в камере дожигания, находящейся между вагранкой и котлом, в физическое тепло газов, почему температура их перед котлом повышается до 900—1000°. Явление повышения температуры ваграночных газов после смешения с воздухом и догорания их известно и из практики чугунолитейных вагранок.

Котло-ваграночный агрегат дает за счет использования тепловых потерь 0,6 *т* пара на 1 *т* расплава, что значительно разгружает основную котельную. При применении за вагранкой теплоиспользующих установок можно заменить часть кокса местным топливом, так как повышенная неполнота сгорания будет сразу после дожигания использоваться в утилизаторе тепла. В вагранке при этом организуется своеобразный «верхний газогенератор». Если после котла расположен подогреватель воздуха, то за счет использования тепловых потерь вагранки можно в нее подавать горячее дутье, что повышает производительность вагранки на 20—30%. Дальнейший путь усовершенствования вагранки — обогащение ее дутья кислородом, что особенно целесообразно при тугоплавком сырье. Подачу кислорода можно делать в зону горения через фурмы медными трубочками диаметром 3—5 *мм* под давлением после редуктора 2—8 *атм*. Кислородная станция состоит из секций по 10—20 шт. баллонов с кислородом при давлении 100—150 *атм*. Баллоны соединены медными магистральными трубками. Для регулирования подачи кислорода устанавливаются вентили, газовые счетчики, редукторы. Обогащение дутья кислородом ведет к экономии топлива на 20—30% и к повышению производительности на 30—50%.

ГЛАВА II

ВАННЫЕ И ДРУГИЕ ПЛАВИЛЬНЫЕ ПЕЧИ ДЛЯ РАСПЛАВА МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ И ГЛАЗУРИ

Вагранки приспособлены для работы на крупнокусковом сырье и топливе. Отопление вагранок пылеугольным топливом, мазутом и газом хотя и проводится на практике, но в крайне ограниченных пока масштабах. Работа вагранок на сыпучем сырье невозможна без его предварительного брикетирования, поэтому плавку сыпучих материалов на газе, мазуте и угольной пыли можно производить или в печах, где материал находится во взвешенном состоянии, в вихревом движении, или в ванных, горшковых и в специальных вращающихся печах. Установки для плавки во взвешенном состоянии напоминают вихревые или

циклонные топки с жидким шлакоудалением. Они еще проходят стадию экспериментирования. Поэтому для сыпучего сырья применяется плавка шлаков в ванных печах, аналогичных стекловаренным, но без студочной их части. Эти печи работают с полным подогревом всей ванны на газе, причем низкокалорийный газ и воздух подогреваются в регенераторах (рис. 114, *а*), на мазуте с подогревом только воздуха или в электрических печах

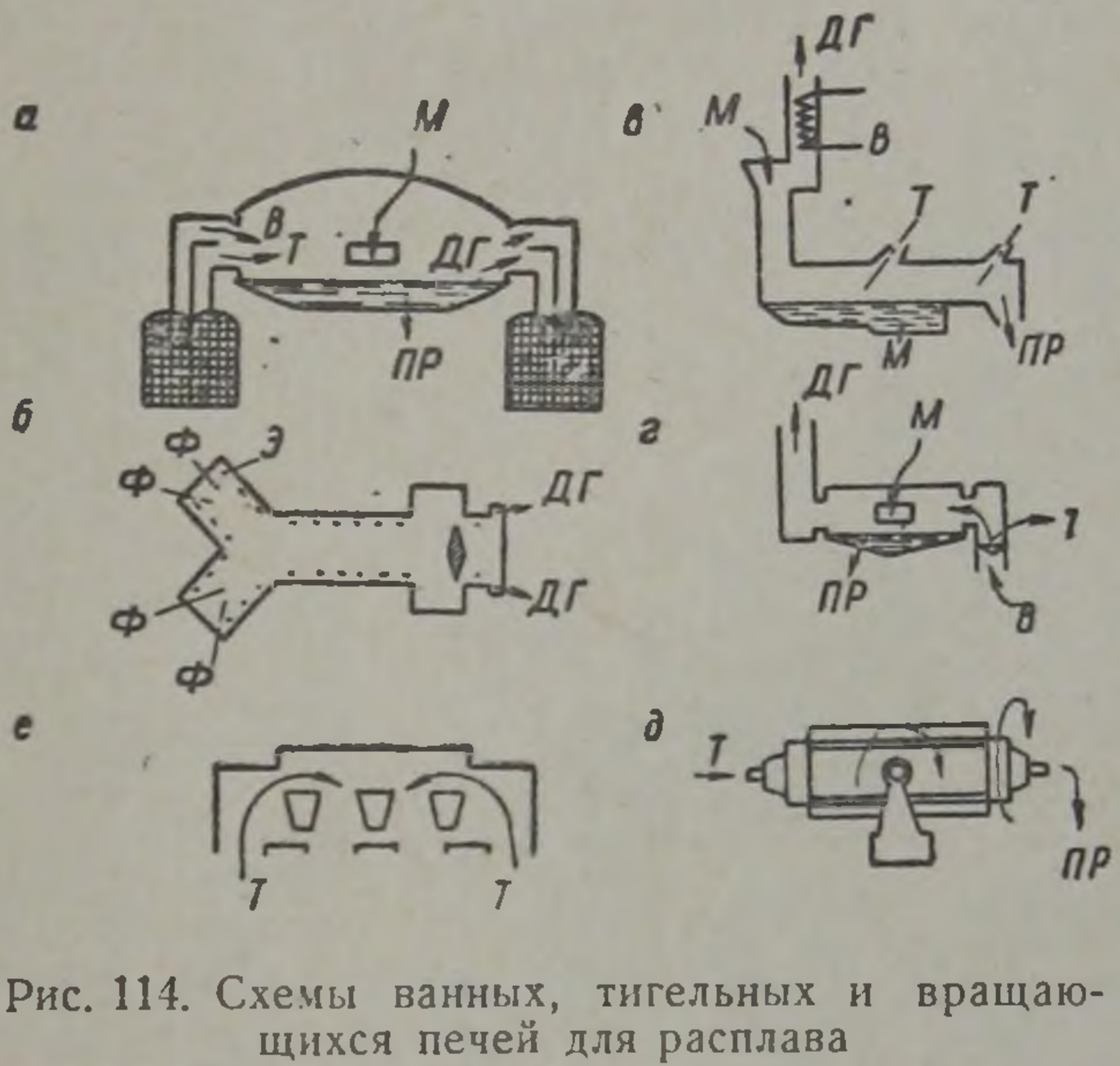


Рис. 114. Схемы ванных, тигельных и вращающихся печей для расплава

Т — топливо; *В* — воздух; *М* — материал; *ПР* — выход продукта; *ДГ* — дымовые газы; *Ф* — форсунки; *Э* — электроды

прямого сопротивления (см. рис. 114, *б*). Вместо регенераторов в последнее время начинают внедрять рекуператоры с прямоточной схемой ванной печи (см. рис. 114, *в*). Коэффициент полезного действия ванных печей на газе невысок — 20—30%. Почти половина всего тепла из-за недостаточной теплоизоляции уходит через сильно развитую поверхность в окружающую среду. Без запечных утилизаторов 25% тепла теряется с уходящими газами. Съем с 1 $м^2$ зеркала ванны составляет 1—2 *т/м² сутки.*

Печи с электрическим обогревом вследствие большей компактности имеют к. п. д., повышенный до 50%, и потери в окружающую среду, сниженные до 20—25%. Электрические печи имеют хорошую регулируемость режима и дают высокое качество расплава. Они весьма перспективны.

В производстве облицовочных изделий употребляются глазури, из них фриттованные получаются расплавлением в печах шихты различного состава. Продолжительность варки глазури в наиболее распространенных, ванных (рис. 114, *г*), печах 5—10 час.,

съем фритты 250 ÷ 300 *кг/м²*, удельный расход условного топлива 1 ÷ 1,3 *кг/кг*. Установка двух последовательно расположенных по ходу газов ванн снижает удельные расходы топлива.

Во вращающихся печах удельные расходы топлива меньше на 30—50%. Печь представляет собой (рис. 114, *д*) стальной барабан, футерованный огнеупорами. Он может вращаться вокруг

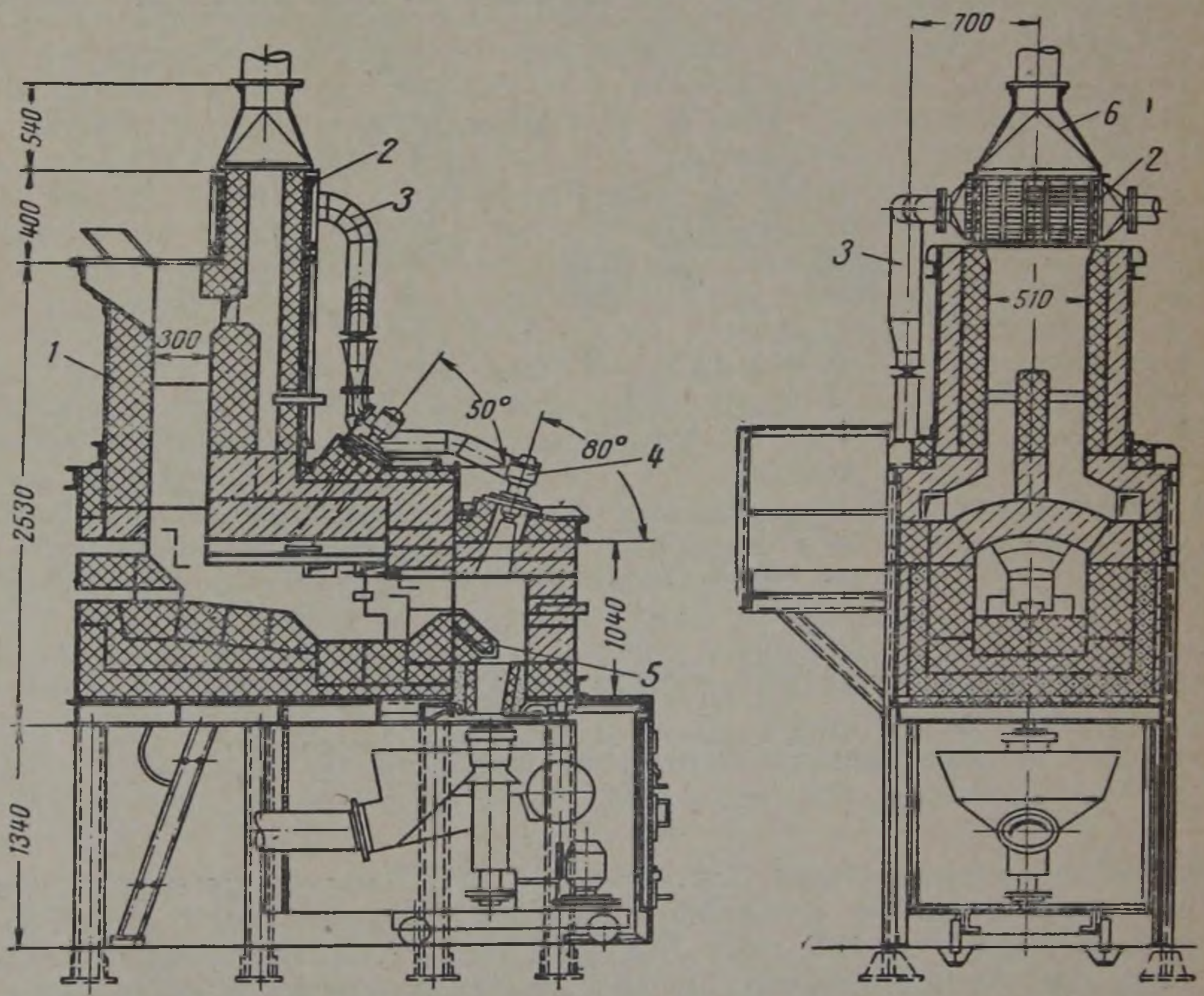


Рис. 115. Шахтно-ванная печь

1 — печь; *2* — рекуператор; *3* — воздуховод; *4* — газовые горелки низкого давления; *5* — водоохлаждаемый лоток; *6* — вытяжная труба

продольной оси и принимать наклонное положение для слива готовой фритты. Вращающаяся печь отапливается газом или нефтью.

Вращение печи сначала производится периодически по мере загрузки шихты и постепенного ее расплавления. Затем печь вращается без перерывов до конца процесса, который здесь сокращен в зависимости от емкости печи до 30—90 мин. Применяются вращающиеся печи с внутренним диаметром 400—1 000 *мм*,

длиной до 2,5—3 *м*. Мощность электродвигателя 0,2—2 *квт*. Вращающиеся печи удобны в работе, качество фритты высокое.

Тигельные печи представляют собой такие печи (рис. 114, *е*), в которых плавка глазури происходит в огнеупорных (шамотных) тиглях. Таких тиглей в печи может быть один, два и более. Ввиду значительной трудоемкости процесса варки в тиглях такие печи употребляются для высококачественной глазури.

В шахтно-ванной печи Теплопроекта при площади ванны 1,1×0,6 $м^2$ съем доходит до 4—5 $т/м^2$ *сутки*. Повышение съема обеспечивается предварительным сильным подогревом шихты отходящими газами в шахте (рис. 115).

Футеровка плавильных печей работает при высоких температурах и агрессивном воздействии расплавов, поэтому она выполняется особо тщательно с применением высокостойких муллитовых, динасовых и других подобных огнеупоров. При эксплуатации печей необходимо постоянно следить за состоянием футеровки, кладки и кожуха, не допуская их износа, который грозил бы вытеканием горячего расплава через повреждение наружу. Водяные рубашки вагранок желательно питать очищенной от накипеобразователей водой или, по крайней мере, своевременно очищать от накипи водяную полость. Накипь вызывает пережог металла рубашки с огневой стороны и может закупорить подвод и отвод охлаждающей воды, привести к нерасчетному парообразованию в рубашке и к ее взрыву. При использовании в плавильных печах газообразного топлива необходимо соблюдать ранее приведенные основные правила техники безопасности для газового хозяйства.

ГЛАВА III

АППАРАТЫ ДЛЯ ПЛАВКИ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ

Органические вяжущие вещества: битум, деготь, пек, смолы используются в промышленности строительных материалов для приготовления кровельных материалов, асфальтовых плиток для полов и т. п.

1. Варочный котел с неогневым обогревом

Для расплавления и смешения составляющих пропиточной массы (дегтя и пека) используют котел с неогневым обогревом, носящий название «толевый смеситель» (рис. 116). В нем подогрев производится паром или горячим маслом, проходящим через глухие змеевики, расположенные концентрично со стенкой корпуса, и через двойное коническое дно смесителя. Обогрев

дна необходим, так как на днищах без обогрева образуется слой нерасплавленного пека, который под длительным влиянием высоких температур превращается в трудноочищаемую твердую массу.

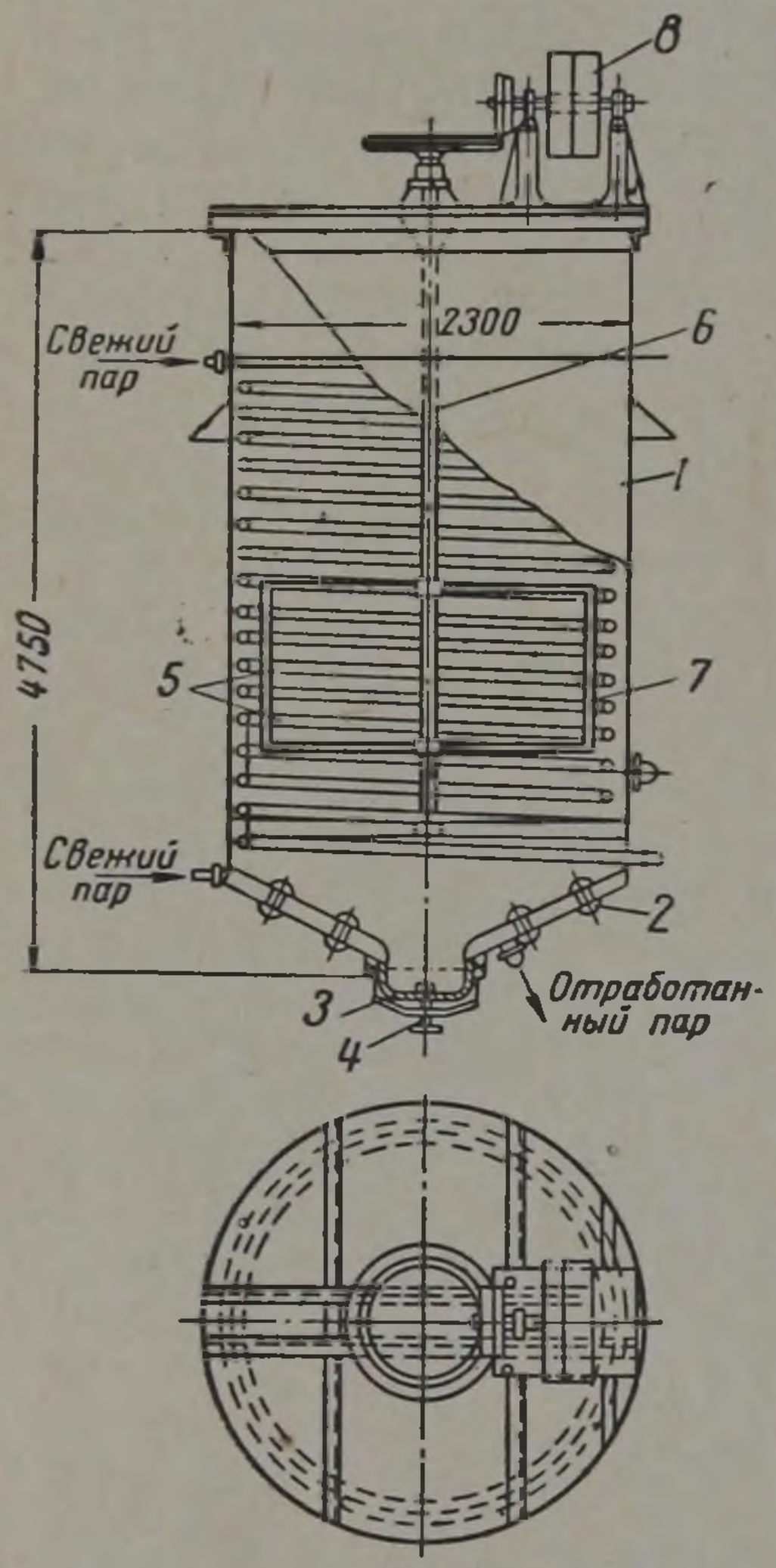


Рис. 116. Варочный котел с неогневым обогревом

1 — корпус; *2* — двойное дно; *3* — крышка люка; *4* — прижимной винт; *5* — змеевик; *6* — вал мешалки; *7* — мешалка; *8* — привод

В котле установлена мешалка с механическим приводом от электродвигателя. Широко распространенный варочный котел-смеситель имеет следующие размеры: диаметр 2,3 *м*, высота цилиндрической части корпуса 4 *м*, полезная емкость 12 $м^3$. Поверхность нагрева змеевиков (диаметр 50 *мм*) 40 $м^2$, днища 4,5 $м^2$. Число оборотов мешалки 22,5 об/мин, мощность привода 3,6 *квт*. Толщина стенок корпуса 8—10 *мм*. Расчетная конечная температура пропиточной массы 120—125°. Полный цикл работы котла 16 час.: залив, нагрев и обезвоживание дегтя 2 часа, загрузка и расплавление пека 8 час., проварка массы 2 часа, слив готовой массы в пропиточные ванны 4 часа. При удельном весе пропиточной массы, равном 1,25 $т/м^3$, выдача продукции за цикл будет 15 *т/цикл* или 23 *т/сутки*.

