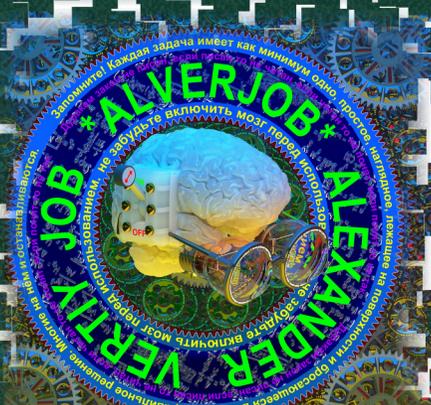


В. А. Филиппов

КОНСТРУКЦИЯ,
РАСЧЕТ
И ЭКСПЛУАТАЦИЯ
УСТРОЙСТВ
И ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ СУШКИ
МИНЕРАЛЬНОГО
СЫРЬЯ



В. А. Филиппов

КОНСТРУКЦИЯ,
РАСЧЕТ
И ЭКСПЛУАТАЦИЯ
УСТРОЙСТВ
И ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ СУШКИ
МИНЕРАЛЬНОГО
СЫРЬЯ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ, ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ



МОСКВА · НЕДРА 1979

Филиппов В. А. Конструкция, расчет и эксплуатация устройств и оборудования для сушки минерального сырья. 2-е изд., перераб. и доп. М., Недра, 1979. 309 с.

В книге изложены вопросы статики, кинетики и динамики процесса сушки минерального сырья различных видов в зависимости от способов подвода тепла и других условий. Рассмотрены вопросы техники и технологии сушки минерального сырья. Приведены методики расчета различных сушильных аппаратов. Даны рекомендации по выбору сушильных аппаратов, расчету систем пылеулавливания, тягодутьевых машин и вспомогательного оборудования при сушке различных продуктов. Освещены вопросы сушки угля, торфа, калийных солей, глины и других материалов.

Рассмотрены конструкции сушилок, топочных, пылеулавливающих, тягодутьевых устройств и вспомогательного оборудования сушилок. Освещены вопросы контроля и автоматизации сушильных установок и техники безопасности при эксплуатации сушилок.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников проектно-конструкторских, научно-исследовательских институтов горной промышленности и предприятий, изготавливающих соответствующее оборудование, а также может быть полезна студентам горных вузов.

Табл. 64, ил. 121, список лит. — 59 назв.



ВВЕДЕНИЕ

В различных отраслях промышленности по переработке и использованию минерального сырья (уголь, сланцы, руды черных и цветных металлов, торф, песок, глина, известняк, доломит, мел и др.) широко применяется тепловая сушка.

Допустимая влажность рудных концентратов и шихт перед обжигом или плавкой в многоподовых и отражательных печах находится в пределах 6—8%, допустимая влажность окисленных никелевых руд перед брикетированием — 12—14%. Влажность концентратов не должна превышать 2—4% перед электроплавкой и 0,3—0,5% перед кислородной взвешенной плавкой.

Влажность бурых углей и торфа не должна превышать перед брикетированием соответственно 18—20 и 10—18%.

При коксовании влажность коксующихся каменных углей должна быть не более 7—9%. Снижение влажности коксовой шихты обуславливает увеличение производительности коксовых печей, снижение расхода тепла на коксование, улучшение состояния огнеупорной кладки коксовых печей и улучшение качества кокса.

Сушка глины, песка, известняка, гипсового камня, доломита, мела перед их размолотом снижает расход электроэнергии на помол и устраняет замазывание транспортных, просеивающих и смешивающих устройств. Сушка этих материалов также необходима как для получения при формовании изделий с определенной остаточной влажностью, так и для достижения температуры, необходимой для технологической переработки сырья.

При перевозке минерального сырья в железнодорожных вагонах на большие расстояния также применяется тепловая сушка, обеспечивающая снижение перевозки балласта в виде избыточной влаги, а в зимнее время улучшающая транспортирование и разгрузку материалов. По степени смерзаемости сыпучие продукты условно разделяют на материалы с абсолютно безопасной и безопасной влажностью. В материалах с абсолютно безопасной влажностью отсутствует смерзающаяся при отрицательных температурах воздуха часть влаги, влияющая на сцепление зерен материала. Безопасная предельная влажность материала принимается исходя из прочности смерзания на сжатие в контактах по ледяным перемычкам, которая не должна превышать 0,025 МПа. Исследования СОЮЗДОРНИИ показали, что прочность смерзания не более 0,025 МПа для щебеночного и гравийного материала различной крупности при температуре окружающей среды —20°C соответствует следующему содержанию влаги (внешней) на его поверхности (%): 5—10 мм — 0,35; 5—15 мм — 0,45; 5—20 мм — 0,6 и 10—20 мм — 0,8. С повышением температуры окружающей среды

допустимое содержание воды на поверхности частиц материала увеличивается. Так, для щебня (гравия) класса 5—20 мм содержание влаги составляет (%): —20°C — 0,6; —15°C — 0,63 и 5°C — 0,88.

Безопасная влажность минерального сырья с точки зрения его смерзаемости определяется следующими показателями, %:

Каменные угли и их концентраты	. 5 — 7
Бурые угли . . . . .	. 25 — 35
Торф . . . . .	. 38 — 40
Руды и их концентраты	. 3 — 4
Глина . . . . .	. 8 — 10
Песок . . . . .	. 2 — 3
Гравий и щебень	. 1,5 — 2,5

На многих металлургических предприятиях при подготовке сырья к переработке или транспортированию широко применяется сушка руд, концентратов, шихт и кеков.

Влажность (%) руд, фильтрованных концентратов и кеков перед сушкой или металлургической переработкой приведена ниже.

Сульфидные руды . . . . .	. 3 — 6
Окисленные никелевые руды .	. 18 — 25
Цинковые и свинцовые кеки .	. 30 — 45
Концентраты:	
медные . . . . .	. 9 — 20
медно-никелевые .	. 15 — 22
пиритные . . . . .	. 10 — 18
свинцовые . . . . .	. 7 — 18
цинковые . . . . .	. 8 — 17

Влажность материалов колеблется в широком диапазоне. При влажности более 20% материал представляет из себя влажную массу, не обладающую сыпучестью.

На торфобрикетных заводах тепловой сушке подвергается фрезерный торф.

В процессе добычи фрезерный торф на поле подсушивается под воздействием солнечного тепла до влажности 40—45%. В зависимости от метеорологических условий сезона и длительности хранения фрезерный торф поступает на брикетный завод со среднегодовой влажностью 50—56%. На торфобрикетных заводах в качестве одной из главных технологических операций перед брикетированием является искусственная сушка фрезерного торфа до влажности 12—18% в газовых трубах-сушилках и паровых трубчатых сушилках и до 8—10% в пневмопароводяных сушилках.

Во фрезерном торфе преобладающим является класс крупности 0—5 мм, содержание более крупных классов (5—20 мм) составляет не более 35%, в том числе частиц крупнее 10 мм менее 15%.

На брикетные фабрики поступает торф со степенью разложения 15—20%.

Начальная влажность глины, поступающей на сушку, различна; она изменяется в зависимости от времени года в пределах 15—25%.

На обогатительных фабриках влажность асбестовой руды, поступающей на сушку, в зависимости от времени года, колеблется в широких пределах — 5—20%.

Хлористый калий получают из калийсодержащей породы — сильвинита, представляющего собой смесь минералов сильвина хлористого калия и галита хлористого натрия с примесями нерастворимых в воде минералов — гипса, ангидрида, карбонатов магния и глинистых веществ.

Сушка калийной соли применяется для снижения влажности с 5—10 до 0,5—1% после ее обогащения.

Основным препятствием для быстрой сушки многих материалов является их растрескивание.

Причиной появления трещин является неравномерность распределения температур и влагосодержания материала.

Весьма эффективным методом повышения скорости сушки является пароувлажнение массы глины.

При этом благодаря температуре материала, увеличению коэффициента потенциалопроводности и совпадению направления потоков влаги под действием термо- и влагопроводности можно значительно увеличить скорость сушки.

Поэтому работники проектных организаций и промышленных предприятий сталкиваются с трудностями при решении вопроса о выборе оптимальных режимов сушки и рациональных конструкций сушилок, а также при расчете сушильных агрегатов.

Предлагаемая книга является вторым, почти полностью переработанным изданием книги, вышедшей в 1969 г.

В ней автор сделал попытку обобщить современное состояние сушки минерального сырья. В книге нашли отражение также многие исследования автора в области сушки на предприятиях угольной промышленности.

Глава I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

§ 1. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЛАЖНОГО ГАЗА И ВОЗДУХА

В качестве сушильного агента применяются дымовые газы и воздух. Для сушки минерального сырья наибольшее распространение получили дымовые газы. Они всегда содержат определенное количество водяных паров, т. е. представляют собой газовые смеси. Характерными параметрами для влажного газа являются: давление p , парциальные давления пара $p_{\text{п}}$ и сухого воздуха $p_{\text{в}}$, температура T , плотность ρ , влагосодержание d , относительная влажность φ , теплоемкость C и энтальпия i . Расчет сушильных установок обычно ведут на 1 кг абсолютно сухого газа, так как эта величина остается постоянной в процессе сушки.

Влагосодержанием газа называется отношение массы влаги в данной газовой смеси к массе сухой части ее и обозначается d (г/кг) или x (кг/кг).

В газовой смеси объем каждого газа равен общему объему смеси V (м³), а температура — общей температуре смеси T (градус). Поэтому влагосодержание газа можно определить по уравнению

$$x = \frac{p_{\text{п}}V}{R_{\text{п}}T} : \frac{p_{\text{в}}V}{R_{\text{в}}T} = \frac{R_{\text{в}}}{R_{\text{п}}} \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{в}}}, \text{ кг/кг}, \quad (\text{I.1})$$

где $R_{\text{в}}$ и $R_{\text{п}}$ — газовые постоянные воздуха и пара.

Так как для воздуха и водяного пара $\frac{R_{\text{в}}}{R_{\text{п}}} = 0,622$, уравнение (I.1) можно представить в следующем виде:

$$x = 0,622 \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{в}}} = 0,622 \frac{p_{\text{п}}}{p - p_{\text{п}}}, \text{ кг/кг}$$

или

$$d = 622 \frac{p_{\text{п}}}{p - p_{\text{п}}}, \text{ г/кг сухого воздуха}. \quad (\text{I.2})$$

Относительная влажность газа φ определяется как отношение данной абсолютной влажности газа к максимальной абсолютной влажности, которая может удерживаться в 1 м³ газа без конденсации влаги при заданных давлении p и температуре T , т. е.

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}} \quad (\text{I.3})$$

или, учитывая, что $\rho = \frac{p}{RT}$, получим

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}}, \quad (1.4)$$

где $\rho_{\text{п}}$ — плотность водяного пара при данной температуре влажного газа, кг/м³; $\rho_{\text{н}}$ — плотность сухого насыщенного водяного пара, кг/м³; $p_{\text{п}}$ — парциальное давление водяного пара при данной температуре влажного газа, Па; $p_{\text{н}}$ — парциальное давление сухого насыщенного водяного пара, Па.

Величины $\rho_{\text{п}}$ и $\rho_{\text{н}}$ находят по таблицам параметров сухого насыщенного водяного пара по заданной температуре.

Плотность влажного газа определяют, суммируя плотности сухого газа и водяного пара:

$$\rho_{\text{вл.г}} = \rho_{\text{с.г}} + \rho_{\text{п}}, \quad \text{кг/м}^3. \quad (1.5)$$

Для смеси воздуха и водяного пара

$$\rho_{\text{вл.в}} = 0,289 \frac{p}{T} \frac{1000 + d}{622d}, \quad \text{кг/м}^3. \quad (1.6)$$

Удельный объем влажного воздуха V_0 , отнесенный к 1 кг сухого воздуха, можно определить по формуле

$$v_0 = 4,64 \cdot 10^{-6} (622 + d) (273 + t), \quad \text{м}^3/\text{кг} \text{ сухого воздуха}, \quad (1.7)$$

где t — температура влажного воздуха, °С.