Расчет теплового баланса смесителя

В расходную часть баланса тепла входят следующие статьи:

а) нагревание каменноугольного дегтя:

$$Q_д = G_д c_д \left(t''_д - t'_д \right) [ккал] , \quad \text{(VII-6)}$$

где $G_д$ — вес дегтя в *кг*. Обычно он составляет 20% от общего веса смеси;

$c_д$ — теплоемкость дегтя, равная 0,5 *ккал/кг град*;

$t''_д$ — конечная температура нагрева дегтя, равная 120—125°;

$t'_д$ — начальная температура дегтя, предварительно нагретого в напорном баке, равная 35—40°.

б) нагрев и расплавление пека $Q_п$. Этот расход определяется по аналогичной формуле, но с учетом тепла на расплавление пека из расчета его веса в 80% от общего веса загрузки и начальной температуры $t'_п \approx t_{о.с.}$;

в) расход тепла на нагрев и испарение влаги из сырья $Q_{вл}$ определяется по обычной формуле $(595 + 0{,}47\ t_c'' - t_c')W$, принимая во внимание, что влаги W в сырьевых материалах 3—6%;

г) потеря тепла в окружающую среду корпусом аппарата $Q_{о.с}$.

Эта потеря, как и для всякого периодически работающего аппарата, рассчитывается по средней разности температур в аппарате и в окружающей среде отдельно по периодам нагрева, варки и слива.

Расчет общего коэффициента теплопередачи через стенки корпуса и теплоизоляцию производится по ранее приведенным формулам. Коэффициент теплоотдачи от обрабатываемой массы к стенкам может быть принят равным $\alpha_1 = 100 — 150$ *ккал/м² час град.*

Сумма потерь $Q_д$, $Q_п$, $Q_{вл}$, $Q_{о.с}$ дает общий расход тепла, который должен быть покрыт теплом пара или греющего масла. Для определения графика расхода теплоносителя этот расход может быть определен по периодам варки.

Расход пара определяется по расходу тепла

$$D\tau = \frac{Q}{i - i_к}\ [кг/период], \qquad \text{(VII-7)}$$

где D — средний за период расход пара в *кг/час*;
τ — длительность отдельного периода в час.;
Q — расчетный расход тепла за период в *ккал/период*;
i — теплосодержание пара в *ккал/кг*;
$i_к$ — теплосодержание выходящего из аппарата конденсата пара в *ккал/кг*;

При обогреве маслом расход его вычисляется по формуле

$$G_м\tau = \frac{Q}{c_м\,(t_м' - t_м'')}\ [кг/период], \qquad \text{(VII-8)}$$

где $G_м$ — средний за рассматриваемый период часовой расход греющего масла в *кг/час*;
$c_м$ — теплоемкость применяемого масла в *ккал/кг* град.; $c_м = 0{,}5 \div 0{,}6$ *ккал/кг град*;
$t_м'$ и $t_м''$ — температура масла при входе и выходе из аппарата в град., $t_м''$ должна быть не менее 150°.

Необходимая поверхность нагрева змеевиков и днища F рассчитывается по максимальному часовому расходу тепла аппаратом $Q_{макс}$ *ккал/час*

$$F = \frac{Q_{макс}}{k\Delta t_{ср}^{лог}}\ [м^2], \qquad \text{(VII-9)}$$

где k — коэффициент теплопередачи от теплоносителя (пар, масло) к пропиточной массе в *ккал/м² час град*. Он определяется по отдельным тепловым сопротивлениям, как обычно. В среднем $k = 50$ *ккал/м² час град*;
$\Delta t_{ср}^{лог}$ — средняя логарифмическая разница температур в град.

При эксплуатации аппарата необходимо обеспечить своевременную очистку поверхности нагрева, как снаружи так и изнут-

ри от отложений (корки продукта, накипь), и выпуск из греющих полостей воздуха. Без этого коэффициент теплопередачи в эксплуатации будет быстро падать, что вызовет снижение фактической производительности аппарата.

2. Варочный котел с огневым обогревом

Варочный котел с огневым обогревом (рис. 117) используется для плавления и варки битумов, применяемых в качестве пропиточных и покровных масс. В обмуровке для удобства обслуживания помещаются два котла, каждый с размерами: диа-

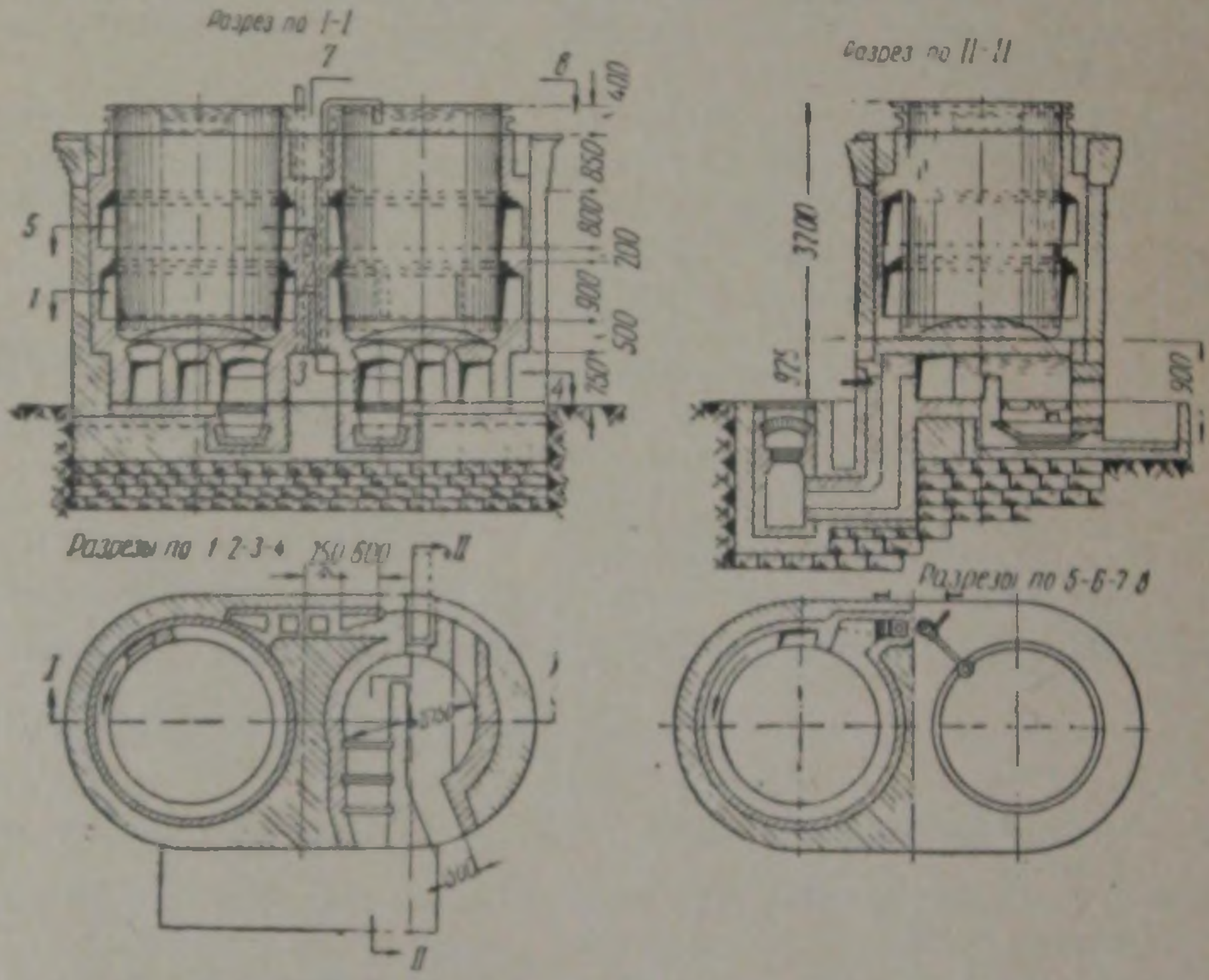


Рис. 117. Варочный котел с огневым обогревом

метр 2,2—2,4 *м*, высота 3,7 *м*. Полезная емкость 12,8 $м^3$. Поверхность нагрева 14 $м^2$. Вес металла 5 *т*. Расчетная производительность 8—15 *т/сутки* в зависимости от степени предварительного подогрева битума. Котлы при твердом топливе оборудованы дутьевой топкой с площадью колосниковой решетки 0,8 $м^2$. Продукты сгорания омывают защитный свод под днищем и проходят сначала в нижний, а затем в верхний кольцевые дымоходы, обогревая при этом боковые стенки котла. Затем газы по двум вертикальным дымоходам уходят в боров к дымовой трубе. Схема этого котла, как теплообменного аппарата, крайне несовершенна. Большая масса материала обогревается в неподвижном состоянии через относительно малую поверхность нагрева. Высокая

температура греющих газов недопустима из-за опасности пережога стенок при плохом их охлаждении обогреваемым материалом, низкая же температура уходящих газов невозможна, так как она должна быть значительно выше температуры материала. Температура варки пропиточной массы 180°, покровной 230°, температура газов после котла 400—500°. Эти условия приводят к повышенной потере с уходящими газами. Длительность процесса обусловливает относительно большие потери в окружающую среду. В целом к. п. д. такого котла не превышает 30%. Методика теплового расчета варочного котла аналогична тепловому расчету гипсоварочного котла с учетом теплофизических характеристик, присущих битуму. Теплоемкость битума принимается при температуре 60° 0,46 *ккал/кг град*; при температуре 220° 0,50 *ккал/кг град*. При варке битума отделяются легкие фракции, имеющие скрытую теплоту испарения 60 *ккал/кг*. Количество их около 1% от веса массы. Испаряется вода, содержание которой около 3—6% от веса массы. Общий коэффициент теплопередачи от газов через стенки варочного котла к битуму, по данным практики, равен 6—8 *ккал/м² час град*, т. е. весьма низок.

3. Трубчатая печь

В отличие от варочного котла с обогревом битума в неподвижном состоянии, в трубчатых печах обогрев битума до 200° происходит во время циркуляции его под напором насосов в

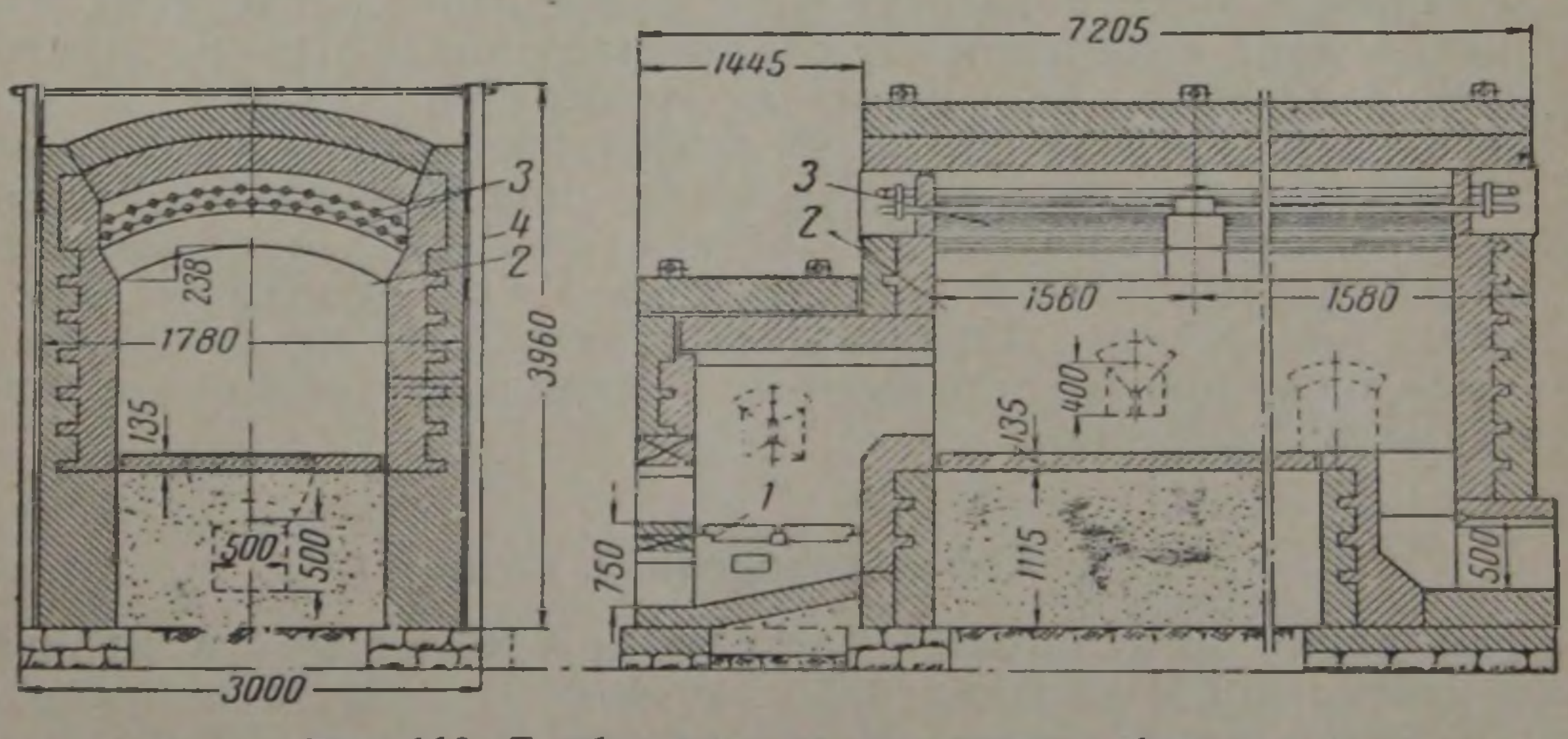


Рис. 118. Трубчатая печь для нагрева битума

1 — колосниковая решетка; *2* — рабочая камера; *3* — трубчатая поверхность нагрева; *4* — каркас

трубах, обогреваемых газами из топки (рис. 118). Поверхность нагрева такой печи состоит из двух рядов труб, расположенных под сводом печи. Диаметр труб печи, применяемой в кровельной

промышленности, около 60 *мм*. Для удлинения пути пропиточной массы в зоне нагрева и увеличения скорости циркуляции трубы соединены последовательно в общий змеевик калачами с фланцами на асбестовых прокладках. Число труб 30 шт., длина каждой 5 180 *мм*, поверхность нагрева равна 26 *м²*. Коэффициент теплопередачи от газов к циркулирующему битуму значительно выше, чем к неподвижному, и достигает 50—100 *ккал/м² час град* в зависимости от скорости циркуляции битума. К. п. д. трубчатой печи 50—70%. Трубчатые печи различных конструкций широко распространены на нефтеперерабатывающих заводах. Расчет трубчатой печи ведется как непрерывно действующей тепловой установки при подогреве массы в процессе циркуляции от температуры в сборнике 90—95° до конечной 200—220°.

4. Конверторы

Конвертор представляет собой горизонтальный цилиндрический котел для производства битумов методом окисления. Конвертор, заполненный битумом на 50—70%, нагревается газами из топки, расположенной под ним. После достижения температуры 180—200° масса усиленно продувается воздухом. Окисление битума — экзотермическая реакция, поэтому дальнейший рост температуры до конечной 220—230° происходит при выключенной топке. Повышение температуры окисления до 300—350° и ввод перегретого пара позволяют ускорить цикл окисления, увеличить производительность конверторов, а применение конденсационной установки дает возможность использовать конденсат выпара как топливо для печей. При размерах конвертора $D=2{,}5$ *м*, $L=8$ *м* и поверхности нагрева его 30 *м²* длительность процесса составляет 30—50 час., из них закачка 1 час, подогревание 9 час., отгонка легких фракций (20%) 10 час., окисление в зависимости от марки битума 10—30 час., выкачка 1 час, подготовка к следующему циклу 1 час. Загрузка составляет 25 *т*, выход битума — 20 *т*. Расход условного топлива 6%. Расход перегретого пара 100% по весу легких фракций.

5. Асфальтоварочные печи

Для варки асфальтовой мастики при непрерывном процессе применяется вращающаяся печь системы Поплавского с наружным и внутренним обогревом топочными газами. Продолжительность варки в ней 1,5—2 часа, тогда как в обычных варочных котлах с мешалками 7—8 час. Кратковременность пребывания асфальта во вращающейся печи обусловливает необходимость устройства после нее запасного подогреваемого бункера для дозревания массы. Температура асфальтовых материалов при входе в печь 60°, при выходе 170—190°. Размеры печи: $D=2{,}2$ *м*; $L=14$ *м*; наклон к горизонту 3°.

6. Условия обслуживания аппаратов для варки органических вяжущих

Органические вяжущие требуют особенно внимательного отношения к себе при их тепловой обработке, так как нарушение правил эксплуатации котлов может привести к пожарам.

Топочные газы, часто используемые как теплоноситель, обогревают металлические стенки котлов при высокой температуре и, если с внутренней стороны стенка котла не будет достаточно охлаждаться продуктом из-за загрязненности отложениями или из-за плохой циркуляции продукта, то она перегреется, прогорит, и вытекающая масса воспламенится. Поэтому надо строго проводить систематическую, не реже 1—2 раза в месяц, очистку внутренней поверхности нагрева варочных аппаратов от загрязнений и следить за местными перегревами стенок. Так как перегрев массы ведет к разложению битума, выделению и вспышкам газообразных продуктов, необходимо точно выдерживать заданный температурный режим варки, оборудовав эти аппараты системой автоматики.

Раздел восьмой

УСТАНОВКИ ДЛЯ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

ГЛАВА I

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ВЫБОР РЕЖИМА ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ

Тепловлажностная обработка является одним из важнейших этапов технологии изготовления ряда строительных деталей: бетонных, железобетонных, известково-песчаных, теплоизоляционных (вулканит) и др. Она ускоряет процесс твердения изделий и улучшает их качество. Способы создания горячей и с высокой влажностью среды, где размещены обрабатываемые изделия, могут быть различны.

В пропарочных камерах и камерах твердения изделия подвергаются воздействию теплого воздуха (60—95°) при атмосферном давлении, насыщенного до $\varphi \approx 100\%$ водяными парами; в автоклавах — насыщенного водяного пара при давлении 4—12 *ати* и выше; в водных бассейнах — подогретой воды. При электропрогревании тепло сообщается влажному изделию при помощи электродов. При прогреве инфракрасными лучами тепло передается от электродов или от нагретых газами поверхностей. Процессы соответственно называются пропариванием в камерах, запариванием в автоклавах, водным твердением в бассейнах, электропрогревом и т. д.

Тепловлажностная обработка изделий в течение 6—20 час. придает изделию прочность, равную 50—70% и выше той, которую изделие приобрело бы лишь через 28 суток естественного вызревания.

Благодаря применению установок тепловлажностной обработки освобождаются громадные заводские площади, которые потребовались бы для размещения изделий после формовки при естественном вызревании до выдачи изделий на стройки.

При тепловлажностной обработке происходят ускоренные процессы гидратации $3CaOSiO_2$, $2CaOSiO_2$, $3CaOAl_2O_3$ и других составных частей (цемента) с образованием гидросиликатов и алюминатов кальция. Под воздействием горячей и влажной среды на известково-песчаные смеси $[Ca(OH)_2+SiO_2]$ также образуются гидросиликаты кальция. Гидросиликат кальция за-

твердевает и уплотняется, кристаллы его прорастают, связывая заполнители в прочный камень. Прочность изделия быстро повышается во влажной и замедляется в относительно сухой среде, так как водная среда благоприятствует переходу коллоидных гидросиликатов в кристаллические. В период остывания из относительно перегретого и переувлажненного изделия испаряется часть воды, что увеличивает концентрацию ионов кальция и гидроксила.

Тепловлажностная обработка однако не рекомендуется для изделий на пластифицированных и гидрофобных цементах и запрещается для изделий на глиноземистых цементах.

Наиболее высокие результаты дает тепловлажностная обработка изделий на основе шлако-портландцемента и пуццоланового цемента.

Для каждого вяжущего и вида изделия опытным путем выбирается режим пропаривания или запаривания.

Автоклавный способ запаривания при давлении выше атмосферного значительно эффективнее пропарки изделий при атмосферном давлении, так как он дает не только ускорение твердения, но и повышение прочности бетона в 2—4 раза по сравнению с прочностью бетона, пропаренного при атмосферном давлении. При автоклавной обработке экономия цемента может составить до 50% за счет введения тонкомолотых добавок. Сроки автоклавной обработки в 2—3 раза меньше, чем при пропарке, и составляют всего 4 ÷ 8 час. Морозостойкость и химическая стойкость запаренного бетона выше обычного, что подтверждается работами как советских, так и зарубежных ученых (Германия, США и др.).

Всесоюзная конференция по железобетону (1955 г.) рекомендовала широкое внедрение автоклавной обработки на новых заводах, так как при этом эффективно используются вяжущие, возможно использование мелкозернистых и глинистых песков и частичная замена высокомарочного цемента известью, молотым песком и низкомарочным шлако-портландцементом.

Характерные графики тепловлажностной обработки изделий показаны на рис. 119, а некоторые из рекомендованных режимов — в табл. 33. Графики тепловлажностной обработки (пропаривание) в периодически действующих камерах показаны кривыми *I* и *II*. График тепловлажностной обработки (запаривание) в автоклавах — кривыми *III* и *IV*. Из графиков видно, что чем выше давление и, следовательно, температура среды, тем короче цикл и выше производительность оборудования. После периода загрузки происходит сначала более медленный *AB*, а потом более быстрый *BC* подъем температуры. График *II* показывает возможность сокращения периода изотермической обработки (способ ЮжНИИ) для экономии пара, если выполнить пропарочные камеры с лучшей герметичностью и теплоизоляцией. В этом случае после короткой изотермической выдержки *CД* происходит медленное *ДЕ* остывание изделий в герметически уплотненной камере.

Термоизоляционные изделия из вулканита (молотый диатомит 60%, известь-пушонка 20%, распушенный асбест 20%) также запариваются в автоклавах, но при меньшем, чем для бетона, давлении. Повышение давления при автоклавной обработке известково-песчаных изделий (по опытам РОСНИИМСа) с обычного 8 *атм* до 16—20 *атм* сокращает цикл с 15 до 4—6 час. А. В. Волженский показал возможность применения автоклавной обработки для известково-глинистых изделий, в том числе при невысоких (2—4 *атм*) давлениях. Помимо пропаривания в воздушно-паровой среде (пропарочные камеры) и в паровой (автоклавы), при

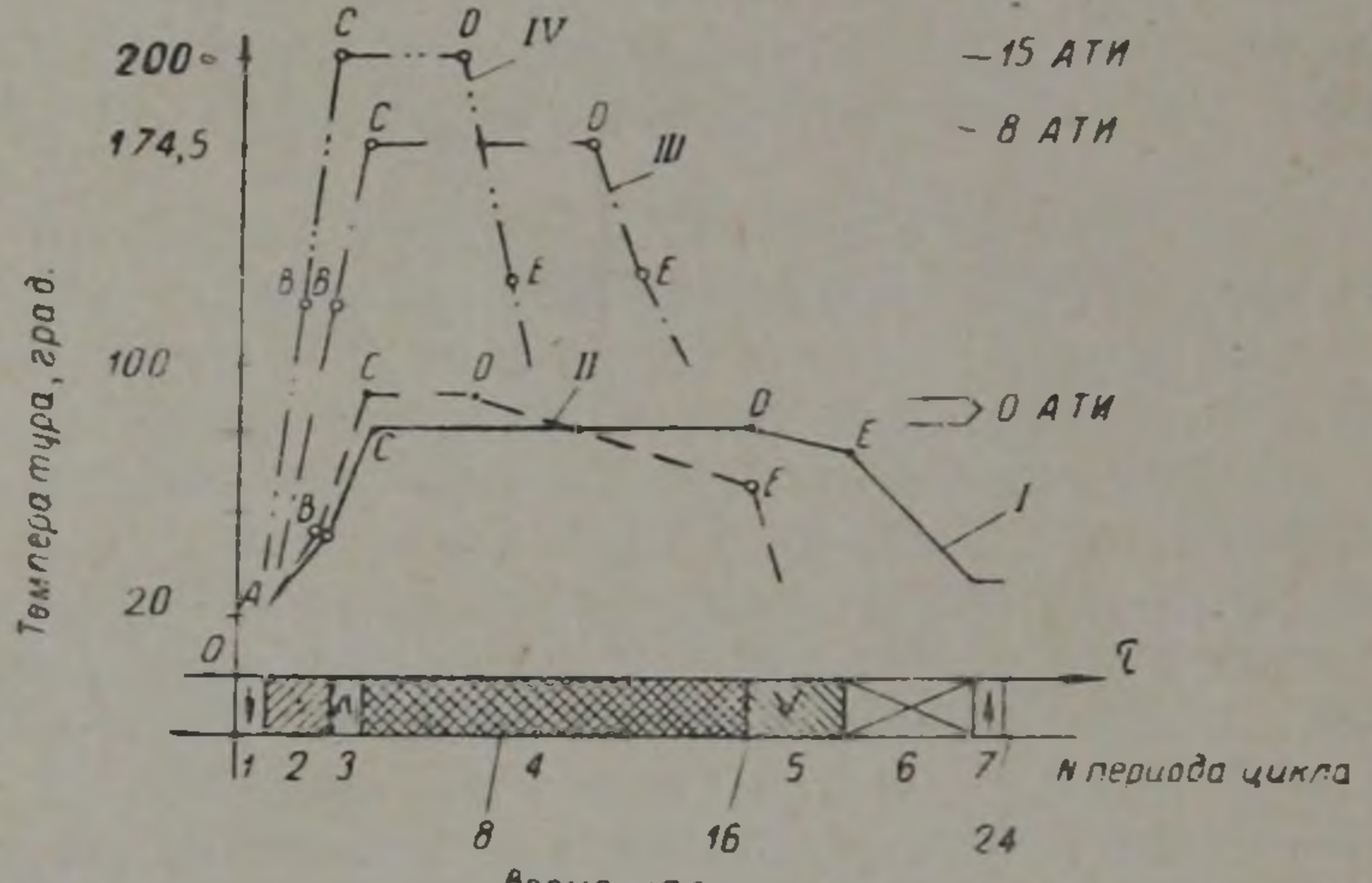


Рис. 119. Графики режимов тепловлажностной обработки изделий

Периоды цикла: *1* — загрузка изделий; *2* — первый период нагрева; *3* — второй период нагрева; *4* — изотермическая выдержка; *5* — первый период охлаждения; *6* — второй период охлаждения; *7* — выгрузка изделий

отсутствии котельной применяется тепловлажностная обработка горячими газами или воздухом при условии увлажнения бетона водой через перфорированные трубы или форсунки, чтобы не допустить вредной сушки бетона при его нагревании.

Тепловлажностная обработка бетона может производиться электропрогревом и другими указанными выше способами.

ГЛАВА II

КОНСТРУКЦИИ УСТАНОВОК ДЛЯ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ

1. Пропарочные камеры периодического действия

Пропарочные камеры периодического действия выполняются туннельного или ямного типа. Камеры туннельного типа (рис. 120) имеют высоту $H=1{,}6 \div 2$ *м*, ширину $B=1{,}5$ *м*. Ширина камер

для крупноразмерных деталей достигает 6—9 *м*. Длина камер (10—25 *м*) выбирается, исходя из производительности цеха, числа камер в блоке и от места, отводимого в цехе для камер. Их внутренние стены делаются в один кирпич ($S_в$=250 *мм*), наружные в 1,5 кирпича ($S_н$ = 380 *мм*). Так как камеры работают в условиях высокой влажности среды, их ограждения с внутренней стороны покрываются слоем гидроизоляции (цементная стяжка). Потолок камеры выполняется в виде сводика или с наклоном к одной из продольных стен из плоских железобетонных плит (70—100 *мм*). В обоих случаях ставят цель избежать попадания капель на изделия. На перекрытие наносится цементная штукатурка, укладывается гидроизоляция и насыпается слой (300—400 *мм*) шлака в качестве теплоизоляции, на который кладется слой бетона 30—40 *мм* и два ряда толя или рубероида на мастике. В камере располагаются паропроводные перфорированные трубы, через которые в камеру подается острый пар. Распределение отверстий по длине трубы должно обеспечивать равномерность выхода пара в камеру. Оно проверяется пробным пуском пара. Количество отверстий рассчитывается по часовому расходу пара. В камеры подводятся трубы для разбрызгивания воды и удержания влажности среды при полном насыщении, что очень важно для тепловлажностной обработки.

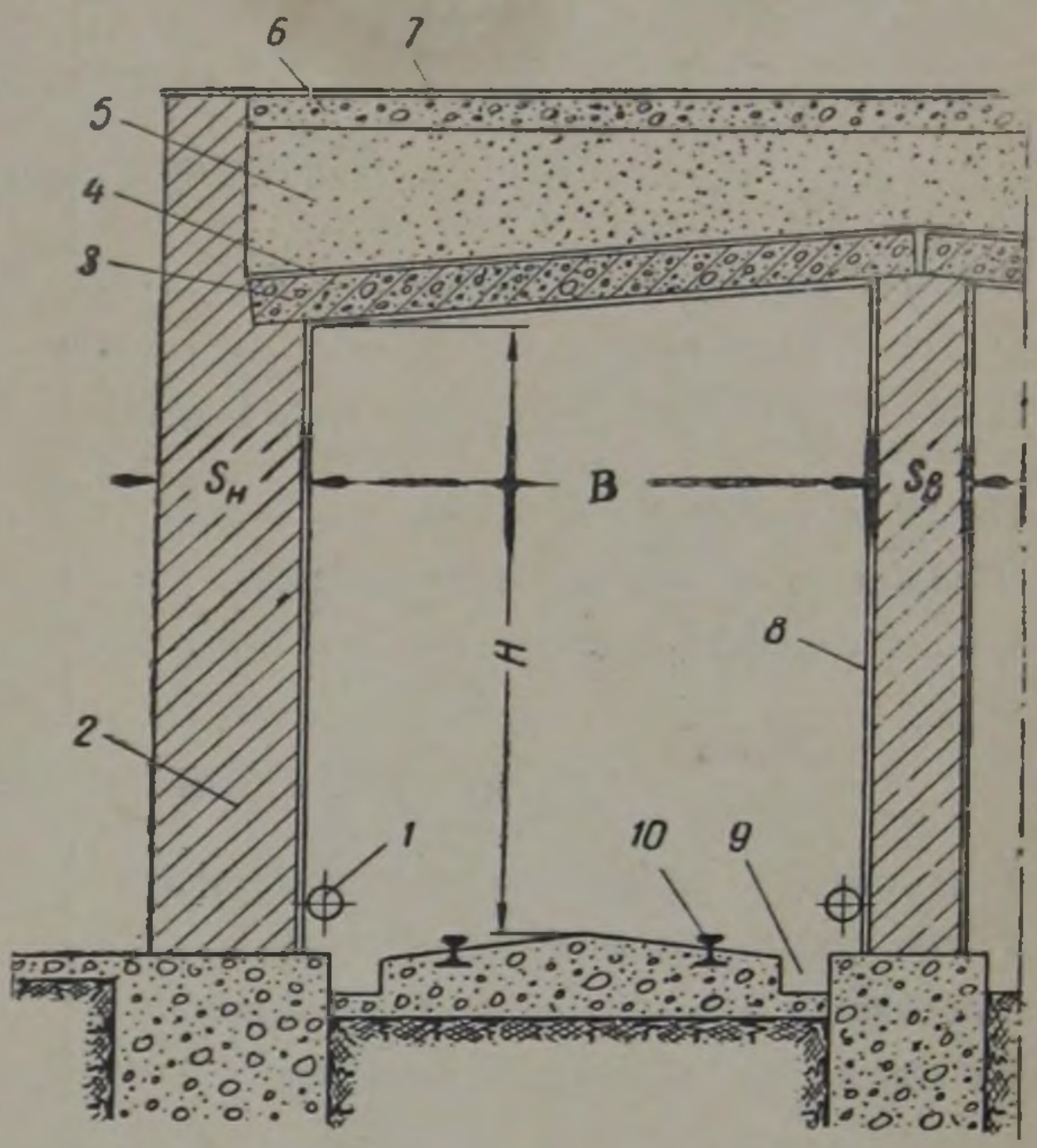


Рис. 120. Пропарочная камера туннельного типа

1 — паропровод (∅ 25 — 50 *мм*); *2* — стена кирпичная или из шлакоблоков; *3* — перекрытие сводчатое или в виде уложенной с уклоном плоской плиты, железобетонное (70 — 100 *мм*); *4* — слой пароизоляции; *5* — утепляющий слой (шлак 300 ÷ 400 *мм*); *6* — слой бетона; *7,8* — слой цементной штукатурки (10—15 *мм*); *9*—канавки для отвода воды из камеры в канализацию; *10*—рельсовый путь

Конструкции камер, где нагревание производится глухим паром, а увлажнение — острым паром через перфорированные трубы, применяются в СССР и распространены в США. Для нагрева в камерах устанавливаются ребристые трубы или другие отопительные элементы. Конденсат через конденсатоотводчики удаляется в котельную. Такая система обогрева приводит к экономии конденсата, теряющегося безвозвратно при нагреве острым паром. Для контроля влажности среды в камере устанавливаются дистан-

Таблица 33

Режимы пропаривания и запаривания изделий

Изделие и вяжущее	t_2 в град.	p в *ати*	Продолжительность в час.		
			подъема температуры, τ_1	выдержки, τ_2	остывания, τ_3
Обработка в камерах					
Изделия на портландцементе	70	0	2—3	15	3—4
То же, с ускорителем $CaCl_2$	70	0	2—3	10	3—4
Изделия на пуццолановом портландцементе	80	0	2—3	10	3—4
То же, с ускорителем $CaCl_2$	80	0	2—3	7	3—4
Изделия на шлако-портландцементе	85	0	2—3	12	3—4
То же, с ускорителем	85	0	2—3	8	3—4
Режимы ЮжНИИ (И 173-53/МСПТИ)					
Тонкостенные изделия на портландцементе	80	0	2—3	2	10
То же, на шлако-портландцементе	90	0	2—3	3	7
Массивные изделия на портландцементе	80	0	3—4	3	10
То же, на шлако-портландцементе	90	0	3—4	4	8
*Автоклавная обработка**					
Крупные изделия из бетона	174,5	8	2—4	6—8	2—3
Мелкие изделия из бетона	174,5	8	1—2	6—8	1—2
Стеновые камни на бесклинкерном вяжущем	174,5	8	2	3—5	1—2
Известково-шлаковый кирпич	174,5	8	2	6	2
Крупные силикатные изделия	174,5	8	3,5	9	3
Стеновые силикатные блоки	174,5	8	2	6—8	2
Изделия из пенобетона	174,5	8	4—6	3—7	5
Армосиликатные изделия	174,5	8	2	8	1,5
Обработка в матрицах					
Изделия на портландцементе марки 300—400	55—65	0	3—4	15	3—4
То же, на высокоактивном цементе мокрого помола с добавлением хлористого кальция	55—65	0	4	6—9	3—4

* Увеличение давления в автоклавах до 12—20 *атм* сокращает продолжительность цикла.