Плотность влажного воздуха можно определить по уравнению

$$\rho_{\text{вл.в}} = \frac{1 + 0,001 d}{V_0}, \quad \text{кг/м}^3. \quad (1.8)$$

Плотность дымовых газов может быть определена по формуле [48]

$$\rho_{\text{г}} = \frac{b - kW_{\text{п}} + 1,285 (\alpha - 1)}{\alpha}, \quad \text{кг/м}^3, \quad (1.9)$$

где b и k — эмперические коэффициенты, зависящие от вида сжигаемого твердого топлива; α — коэффициент избытка воздуха; $W_{\text{п}} = \frac{W^{\text{р}}}{Q^{\text{р.н}}} 10^3$ — приведенная влажность, кг·%/кДж; $W^{\text{р}}$ — рабочая влажность, %; $Q^{\text{р.н}}$ — низшая теплота сгорания рабочего топлива, кДж/кг.

Значения коэффициентов h и k приведены ниже:

	h	k
Антрацит	1,376	0,007
Полуантрацит, тощий уголь	1,360	0,007
Каменный уголь	1,350	0,007
Бурый уголь	1,354	0,0051
Торф	1,365	0,006

Обычно плотность дымовых газов при $t=0^\circ\text{C}$ и $p=1 \cdot 10^5$ Па составляет 1,3—1,35 кг/м³.

Плотность дымовых газов, образующихся при сжигании газообразного топлива, отнесенная к $t=0^\circ\text{C}$ и $p=1\cdot 10^5$ Па, определяется по формуле

$$\rho_{\text{д.г}} = \frac{\rho_{\text{г.г}} + \frac{d}{1000}}{1 + \frac{d}{805}}, \text{ кг/м}^3. \quad (\text{I.10})$$

§ 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ И ИХ СМЕСИ С ВОЗДУХОМ

При расчете параметров смеси топочных газов и воздуха необходимо иметь элементный состав принятого топлива. Теплоту сгорания твердого и жидкого топлива можно определить калориметрированием или подсчитать по формуле Менделеева.

По элементному составу топлива определяется теоретическая масса абсолютно сухого воздуха для сжигания 1 кг топлива:

для твердого или жидкого топлива

$$L_0 = 0,115C^p + 0,345H^p + 0,043(S^p_{\text{л}} - O^p) \text{ кг/кг топлива}, \quad (\text{I.11})$$

где C^p , H^p , O^p и S^p — содержание углерода, водорода, кислорода и серы на рабочее топливо, % по массе;

для сухого газообразного топлива

$$L_0 = 1,38 \left(0,0179 \text{CO} + 0,248 \text{H}_2 + 0,44 \text{H}_2\text{S} + \right. \\ \left. + \sum \frac{m + \frac{n}{4}}{12m + n} C_m H_n - O_2 \right), \text{ кг/кг топлива}, \quad (\text{I.12})$$

где CO, H_2 , H_2S , $C_m H_n$ — содержание составляющих газообразного топлива, % по массе; m и n — число атомов углерода и водорода в молекуле углеводорода ($C_m H_n$).

При отсутствии данных об элементном составе топлива

$$L_0 = \frac{\alpha}{1000} (Q^p_{\text{н}} + 6W^p) 0,24, \text{ кг/кг}, \quad (\text{I.13})$$

где α — коэффициент, равный: для торфа — 1,35; для угля — 1,40—1,43; каменных углей, сланцев, жидкого топлива — 1,42; тощих углей и антрацитов — 1,43.

Объем воздуха, теоретически необходимый для горения,

$$V_0 = \frac{L_0}{1,293}, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (\text{I.14})$$

Суммарное количество продуктов (дымовых газов), полученных при полном сгорании 1 кг топлива, включает массу сухих газообразных продуктов ($G_{\text{с.г}}$) и массу водяных паров ($G_{\text{в.п}}$):

$$G_{\text{д.г}} = G_{\text{с.г}} + G_{\text{в.п}}. \quad (\text{I.15})$$

Массу водяных паров и сухих газов, образующихся при сгорании 1 кг топлива, можно определить для твердого и жидкого топлива по формулам:

$$G_{в.п} = \frac{9H^p + W^p}{100} + \frac{\alpha L_0 d_0}{1000}, \text{ кг/кг топлива,} \quad (I.16)$$

$$G_{с.г} = 1 + \alpha L_0 - \frac{9H^p + W^p + A^p}{100}, \text{ кг/кг топлива,} \quad (I.17)$$

где H^p , W^p , A^p — содержание водорода и влаги в топливе и его зольность, %; α — коэффициент избытка воздуха в топке; L_0 — теоретически необходимая масса воздуха на 1 кг сжигаемого топлива, кг/кг; d_0 — влагосодержание окружающего воздуха 10–15 г/кг.

Приближенно при отсутствии данных элементного анализа массу сухих газов можно определить по формуле

$$G_{с.г} = 1 + 0,00033 Q_{pH}^p \alpha, \text{ кг/кг.} \quad (I.18)$$

Для газообразного топлива:

$$G_{в.п} = \sum \frac{0,09n}{12m + n} C_m H_n \frac{\alpha L_0 d_0}{1000}, \text{ кг/кг сухого газообразного топлива;} \quad (I.19)$$

$$G_{с.г} = 1 + \alpha L_0 - \sum \frac{0,09n}{12m + n} C_m H_n, \text{ кг/кг сухого газообразного топлива.} \quad (I.20)$$

Зная массу сухих газов и водяных паров, можно определить влагосодержание топочных газов:

$$d = 1000 \frac{G_{в.п}}{G_{с.г}}, \text{ г/кг сухого газа.} \quad (I.21)$$

При снижении температуры топочных газов путем подмешивания к ним воздуха или агента рециркуляции коэффициент избытка воздуха определяется исходя из заданной температуры дымовых газов перед сушилкой.

Для твердого и жидкого топлива

$$\alpha = \frac{Q_{в}^p \eta_T + C_T i_T - \left(1 - \frac{9H^p + W^p + A^p}{100}\right) C_{с.г} t_1}{L_0 \left(C_{с.г} t_1 + \frac{i_{в.п} d_0}{1000} - i_0\right)} - \frac{\frac{9H^p + W^p}{100} i_{в.п}}{L_0 \left(C_{с.г} t_1 + \frac{i_{в.п} d_0}{1000} - i_0\right)}. \quad (I.22)$$

Для газообразного топлива

$$\alpha = \frac{Q_{\text{в}}^{\text{р}} \eta_{\text{т}} + C_{\text{т}} i_{\text{т}} - \left(1 - \sum \frac{0,09n}{12m+n} C_m H_n\right) C_{\text{с.г}} t_1}{L_0 \left(C_{\text{с.г}} t_1 + \frac{i_{\text{в.п}} d_0}{1000} - i_0\right)} - \frac{\left(\sum \frac{0,09n}{12m+n} C_m H_n\right) i_{\text{в.п}}}{L_0 \left(C_{\text{с.г}} t_1 + \frac{i_{\text{в.п}} d_0}{1000} - i_0\right)}, \quad (1.23)$$

где $Q_{\text{в}}^{\text{р}}$ — высшая теплота сгорания рабочего топлива, кДж/кг; $\eta_{\text{т}}$ — к. п. д. топки, учитывающий потерю тепла в окружающую среду; $C_{\text{т}} i_{\text{т}}$ — энтальпия топлива, кДж/кг; i_0 — энтальпия воздуха при входе в сушилку, кДж/кг; $i_{\text{в.п}}$ — энтальпия водяных паров кДж/кг.

§ 3. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Любой влажный материал состоит из абсолютно сухого вещества $G_{\text{с}}$ и влаги $W_{\text{м}}$, поэтому массу влажного материала можно определить по уравнению

$$G_{\text{вл}} = G_{\text{с}} + W_{\text{м}}, \text{ кг.} \quad (1.24)$$

Относительная влажность материала определяется отношением массы влаги во влажном материале к массе влажного материала:

$$W_{\text{а}} = \frac{W_{\text{м}} \cdot 100}{G_{\text{вл}}}, \text{ \%}. \quad (1.25)$$

Абсолютная влажность, или влажность на сухую массу, определяется отношением массы влаги материала к массе абсолютно сухого вещества

$$W_{\text{а}} = \frac{W_{\text{м}} \cdot 100}{G_{\text{с}}}, \text{ \%}. \quad (1.26)$$

Между этими двумя величинами существуют следующие соотношения:

$$W_{\text{о}} = \frac{W_{\text{м}} \cdot 100}{G_{\text{с}} + W_{\text{м}}} = \frac{\frac{W_{\text{м}}}{G_{\text{с}}} \cdot 100}{1 + \frac{W_{\text{м}}}{G_{\text{с}}}} = \frac{W_{\text{а}} \cdot 100}{100 + W_{\text{а}}}, \text{ \%}; \quad (1.27)$$

$$W_{\text{а}} = \frac{W_{\text{о}} \cdot 100}{100 - W_{\text{о}}}, \text{ \%}. \quad (1.28)$$

Относительная влажность не может быть выше 100%, тогда как абсолютная может быть любой. Как правило, для минерального сырья применяется относительная влажность.

Помимо понятия «влажность» используют понятие «влагосодержание материала», которое определяется отношением массы влаги к массе абсолютно сухого материала в относительных единицах:

$$U = \frac{W_i}{G_c}, \text{ кг/кг.} \quad (I.29)$$

Масса влаги, испаренной в течение 1 ч, может быть определена по разности масс поступившего G_1 (кг/ч) и высушенного G_2 (кг/ч) материала:

$$W = G_1 - G_2, \text{ кг/ч} \quad (I.30)$$

или

$$W = G_c \left(\frac{W_1 - W_2}{100} \right) = G_c (U_1 - U_2),$$

где G_c — масса абсолютно сухого вещества, кг/ч; W_1 — начальная влажность материала, %; W_2 — конечная влажность материала, %; U_1 — начальное влагосодержание материала, кг/кг; U_2 — конечное влагосодержание материала, кг/кг.

Масса абсолютно сухого материала

$$G_c = G_1 \frac{100}{100 - W_1} = G_2 \frac{100}{100 - W_2} = \frac{G_1}{1 + U_1} = \frac{G_2}{1 + U_2}. \quad (I.31)$$

Масса высушенного материала

$$\begin{aligned} G_2 &= G_1 \frac{100 - W_2}{100 - W_1} = G_1 \frac{1 + U_2}{1 + U_1} = G_c (1 + U_2) = W \frac{100 - W}{W_1 - W_2} = \\ &= W \frac{1 + U}{U_1 - U_2}, \text{ кг/ч.} \end{aligned} \quad (I.32)$$

Начальная масса влажного материала

$$\begin{aligned} G_1 &= G_2 \frac{100 + W_1}{100 + W_2} = G_2 \frac{1 + U_1}{1 + U_2} = G_c (1 + U_1) = \\ &= W \frac{100 - W_2}{W_1 - W_2} = W \frac{1 + U_2}{U_1 - U_2}, \text{ кг/ч.} \end{aligned} \quad (I.33)$$

Для тепловых и аэродинамических расчетов сушилок большое значение имеет плотность материала. Различают кажущуюся ρ_k , насыпную ρ_n и действительную ρ_d плотности.

Кажущуюся и насыпную плотности используют для различных технических расчетов, действительную плотность применяют для ориентировочной оценки кажущейся и насыпной плотностей.

Действительная плотность сухого
минерального сырья, кг/м³:

Угли	1300—1700
Песок	1370—2190
Песчаник	1530—2950
Глина	2200—2540

Известняк	2400—2660
Доломит	2280—2740
Гипс	2150—2360
Каменная соль	2120—2220
Торф	720—850
Графит	2200—2300
Хромитовая руда	3700—4500
Колчеданная руда	3500—4500

Характерной особенностью кажущейся плотности некоторых видов минерального сырья является ее тесная связь с минеральным составом и пористостью сырья.