К камерам периодического действия относятся также ямные камеры (рис. 122), применяемые обычно для крупных изделий. Они имеют длину 4—15 *м*, ширину 2—10 *м*, глубину 1—4 *м*. Чтобы устранить пропускание пара по контуру крышек, на камере устанавливается песочный или водяной затвор, выполненный из швеллера № 16—20 и заполненный песком или водой, куда входит вертикальное контурное ребро опускаемой крышки. Бо́льшие ширина и длина ямных камер затрудняют выполнение плоских стойких от коробления крышек, поэтому рационально применение двускатных крышек, дополнительным преимуществом которых является организованный сток конденсирующейся влаги в контурный водяной затвор для пополнения его водой. Необходимо предусматривать в блоке ямных камер устройство приямка для слива из камер избытка конденсата и поливочной воды. Если свободный сток из приямка в канализацию затруднен, то дополнительно устанавливается автоматически включающийся перекачивающий насос.

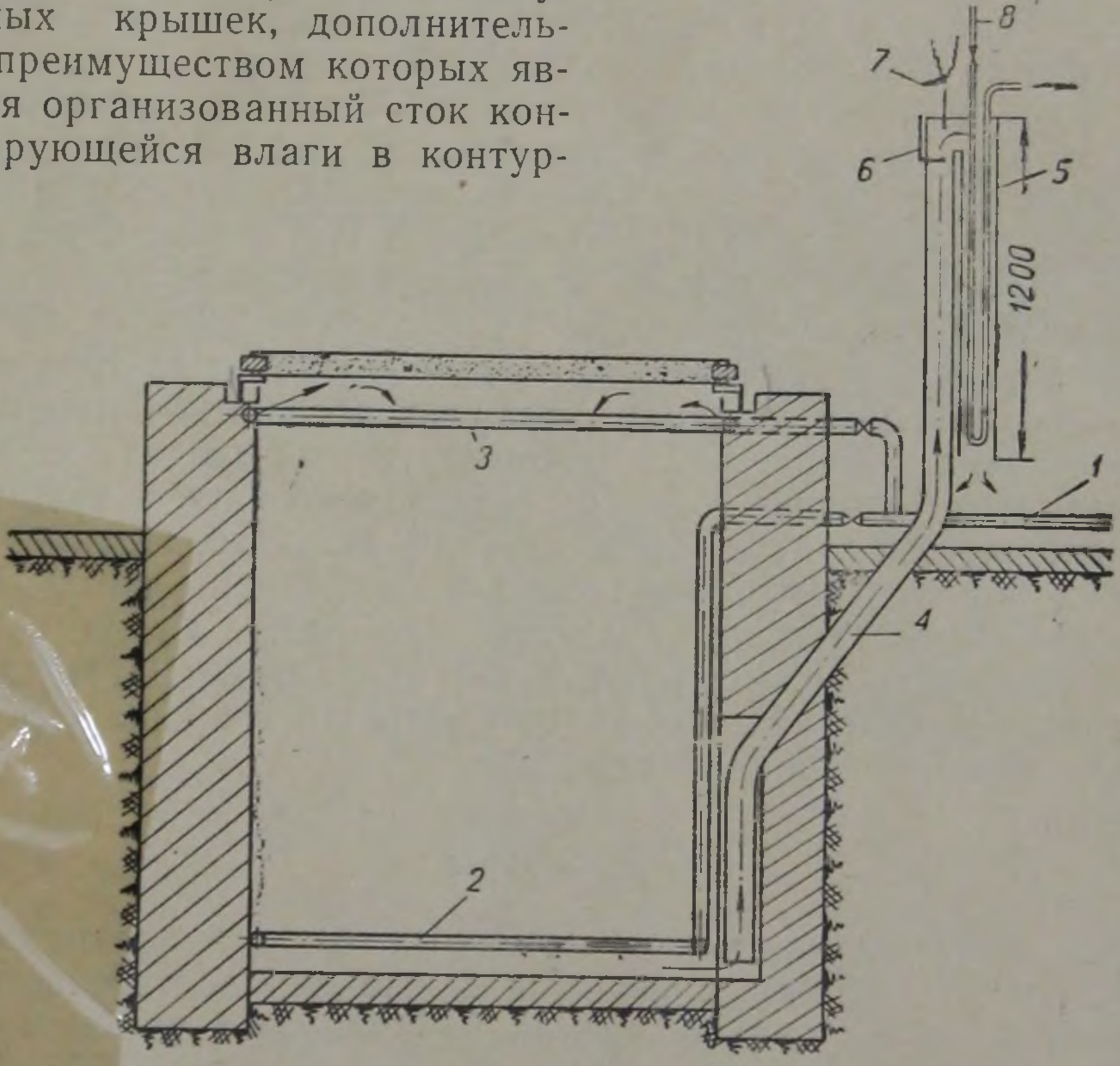


Рис. 123. Ямная камера конструкции Л. А. Семенова

1 — паропровод из котельной; *2* — нижние перфорированные трубы; *3* — верхние перфорированные трубы; *4* — обратная труба диаметром 100 *мм*; *5* — контрольный конденсатор с змеевиком; *6* — термометр обычный; *7* — термометр контактный; *8* — труба для подачи воды

На рис. 123 показана пропарочная ямная камера конструкции Л. А. Семенова. В отличие от обычных камер, в ней расположено два ряда паровых перфорированных труб: нижний *2*, как и у

обычных камер, и верхний *3*. Отверстия в перфорированных трубах для выхода пара выполняются диаметром 2—4 *мм* с шагом 100—200 *мм*. В нижней части камеры у одной из стенок на уровне 100 *мм* от пола проложен отводной канал сечением 150×200 *мм*. Канал соединяется с внутренним пространством камеры отверстиями 50×100 *мм* через каждый метр. На выходе отводной канал присоединен к контрольному конденсатору *5*, состоящему из кожуха, обратной трубы *4* и U-образного змеевика из труб диаметром 13÷25 *мм*. Нижний конец кожуха открыт, верхний наглухо закрыт. В змеевик подается холодная вода.

Для предварительного прогрева изделий пар в начале процесса подается через нижний ряд труб. В этот период изделия прогреваются при атмосферном давлении в обычной паровоздушной среде до 90°. Когда давление повышается, избыток паровоздушной смеси проходит в контрольный конденсатор, где пар конденсируется, а воздух уходит в атмосферу. По интенсивности стока конденсата судят об избытке подаваемого пара и соответственно регулируют его количество.

Температура в камере не может подняться до 100°, так как воздух, находящийся в камере, снижает абсолютное парциальное давление пара, которое не может стать равным атмосферному. Поэтому во втором периоде прогрева подача пара в нижние трубы прекращается и включается верхний ряд труб. Идущий сверху более легкий пар вытесняет тяжелый воздух вниз, который через контрольный конденсатор удаляется наружу. Среда в камере Л. А. Семенова приближается к чисто паровой (100°), поэтому пропаривание изделий происходит быстрее и сокращаются удельные расходы пара на 1 $м^3$ изделий.

2. Стенды

Для изготовления крупноразмерных изделий, затрудняющих применение передвижных форм, а также для построечного изготовления железобетонных изделий на полигонах решениями Всесоюзной конференции по железобетону и бетону (1955 г.) рекомендован преимущественно стендовый способ производства. При этом способе непосредственно на стенде формуются плоские изделия или пустотные настилы, а в матрицах—изделия, имеющие сложную форму (ребристые плиты, лестничные марши и т. д.). Стенд (рис. 124) представляет собой ямную камеру малой глубины с гладко отшлифованным дном, состоящим из железобетонной плиты толщиной 120—200 *мм*, поверх которой положен мозаичный раствор толщиной 25—30 *мм*, гладко отшлифованный карборундовыми волчками. Теплоизоляционный слой шлака толщиной 300—400 *мм* находится внизу, под плитой. В ней на глубине 50—70 *мм* от поверхности уложены обогревающие трубы диаметром 25—32 *мм* с шагом 1,8—2,2 диаметра трубы, по которым проходит пар или горячая вода. Трубы соединены в секции поперечными концевыми трубами. Длина этих труб 2 000—5 000 *мм*. При электропро-

запаривания при таком повышении давления сокращается вдвое, а учитывая, что емкость автоклава с увеличением диаметра увеличивается вчетверо, можно считать, что повышение давления и диаметра снизит вдвое затрату металла на 1 $м^3$ запаренных изделий. Это оправдывает, учитывая и повышение качества изделий,

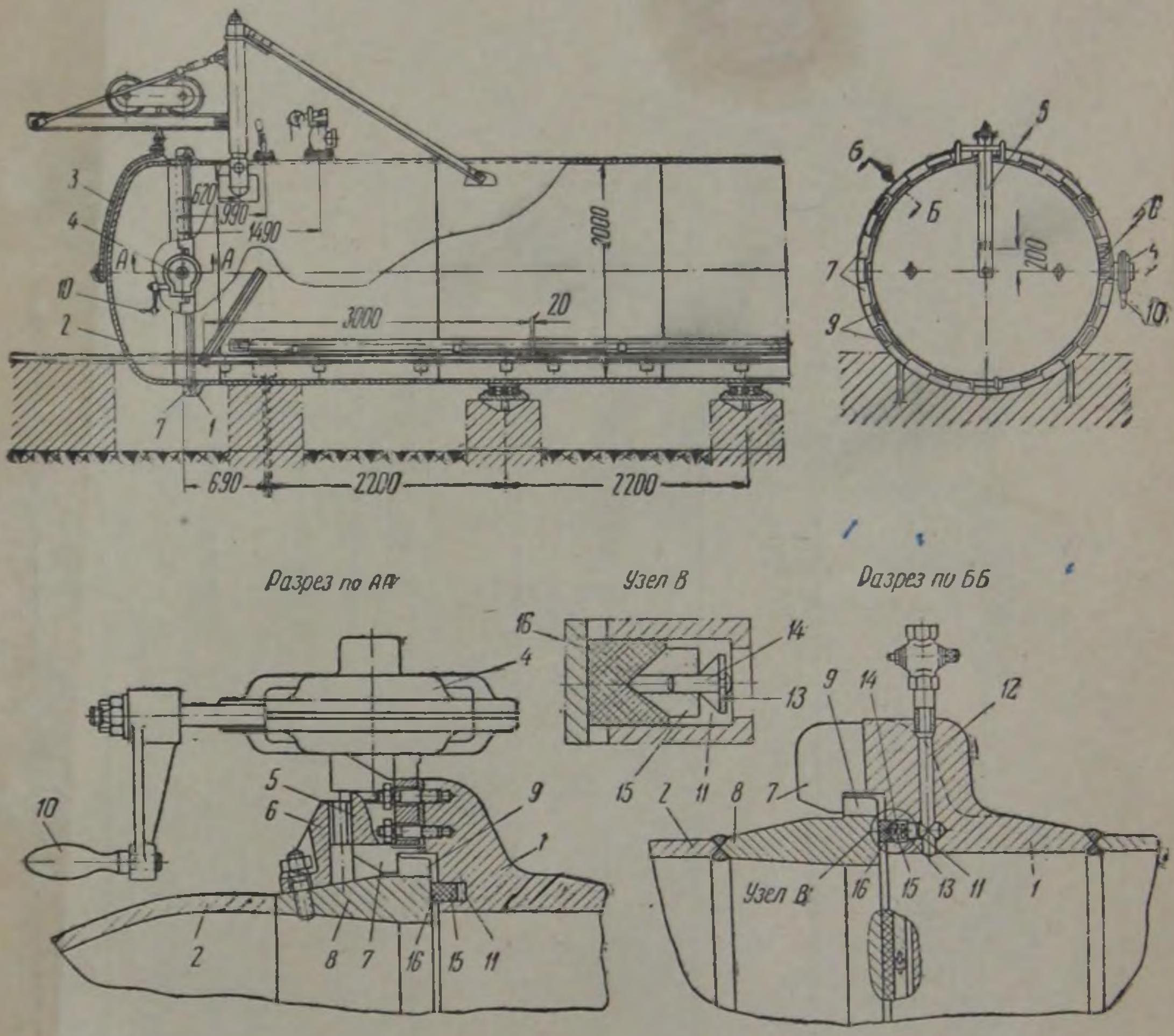
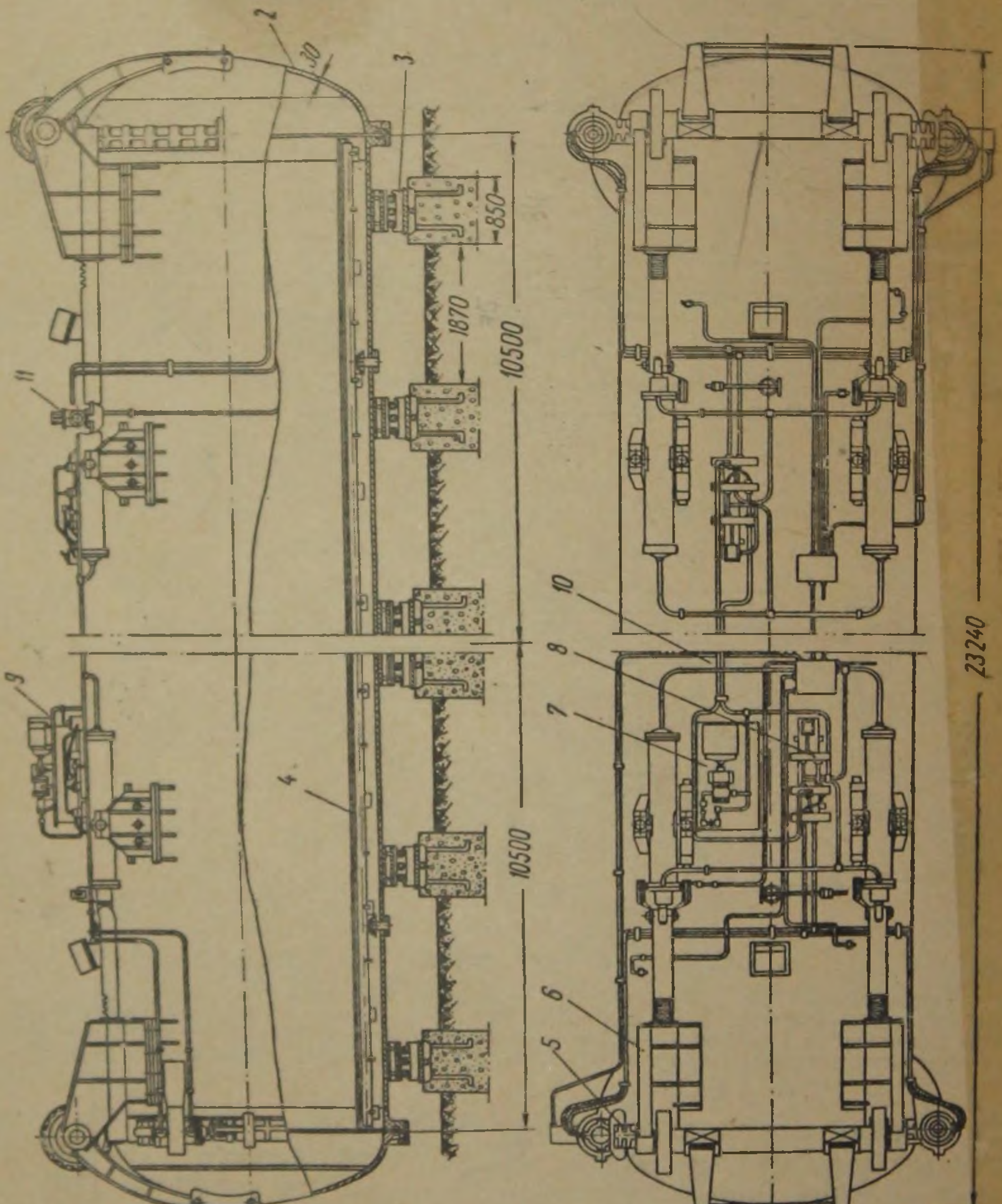


Рис. 126. Автоклав диаметром 2 000 *мм* на 8 *кг/см²*

1 — фланец; *2* — крышка; *3* — подвеска; *4* — червячный редуктор; *5* — шестерня; *6* — зубчатый сектор; *7* — выступы фланца; *8* — кольцо крышки; *9* — выступы кольца крышки; *10* — рукоятка для поворота крышки; *11* — проточка; *12* — паровой штуцер; *13* — пластинчатые пружины; *14* — стержни пластинчатых пружин; *15* — четырехсекторное кольцо; *16* — резиновое кольцо

применение автоклавов большой емкости, работающих под повышенным давлением. Автоклав устанавливается на опорах, из которых одна неподвижная, а остальные подвижные. Пар подается в автоклав по расположенной внутри его перфорированной трубе. Конденсат удаляется при открывании спускного клапана. Вагонетки с изделиями вкатываются по перекидному рельсовому мостику, соединяющему рельсовый путь в автоклаве с цеховыми путями. Так как для повышения производительности автоклава вспомогательное время цикла автоклава должно быть возможно более коротким, то его крышки при разгрузке и после разгрузки


2
30
3
850
1870
10500
11
9
4
10500
10
8
7
6
5
23240

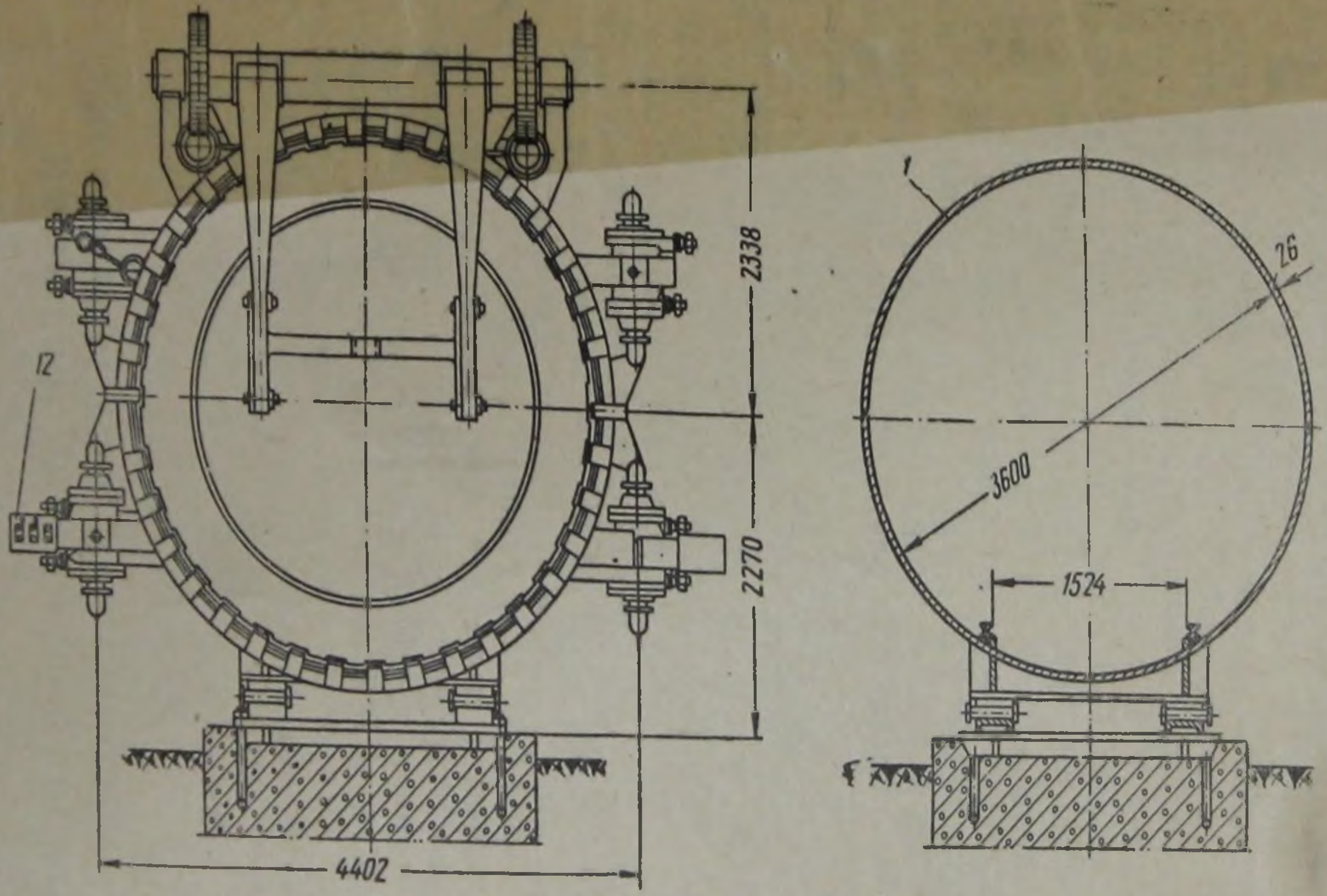


Рис. 127. Автоклав диаметром 3 600 *мм* на 12 *кг/см*²

1 — корпус автоклава; *2* — крышка; *3* — подвижная опора; *4* — рельсы; *5* — байонетное кольцо с поворотным механизмом; *6* — механизм подъема крышки; *7* — насосная станция; *8* — распределительная станция; *9* — электропривод; *10* — маслопровод; *11* — предохранительный клапан; *12* — пульт управления

должны быстро открываться и закрываться. На современных автоклавах введено быстро действующее приспособление для закрывания крышки. Крышка такого автоклава имеет кольцо с выступами, заходящими при повороте за соответствующие выступы фланца автоклава. Для поворота крышки на один выступ служит редуктор и зубчатый сектор. Редуктор приводится в движение вручную или электродвигателем. Герметичность между крышкой и фланцем достигается укладкой в стык резинового кольца. Так как крышка достаточно тяжела, то для ее подвешивания и поворота служит укрепленный на передней обечайке автоклава поворотный кран. Во избежание больших тепловых потерь в окружающую среду все внешние горячие ($t \geqslant 50°$) поверхности, включая и арматуру автоклава, должны быть надежно изолированы теплоизоляционными скорлупами или сегментами из диатомита, совелита или другого легкого ($\gamma \leqslant 400$ *кг/м*^{3}) и малотеплопроводного материала ($\lambda \leqslant 0{,}08$ *ккал/м час град*). Температура, создаваемая в автоклаве, зависит не от общего давления в нем, а только от парциального давления пара, поэтому присутствие воздуха является вредным, снижающим производительность автоклава. Для выпуска воздуха на автоклаве предусмотрен продувочный клапан. Выпускать воздух надо сейчас же, как только температура в автоклаве понизится по сравнению с температурой насыщенного пара, соответствующей давлению, указываемому манометром автоклава. ВНИИСтроммаш разработал для крупных изделий автоклав (конструкция которого дана на рис. 127) диаметром 3 600 *мм* и длиной 21 000 *мм*. Рабочее давление 12 *атм*, температура 187°. Толщина стенки корпуса 26 *мм*, крышки 30 *мм*. В автоклаве уложены рельсы с шириной колеи 1 524 *мм*. Грузоподъемность тележки-платформы 22 *т*, вес ее 1 058 *кг* и габариты 4 306×2 000×312 *мм*. Для открывания крышек и поворота прижимных байонетных колец автоклав снабжен гидравлической системой, работающей при давлении 65 *атм*. Диаметр гидроцилиндра для открывания крышки 260 *мм*, ход поршня 1 700 *мм*. Диаметр цилиндра поворота байонетных колец 130 *мм*, ход поршня 200 *мм*. Система снабжена питающим ее маслонасосом производительностью 50 *л/мин* с двигателем мощностью 10 *квт*.

ГЛАВА III

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ УСТАНОВОК ДЛЯ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ

1. Камеры периодического действия

В задание входит ассортимент изделий и годовая производительность цеха. На основе практики аналогичных производств и литературных данных (см. табл. 33) выбираются режим пропарки по периодам и общая продолжительность цикла, включая время на загрузку, разгрузку и ремонт камер. По формуле, аналогичной

(VI-6), определяется объем камеры. Важным моментом является нахождение наиболее рациональных размеров камеры для наивыгодной садки изделий. Степень заполнения объема V камеры изделиями составляет $g=0{,}3 \div 0{,}5$ $м^3/м^3$. Сокращение вспомогательного времени достигается за счет механизации загрузки и разгрузки; рабочего времени — за счет улучшения обтекаемости изделий паром, увеличения его парциального давления и поднятия температуры до рациональных пределов, а также подбором состава бетона, введения предварительной вибрации и т. д. После определения размеров камер подбираются конструкции ограждения, что необходимо для расчета затрат тепла для их прогревания и определения потерь в окружающую среду. Далее составляется тепловой баланс пропаривания по периоду нагрева, по периоду изотермической выдержки и по всему циклу в целом. Часовые расходы тепла в первом периоде значительно выше, чем во втором. В приходную часть теплового баланса включается тепло пара или другого теплоносителя*. В расходную часть баланса первого периода входят следующие статьи.

1. Расход тепла на нагрев изделий

$$Q_н = \Sigma G_i c_i (t_2 - t_1)\, m\ [ккал]\ , \qquad \text{(VIII-2)}$$

где G_i — вес отдельной составляющей в одном изделии в *кг*;
c_i — удельная теплоемкость этой составляющей в *ккал/кг град*;
t_2 — температура изотермического прогрева в град.;
t_1 — начальная температура изделия в град.;
m — число уложенных в камере изделий, определяемое по эскизу заполнения камеры.

2. Расход тепла на нагревание опалубки и форм $Q_ф$, транспортных устройств — тележек, этажерок $Q_{тр}$ определяется по формуле, аналогичной (VIII-2).

3. Расход тепла на прогревание ограждений камеры $Q_к$. Предварительно по формулам нестационарного теплообмена определяются средние температуры каждого слоя в начале процесса нагрева $t'_{ср}$ и в конце его $t''_{ср}$ по всей толщине конструкции ограждения. Зная вес каждого слоя в конструкции G_i в *кг* и теплоемкость, можно эту статью расхода тепла найти по формуле

$$Q_к = \Sigma G_i c_i \left(t''_{ср} - t'_{ср} \right) [ккал]. \qquad \text{(VIII-3)}$$

4. Расход тепла в окружающую среду через прогретые части ограждения $Q_{о.с}$ определяется по формулам раздела второго, гл. II. Расход берется за τ_1 в час. первого периода.

5. Расход тепла на испарение воды из изделия $Q_{исп}$. В приближенных расчетах принимается, что вода испаряется в количестве a, равном 1% от веса изделия $G_и$:

$$Q_{исп} = (595 + 0{,}47 t_{ср} - t_1)\, a G_и m\ [ккал]\ , \qquad \text{(VIII-4)}$$

где $t_{ср} \approx 0{,}5(t_1 + t_2)$ — средняя температура испаряющейся воды в град.

* Экзотермия гидратации цемента, полная величина которой составляет верно 0,15 М *ккал/кг* цемента (М — марка цемента), в расчетах камер не учитывается. *А. В.*

6. Тепло пара $Q_п$, заполняющего свободный объем камеры

$$Q_п = 300 \cdot V(1-g) \ [ккал] ,$$

где 300 — теплосодержание 1 $м^3$ пара в $ккал/м^3$.

7. Расход тепла за счет пропускания через щели и неплотности $Q_{пр}$ в зависимости от состояния камер может быть учтен коэффициентом 1,08 ÷ 1,12 от суммы статей расхода первого периода.

Тепловой баланс первого периода

$$Q_1 = (1{,}08 \div 1{,}12) \Sigma_1^6 Q_i \ [ккал] . \qquad \text{(VIII-5)}$$

Тепловой баланс второго периода

$$Q_2 = Q_{о.с} + Q_{пр} \ [ккал] . \qquad \text{(VIII-6)}$$

Во втором периоде пропаривания, когда ограждения камеры и изделия уже прогреты до конечной температуры и требуется тепло только на покрытие тепловых потерь через ограждения камеры в окружающую среду во время изотермической выдержки, расход тепла незначителен. Потери тепла в окружающую среду пропорциональны повышенной разности температур в этом периоде и увеличенному количеству часов τ_2 второго периода. Часовые потери тепла на пропуски следует брать удвоенными, поскольку камеры во втором периоде работают при более высоких температурах, чем в первом периоде. Расход тепла со спускаемой в канализацию водой рассчитывается по температуре второго периода.

По расходу тепла определяется расход теплоносителя по периодам. Так, например, среднечасовой расход пара за первый период определяется по формуле

$$D_I = \frac{Q_I}{\tau_1 (i_п - i_к)} \ [ккал/час] , \qquad \text{(VIII-7)}$$

где $i_п$ — теплосодержание пара при входе в нагреватели или перфорированную трубу камеры в $ккал/кг$. Его величину находят из таблиц насыщенного пара по давлению с учетом фактической сухости пара;

$i_к$ — теплосодержание конденсата в $ккал/кг$, оно зависит от метода обогрева — острым или глухим паром. При обогреве острым паром $i_{к_1} \approx 0{,}5 \times \times (t_1 + t_2)$. При обогреве глухим паром $i_к$ соответствует теплосодержанию воды при давлении пара в нагревателях, если нет переохлаждения конденсата.

Аналогично находят расход тепла за второй период. Здесь $i_{к_2} \approx t_2$. Расхода пара в периоде охлаждения нет. После составления теплового баланса и определения расхода пара в целом за

цикл пропаривания находят удельный расход нормального пара (640 *ккал/кг*) на 1 $м^3$ изделий. Для камер периодического действия он в среднем составляет 200—300 $кг/м^3$ в зависимости от типа камеры и ассортимента изделий. Расчет труб, подводящих пар в камеры, делают по скорости пара 20—30 *м/сек*. Число отверстий в каждой из двух проложенных в камере перфорированных труб определяется по формулам истечения пара из отверстий. При обычно невысоком давлении насыщенного пара в трубах пропарочных камер можно определить число отверстий по упрощенной формуле:

$$n = \frac{D}{0{,}67 d^2 \sqrt{(0{,}2 + 0{,}48 p_1)(p_1 - p_2)}}, \qquad \text{(VIII-8)}$$

где D — расход пара через каждую парфорированную трубу в первый период максимального расхода в *кг/час*;

d — диаметр одного отверстия в *мм*. Он обычно равен 2—4 *мм*;

p_1 и p_2 — абсолютные давления пара в перфорированной трубе и в камере ($p_2 = 1$) в *ата*.

При $p_1 = 2$ *ата* и $d = 2$ *мм* на каждые 100 *кг/час* приходится 34 отверстия.

Поверхность нагрева глухих нагревателей определяется по обычной формуле:

$$F = \frac{Q}{k \Delta t} [м^2].$$

Вентиляция включается во вторую половину периода охлаждения изделий. Часовое количество воздуха для вентиляции камеры рассчитывается, исходя из количества влаги, которую надо удалить из камеры, и разницы влагосодержаний воздуха после и до камеры, аналогично расчетам сушильных установок. Оно может быть принято равным 10—20 объемам свободной камеры. Сечение вентиляционных каналов выбирают из расчета скорости воздуха 10—15 *м/сек*. Вентилятор, обслуживающий блок камер, подбирают по величине напора, превышающей сопротивление в сети при отсасывании паровоздушной смеси из одновременно охлаждающихся камер. Каждая камера может быть отключена от общей вентиляционной сети своей задвижкой, которая одновременно является и регулирующей.

2. Камеры непрерывного действия

Расчет камер непрерывного действия ведется по зонам. Из графика пропаривания известны температуры изделий при входе и выходе из каждой зоны. Зная по производительности камеры, сколько вагонеток подается ежечасно, можно определить количество тепла, требуемое на нагревание изделий и вагонеток, а также прочие статьи расхода по зонам. Относительная влажность воздуха в первой зоне доводится до 100% и удерживается на этом

уровне вплоть до зоны остывания. Тепло в зоны нагрева и изотермической выдержки подается через завесы воздухом, прошедшим калориферы. Это тепло должно покрыть потери в каждой зоне. Калориферы обогреваются паром из котельной под давлением 5—6 *атм.* Величина поверхности нагрева определяется по расчетному графику калорифера конкретного типа в зависимости от скорости воздуха в его живом сечении. Одновременно находят его аэродинамическое сопротивление. При продвижении изделия должны нагреваться и охлаждаться с определенной скоростью, что обеспечивается регулируемым теплообменом между паровоздушной смесью и изделиями. Факторами регулирования являются: разница температур между смесью и поверхностью изделия, скорость ее и полнота омывания каждого изделия. В зоне охлаждения, если это необходимо, проверяют, достаточен ли влагообмен при испарении части влаги с поверхности изделия. Формулы для расчета теплообмена и влагообмена были приведены в соответствующих разделах. Особенностью расчета камер непрерывного действия является расчет ее воздушных торцовых завес. Расчет концевых воздушных завес сводится к следующему. При отсутствии завесы количество циркулирующего воздуха V_0, входящего (внизу) $V_{вх}$ или выходящего (вверху) $V_{вых}$ из камеры, зависит от положения нейтральной зоны по высоте камеры и от соотношения температур в камере и в окружающей среде. Это может быть выражено приближенной формулой:

$$V_{вх} = V_{вых} = V_0 = 0{,}67\varphi B \sqrt{2g \frac{\Delta t}{T} z^3} \quad [м^3/сек], \qquad \text{(VIII-9)}$$

где φ — коэффициент расхода, равный (по опытам ВНИИЖелезобетона) 0,5;
B — ширина камеры в *м*;
Δt — разность средней температуры в камере и окружающей среды в град.;
T — средняя абсолютная температура воздуха в камере в град.;
z — расстояние от пола до положения нейтральной линии в *м*.