Кажущаяся плотность углей, сланцев и торфа может быть определена приближенно по формуле

$$\rho_{\text{каж}} = \frac{100\rho_{\text{д}}}{100 + (\rho_{\text{д}} - 1) W_{\text{max}}} \frac{100 - W_{\text{max}}}{100 - W^{\text{p}}} 1000, \text{ кг/м}^3, \quad (I.34)$$

где W^{p} и W_{max} — рабочая влажность и максимальная влагоемкость, %.

Максимальная влагоемкость угля определяется стандартным методом (ГОСТ 8858—75).

Приближенно для сланца и торфа максимальную влагоемкость можно определять по формуле

$$W_{\text{max}} = 1 + 1,07 W^{\text{p}}, \text{ \%}. \quad (I.35)$$

Действительная плотность угля, сланца и торфа выражается уравнением

$$\rho_{\text{д}} = \frac{\rho_{\text{орг}} \cdot 10^5}{100 - A^{\text{с}} \left(1 - \frac{\rho_{\text{орг}}}{2,9}\right)}, \text{ кг/м}^3, \quad (I.36)$$

где $A^{\text{с}}$ — зольность сухого угля, %.

Кажущаяся плотность торфа зависит от влажности W^{p} и степени его разложения R и может быть выражена формулой

$$\rho_{\text{к}} = A + B W^{\text{p}} + C R, \text{ кг/м}^3. \quad (I.37)$$

Значения коэффициентов A , B и C следующие [20],

	A	B	C
Верховой торф:			
топяной	0,369	0,002332	0,0105
лесной и лесотопяной	0,631	0,000396	0,009019
Низинный торф:			
топяной	0,437	0,002716	0,00806
лесотопяной	0,566	0,002032	0,00642
лесной	0,500	0,002048	0,007266

Насыпной плотностью называется масса единицы объема материала в насыпном виде.

Насыпная плотность зависит от марки, крупности и влажности угля и может изменяться в широких пределах — от 750 до 1200 кг/м³.

Кажущаяся плотность материала $\rho_{\text{каж}}$ представляет собой массу единицы объема материала в массиве с внутренними порами и трещинами, заполненными влагой и воздухом (табл. I.1).

Кажущаяся и насыпная плотности углей, сланцев и торфа при их рабочей (табличной) влажности [27].

Кажущаяся плотность может быть определена по формуле

$$\rho_{\text{к1}} = \rho_{\text{к}} \frac{100 - W^{\text{P}}}{100 - W^{\text{P}}_1}, \text{ кг/м}^3, \quad (\text{I.38})$$

где $\rho_{\text{к}}$ — кажущаяся плотность при рабочей (табличной) влажности W^{P} .

Т а б л и ц а I.1

Кажущаяся и насыпная плотности углей, сланцев и торфа при их рабочей (табличной) влажности [46]

Марка топлива	Влажность W^{P} , %	Плотность, кг/м ³	
		кажущаяся $\rho_{\text{к}}$	насыпная $\rho_{\text{н}}$
Б	45	1300	780
Д	13	1400	880
Г	7	1440	910
Ж	5	1440	910
К	6,5	1480	930
СС	8	1590	1000
Т	4,5	1470	930
ПА	7,5	1510	950
А	5	1630	1030
Сланцы	12	1650	1030
Торф	50	850	450

Кривые изменения липкости тонкоизмельченного угля марки Ж (рис. I.1,а) показывают, что с увеличением влажности угольного порошка его липкость возрастает, а с повышением температуры контактирующей с ним пластины она значительно падает и почти полностью исчезает при температуре пластины 180—200°C. Аналогичные данные были получены для проб флотоконцентратов углей марок К, Г и антрацита.

Кривые изменения липкости соли хлористого калия (рис. I.1,б) свидетельствуют о том, что без нагрева металлической пластины липкость материала возрастает с увеличением его влажности.

При влажности соли более 10—11% липкость практически остается неизменной. С ростом температуры нагревателя и увеличением влажности липкость калийной соли уменьшается. Минимальные показатели липкости наблюдаются при температуре поверхности 50°C. При ее нагреве до 80°C резко возрастает липкость материала, по мере увеличения нагрева пластины она снижается, при температуре 200°C липкость исчезает полностью.

Липкость материала зависит в основном от крупности частиц и плотности их укладки. Максимальная липкость мелкодисперсных

материалов (частицы крупностью менее 50 мкм) составляет 140—180 кН/м², а для крупнодисперсных продуктов (частицы крупностью 50 мкм) липкость не превышает 2—3 кН/м².

Для тонкодисперсных угольных продуктов липкость может быть ориентировочно определена по формуле

$$L = 9,5 \frac{A^c (W - W_{\max})}{\rho_k d_{\text{м.ср}}^{\text{пов}}}, \text{ кН/м}^2, \quad (1.39)$$

где A^c и W — зольность на сухую массу и влажность материала, доли ед.; ρ_k и $d_{\text{м.ср}}^{\text{пов}}$ — плотность кг/м³ и средний диаметр частиц материала, м; W_{\max} — максимальная влагоемкость угольного продукта, доли ед.

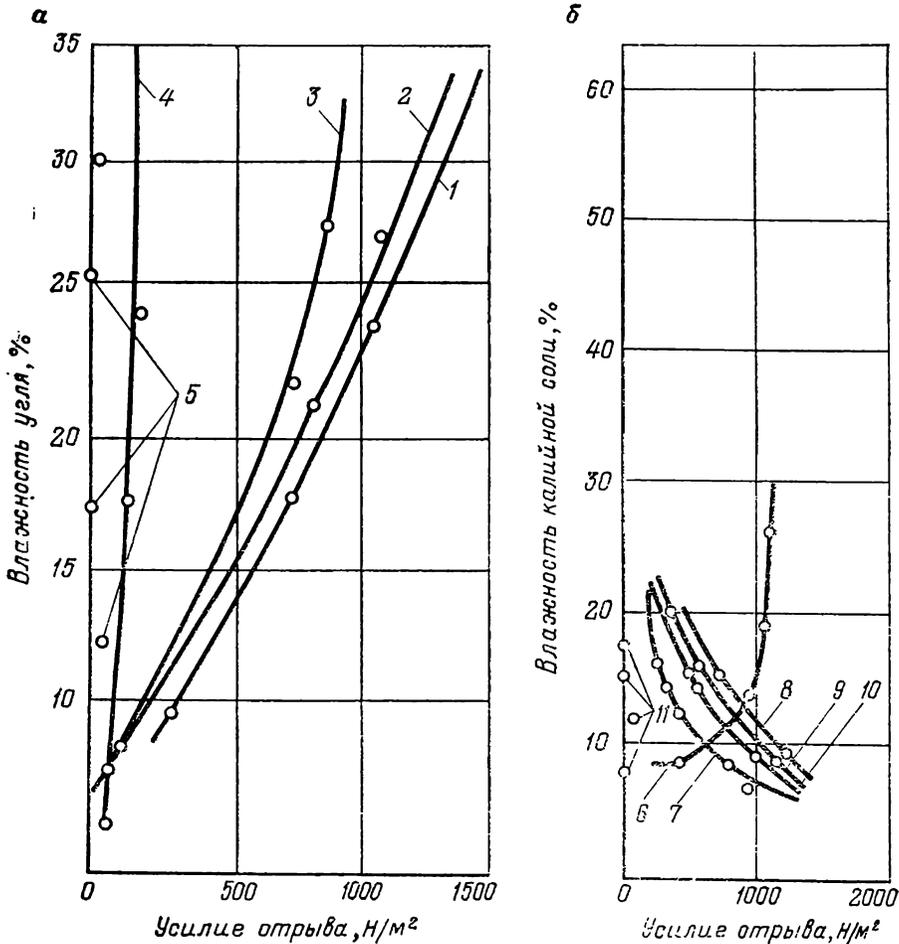


Рис. 1.1. Зависимость липкости угля марки Ж (а) и калийной соли (б) от изменения температуры контактирующей с ними металлической поверхности:

1, 6 — без нагрева; 2—5 — при температуре соответственно 80, 100, 180, 200°С; 7—11 — при температуре соответственно 50, 80, 100, 170, 200°С

Проведенные исследования адгезионных свойств углей различных марок и калийных солей свидетельствуют о широком диапазоне изменения липкости в зависимости от исходных свойств материалов, их влажности, температуры соприкасающейся поверхности. Зная механизм процесса налипания материала на нагретую поверхность, можно бороться с этим явлением, осложняющим работу промышленных сушильных установок, а также правильно выбирать сушильные аппараты и загрузочные устройства в зависимости от свойств сушеного материала.

§ 4. МАТЕРИАЛЬНЫЙ И ТЕПЛОВОЙ БАЛАНСЫ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Воздух или дымовые газы, которые в условиях непосредственного соприкосновения и теплообмена с высушенным материалом воспринимают удаляемую из него влагу, называют сушильным агентом. Среду, получающую от внешнего источника необходимую для сушки теплоту и передающую ее высушиваемому материалу через стенку, называют теплоносителем. Аппарат, в котором происходит искусственная сушка материалов, т. е. организованный отвод сушильного агента, поглотившего пары влаги, называется сушилкой (рис. 1.2).

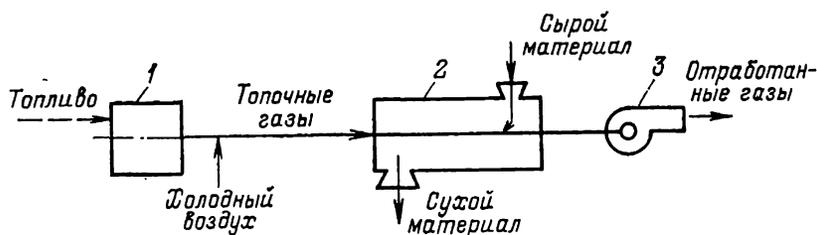


Рис. 1.2. Схема сушильной установки:
1 — источник тепла; 2 — сушилка; 3 — вентилятор

Схема сушильной установки состоит из сушилки, источника получения сушильного агента (топка, котел, калорифер и т. д.), вентилятора-дымососа для подачи агента и перемещения его в сушилку и транспортных устройств для подачи материала в сушилку и выдачи его из нее. Взаимное движение воздуха и материала в сушилке может быть параллельным — прямоток, встречным — противоток и перпендикулярным — перекрестный ток.

При сушке изменяются масса материала G_M , его влажность W и температура ϑ .

Обозначим массу абсолютно сухого сушильного агента, входящего и выходящего из сушилки, через L , массу влаги и материала до и после сушки через

$$\frac{G_1 W_1}{100} \text{ и } \frac{G_2 W_2}{100}. \quad (1.40)$$

Массу влаги в воздухе при его входе и выходе из сушилки выражаем как

$$L \frac{d_1}{1000} \text{ и } L \frac{d_2}{1000}. \quad (I.41)$$

Тогда масса влаги, поступившей в сушилку, должна быть равна массе влаги, вынесенной из нее:

$$\frac{G_1 W_1}{100} + L \frac{d_1}{1000} = \frac{G_2 W_2}{100} + L \frac{d_2}{1000}, \quad (I.42)$$

откуда

$$\frac{G_1 W_1}{100} - \frac{G_2 W_2}{100} = W. \quad (I.43)$$

Тогда

$$L = \frac{1000 W}{d_2 - d_1}, \text{ кг/ч.}$$

Обозначая через $l = \frac{G_r}{W}$ расход воздуха на 1 кг испаренной влаги, получаем

$$l = \frac{1000}{d_2 - d_1}, \text{ кг/кг влаги.} \quad (I.44)$$

Общим методом теплового расчета является составление теплового баланса сушилки на 1 кг испаренной влаги.

Расход тепла на испарение влаги

$$q_0 = 2500 + 1,9(t_2 - \vartheta_1), \text{ кДж/кг,} \quad (I.45)$$

где t_2 — температура газов, выходящих из сушилки, °С; ϑ_1 — температура материала перед сушкой, °С.

Расход тепла на нагрев материала во время сушки, отнесенный к 1 кг испаренной влаги,

$$q_m = \frac{G_m}{W} C_m (\vartheta_2 - \vartheta_1), \text{ кДж/кг,} \quad (I.46)$$

где C_m — удельная теплоемкость высушенного материала, определяемая по формуле

$$C_m = C_0 \frac{100 - W_2}{100} + \frac{W_2}{100}, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°С);} \quad (I.47)$$

ϑ_2 — температура материала после сушки, °С.