При правильном использовании воздушных завес можно достигнуть снижения потерь воздуха из камеры до 0,2—0,15 от расчетного по формуле (VIII-9) или к.п.д. 80—85%. Воздушные завесы представляют собой потоки воздуха, выходящие со скоростью 10—12 *м/сек* из сопла или щелей коробов, так что направление этих потоков пересекает возможное направление входа (или выхода) в камеру внешнего воздуха и препятствует ему. Для того чтобы распределение воздуха по щелям или соплам, расположенным вдоль подающего короба, было равномерным, сечение коробов делается переменным, сужающимся. Оси сопел торцовых завес направлены обычно под углом 45° против потока воздуха. Ширина сопел в камерах, их высота и количество выбираются по расчету. Расчет воздушных завес, по И. А. Шепелеву, производится следующим образом. Устанавливается количество циркулирующего

воздуха при отсутствии завес V_0 в *м³/сек*. У перекрытия воздух с максимальной скоростью выходит из камеры, у пола — входит в камеру. По данным ВНИИЖелезобетона, скорость входящего в камеру воздуха составляет 0,25—0,7 *м/сек*, а скорость выходящего — от 0,7 до 1,5 *м/сек*. Нейтральная линия устанавливается на 0,6—0,9 общей высоты от пола. Поэтому выше нее отверстие работает как выходное, ниже нее как входное. Расчет ведется для каждого из них отдельно. Расчетная высота отверстия H в *м*, ширина B в *м*. Далее задаются необходимой глубиной действия завесы («высота условного шибера») h в *м*, что позволяет определить количество воздуха, которое будет проходить после введения воздушной завесы:

$$V = V_0\left(1 - \frac{h}{H}\right)[м^3/сек]. \qquad \text{(VIII-10)}$$

Дальнобойность струи зависит от некоторой величины A, которая в свою очередь зависит от угла α, угла оси струи с вертикалью и от того, расположена ли завеса снизу ($A_н$) или сбоку от торцового отверстия ($A_б$).

Турбулентность выходящих из щелей струй воздуха оценивается коэффициентом $a = 0{,}1 \div 0{,}2$.

При $a = 0{,}2$ коэффициенты $A_н$ и $A_б$ равны:

α . .	10	20	30	40	50°
$A_н$.	0,26	0,35	0,41	0,45	0,48
$A_б$.	0,22	0,39	0,46	0,47	0,48

Если обозначить ширину щели через b в *м*, количество воздуха, необходимое для действия завесы, можно найти по формуле

$$V_в = \frac{V_0 - V}{A\sqrt{\frac{H}{b} + 1}}\ [м^3/сек]. \qquad \text{(VIII-11)}$$

Скорость выхода воздуха из щели равна

$$u_0 = \frac{V_в}{tB}\ [м/сек]. \qquad \text{(VIII-12)}$$

Коэффициент местного сопротивления при выходе струй из щелей может быть принят в аэродинамическом расчете равным 2,5—3. Напор у вентиляторов завес камер составляет 80—150 *мм* вод. ст. Так как установка воздушных завес не обеспечивает полного уплотнения торцов камеры, рекомендуется навешивать дополнительно гибкие съемные шторы (например, из бывших в употреблении транспортерных лент).

3. Расчет автоклавов

Тепловой расчет автоклава принципиально не отличается от расчета периодических камер пропаривания. Особенностями являются повышенная температура процесса и возможность использования пара, выпускаемого после изотермического прогрева изделий в одном автоклаве на различные нужды, в том числе на первоначальный нагрев свежезагруженных изделий в другом автоклаве.

График работы автоклавов в этом случае может быть представлен кривыми *III* и *IV* на рис. 119. От точки *A* до точки *B* в автоклаве происходит повышение температуры за счет подачи пара из второго автоклава, где температура с понижением давления при выпуске в это время падает от точки *D* до точки *E*. В точке *B* прием пара из этого автоклава становится невозможным, так как давление его пара в точке *E* уже недостаточно для дальнейшего перепуска в первый автоклав. Последующее нагревание изделий в первом автоклаве от точки *B* до точки *C* производится острым паром из котельной. В этом периоде часовой расход острого пара наибольший. От точки *C* до точки *D* изотермическая температура поддерживается постоянным впуском острого пара, расход которого рассчитывается только на покрытие потерь в окружающую среду и поэтому этот расход невелик. От точки *D* до точки *E* происходит перепуск отработавшего пара из первого автоклава в третий, а после точки *E* — в теплообменники низкого давления (подогрев воды для приготовления бетонной смеси и т. д.). Использование отработавшего в одном автоклаве пара за счет перепуска в другой дает экономию тепла до 20%, при этом полное использование отработавшего тепла практически невозможно, так как нагретая масса изделий и самого автоклава не может слишком быстро отдать тепло при понижении давления, и часть избыточного тепла в ней сохраняется.

Для улучшения использования отработавшего пара следует иметь перепускные паропроводы больших диаметров, невысокие скорости перепускаемого пара, задвижки с малым коэффициентом местного сопротивления и хорошую теплоизоляцию паропроводов. Все это уменьшит потери давления и тепла при перепуске.

В качестве примера приводим тепловой баланс для автоклава по А. В. Волженскому. В автоклаве длиной 17 *м*, диаметром 2 *м* при режиме 1,6—8—1,2 час. и давлении 8 *ати* (174,5°С) запаривается силикатный кирпич (12 750 шт.).

Вес автоклава 13,5 *т*. Вес вагонетки 425 *кг*. Число вагонеток 15 шт. Вес сухой массы сырца в автоклаве 44 400 *кг*. Абсолютная влажность изделий в начале и конце соответственно 55 и 7,5%. Вследствие наличия воздуха в автоклаве температура практически снижена до 172,1°. Тепловой баланс автоклава приведен ниже.

Расход тепла	В тыс. *ккал.*	В %
1. Нагрев сухой массы от 40°: 0,22·44 400 (172,1—40)	1 290,3	38,6
2. Нагрев воды сырца: 0,055·44 400 (172,1—40)	327	9,8
3. Нагрев стенок автоклава от 65°: 0,115·13 500 (172,1—65)	166,3	5
4. Нагрев вагонеток от 15°: 0,115·425·15 (172,1—15)	115,2	3,4
5. Потери во внешнюю среду при $F=120$ *м²* и нагреве за 1,6 часа, $k=3{,}4$ *ккал/м² час град* (повышенный) $3{,}4\cdot120\left(\frac{172{,}1+25}{2}-25\right)1{,}6$	47	1,4
6. Потери во внешнюю среду в период запаривания: 3,4·120 (172,1—25) 8	470,4	14,1
Итого	2 416,2	—
7. Затрата тепла пара ($i=662{,}9$ *ккал/кг*, $\gamma=4{,}32$ *кг/м³*) на заполнение им свободного объема (25 *м³*) автоклава: 662,9·4,32·25=662,9·108	71,5	2,1
8. Теплосодержание образовавшегося конденсата: $\frac{2\,416{,}2\cdot10^3}{662{,}9-174}\cdot174=4\,942{,}1\cdot174$	859,9	25,6
Всего	3 347,6	100

Приход тепла		
Получено с паром: (4 942,1+108)662,9	3 347,6	100

Из теплового баланса можно определить следующие основные величины:

удельный расход тепла на 1 000 шт. силикатного кирпича

$$q=\frac{3347{,}6\cdot1\,000}{12\,750}=262{,}5\text{ тыс. }ккал\text{ на }1\,000\text{ шт.};$$

удельный расход пара на 1 000 шт.

$$d=\frac{5\,050\cdot1\,000}{12\,750}=396\,кг\text{ на }1\,000\text{ шт.}$$

С перепуском этот расход меньше на 16%.

Для повышения экономичности работы автоклавов необходимо улучшить качество изоляции, понизить величину k. Массу для изделия готовить на горячей воде, снижая ее количество, не допускать переохлаждения вагонеток. Сокращать длительность раз-

357
369

грузки и загрузки автоклава. Повысить степень использования объема автоклава применением рациональных вагонеток и оптимальной по плотности укладки изделий. Пар из автоклавов можно выпускать через аккумулятор пара и далее использовать в системе пропарочных камер и стендов. Туда же следует направлять и конденсат из автоклава, который при падении давления даст добавочный вторичный пар («пар вскипания»).

И. Т. Кудряшев и М. Я. Кривицкий разработали способ предварительного перед пуском пара вакуумирования изделий в автоклаве, что способствует удалению воздуха из пор и быстроте прогрева изделий. Термические напряжения при этом уменьшаются, а прочность повышается. Кроме того, вакуумирование позволяет использовать большее количество перепускного пара и тем самым снизить удельный расход пара на запаривание изделий.

4. Основные показатели прочих методов тепловлажностной обработки

При электронагреве электродами служат или металлические стенки формы, или расставленные по специальной схеме стальные стержни. Ток подводится к ним из производственной сети через трансформатор при напряжении ⩽ 220/110 *в*. Бетонная смесь предварительно выдерживается в течение 3—6 час., а затем под действием тока нагревается в течение 3—4 час. Изотермическая выдержка под током зимой продолжается 16, летом — 8 час. (по ЮжНИИ 4 часа). Остывание — около 4 час. Затрата электроэнергии порядка 70—80 *квт-ч/м*^{3}. Распределение температур в изделии при электронагреве отличается от распределения при внешнем обогреве: максимальные температуры оказываются в середине изделия. В этих условиях пересушивание может наступить скорее, чем при пропаривании.

Для обогрева инфракрасными лучами электроламп менее экономичны, чем металлические короба, по которым проходит горячий газ. Рекомендуется перед обогревом выдерживать изделия. Температурный градиент в изделии устанавливается около 1 *град/см*. Прогрев до температуры 70° длится 30—40 мин. при толщине изделия 150 *мм* и 40—50 мин. при толщине 200 *мм*. Изотермическая выдержка достаточна в течение 30—40 мин. Мощность электрических источников для инфракрасного излучения на 1 *м*^{2} при нагреве — около 10 *квт*, при изотермической выдержке — около 1 *квт*.

Ускорение твердения в водных бассейнах применяется для асбоцементных и железобетонных труб. Возможно непрерывное передвижение труб в бассейне, подвешенных на конвейерных тележках. Температура воды 40—60°. Время водной обработки 1—3 суток в зависимости от температуры воды и назначения труб. Вода в бассейне нагревается или острым паром, или, что предпочтительнее, при циркуляции через подогреватель при скорости ее в трубках подогревателя 1—1,5 *м/сек*. Общий

коэффициент теплопередачи в нем при обогреве газами 10—20 *ккал/м² час град*, при обогреве паром 1 500—2 500 *ккал/м² час град*.

ГЛАВА IV

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ УСТАНОВОК ДЛЯ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ

Установки для тепловлажностной обработки, работающие с применением пара под давлением выше 0,7 *ати*, согласно правилам Государственной инспекции Котлонадзора СССР подлежат обязательной регистрации, а к их эксплуатации допускаются только лица, знакомые с правилами обслуживания агрегатов, находящихся под давлением. На каждый автоклав составляется шнуровая книга и паспорт завода-изготовителя. Периодически проводятся техническое освидетельствование и гидравлическое испытание автоклава. На шкале манометра автоклава закрепляется указатель максимального рабочего давления. Для проверки его показаний контрольным манометром между сифонной трубкой и рабочим манометром устанавливается трехходовой кран.

Один из предохранительных клапанов автоклава закрывается кожухом и пломбируется, а для продувания поднимания рычага выводится через щель цепочка. Открывание крышек разрешается только после понижения давления в автоклаве до атмосферного. Во избежание ожогов и для экономии тепла все горячие поверхности изолируются так, чтобы внешняя поверхность изоляции имела бы температуру не выше 50° при температуре окружающей среды 25°. Повышенные влажность и температура в пропарочных камерах делают недопустимым длительное пребывание там обслуживающего персонала (при температуре мокрого термометра 40° и выше) без специального брезентового костюма, валенок, перчаток и воздухоохладительной маски. Во избежание появления туманов в помещениях, где установлены пропарочные камеры и автоклавы, эти помещения оборудуются приточно-вытяжной вентиляцией; наружный воздух, приходящий зимой в помещение, должен быть предварительно подогрет в калорифере. Количество воздуха для вентиляционного обмена L может быть найдено по формуле

$$L = \frac{W1\,000}{d_2 - d_1}\ [кг/час]\,, \qquad \text{(VIII-13)}$$

где W — количество влаги, выделяющейся и подлежащей удалению из камеры и цеха, в *кг/час*;

d_2 и d_1 — влагосодержание воздуха при температурах и относительных влажностях соответственно при выходе и входе в *г/кг*.

ГЛАВА V

УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОДОГРЕВА ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ БЕТОНОВ

В зимнее время необходимо подогревать песок и щебень, чтобы освободить их ото льда и превратить смерзшиеся глыбы, мешающие транспортированию и дозированию, в сыпучие, подвижные материалы. Подогрев может производиться только на складе или только в цеховых бункерах, или его проводят в две ступени — и на складе, и в цехе. Помимо нагрева заполнителей бетона (до 5—40°), зимой подогревается и вода затворения (до 70—95°). Температура бетонной смеси ограничивается 25—45° из-за опасения снизить подвижность и качество бетона. Теплоносителями при подогреве заполнителей бетона могут быть: пар, горячая вода, дымовые газы. Подогрев может быть или рекуперативным, или при непосредственном контакте с теплоносителем. Последнее не требует большой затраты металла, дешевле и интенсивнее, но при применении пара и воды ведет к обводнению заполнителей, что затрудняет их дозирование. Рекуперативный подогрев заполнителей в неподвижном состоянии в бункерах не эффективен, так как очень велико термическое сопротивление толстого слоя кусковых материалов. Даже при частой расстановке подогревающих секций в слое заполнителей бетона коэффициент теплопередачи не превышает 10—20 *ккал/м² час град*, что сильно увеличивает поверхность нагрева и делает бункера дорогими и громоздкими. При движении песка и щебня поверхность нагрева быстро изнашивается, требуя частой замены.

Всесоюзная конференция по сборному железобетону (май—июнь 1955 г.), считая бункерный подогрев заполнителей громоздким и нецелесообразным, рекомендовала разработать эффективные способы нагрева песка и щебня, что и выполнено рядом проектных институтов и отдельными исследователями.

В Германской Демократической Республике гравий и щебень эффективно за несколько минут подогреваются циркулирующей водой в бассейнах, тогда как подогрев в бункерах длителен и продолжается в зависимости от объема бункера 4—6 час. Влажность гравия и щебня после водного нагрева не более 5%, влажность песка 14—16%.

Водный способ подогрева не может вызвать большее обводнение, если щебень и песок при поступлении в установку для их разогрева уже содержат предельное количество воды или льда. Кроме того, влажность заполнителя не вызывает затруднений при приготовлении большинства бетонных смесей, поскольку величина добавки воды затворения всегда может быть откорректирована. Теплообмен при водном нагреве чрезвычайно эффективен, так как каждый кусок заполнителя интенсивно и равномерно омывается теплоносителем. Быстрота нагрева и чистота заполнителей делают этот способ перспективным.

В Федеративной Республике Германии для нагрева заполнителей и воды применяются передвижные машины производительностью 20÷30 *м³/час*. Заполнители нагреваются во вращающемся со скоростью 8 об/мин барабане, а вода — в резервуаре, помещенном в верху установки.

Быстрое разогревание заполнителей с частичной их подсушкой может быть организовано так же, как и выше, в непрерывном потоке при движении заполнителей на сетчатом транспортере или при движении через бункер-шахту с жалюзийной решеткой при продувке через слой движущихся заполнителей горячих газов. Из теории теплообмена известно, что объемный коэффициент теплоотдачи в этом случае очень высок, достигая 3 000 *ккал/м³ час град*.

Менее эффективен, но также целесообразен прогрев заполнителей во вращающихся барабанах типа сушильного.

Так как подогрев воды организовать легче, чем песка или гравия, то при приготовлении бетона температура воды должна быть выше с тем, чтобы ее тепло в общей смеси было значительным. Необходимая температура воды для приготовления бетонной смеси определяется по формуле

$$t_в \leqslant \frac{t_б\,(\sigma_в + \Sigma c_i g_i) - \Sigma c_i \sigma_i t_i}{g_в}\ [\text{град}], \qquad \text{(VIII-14)}$$

где $t_б$ — предельная температура бетонной смеси в град. Она устанавливается опытным путем в зависимости от сорта цемента и дальности транспортирования смеси (25—45° и выше);

$g_в$, g_i — вес воды, цемента и входящих в смесь заполнителей в *кг*;

t_i — температуры цемента и заполнителей перед смешением в град.;

c_i — теплоемкости цемента и заполнителей в *ккал/кг град*.

Для подогрева воды используются пароводяной или газоводяной подогреватели. Подогрев воды острым паром упрощает конструкцию подогревателя, но вызывает потери конденсата.

Полезное количество тепла, необходимое для того, чтобы нагреть заполнитель и растопить лед его влаги, вычисляется по формуле

$$Q_{пол} = \frac{\gamma_0 V}{\tau}\left[c\,(t_2 - t_1) + \frac{w}{100}\,(-0{,}5t_1 + 80 + t_2)\right]\ [ккал/час], \qquad \text{(VIII-15)}$$

где γ — объемный вес абсолютно сухого заполнителя в *кг/м³*;

V — объем обогреваемого заполнителя в *м³*;

τ — время подогрева и оттаивания данного объема заполнителя в час.;

c — теплоемкость абсолютно сухого заполнителя в *ккал/кг град*;

t_1 и t_2 — начальная и конечная температуры заполнителя в град.;

w — абсолютная влажность поступающего заполнителя в %;

0,5 и 80 — удельная теплоемкость льда и скрытая теплота его плавления, соответственно в *ккал/кг град* и *ккал/кг*.

При расчете количества теплоносителя, помимо полезного расхода тепла $Q_{пол}$, необходимо учитывать, при наличии разницы

температур и потери тепла ограждающими поверхностями в окружающую среду $Q_{пот}$. Они рассчитываются по формулам раздела второго. Очевидно, что при подогреве на открытых складах эти потери могут достигать больших величин. При неорганизованном подогреве заполнителей пары влаги, выделившиеся из нижних слоев, проходя в более холодные верхние слои заполнителей, вновь конденсируются, вызывая обводнение и обледенение их. Поэтому вопросам стока воды и удаления ее паров, например, вентиляцией объема заполнителя, следует уделять необходимое внимание.