При расчетах для минерального сырья принимают $C_0 = 0,75 \div 1,13$ кДж/(кг·°С).

Потери тепла в окружающую среду, отнесенные к 1 кг испаренной влаги,

$$q_s = \frac{F_c k \Delta t_{\text{окр}}}{W}, \text{ кДж/кг,} \quad (I.48)$$

где F_c — наружная поверхность сушилки, м^2 ; k — коэффициент теплоотдачи, равный $0,1-0,02 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{С})$; $\Delta t_{\text{окр}}$ — разность температур внутри сушилки и воздуха в помещении, где расположена сушилка, $^\circ\text{С}$;

$$\Delta t_{\text{окр}} = (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}). \quad (1.49)$$

Изоляция сушилки выбирается таким образом, чтобы температура наружной стенки не была выше 45°С или чтобы коэффициент теплоотдачи был равен $0,1-0,02 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{С})$.

Для сушилок обычно принимают $q_5 = 126 \div 252 \text{ кДж/кг}$. Как правило, потери тепла в окружающую среду не превышают $5-10\%$.

Расход сухих газов на 1 кг испаренной влаги

$$l_{\text{с.г}} = \frac{q_0 + q_{\text{м}} + q_5}{c_{\text{г}} t_1 - c'_{\text{г}} t_2}, \quad \text{кг/кг}, \quad (1.50)$$

где $c'_{\text{г}}$ и $c''_{\text{г}}$ — теплоемкость сушильного агента на входе и выходе из сушилки, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$; t_1 и t_2 — температура сушильного агента на входе и выходе из сушилки, $^\circ\text{С}$.

Потери тепла с отходящими газами

$$q_2 = l_{\text{с.г}} (c''_{\text{г}} + 0,001 d_1 c_{\text{в.п}}) (t_2 - t_0), \quad \text{кДж/кг}, \quad (1.51)$$

где d_1 — влагосодержание газов при входе в сушилку, кг/кг ; $c_{\text{в.п}}$ — теплоемкость 1 кг пара в сушильном агенте при температуре t_2 , $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$; $t_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды, $^\circ\text{С}$.

Суммарный расход тепла на 1 кг испаренной влаги

$$\Sigma q = q_0 + q_{\text{м}} + q_2 + q_5, \quad \text{кДж/кг}. \quad (1.52)$$

Расход тепла на 1 кг испаренной влаги с учетом потерь тепла в топке

$$q = \frac{\Sigma q}{\eta_{\text{т}}}, \quad \text{кДж/кг}, \quad (1.53)$$

где $\eta_{\text{т}}$ — к. п. д. топки.

Расход топлива, сжигаемого в топке сушилки,

$$B = \frac{l_{\text{с.г}}}{G_{\text{с.г}}} = W, \quad \text{кг/ч} \quad \text{или} \quad B = \frac{qW}{Q_{\text{п.н}}}, \quad \text{кг/ч}. \quad (1.54)$$

Теоретический тепловой коэффициент полезного действия (к. п. д.) сушилки (без учета потерь тепла в окружающую среду) определяется из выражения

$$\eta_{\text{теор}}^{\text{с}} = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_{\text{с}}}, \quad (1.55)$$

где t_1 и t_2 — температура сушильного агента на входе и выходе из сушилки, $^\circ\text{С}$; $t_{\text{с}}$ — температура окружающей среды.

Действительный тепловой к. п. д. сушилки

$$\eta_{\text{д}}^{\text{с}} = \frac{q_0}{\Sigma q}, \quad (1.56)$$

где q_0 — расход тепла на испарение 1 кг влаги; Σq — суммарный расход тепла на испарение 1 кг влаги.

§ 5. ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СУШИЛКИ

Аналитический расчет сушилки, т. е. определение удельных расходов тепла и сухого агента сушки, является достаточно кропотливым, а при отсутствии данных по энтальпии $I_{\text{г2}}$ и температуре t_2 газов на выходе из сушилки приходится решать эту задачу методом подбора. Проще и нагляднее использовать графический метод — I - d -диаграмму, построенную проф. Л. К. Рамзиным (рис. 1.3).

Основными параметрами этой диаграммы являются энтальпия и влагосодержание. Барометрическое давление принято равным $9,7 \cdot 10^5$ Па. Энтальпия I отложена по оси ординат, а влагосодержание d — по оси абсцисс. Для более четкого построения семейства кривых относительной влажности воздуха на той же диаграмме угол между осями взят не прямой, как в обычных графиках, а тупой, т. е. 135° . Наклонная ось влагосодержания не приведена на диаграмме, а вместо нее построена под прямым углом к оси ординат вспомогательная ось, на которую спроектированы значения влагосодержания с наклонной оси.

Поэтому линии энтальпии идут наклонно, а линии влагосодержания — вертикально. На диаграмме начерчены кривые постоянной влажности воздуха ($\varphi = \text{const}$). Они имеют резкий перелом при температуре $99,4^\circ\text{C}$, так как при этой температуре давление насыщенного пара равно барометрическому давлению $9,7 \cdot 10^5$ Па. Кривая $\varphi = 100\%$ делит площадь диаграммы на две части: верхнюю, где влажный воздух представляет собой смесь сухого воздуха и насыщенного пара, и нижнюю, где пар является насыщенным и частично сконденсированным в жидкость.

На I - d -диаграмме рядом с линиями $I = \text{const}$ пунктиром нанесены линии $t_{\text{м}} = \text{const}$. Они имеют небольшой наклон к прямым $I = \text{const}$. Внизу диаграммы построена кривая $p_{\text{п}} = f(d)$ в обычной координатной сетке. По оси ординат отложено парциальное давление водяного пара, а по оси абсцисс — влагосодержание.

По диаграмме влажного воздуха легко определить любые параметры влажного воздуха (I , d , t , $t_{\text{м}}$, φ , $p_{\text{п}}$), если известны два из них.

Перед подачей в сушилку воздух нагревается. Параметры холодного воздуха до его нагрева t_0 и d_0 . На рис. 1.4,а точка А соответствует состоянию воздуха перед нагревом.

При нагреве воздуха увеличиваются его энтальпия и температура, а влагосодержание остается неизменным. Этот процесс на

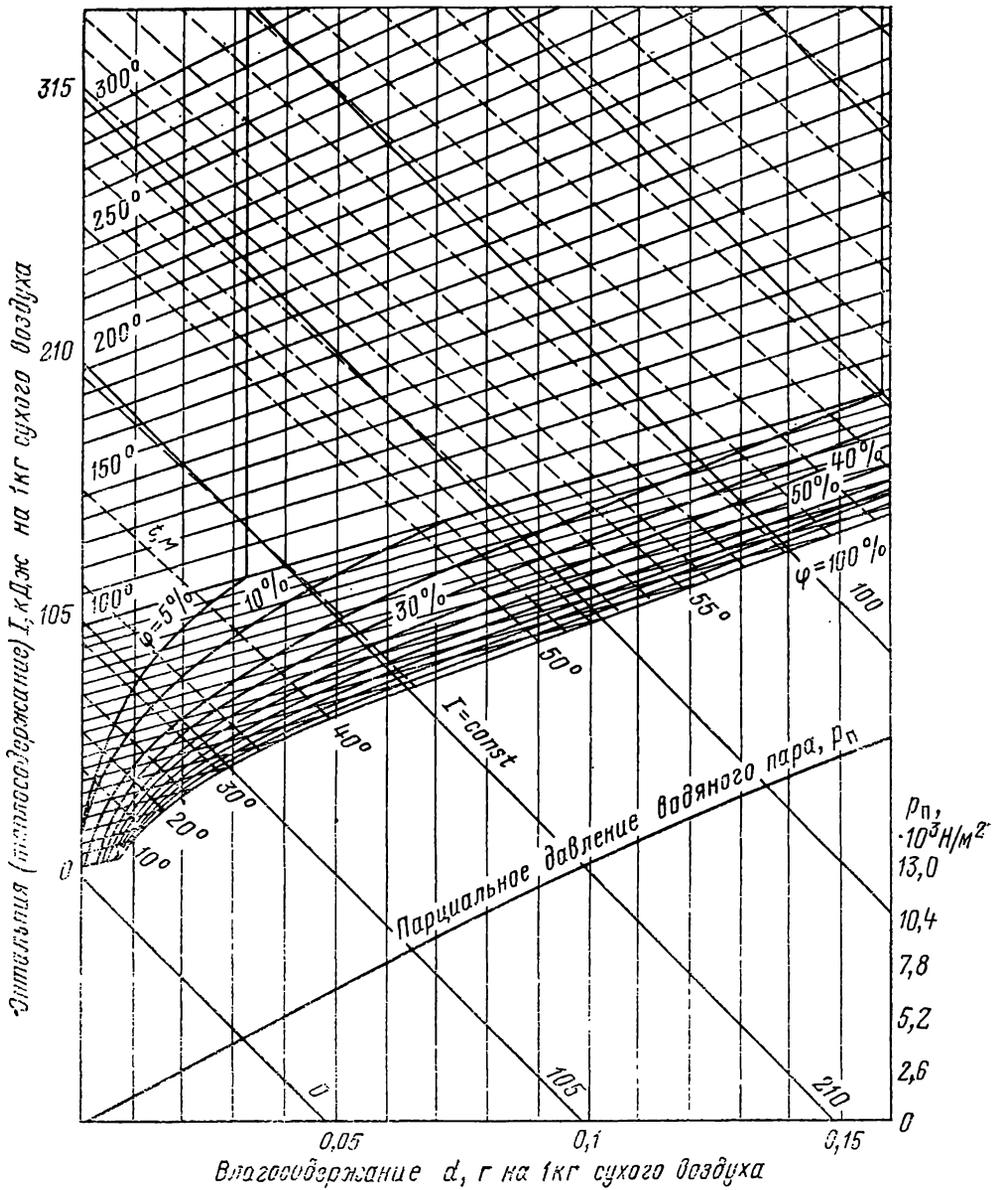


Рис. I.3. I - d -диаграмма влажного воздуха

I - d -диаграмме представлен линией AB . В точке B температура воздуха равна t_1 , энтальпия I_1 и влагосодержание $d_1 = d_0$. Теоретический процесс сушки будет происходить при постоянной энтальпии ($I = \text{const}$), т. е. по линии BC . В точке C параметры отработанного воздуха будут t_2 , d_2 , $I_2 = I_1$.

Расход воздуха, отнесенный к 1 кг испаренной влаги,

$$l = \frac{1000}{d_2 - d_1} = \frac{1000}{DCM_d}, \quad \text{кг/кг}, \quad (I.57)$$

где M_d — масштаб влагосодержания, кг/мм.

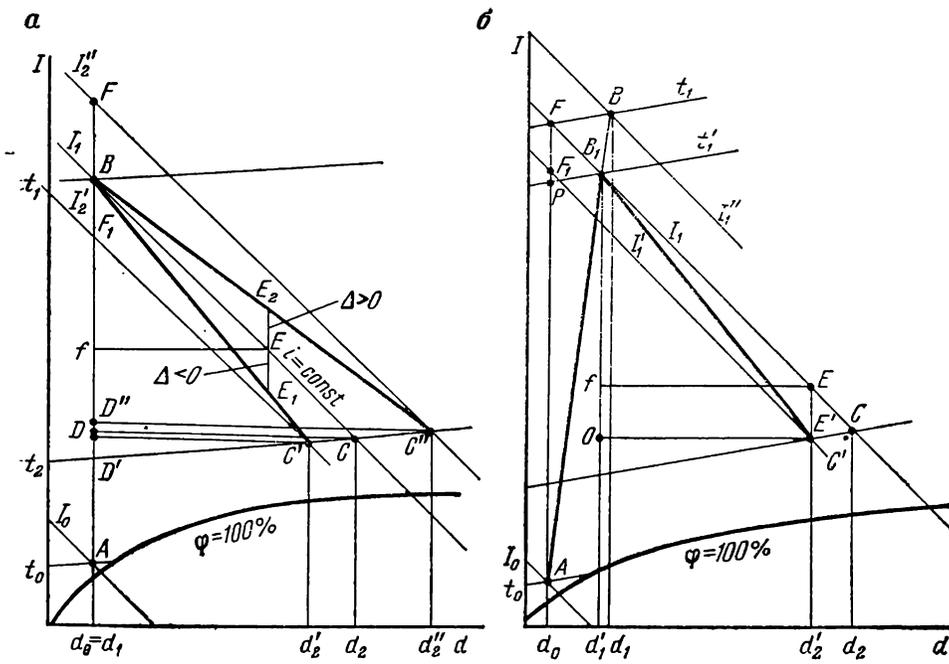


Рис. 1.4. Процесс сушки на I_d -диаграмме воздухом (а) и топочными газами (б)

Расход тепла на подогрев 1 кг воздуха будет выражаться линией AB в масштабе энтальпий M_I .

Расход тепла на 1 кг испаренной влаги при теоретическом процессе

$$q = l(I_1 - I_0) = 1000 \frac{M_I}{M_d} \frac{AB}{DC}. \quad (I.58)$$

При построении процесса действительной сушки исходят из процесса теоретической сушки, работающей в тех же пределах состояния агента сушки, что и действительная, т. е. при тех же параметрах t_0, d_1, t_1, t_2 или I_2 , и из величины Δ , вычисленной по формуле

$$\Delta = \vartheta_1 - (q_m + q_5), \text{ кДж/кг.} \quad (I.59)$$

В зависимости от того, будет ли $\Delta > 0$ или $\Delta < 0$, процесс сушки для действительной сушки определится линией BC'' (лежащей выше линии BC) или BC' (лежащей ниже линии BC).

Для построения линий BC' и BC'' на луче BC теоретической сушилки из произвольной точки проводят линию, перпендикулярную к оси абсцисс, на которой откладывают вверх ($\Delta > 0$) или вниз ($\Delta < 0$) отрезок

$$F_{1(2)} l m_{1(2)} = l f \frac{\Delta}{m}, \quad (I.60)$$

где m — величина, зависящая от масштаба диаграммы, равная $M_I/M_d \cdot 1000$.

Проводя через точку E луч BE до пересечения его с заданным значением I_2 или t_2 находят конечную точку сушильного процесса, изображенного, таким образом, линией BC' или BC'' .

После этого определяют расход агента сушки и тепла на 1 кг испаренной влаги:

$$l = \frac{1000}{d_2 - d_1} = \frac{1000}{M_d D' C' (D'' C'')}, \text{ кг/кг испаренной влаги; (I.61)}$$

$$q = l(I_1 - I_0) = m \frac{AF_{1(2)}}{D' C' (D'' C'')} + \Delta, \text{ кДж/кг испаренной влаги. (I.62)}$$

Количество сухого агента сушки, необходимого для испарения всей влаги W из материала,

$$G_r = lW, \text{ кг/ч. (I.63)}$$

Найдя по соответствующей таблице объем влажного агента сушки на 1 кг сухого (V м³/кг) при определенных значениях t и I , выбираем дымосос, производительность которого с учетом принимаемого в расчетах подсоса воздуха $\alpha_{пр}$ или утечек составит

$$v = Lv_0(1 \pm \alpha_{пр}), \text{ м}^3/\text{ч. (I.64)}$$

По удельному расходу тепла определяют его общий расход на сушку ($Q = qW$, кВт), а затем расход теплоносителя или топлива.

При сушке топочными газами с достаточной для практики точностью можно пользоваться Id -диаграммой, составленной для влажного воздуха (рис. I.4,б).

Зная температуру или энтальпию и влагосодержание топочных газов, можно построить процесс на Id -диаграмме.

Предположим, что параметры топочных газов соответствуют точке $B(I_1, d_1)$ на диаграмме, а параметры окружающего воздуха — точке $A(I_0, d_0)$. Изменение параметров от воздуха к топочным газам, изображаемое прямой линией AB , зависит от температуры газов. Наклон луча AB определяется теплотой сгорания топлива. Для одного и того же топлива наклон луча AB зависит от его влажности. Энтальпия топочных газов не зависит от влажности топлива и при одном и том же избытке воздуха будет неизменной.

Начальные параметры смеси топочных газов и воздуха перед сушилкой определяются пересечением изотермы заданной температуры сушки и линией смещения AB . Определив параметры смеси, действительный процесс сушки строят далее так же, как и процесс сушки нагретым воздухом.

Расход смеси топочных газов и воздуха на 1 кг испаренной влаги с параметрами, соответствующими точке B_1 (см. рис. I.4,б), можно определить по формуле

$$l = \frac{1000}{d'_2 - d'_1} = \frac{1000}{M_d DC'}, \text{ кг/кг. (I.65)}$$

Расход тепла на испарение 1 кг влаги рассчитывается по формуле

$$q = \frac{AF}{DC'} m + \Delta = \frac{AF'}{DC'} m, \text{ кДж/кг влаги.} \quad (I.66)$$

§ 6. СПОСОБЫ СУШКИ И КЛАССИФИКАЦИЯ СУШИЛОК

Для каждого материала устанавливается определенный режим сушки, т. е. допустимая интенсивность сушки, температура материала, температура и относительная влажность сушильного агента, скорость его движения и изменение указанных параметров в различные периоды процесса сушки.

Для сушки минерального сырья применяют большое число разнообразных сушилок.

Существуют различные способы сушки материалов:

конвективный, когда тепло, необходимое для испарения влаги, передается от сушильного агента сушиму материалу при непосредственном их соприкосновении;

контактный, когда тепло, необходимое для испарения влаги, передается материалу от горячей поверхности при непосредственном ее контакте с материалом;

радиационный, когда тепло, необходимое для испарения влаги, передается материалу инфракрасными лучами от электроламп или нагретых излучающих поверхностей;

сублимации — сушка материала в замороженном состоянии при глубоком вакууме;

химический — путем предварительной пропитки материалов водными растворами солей;

токами высокой частоты, когда температура внутри материала повышается и в результате этого влага из его внутренних слоев быстро перемещается к наружной поверхности и испаряется в окружающую среду;

комбинированные; конвективно-контактный; токи высокой частоты в комбинации с конвективным и терморрадиационным способами и др.

Классификация сушилок приведена ниже:

Признак классификации

Тип сушилки

По способу подвода тепла к материалу

Конвективная, контактная (сушка на горячих поверхностях), радиационная (сушка инфракрасными лучами), электрическая (сушка в электрическом поле)

По давлению в рабочем пространстве

Атмосферная, вакуумная, под давлением

По способу действия Сушильный агент

Периодическая, непрерывная
Воздух, топочные газы, смесь воздуха с топочными газами, перегретый пар, инертные газы, насыщенный водяной пар под давлением

По направлению движения сушильного агента относительно материала

По характеру циркуляции сушильного агента

По способу нагрева сушильного агента

По схеме нагрева сушильного агента

С прямотоком, противотоком, перекрестным током и реверсивная

С естественной и принудительной циркуляцией

С паровыми воздухоподогревателями, огневыми воздухоподогревателями, путем смешения с топочными газами, с электронагревом

С централизованным подогревом, с подогревом индивидуальными агрегатами и с промежуточным подогревом

Для сушки минерального сырья наибольшее распространение получили сушилки с конвективным способом сушки материалов топочными газами в газовых барабанных сушилках, трубах-сушилках, сушилках кипящего слоя и взвешенного слоя и др. Кроме того, применяются паровые трубчатые сушилки, пароводяные сушилки и др.

Глава II

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О МЕХАНИЗМЕ СУШКИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

§ 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ХАРАКТЕРЕ СВЯЗИ ВЛАГИ С МАТЕРИАЛОМ

Теоретическое обоснование процессов сушки и обезвоживания продуктов минерального сырья и строгий количественный расчет времени и энергии, потребных для удаления воды из них, возможны лишь при полной ясности характера и энергии связи влаги с материалом.

Связь между влагой и веществом материала характеризуется свободной энергией процесса изотермического обезвоживания, т. е. работой отрыва 1 моля воды при изотермическом обратимом процессе без изменения вещества материала и для данной его влажности:

$$E = -\Delta F = RT \ln \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}} = -RT \ln \varphi, \quad (\text{II.1})$$

где R — универсальная газовая постоянная; $T = 273 + t$ — термодинамическая (абсолютная) температура, °С; $p_{\text{п}}$, $p_{\text{н}}$ — давление пара над свободной поверхностью воды и материала при равновесной влажности и заданной температуре T , Па; φ — относительная влажность воздуха, доли единицы.

Из выражения (II.1) видно, что с увеличением энергии связи влага прочнее связана с веществом материала. На этом принципе основана классификация видов связи влаги с материалом, разработанная академиком П. А. Ребиндером.

По величине и природе энергии связи, согласно классификации П. А. Ребиндера, различают три основных вида связи влаги с материалом (в порядке возрастающей энергии связи): физико-механическую, физико-химическую и химическую.

При сушке минерального сырья обычно удаляется влага, связанная физико-механически и частично физико-химически.

На основе анализа термограмм сушки М. Ф. Казанским установлен ряд сингулярных точек, характеризующих различные виды связи влаги с капиллярно-пористыми телами.

Термографический анализ видов связи влаги с материалом, разработанный М. Ф. Казанским [17], основан на закономерностях кинетики сушки влажного дисперсного тела в условиях постоянной температуры окружающего воздуха. Экспериментальная сторона применения термографического метода сводится к одновременной записи в процессе сушки исследуемого тела кинетической кривой I (рис. II.1), изменения температуры тела, и кинетической

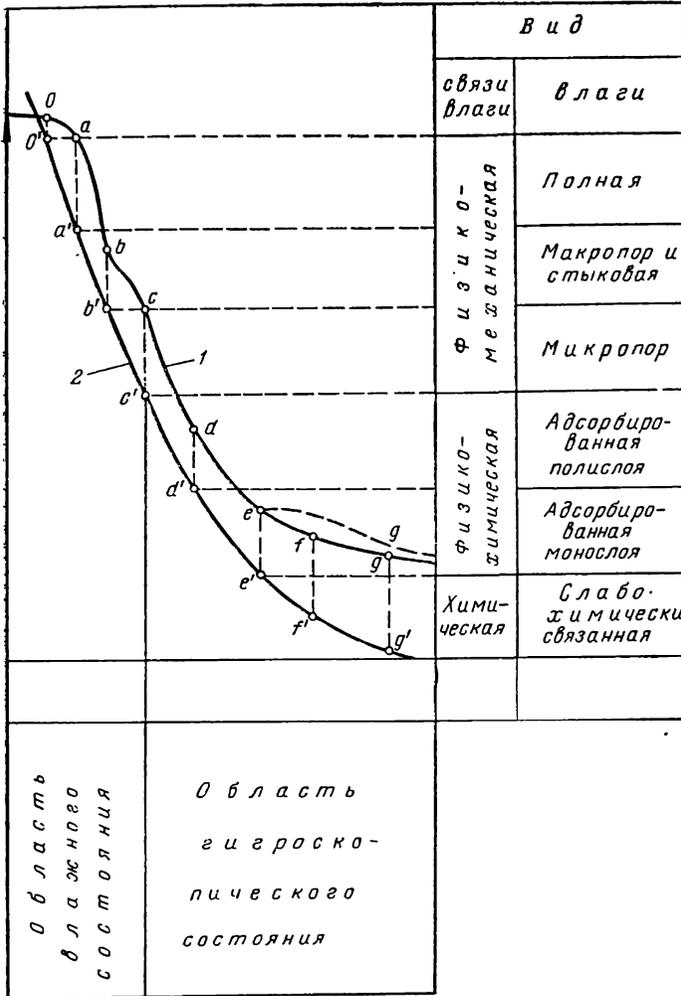


Рис. II.1. Кинетические кривые сушки

кривой 2 убыли его массы, называемой кривой сушки. На термограмме фиксируется разность между температурой тела и температурой окружающей среды.