Часовой расход тепла при подогреве заполнителей равен

$$Q = Q_{пол} + Q_{пот} \; [ккал/час] . \qquad \text{(VIII-16)}$$

Этот расход пополняется эквивалентным приходом тепла.

При теплообмене через поверхность нагрева необходимая величина определяется по формуле

$$F = \frac{Q}{k\Delta t_{ср}} \; [м^2] . \qquad \text{(VIII-17)}$$

Поверхность нагрева может быть выполнена или в виде трубчатой поверхности (для всех теплоносителей), в этом случае она равна

$$F = n\pi d l_1 \; [м^2] \qquad \text{(VIII-18)}$$

или плоских экранов-коробов (для газообразного теплоносителя)

$$F = nbl_1 \; [м^2] , \qquad \text{(VIII-19)}$$

где n — число труб или коробов;
d — наружный диаметр труб в *м*;
l_1 — длина одной трубы или короба в *м*;
b — активный (греющий) периметр короба в *м*.

При подогреве острым паром количество перфорированных труб, число и диаметр отверстий для выхода пара рассчитываются по формуле (VIII-8). Если давление в трубах выше критического для истечения (1,8 *ата*), то суммарная площадь отверстий для выхода пара

$$\sum f_i = \frac{2{,}2D}{\sqrt{(0{,}2+0{,}48p_1)\,p_1}} \; [мм^2] , \qquad \text{(VIII-20)}$$

где D — часовой расход пара в *кг/час*.

Так как есть опасность загрязнения отверстий, число их практически удваивается против расчетного. Затрата труб при подогреве острым паром значительно меньше, чем при рекуперативном.

На Куйбышевгидрострое был применен двойной подогрев только на складе: первый в штабелях песка на площадке, второй — в бункерах подогрева.

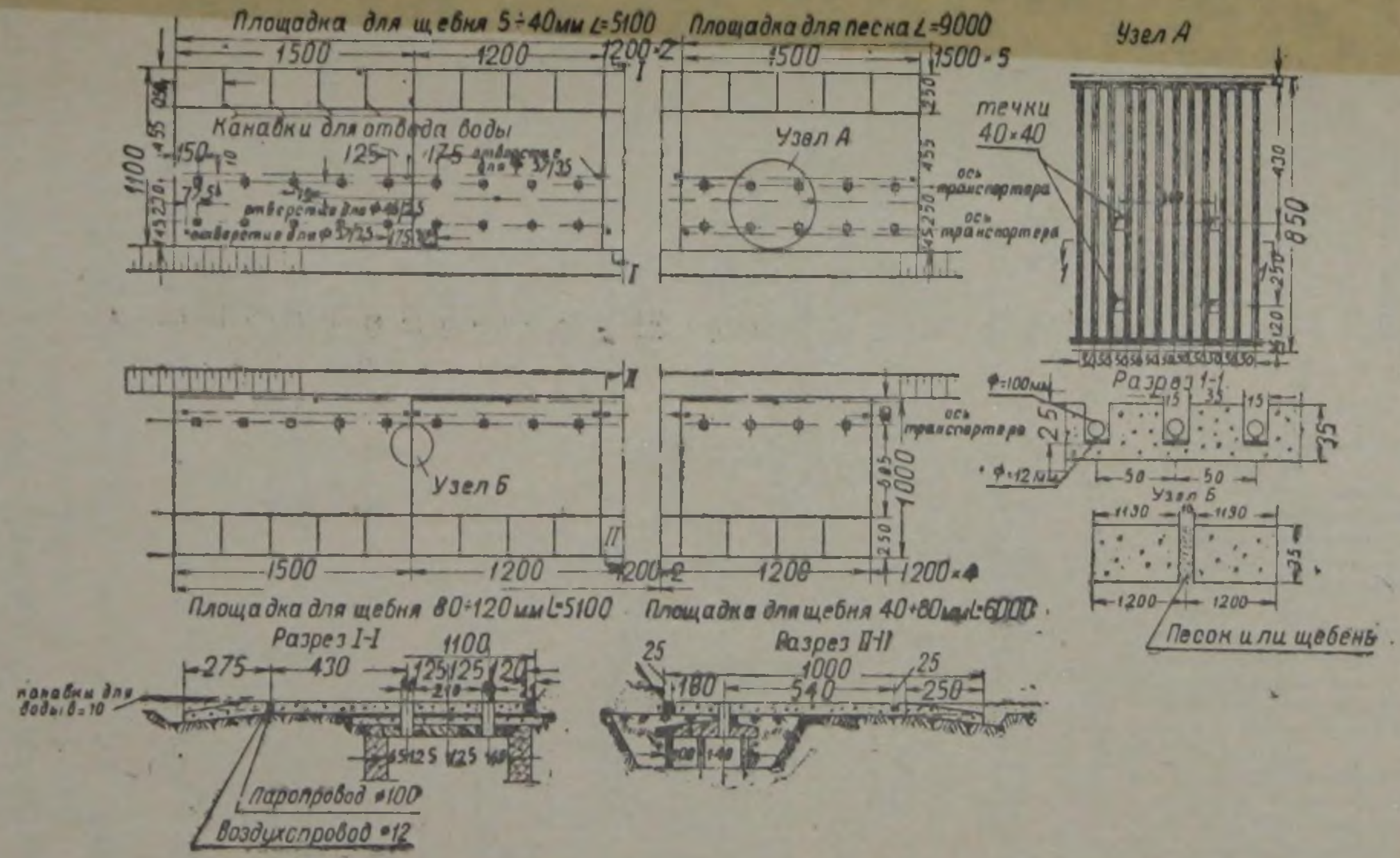


Рис. 128. Площадка прогрева заполнителей

Площадка (рис. 128) выполнена из ребристых бетонных плит, уложенных ребрами кверху, между которыми размещаются с шагом в 500 *мм* паровые трубы диаметром 100 *мм*. Площадка имеет уклон в сторону подземных транспортерных галерей для стока конденсата. Оттаявший песок бульдозерами сталкивается в течки к транспортерам. В лотках бункеров подогрева расположены паровые регистры из труб диаметром 80—100 *мм*. Песок подогревается до 20—30°, щебень до 10—20°. На 1 $м^3$ для подогревания заполнителей затрачивается 103 *кг* пара. Для интенсификации теплообмена и удаления водяных паров под паровыми трубами укладываются воздушные перфорированные трубы.

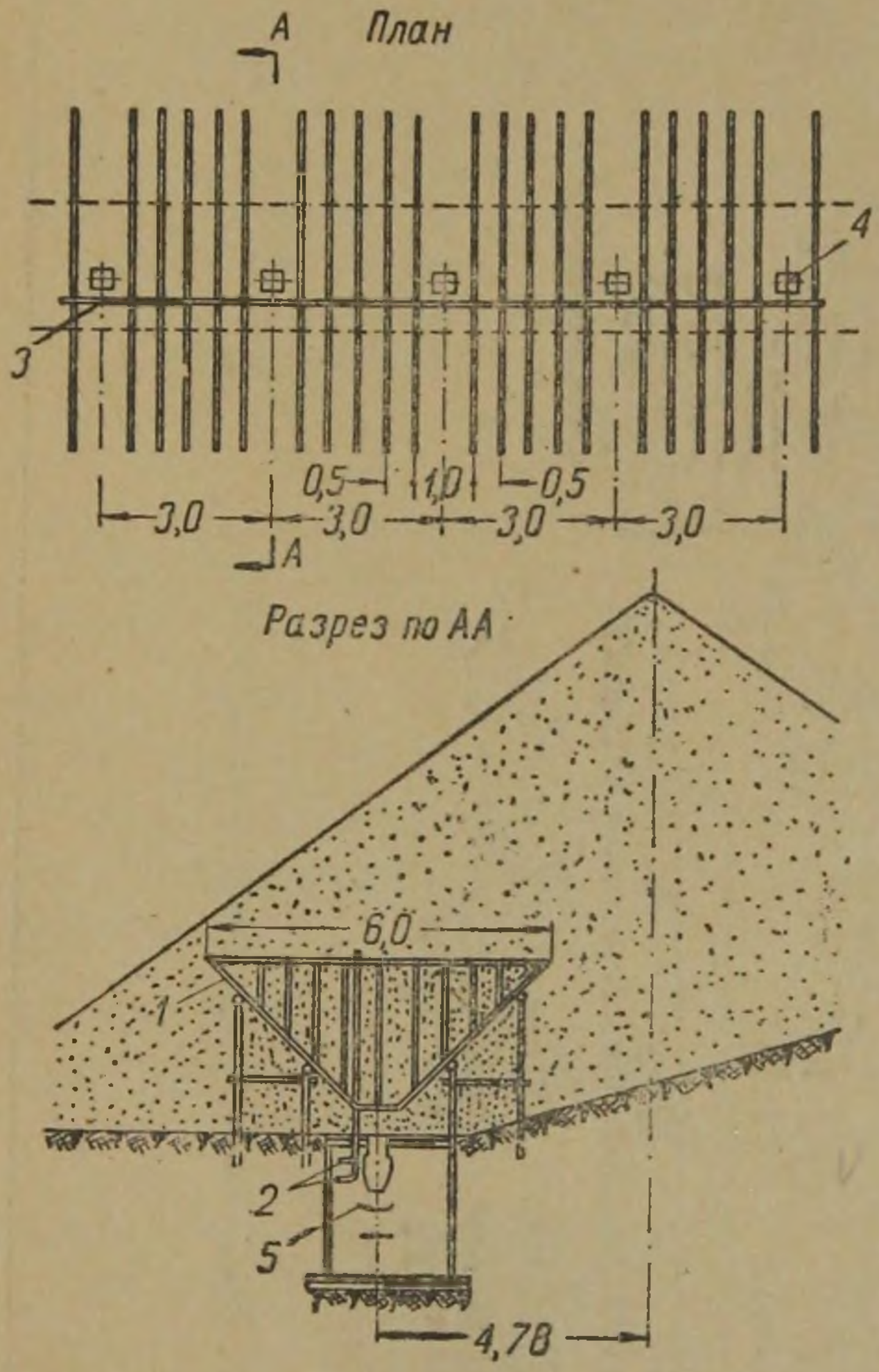


Рис. 129. Система подогрева заполнителей в штабелях (Камгэсстрой)

1 — регистры; *2* — трубы для подвода пара и отвода конденсата; *3* — паропровод; *4* — течка; *5* — транспортер

На Камгэсстрое (рис. 129) система подогрева — одноступенчатая и только в штабелях, так как бункера подогрева, предусмотренные проектом, оказались ненужными. Регистры составлены из труб диаметром 100—140 *мм*, высотой 2 500 *мм*, шаг между регистрами 500 *мм*, а над течками вдвое больший. Заполнители подогреваются до 30° при расходе пара 143 *кг* на 1 $м^3$ заполнителей.

Как указано выше, эти способы оттаивания и прогрева заполнителей основаны на неэффективном теплообмене, медленны и требуют высоких удельных расходов пара, превышающих в 2—3 раза технически возможный расход тепла.

ЛИТЕРАТУРА

ВВЕДЕНИЕ

Контрольные цифры развития народного хозяйства СССР на 1959—1965 годы. (Тезисы доклада товарища Н. С. Хрущева на XXI съезде КПСС).

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) ГЭИ. 1957.

Пинчук Г. А., Покалюк А. И., Тебенихин Е. Ф., Технология топлива, смазочных материалов и воды, Трансжелдориздат, 1954.

Главснабуголь при СНК СССР. Переводные эквиваленты каменноугольного топлива СССР, ГЭИ, 1943.

Арсеев А. В., Сжигание газов. Металлургиздат, 1952.

Доброхотов Н. Н., К динамике диффузионных процессов, изд. АН УССР, 1948.

Вулис Л. А., Тепловой режим горения, ГЭИ, 1954.

Семенов Н. Н., Цепные реакции, ОНТИ, 1934.

Франк-Каменецкий Д. А., Диффузия и теплопередача в химической кикетике, изд. АН СССР, 1947.

Карабин А. И., Турбулентные мазутные форсунки. Сб. «Промышленные печи», Металлургиздат, 1953.

Ницкевич Е. А., Проектирование котельных установок, ГЭИ, 1951.

Кнорре Г. Ф., Перспективы развития циклонного принципа сжигания твердого топлива, «Теплоэнергетика», № 1. 1954.

Кнорре Г. Ф., Топочные процессы, ГЭИ, 1951.

Леви Л. И., Кислород в ваграночной плавке, Машгиз, 1952.

Льюис Б. и Эльбе Г., Горение, пламя и взрывы в газах, ГИЛ, 1948.

Предводителев А. С., Хитрин Л. А., Цуханова О. А., Колодцев Х. И. и Гроздовский М. К., Горение углерода, изд. АН СССР, 1949.

Гинзбург Д. Б., Газогенераторы и газовое хозяйство в стекольной и керамической промышленности, Промстройиздат, 1949.

Гинзбург Д. Б., Рационализация технологических схем газостанций и конструкций газогенераторов, «Стекло и керамика», № 9, 1953.

Колодцев Х. И. и Бабий В. И., Высокоинтенсивная газификация твердого топлива для газотурбинных установок, «Теплоэнергетика», № 9, 1956.

Гинзбург Д. Б., Об использовании подогретого дутья в газогенераторах, «Стекло и керамика», № 9, 1955.

Шишаков Н. В., Основы производства горючих газов, ГЭИ, 1948.

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

Газификация твердого топлива. Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 1957.

Глинков М. А. и Баум В. А., Механика газов, металлургические печи, Металлургиздат, 1951.

Нормы аэродинамического расчета котельных агрегатов, Машгиз, 1949.

Гинзбург Д. Б., Зимин В. Н., Кузяк, В. А., Гриссик А. М., Щукин А. А. и др., Теплотехнические расчеты установок силикатной промышленности, Промстройиздат, 1951.

Романенко П. Н., К теории эжекции и расчета струйных аппаратов, Известия АН СССР, 1953.
Чернов А. В., Кирпичные дымовые трубы, Госстройиздат, 1955.
Кучерук В. В., Очистка от пыли вентиляционных и промышленных выбросов, Госстройиздат, 1955.
Рысин С. А., Справочник по вентиляторам, Госстройиздат, 1955.
Нохратян К. А., Аэродинамические сопротивления в кольцевых и туннельных печах, Промстройиздат, 1957.
Михеев М. А., Основы теплопередачи, ГЭИ, 1956.
Воскресенский К. Д., Сборник задач по теплопередаче, ГЭИ, 1951.
Будрин Д. В., Моделирование нестационарных тепловых потоков в печных стенках. Труды Уральского политехнического института имени Кирова, вып. XVII, Металлургиздат, 1941.
Тимофеев В. Н., Теплообмен в слое. Изв. ВТИ, № 2, 1949.
Иванцов Г. П., Нагрев металла, Металлургиздат, 1949.
Китаев Б. И., Теплообмен в шахтных печах, Металлургиздат, 1945.
Лыков А. В., Теория теплопроводности, Гостехиздат, 1952.
Кондратьев Г. М., Регулярный тепловой режим, ГИТТЛ, 1954
Будрин Д. В. и Красссовский Б. А., Нагрев и охлаждение тел различной формы. Труды Уральского политехнического института имени Кирова, вып. XVII, 1941.
Теория подобия и моделирования, изд. АН СССР, 1951.
Кирпичев М. В., Теория подобия, изд. АН СССР, 1953.
Ваничев А П., Приближенный метод решения задач теплопроводности при переменных константах. Изв. АН СССР, ОТН, № 12, 1946.
Лукьянов В. С., Гидравлические приборы для технических расчетов, Изв. АН СССР, ОТН, № 2, 1939.
Шорин С. Н., Теплопередача, Госстройиздат, 1952.

РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ

Будников П. П., Высокоогнеупорные материалы, свойства и применение, Промстройиздат, 1948.
Кауфман Б. Н., Теплопроводность строительных материалов, Госстройиздат, 1955.
Некрасов К. Д., Огнеупорные бетоны, их свойства и применение, Стройиздат, 1949.
Справочник строителя промышленных печей, Госстройиздат, 1952.
Бельский В. И. и Чернов А. В., Кладка и монтаж промышленных печей, Стройиздат, 1948.
Тебеньков Б. П., Рекуператоры для промышленных печей, Металлургиздат, 1955.
Вознесенский А. А., Пути повышения экономичности и производительности шахтных печей, «Промышленная энергетика» № 8, 1956.

РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ

Лыков А. В., Теория сушки, ГЭИ, 1950.
Лыков А. В., Явления переноса в капиллярно-пористых телах, ГИТТЛ, 1954.
Лыков А. В., Тепло и массообмен в процессах сушки, ГЭИ, 1956.
Лебедев П. Д., Сушка инфракрасными лучами, ГЭИ, 1955.
Лурье М. Ю., Сушильное дело, ГЭИ, 1949.
Филоненко Г. К. и Лебедев П. Д., Сушильные установки, ГЭИ, 1952.
Федоров И. М., Теория и расчет процесса сушки, ГЭИ, 1955.
Лебедев П. Д. и Щукин А. А., Промышленная теплотехника, ГЭИ, 1956.
Шервуд Т. К., Сушка твердых тел, Гослестехиздат, 1945.
Нохратян К. А., Искусственная сушка в керамической промышленности, ч. 1 и 2, ОНТИ, 1938.
Шумилин А. А., Сушка огнеупоров, Металлургиздат, 1952.
Ворошилов А. П., Барабанный сушильный агрегат, Гостехиздат, 1949.
ЦКТИ. Нормы расчета и проектирования пылеприготовительных установок, Машгиз, 1952.