Проектируя критические точки кривой 1 на кривую сушки 2, а затем проектируя соответствующие точки кривой сушки на ось влажности, получим количество различно связанной влаги, последовательно удаляемой из материала во время сушки. В период от начала сушки до критической точки *a* при постоянных температуре тела и скорости сушки испаряется капиллярная и кантактная влага с водонасыщенной поверхности пористого тела. В период между критическими точками *a* и *b* также удаляется стыковая влага. До критической точки *c* испарение влаги происходит при относительном давлении пара, равном единице: из пористого тела

удаляется капиллярная влага из макропор ($r > 10^{-5}$ см), т. е. влага так называемого влажного состояния тела.

Начиная с критической точки b , из тела удаляется гигроскопическая влага при относительном давлении пара меньше единицы.

При этом в период времени между критическими точками b и c испаряется капиллярная влага, находящаяся в порах, радиус которых меньше 10^{-5} см. Влага, удаляемая из пористого тела от начала сушки до момента, соответствующего положению критической точки c , относится к механически связанной с твердой фазой тела.

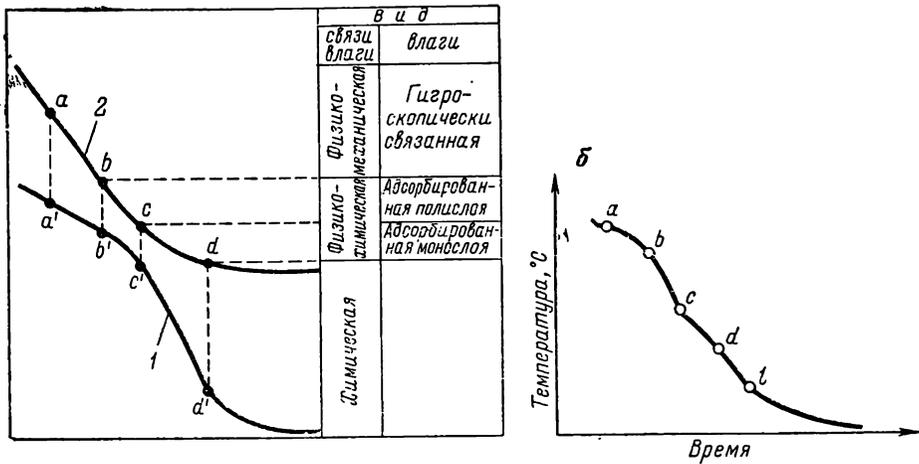


Рис. 11.2. Кинетические кривые сушки

Начиная с критической точки c , происходит удаление адсорбированной влаги, т. е. влаги, связанной физико-химически с твердой фазой. Сначала удаляется влага полимолекулярных слоев ΔW_{c-d} , чему на термограмме соответствует линейный участок $c-d$. Затем, начиная с критической точки d , удаляется влага ΔW_{d-e} мономолекулярного слоя.

В зависимости от пористой структуры и физико-химических свойств тела и удаляемой влаги названные периоды сушки могут быть большими или меньшими. Кроме того, в зависимости от различия пористой структуры тела и его физико-химических свойств могут выпасть отдельные отрезки кривой 1, а поэтому и сами термограммы сушки различных материалов по виду кривой и положению на ней критических точек могут быть различными.

На рис. 11.2,а показаны термограмма 1 и кривая сушка 2 тихвинского шлама, в котором содержится 12,85% гигроскопически связанной влаги и 6,28% адсорбционной (полимолекулярного слоя — 3,87%, мономолекулярного — 0,41%).

Термограмма сушки образцов каменных углей ряда марок (рис. 11.2,б) показывает, что независимо от температуры она при

сушке каменных углей имеет тот же вид, что и термограммы сушки таких типичных капиллярно-пористых тел, как силикагель и активированный уголь.

В зависимости от соотношения разных видов связи влаги все влажные материалы можно разделить на три группы: капиллярно-пористые, коллоидные и капиллярно-пористые коллоидные тела. Если влага, содержащаяся в теле, в основном связана капиллярными силами, то тело называется капиллярно-пористым (кварцевый песок, рудные концентраты, каменный уголь, старые бурые угли и др.). В случае преобладания осмотической или структурной связи влаги тело называем коллоидным. Если тело содержит влагу, осмотически связанную и капиллярную, то оно называется капиллярно-пористым коллоидным телом. К числу этих тел относятся торф, молодые бурые угли и др.

Т а б л и ц а П.1
Дифференциальное влагосодержание глин, [17] %

Вид глины	Влага набухания	Гигроскопическая влага	Адсорбированная влага	
			общая	в монослое
Пыжевский бентонит	83,8	46,6	20,3	14,0
Черкасский пеллгорскит	92,0	49,6	14,1	8,1
Часовьярская глина	51,4	15,0	7,0	3,5

Наиболее типичным коллоидным материалом является глина. Она способна удерживать большие количества как адсорбированной и гигроскопической влаги, так и осмотически связанной (табл. П.1).

Ближайшие к поверхности глинистых частиц слои воды прочно удерживаются ими вследствие действия координационных, электростатических и водородных связей [18]. Далее этих слоев воды располагаются гидратные слои, которые менее связаны с поверхностью глинистых частиц. При повышении температуры происходит нарушение слабых связей и молекулы воды переходят в более удаленные от поверхности слои, где преобладающее значение имеют слои осмотической влаги — переходные от структурированного гидратного слоя к свободной воде (Рис. П.3).

Исследования водных свойств глин показали, что с момента начала их сушки до состояния, соответствующего максимальной влажности набухания, происходит испарение избытка свободной воды. Затем до влажности, близкой к максимальной гигроскопической, испаряется иммобилизованная и осмотически связанная влага.

За счет нарушения неоднородности геометрии порового пространства и размера глинистых частиц часть воды в процессе сушки не удаляется из глины вследствие ее защемления в порах — это так называемая иммобилизованная вода, состав и структура

которой в зависимости от размера пор могут быть различными.

При увеличении температуры нагрева глины происходит разрушение исходной структуры связанной воды и переход части ее в свободную из области осмотической влаги, а из адсорбционной — в осмотическую. В результате этого в области больших влажностей глин происходит дополнительное удаление воды, что приводит к дополнительной температурной деформации глинистого вещества.

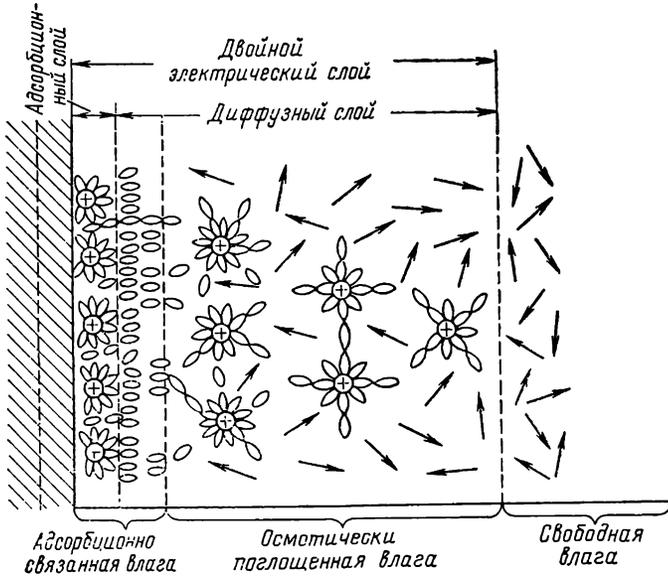


Рис. II.3. Схема строения связанной влаги в глинах

Одним из типичных коллоидных капиллярно-пористых материалов является торф. Он химически самый молодой среди других твердых топлив. Влажность торфа зависит от его вида, степени разложения и условий водного питания.

Основная часть воды в торфе естественной структуры при полной его влагоемкости приходится на долю капиллярной и внутриклеточной. Количество внутриклеточной воды определяется как разность общего количества связанной воды и сорбционной (табл. II.2) [29].

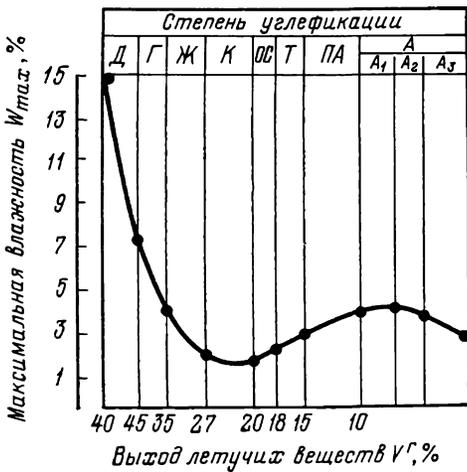


Рис. II.4. Изменение максимальной влагоемкости каменных углей и антрацитов в зависимости от степени их углефикации

Типичным капиллярно-пористым материалом является каменный уголь.

Влага, содержащаяся в угле, является одним из основных компонентов, определяющих степень углефикации угольного вещества.

Закономерность изменения содержания влаги с возрастанием степени углефикации достаточно хорошо прослеживается по максимальной влагоемкости W_{\max} углей от длиннопламенных до высокометаморфизованных антрацитов (рис. II.4).

Таблица II.2
Содержание связанной воды в торфах, %

Тип торфа	Степень разложения, %	Связанная вода, %	Распределение воды по видам связи		Относительная влажность торфа
			Сорбционная	Внутриклеточная	
Верховой	20	300	40	260	75
Сосново-пушицевый	60	275	70	205	73,4
Осоково-гипковый низинный	35	345	60	285	77,5
Осоково-сфагновый переходный	35	280	60	220	73,6
Древесно-осоковый переходный	40	275	60	215	73,2

Таблица II.3
Показатели взаимодействия углей с водой

Марка угля	Выход летучих V^T , %	Максимальная влагоемкость W_{\max} , %	Теплота смачивания, кал/г	Краевой угол смачивания, градус
Д	40,4	11,10	3,40	0—2
Г	38,2	7,45	2,47	52
Ж	31,6	2,76	1,62	71
ОС	19,1	3,02	1,73	90
Т	11,6	3,72	2,0	74
ПА	9,3	4,72	2,36	78
А	3,7	3,80	1,70	76

ИК-спектры углей разной степени метаморфизма показывают, что увлажнение каменных углей низкой и средней стадии метаморфизма сопровождается увеличением энергии взаимодействия их с водой на 0,8—2 кДж/моль (табл. II.3) [49].

На основании современных представлений о связи влаги с материалом каменных углей можно выделить следующие основные ее виды:

механически удерживаемая в пустотах (трещины, макрокапилляры и макропоры размером более 10^{-5} см) свободная вода;

капиллярно-связанная вода, которая может находиться в порах угля размером менее 10^{-5} см, где она испытывает напряжение растяжения и имеет пониженную плотность; сорбционно связанная вода, находящаяся в порах размером 5—8 Å, а также на поверхности микро- и макропор; химически связанная вода, которая может быть ионосвязанной в виде гидроксильных ионов или молекулярно связанной в виде кристаллогидратов минеральной части угля.

Т а б л и ц а П.4
Дифференциальное влагосодержание углей некоторых марок
(данные автора), %

Материал	Полная влагоемкость	Влага гигроскопическая	Адсорбированная влага		Влага	
			общая	в монослое	макропор	микропор
Шлам илонакопителей, марка А, $W_{нач}=35\%$ (ЦОФ «Донецкая»)	25	7,1	3,3	0,7	17,9	3,8
Флотоконцентрат с вакуум-фильтров, марка Ж, $W_{max}=25\%$ (ЦОФ «Дуванская»)	15,5	6,6	2,6	0,9	9	2,9
Флотоконцентрат с вакуум-фильтров, марка К, $W_{нач}=25\%$ (ЦОФ «Советская»)	19,6	4,1	1,6	0,4	16,5	2,5

Химически связанная вода входит в состав молекул угольного вещества. Наибольшее количество химически связанной влаги удаляется из угля при его нагреве до температуры 450—700°C. При сушке она не удаляется.

В табл. П.4 приведено распределение влаги по видам ее связи с угольным веществом.

§ 2. ГИГРОТЕРМИЧЕСКОЕ РАВНОВЕСНОЕ СОСТОЯНИЕ ВЛАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В состоянии равновесия, когда температура материала равна температуре окружающего воздуха, а давление пара материала равно парциальному давлению пара в воздухе, влажность материала называется равновесной.

Равновесная влажность помимо температуры и влажности воздуха, зависит также от способа достижения равновесия (сушка — десорбция, увлажнение — сорбция). Как правило, изотермы сорбции лежат выше изотерм десорбции. Зависимость между равновесной влажностью материала и влажностью окружающего воздуха при постоянной температуре, изображаемая в виде кривой, называется изотермой адсорбции.

Изотермы адсорбции имеют различную форму для разных материалов. Равновесная влажность материала, соответствующая влажности воздуха примерно 100%, является максимальной гигроскопической влажностью.

На рис. II.5 показаны изотермы адсорбции для углей ряда марок, полученных на приборе А. И. Чуприна [55] «динамическим» методом.

На рис. II.6 показаны изотермы адсорбции речного песка (а) и угля Сангарского месторождения (б) в Якутии при температуре воздуха 10,6; 12 и 30°C. Изотермы адсорбции имеют S-образный характер; с увеличением температуры воздуха равновесная влажность материалов уменьшается [44].

Точка на изотермах адсорбции (см. рис. II.6), отвечающая переходу от крутого подъема к линейной части кривой, характеризует завершение мономолекулярной адсорбции и начало образования полимолекулярных поверхностных слоев. На участке изотерм адсорбции ($\varphi=0,2\div 0,8$) имеет место прямая зависимость между упругостью водяного пара и равновесной влажностью материала. С дальнейшим возрастанием относительной влажности воздуха прямолинейный участок изотерм переходит в криволинейный, что указывает на изменение характера адсорбции. На этом участке поглощение влаги связано в основном с процессом капиллярной конденсации.

Равновесная влажность торфа может быть определена по эмпирической формуле

$$W_p = a\varphi^b e^c, \% \quad (II.2)$$

где φ — относительная влажность воздуха, %; e — основание натурального логарифма; a, b, c — постоянные, зависящие от температуры воздуха, значения которых приведены ниже.

Температура, *C	a	b	c
105	4,63	0,51	0,34
80	3,39	-0,07	1,63
55	2,04	-0,51	2,65

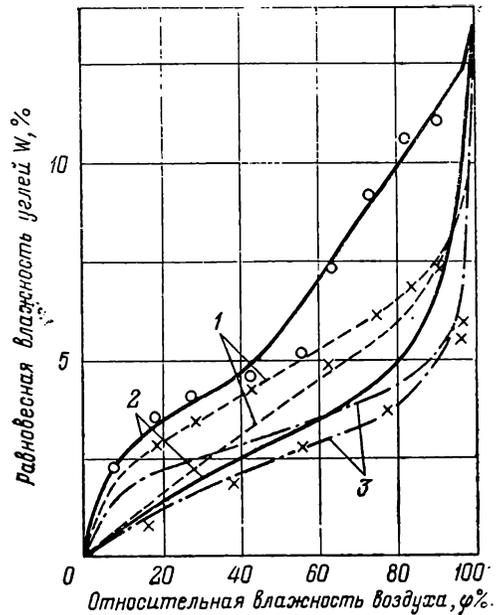


Рис. II.5. Изотермы адсорбции для продуктов обогащения углей:

1 — шлам антрацита, ЦОФ «Донецкая»; 2 — флотоконцентрат марки Ж, ЦОФ «Дуванская»; 3 — флотоконцентрат марки К, ЦОФ «Советская»

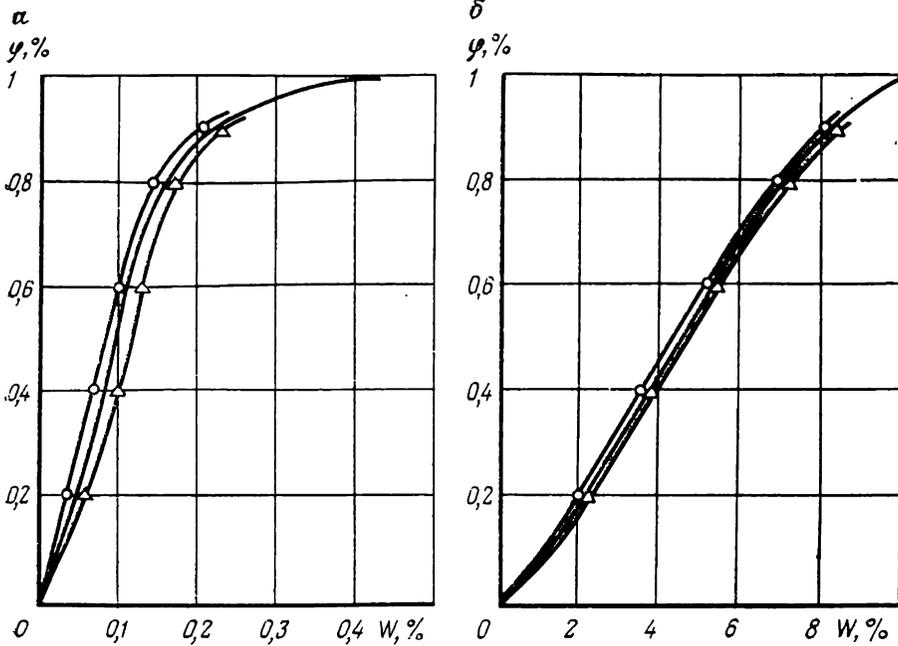


Рис. II.6. Изотермы адсорбции

30	1,02	-1,17	3,71
20	0,78	-1,29	4,20

Если материал после сушки будет транспортироваться и храниться в обычных условиях, то конечная влажность высушенного материала не должна быть меньше равновесной для условий транспортирования и хранения, иначе при хранении материал будет поглощать влагу из воздуха путем сорбции вплоть до достижения им влажности.

Изотермы сорбции и десорбции не совпадают (см. рис. II.5). Это явление называется сорбционным гистерезисом, который возникает в результате присутствия на поверхности частиц материала адсорбированного воздуха и наличия в материале четочных капилляров.

§ 3. МЕХАНИЗМ УДАЛЕНИЯ ВЛАГИ ИЗ МАТЕРИАЛА В ПРОЦЕССЕ СУШКИ

Характерной особенностью процесса сушки является переход влаги материала из жидкой фазы в газообразную путем испарения, которое происходит тогда, когда парциальное давление пара окружающей среды меньше, чем парциальное давление пара влаги материала.

С уменьшением разности давлений испарение влаги из материала снижается и при разности давлений, равной нулю, процесс сушки прекращается.

Процесс сушки характеризуется изменением влажности и температуры материала, а также скоростью сушки. Весь процесс сушки можно разделить на несколько периодов (рис. II.7,а). Кривая 1 выражает изменение влажности материала во времени $W=f(\tau)$. Кривая 2 характеризует изменение скорости сушки, т. е. изменение влажности материала в единицу времени, которое можно определить по тангенсу угла наклона α касательной пунктирной в любой точке кривой сушки (кривая 1):

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{A}{B}.$$

Кривая 3 показывает изменение температуры материала в процессе сушки. Процесс сушки в основном состоит из трех периодов:

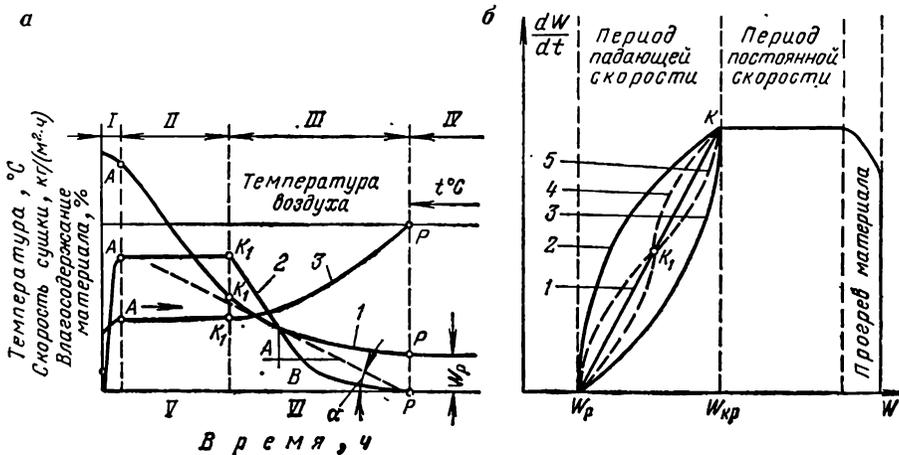


Рис. II.7. Изменение влажности, температуры материала и скорости сушки во времени:

I—VI — периоды соответственно прогрева, постоянной скорости, падающей скорости, равновесного состояния, влажного и гигроскопического состояний

прогрева; постоянной скорости сушки и падающей скорости сушки. В начальный период сушки (на кривой до точки A) происходит прогрев материала. После этого наступает период постоянной скорости сушки (отрезок AK₁ на кривой 2), которая численно равна скорости испарения влаги с открытой поверхности жидкости. Содержащаяся в материале влага ведет себя, как свободная. Температура поверхности материала равна приблизительно температуре мокрого термометра, которая остается постоянной (отрезок AK₁ на кривой 3). Закончится период постоянной скорости сушки, когда средняя влажность материала понизится до критической W_{кр} (точка K₁ на рис. II.7,а), а на поверхности испарения влажность материала будет соответствовать максимальной гигроскопической влажности W_{гигр}^{max}.

Период падающей скорости сушки начинается после уменьшения влажности материала ниже максимальной гигроскопической, когда скорость сушки замедляется (отрезок K_1P на кривой 2). При этом вследствие снижения расхода тепла на испарение влаги температура материала непрерывно увеличивается (отрезок K_1P на кривой 3) и уменьшается температурный перепад между температурой среды (воздуха) и сушимым материалом.

Характер кривых сушки зависит от влажности, размеров частиц материала и способа их укладки, гидродинамических условий обтекания, параметров среды (температуры, влажности, скорости). Совокупность этих факторов определяет характер протекания процесса сушки, который называется режимом сушки.

Кривые скорости сушки в период падающей скорости могут быть различной конфигурации (рис. II, 7,б). По характеру кривых можно в ряде случаев судить о виде связи влаги с материалом и влиянии различных факторов на процесс сушки. Кривая 1 характерна для тонких пористых материалов с одной критической точкой K . Кривые 2 соответствуют сушке коллоидных тел, кривая 3 характерна для пористых керамических материалов. Эти кривые имеют одну критическую точку K . Материалы с усложненной структурой имеют более сложные кривые сушки. Кривая 4 характерна для сушки глины, кривая 5 — для материалов с большой пористостью; на этих кривых наблюдается вторая критическая точка K_1 , которая показывает изменение механизма перемещения влаги в материале. Для многих материалов эта точка соответствует началу удаления адсорбционно связанной влаги, тогда как в начальный период падающей скорости удаляется влага микрокапилляров. Заканчивается период сушки при достижении поверхности материала равновесной влажности W_p , когда скорость сушки равна нулю и удаление влаги из материала не происходит.

Сушка минерального сырья в основном протекает в два периода — постоянной и падающей скорости сушки. В первом периоде с увеличением скорости сушильного агента возрастает скорость сушки $\frac{dW}{d\tau}$. В этом периоде скорость сушки зависит также от начальной влажности. Например, для сушки асбестовой руды эта зависимость описывается соотношением

$$\frac{dW}{d\tau} = 0,214W_n^{0,87}. \quad (\text{II.3})$$

С изменением скорости сушки изменяется величина критической влажности, при которой период постоянной скорости сушки переходит в период падающей скорости. Коэффициент сушки K , характеризующий скорость второго периода, для сушки асбеста может быть представлен зависимостью [16]:

$$K = 0,5 \left(\frac{dW}{d\tau} \right)^{0,4} \quad (\text{II.4})$$

Влияние температуры на скорость сушки может быть описано уравнением

$$\frac{dW}{d\tau} = At^{0,04}, \quad (\text{II.5})$$

где A — коэффициент, который в зависимости от скорости сушильного агента изменяется в пределах 0,5—2,75.