Шемаханов М. М., Сушка и сушилки на обогатительных и углебрикетных фабриках, Углетехиздат, 1952.
Лурье М. Ю., Улучшение работы барабанной сушилки путем устройства цепных завес, Труды НИИСтройкерамики, 1954, вып. 9.
Булавин И. А., Гончар П. Д., Краткий справочник по производству кирпича и черепицы, Росгизместпром, 1954.
Гончар П. Д., Совмещенная сушка и помол в шахтной мельнице, «Стекло и керамика», № 2, 1951.
Нохратян К. А., Штабельная бесполочная сушка сырца, Сб. трудов РОСНИИМС, № 3, 1953.
Жуков А. и Семенюк И., О дальнейшей интенсификации процессов сушки и обжига керамических изделий. Сб. трудов ЦНИИСМ УССР, № 2, 1955.
Смолякова З. А., Определение оптимального режима сушки кирпича по величине критического градиента влажности, Инф. бюл. РОСНИИМС № 1, 1956.
Симин Г. Ф., Повышение производительности сушил и печей кирпичных заводов путем их тепловой блокировки. Инф. бюл. РОСНИИМС, № 1, 1956.
Роговой М. И., Использование отходящего тепла в кирпичной промышленности, Промстройиздат, 1949.
Скоростная сушка кирпича-сырца в камерных и туннельных сушилах, инстр., указания МПСМ РСФСР, Промстройиздат, 1951.
Ускоренная сушка сырца в туннельных сушилах Кучинского кирпичного завода, Инф. сообщение МПСМ СССР, Промстройиздат, 1956.
Ковельман Г. А., Бруслинская П. М., Соколова В. А., Ускоренная сушка изделий сложной формы инфракрасными лучами, Труды ГИКИ, № 1, 1953.
Технические указания по эксплуатации туннельных шестиярусных сушил для сушки листов гипсовой штукатурки, Промстройиздат, 1954.
Лыков А. В. и др., Метод интенсивной сушки строительных материалов, «Строительные материалы, изделия и конструкции», № 12, 1955.
Мазнин А. Н. и др., Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников, ГЭИ, 1950.

РАЗДЕЛ ПЯТЫЙ

Юнг В. Н., Бутт Ю. М. и др., Технология вяжущих, Промстройиздат, 1952.
Ансельм В., Шахтные печи, Промстройиздат, 1956.
Крамм А. С., Основные элементы теории и расчета шахтных полугазовых известеобжигательных печей, БТИ МПСМ РСФСР, 1949.
Голубков С. Н., Определение времени пребывания известняка в шахте известеобжигательной печи, Сб. трудов РОСНИИМС, № 8, 1954.
Крамм А. С., Пофракционный метод обжига известняка, Промстройиздат, 1951.
Брусиловский Г. В., Производство извести, Госхимиздат, 1954. ГОСТ 2621-44. Печь шахтная.
Ходоров Е. И., Печи цементной промышленности, т. 1 и 2, Промстройиздат, 1949, 1950.
Ходоров Е. И., Высокопроизводительная автоматическая шахтная печь, «Цемент», № 5, 1954.
Палагин Г. С., Новая автоматическая комбинированная шахтная печь для обжига извести и цемента, изд. Ленинградского дома технической пропаганды, 1955.
Мазуров Д. Я., Увеличение производительности автоматических шахтных печей, «Цемент», № 1, 1953.
Боганов А. И., Механическое оборудование цементных заводов, Промстройиздат, 1955.
Хохлов В. К., Пути реконструкции вращающихся печей, «Строительные материалы, изделия и конструкции», № 2, 1957.
Ягеман Д., Вращающаяся печь с конвейерным кальцинатором, «Строительные материалы, изделия и конструкции», № 12, 1955.
Бурковский Ю. А., Вращающаяся печь с конвейерным кальцинатором, «Цемент», № 2, 1955.
Соколов А. С., Способы повышения стойкости футеровки вращающихся печей, Промстройиздат, 1954.

Огибалов Т. и др., Опыт использования вращающейся печи для обжига извести, «Строительные материалы, изделия и конструкции», № 6, 1956.
Лурье Ю. С., Двустороннее питание вращающихся печей сырьевой смесью, «Цемент», № 1, 1955.
Волженский А. В., Эстрих-гипс, БТИ МПСМ РСФСР, 1949.
Козлов Б. А., Обжиг вяжущих во взвешенном состоянии, Гизместпром, 1936.
ВНИИГипс, Гипсовые материалы, № 1, 1952.
Печуро С. С., Анализ тепловых балансов варочных котлов, 1947.
Булавин И. А., Силенок С. Г., Оборудование для производства строительных материалов, Машгиз, 1954.
Вознесенский А. А., Непрерывная варка гипса с использованием вторичных энергоресурсов. Труды Ростовского-на-Дону инженерно-строительного института (РИСИ), выпуск 5, 1956.
Хохель А., Агломерационный способ получения керамзита, «Строительные материалы, изделия и конструкции», № 12, 1955.
Вальберг Г. С., Новое в обжиге клинкера на агломерационной решетке, Промстройиздат, 1955.
Элинзон М. П. и др., Технология спекания топливных шлаков и зол методом агломерации, «Бюллетень строительной техники», № 17, 1953.
Онацкий С. П., Основные принципы заводской технологии производства керамзита, «Стекло и керамика», № 12, 1954.

РАЗДЕЛ ШЕСТОЙ

Мамыкин П. С., Стрелов К. К., Топки, печи, сушила огнеупорных заводов, Металлургиздат, 1950.
Гинзбург Д. Б. и др., Печи и сушила силикатной промышленности, Промстройиздат, 1956.
Китайцев В. А. и др., Теплотехника и тепловые установки в промышленности строительных материалов, Промстройиздат, 1954.
Романов П. Р., Освоение производства фасадной керамики для облицовки зданий МГУ имени Ломоносова, Труды НИИСтройкерамики, 1952.
Дуванов П. А., За высокие съемы кирпича с кольцевых печей, Промстройиздат, 1954.
Нохратян К. А., Теоретические основы скоростного обжига по методу П. А. Дуванова, Промстройиздат, 1955.
Володина Н. Н. и др., Опыт скоростного обжига кирпича по методу П. А. Дуванова на Бескудниковском заводе № 1, Сб. трудов РОСНИИМС, вып 9, 1955.
Шлыков А. В., Теоретические основы производства керамических стеновых материалов при введении топлива в шихту, Инф. бюллетень РОСНИИМС, № 1, 1956.
Полякова Т. И. и др., Обжиг в туннельных печах кирпича с топливом, введенным в сырец, Сб. трудов РОСНИИМС, вып. 5, 1953.
Инструктивные указания по обжигу сырца повышенной и формовочной влажности в кольцевых печах, Промстройиздат, 1956.
Наумов М. М., Туннельные печи кирпичной промышленности, Промстройиздат, 1953.
Заика И., Туннельная печь Хмельницкого завода, «Строительные материалы, изделия и конструкции», № 6, 1956.
Куколев Г. В., Бескапсельный обжиг керамических плиток в туннельной печи, «Стекло и керамика», № 6, 1952.
Деркач А. Д., Многоканальная муфельная печь непрерывного действия, «Стекло и керамика», № 5, 1954.
Будников П. П. и др., Технология керамики и огнеупоров, Промстройиздат, 1954.
Гурвич Р. М., Заводы строительной керамики, Промстройиздат, 1951.

РАЗДЕЛ СЕДЬМОЙ

Жилин А. И., Минеральная вата, Промстройиздат, 1953.
Горяйнов К. Э., Минеральная вата и изделия из нее, Машгиз, 1950.
Кальянов Н. Н. и др., Заводы минеральной ваты, Госстройиздат, 1952.

Мариенбах Л. М., Интенсификация ваграночного процесса. Машгиз, 1954.
Лемлех И. М., Применение горячего дутья в вагранках, Машгиз, 1949.
Леви Л. И., Кислород в ваграночной плавке, Машгиз, 1952.
Китаев Б. И., Теплообмен в вагранке., Челяб. отд. ВНИТО литейщиков, 1949.
Китайцев В. А., Опыт применения ватержакетных вагранок в производстве минеральной ваты. «Механизация строительства», № 5, 1949.
Вознесенский А. А., Использование вторичных энергоресурсов шахтных печей, Труды научно-технического совещания по использованию вторичных энергоресурсов, Госэнергоиздат, 1957.
Чикида И. Т., Оборудование кровельных заводов, Промстройиздат, 1954.
Жаренов А. С., Производство битумных материалов, Промстройиздат, 1948.

РАЗДЕЛ ВОСЬМОЙ

Волженский А. В., Водотермическая обработка строительных материалов в автоклавах, Изд. АА СССР, 1944.
Волженский А. В. и др., Перспективы производства автоклавных изделий, «Строительные материалы, изделия и конструкции», № 1, 6, 1955.
Волженский А. В. и др., Производство железобетонных пустотелых балок-настилов и панелей перекрытий, Госстройиздат, 1954.
Миронов С. А., Теория и методы зимнего бетонирования, Госстройиздат, 1956.
ЮжНИИ, Инструкция по применению эффективных режимов пропаривания бетонных и железобетонных изделий, ТУ Министерства строительства, 1953.
Гершберг О. А., Технология бетонных и железобетонных изделий, Промстройиздат, 1957.
Батурин В. В., Основы промышленной вентиляции, Профиздат, 1951.
Спектор Б. В., Производство пенобетона при радиационном (беспаровом) прогреве, «Бетон и железобетон», № 8, 1955.
Вегенер Р. В., Электропрогрев бетонных и железобетонных конструкций, Госстройиздат, 1953.
Кронгауз С., Универсальные камеры непрерывного действия на заводах сборного железобетона, «Строительные материалы, изделия и конструкции, № 11, 1955.
Инструкция по пропариванию бетонных и железобетонных изделий на заводах и полигонах, Госстройиздат, 1956.
Улучшение тепловлажностной обработки бетона в камерах непрерывного действия типа люберецкого завода, Инф. сообщение МПСМ СССР, Промстройиздат, 1955.
Вознесенский А. А. Установка аккумуляторов пара на заводах железобетонных изделий. Промышленная энергетика, № 7, 1958.
Вознесенский А. А., Эффективные схемы подогрева заполнителей бетона, Труды Ростовского-на-Дону инженерно-строительного института (РИСИ), выпуск 13, 1958.

Приложение 1

Относительная влажность φ по показаниям сухого и мокрого термометров (в %)

Психрометрическая разность $t_с - t_м$ в град.	Показания сухого термометра $t_с$ в град.											
	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	100
1,1	91	92	93	93	94	94	94	94	95	95	96	96
2,2	83	85	86	87	88	88	89	92	92	93	94	94
3,3	75	77	79	80	82	83	84	84	85	87	88	89
4,4	67	70	73	74	76	77	78	79	80	81	84	85
5,0	63	67	70	72	74	75	76	77	78	79	82	83
5,6	60	63	67	69	71	72	74	75	75	76	80	81
6,7	52	57	61	63	66	67	69	70	71	73	77	78
7,8	46	51	55	58	61	63	65	66	67	68	73	75
8,9	39	45	50	53	56	58	61	62	64	65	70	72
10,0	33	39	45	48	52	54	57	58	60	61	67	69
12,2	—	29	35	39	43	46	49	51	54	55	60	64
15,0	—	17	24	29	34	37	41	42	46	48	53	56
20,0	—	—	—	14	19	22	26	29	34	37	43	46
25,0	—	—	—	—	—	11	15	19	24	28	33	36
30,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	20	25	27

Приложение 2

О НОВОЙ ЕДИНИЦЕ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

I мировая конференция по свойствам воды и пара (Лондон, 1929 г.) постановила ввести единую для всех стран килокалорию, равную $\frac{1}{860}$ международного *квт-ч*. В 1945 г. международный комитет мер (Париж) рекомендовал в качестве единицы тепловой энергии джоуль, равный 10^7 эргов. При этом 1 международный *квт.-ч.* оказался больше абсолютного, а именно: 1 международный *квт-ч* = 1,0001 абс. *квт.-ч.*

Одновременно было уточнено и значение килокалории: 1 международная килокалория $= \frac{1}{859{,}8452}$ *квт.-ч.*

В 1954 г. международная конференция по свойствам водяного пара (Филадельфия), а затем в 1956 г. мировая конференция по свойствам водяного пара (Лондон) в которой принял участие и СССР, постановили перейти от килокалории к абсолютной тепловой единице — джоулю.

Рекомендуется с 1958 г. в СССР начать применение новой единицы тепловой энергии, давая в 1958 и в 1959 гг. величины одновременно в старых и новых единицах тепловой энергии с тем, чтобы в 1960 г. перейти только к новым единицам.

В приложениях *А, Б, В* (по данным ВТИ, июль 1958 г.) указаны пересчетные значения для новых единиц тепловой энергии и для вводимых одновременно новых единиц давления: 1 бар $= 10^6$ *дин/см²*. Во избежание путаницы между *кг* и *кг-силой* рекомендуется силу выражать в ньютонах:

1 *кг-сила* = 9,80665 ньютона;
1 ньютон = 0,101972 *кг-силы*.

В новых единицах тепловой эквивалент *квт-ч.*: 1 *квт-ч* =3 600 *кдж* =3,6 *мдж.* Теплота сгорания условного топлива равна 7 000 *ккал/кг*, что в переводе на новые единицы дает:

$$7\,000 \cdot 4{,}1868 = 29307{,}6 \text{ кбж.}$$

Если округлить эту величину до 30 000 *кдж* или 30 *мдж*, то теплота сгорания условного топлива повысится до 7 160 *ккал/кг.*

Коэффициент излучения абсолютно черного тела в новых единицах $C = 20{,}412 \cdot 10^{-8}$ *кдж/м² час град* K^4, что дает его величину в килокалориях: $C = 4{,}875 \cdot 10^{-8}$ *ккал/м² час град* K^4, т. е. несколько ниже принимаемого сейчас.

Приложение 2-А

Пересчетные значения для единиц энергии

Величина	Джоуль (*дж*)	Килограмм-метр (*кГм*)	Ватт-час (*вт-ч*)	Калория (*кал*)	Британская единица тепла (БЕТ)
10^4 *дж*	10 000	1019,72	2,77778	2388,46	9,47817
10^4 *кГм*	98066,5	10 000	27,2407	23422,8	92,9491
вт-час (10^{-3} *квт-ч*)	3 600	367,098	1	859,845	3,41214
10^4 *кал* (10 *ккал*)	41 868	4269,35	11,63	10 000	39,6832
10 БЕТ	10550,6	1075,86	2,93071	2519,96	10

Приложение 2-Б

Пересчетные значения для единиц энергии на массу

Величина	*кдж/кг* = *дж/г*	*кГм/г*	*вт-ч/г*	*кал/г* = *ккал/кг*	БЕТ/фунт
10^3 *дж/г*	1 000	101,972	0,27778	238,846	429,923
10 *кГм/г*	98,0665	10	0,0272407	23,4228	42,161
10^{-5} *квт·ч/г*	36	3,67098	0,01	8,59845	15,4772
10 *кал/г*	41,868	4,26935	0,01163	10	18
10^2 БЕТ/фунт	232,6	23,7186	0,0646111	55,5556	100

Приложение 2-В

Пересчетные значения для единиц давления

Величина	*атм* физ	*кГ/см²*	фунт/дюйм²	бар	*мм* рт. ст.	дюйм рт. ст.
1 *атм* физ.	1	1,03323	14,6959	1,01325	760	29,9213
1 *кг/см²*	0,967841	1	14,2233	0,980665	735,559	28,9590
10 фунт/дюйм²	0,680460	0,703070	10	0,689476	517,149	20,3602
1 *бар*	0,986923	1,01972	14,5038	1	750,062	29,5300
10^3 *мм* рт. ст	1,31579	1,35951	19,3368	1,33322	1 000	39,3701
10 дюймов рт. ст.	0,334211	0,345316	4,91154	0,338639	254	10

Анатолий Александрович Вознесенский

ТЕПЛОВЫЕ УСТАНОВКИ
В ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
И ИЗДЕЛИЙ

* * *

Госстройиздат
Москва, Третьяковский проезд, д. 1

* * *

Научный редактор канд. техн. наук *В. В. ПЕРЕГУДОВ*
Редактор издательства *В. А. РОЗАНОВА*
Технический редактор *В. И. КОРНЕЕВА*

Сдано в набор 23 IX-1958 г.
Подписано к печати 18/XI-1958 г.
Т-10355. Бумага 60×92¹/₁₆=12,125 бум.л.
—23,25 печ.л.+3 вкл. 1 п. л.
(25,5 уч.-изд. л.) Тираж 7000 экз.
Изд. № I-3543. Зак. № 1959.
Цена 9 руб. Переплет № 5—1 руб.

Типография № 1 Государственного издательства литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, г. Владимир

Опечатки

Страница	Строка: сверху	Строка: снизу	Напечатано	Следует читать
18		4	H_n	$C_m H_n$
24		18	$E = E_{II} - E_{II}$	$E = E_{II} - E_{I}$
44		7	*ккал/м³ час*	*ккал/м² час*
46	Рис. 8.		*P*—давление	*P*—регулировка
66	Формула I-37		$+ 0{,}375\ S^p +$	$+ 0{,}375\ S^p) +$
67	Формула II-42		$+ V^0_{H_2}$	$+ V^0_{N_2}$
72	Формула I-72		$(21 + \beta RO_2)$	$(21 - \beta RO_2)$
76	Формула I-82		$+ \frac{m}{2} C_m H_n$	$+ m C_m H_n$
89	Формула II-43		$\frac{\overline{V}\,\overline{N}}{\overline{N}}$	$\frac{\overline{V}\cdot\overline{H}}{\overline{N}}$
103	Формула II-69		$\varepsilon_{г+п} + T^3_г$	$\varepsilon_{г+п} \times T^3_г$
152	Формула IV-37		$- L(I_1 - I_0)$	$= L(I_1 - I_0)$
156	Формула IV-61 и ниже		*MI*	M_I
197		16	III битума марки	битума марки III
209	Формулы V-7—V-10		— *c*	*c*
246	18		1—2 сек.	1—2 мин.
283		13	№ 64	№ 6 4

Зак. 1959