Для определения коэффициента теплоотдачи П. Д. Лебедевым было предложено универсальное уравнение, пригодное для обоих периодов сушки при конвективном и радиационном способах подвода тепла к материалу:

$$\text{Nu} = A \text{Re}^n K^m B \left(\frac{W}{W_{\text{кр}}} \right)^\sigma, \quad (\text{II.6})$$

где Nu — критерий Нуссельта; $\text{Nu} = \frac{\alpha d_M}{\lambda}$; Re — критерий Рейнольдса; $\text{Re} = \frac{v t_M}{\nu}$; ν — коэффициент кинематической вязкости газа; λ — коэффициент теплопроводности газа; v — скорость газа; A — постоянный коэффициент; K — параметрический критерий (подобный параметрическому критерию Гухмана), определяющий увеличение коэффициента теплоотдачи за счет турбулизации газового потока парами у поверхности материала,

$$K = \frac{T_M}{T_c};$$

T_M , T_c — соответственно температура мокрого термометра и среды; K ; B — параметрический критерий, учитывающий увеличение коэффициента теплоотдачи вследствие уменьшения толщины пограничного слоя с повышением температуры поверхности излучателя при сушке радиацией;

$$B = \frac{T_n}{T_c};$$

T_n — температура излучателя; K ; $\frac{W}{W_{\text{кр}}}$ — параметрический критерий, учитывающий (в период падающей скорости сушки) уменьшение коэффициента теплоотдачи с уменьшением влажности материала; $W_{\text{кр}}$, W — соответственно критическая влажность материала во втором периоде сушки; для первого периода сушки

$$\frac{W_1}{W_{\text{кр}}} \approx 1.$$

П. Д. Лебедев дает частные решения уравнения (II.6) применительно к глине и песку:

для глины

$$Nu = 0,45 Re^{0,5} \left(\frac{T_c}{T_m}\right)^2 \left(\frac{T_n}{T_c}\right)^{0,4} \left(\frac{W}{W_{кр}}\right)^{0,9}; \quad (II.7)$$

для песка

$$Nu = 0,65 Re^{0,5} \left(\frac{T_c}{T_m}\right)^2 \left(\frac{T_n}{T_c}\right)^{0,4} \left(\frac{W}{W_{кр}}\right)^{1,8} \quad (II.8)$$

Основными факторами, ускоряющими процессы сушки, являются: повышение скорости сушильного агента, увеличение разности температур и парциальных давлений (рис. II. 8, а).

В настоящее время за основу процесса сушки принимается модель углубления границы испарения, когда тело представляется двумя зонами: в поверхностном слое толщиной Δ (τ) влага перемещается в виде пара, а во внутренней зоне — в виде жидкости.

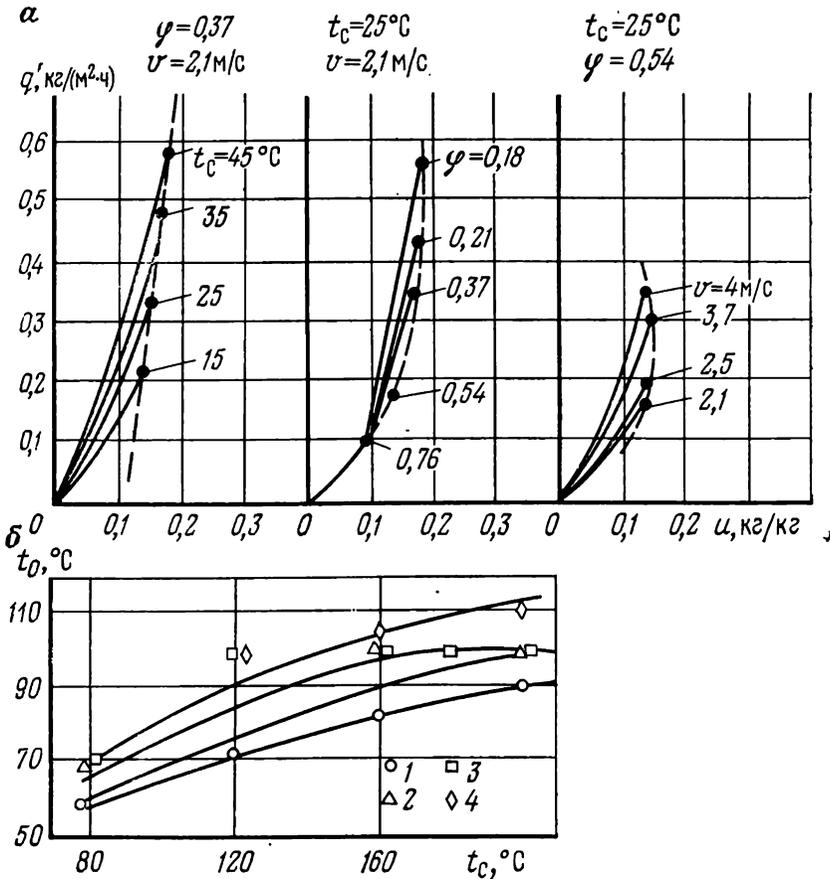


Рис. II.8. Изменение скорости сушки в зависимости от различных факторов: а — интенсивность сушки глины q' в зависимости от влагосодержания материала u , температуры t_c сушильного агента, относительной влажности ϕ и скорости сушильного агента v ; б — зависимость температуры поверхности испарения t_0 от температуры сушильного агента t_c и пористости материала, 1—4 — пористость соответственно 56, 46, 36, 26%

Испарение влаги происходит на подвижной границе зон $\Delta(\tau)$. Исследования показали, что в процессе сушки температура поверхности испарения (рис. II. 8,б) зависит от температуры сушильного агента ($t_c=80\div 200^\circ\text{C}$) и пористости материала и не зависит от скорости обдувающего сушильного агента ($v=5\div 15$ м/с).

При сушке материала во взвешенном состоянии величина углубления зоны испарения определяется зависимостью [6]

$$x_0 = 1 - \sqrt{3 \left(1 - \frac{a_m \delta \rho}{ac}\right) F_0}, \quad (\text{II.9})$$

где $x_0 = \frac{r}{R}$; r — текущий радиус; R — радиус тела; a_m — коэффициент диффузии влаги; a — коэффициент температуропроводности; δ — термоградиентный коэффициент; ρ — скрытая теплота парообразования; c — теплоемкость; F_0 — критерий Фурье, $F_0 = \frac{\alpha \tau}{R^2}$.

§ 4. ФИЗИЧЕСКИЕ, ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА СУШКИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Как показали опыты, в период с начала сушки до влажности материала, соответствующей максимальному влагопоглощению, происходит испарение избытка свободной воды. Затем, до влажности, близкой к максимальной гигроскопической, удельная теплота испарения этой влаги остается равной теплоте испарения свободной воды. От влажности, близкой к максимальной гигроскопической, удельная теплота испарения влаги начинает возрастать с уменьшением влажности, что свидетельствует об изменении физического состояния системы. В этом случае двухфазная система тепло — вода переходит в трехфазную систему тепло — вода — воздух. В этих условиях испарение влаги происходит с поверхности вогнутых менисков, кривизна которых непрерывно возрастает в связи с продолжающимися при сушке сжатием системы и уменьшением ее влажности. В гигроскопической области теплота, затрачиваемая на испарение влаги, идет не только на фазовое превращение воды в пар, но и на разрушение связи влаги с телом. В частности, на испарение влаги из микрокапилляров тела требуется дополнительный расход тепла по сравнению с затратой тепла при фазовом переходе воды в пар. Таким образом, влага, поглощенная веществом материала, имеет различные силы взаимодействия с его твердой фазой.

Для определения энергии связи влаги с веществом материала необходимо располагать данными о тепловом эффекте (удельная теплота испарения влаги) в зависимости от влажности и пористой структуры материала.

Удельную теплоту испарения влаги можно выразить следующим уравнением [18]:

$$L = L_0 - \Delta_1 L + \Delta_2 L + \Delta_3 L + \Delta_4 L. \quad (\text{II.10})$$

В уравнении (II.10) слагаемое L_0 представляет собой теплоту испарения свободной воды; $\Delta_1 L$ выражает рост удельной теплоты испарения, вызванный увеличением удельной поверхности жидкости в капиллярах; $\Delta_2 L$ и $\Delta_3 L$ представляют собой часть удельной теплоты испарения, которая зависит от изменения давления жидкости и пара в капиллярах; $\Delta_4 L$ выражает прирост удельной теплоты испарения, вызванный сжатием твердой фазы тела с изменением влажности.

Общее количество тепла, необходимое для сушки, можно представить выражением

$$Q = \int_{W_1}^0 L dW. \quad (\text{II.11})$$

Графически Q можно представить площадью фигуры, ограниченной кривой $L(W)$ и значением начальной влажности материала W_1 .

Методика расчета тепла, необходимого для высушивания материала, и физический смысл отдельных членов правой части уравнения (II.11) ясен из рис. II.9. Горизонтальной линией на рисунке отмечено значение удельной теплоты испарения свободной воды, вертикальными — границы удаления влаги разных видов связи с материалом. Заштрихованная часть рисунка по площади эквивалентна количеству тепла, необходимого для испарения влаги из материала от начальной до конечной его влажности.

При сушке угля, начиная от влажности ниже максимальной гигроскопической, заметно возрастает расход тепла на испарение влаги.

Обработка экспериментальных данных позволила автору установить зависимость возрастания расхода тепла от влажности материала при $W_2 < W_{\text{гигр}}^{\text{max}}$.

$$\Delta Q_{\text{исп}} = 2490 \left(\frac{W_{\text{гигр}}^{\text{max}}}{W_2} \right)^{0,1}, \text{ кДж/кг}, \quad (\text{II.12})$$

где $W_{\text{гигр}}^{\text{max}}$ — максимальная гигроскопическая влажность, %, W_2 — влажность высушенного угля, %.

Снимая при разных температурах изотермы адсорбции и сопоставляя их с термограммами и кривыми сушки, можно получить ряд термодинамических параметров и коэффициентов влагопереноса: химический потенциал массопереноса; истинную и среднюю удельные изотермические влагоемкости; температурный коэффи-

циент химического потенциала; термоградиентный коэффициент; дифференциальную теплоту адсорбции и полный удельный расход тепла на удаление связанной влаги.

Путем соответствующей обработки изотермы можно оценить такие характеристики материала, как его удельная поверхность, распределение пор по радиусам и виды связи влаги с веществом твердого тела.

Истинная удельная изотермическая влагоемкость, оставаясь практически независимой от температуры при $W = \text{const}$, с возрастанием удельного влагосодержания материала увеличивается.

Средняя удельная изотермическая влагоемкость материала характеризует его влагоаккумулирующие свойства в гигроскопической области.

Углю с большей удельной поверхностью соответствует и большая влагоаккумулирующая способность. Так, для сангарского угля с удельной поверхностью ($102 \text{ м}^2/\text{г}$) $\bar{C}_m = 0,1 \cdot 10^{-7}$ моль/Дж, для чульманского ($102 \text{ м}^2/\text{г}$) $\bar{C}_m = 0,1 \cdot 10^{-7}$ моль/Дж; для кангаласского ($88 \text{ м}^2/\text{г}$) $\bar{C}_m = 0,09 \cdot 10^{-7}$ моль/Дж [44].

Из сопоставления удельной поверхности и влагоаккумулирующей способности исследованных видов углей можно сделать вывод, что для них характерна в основном адсорбционно связанная влага.

В табл. II.5 приведены виды связи влаги с углем, а также свободная и внутренняя энергия связи влаги с угольным веществом для ряда продуктов углеобогащения.

В процессе сушки изменения влажности и температуры во влажных материалах основываются на понятиях потенциалов переноса тепла и влаги. Потенциалом переноса является такая функция состояния системы, которая при равновесии равна во всех точках системы, и градиент которой определяет направление и скорость переноса соответствующей субстанции.

В этой связи представляют большой интерес экспериментальные методы определения единого потенциала переноса влаги для любой влажности материала [22].

Понятие потенциала переноса влаги во влажных телах было принято на основе термодинамической аналогии академиком

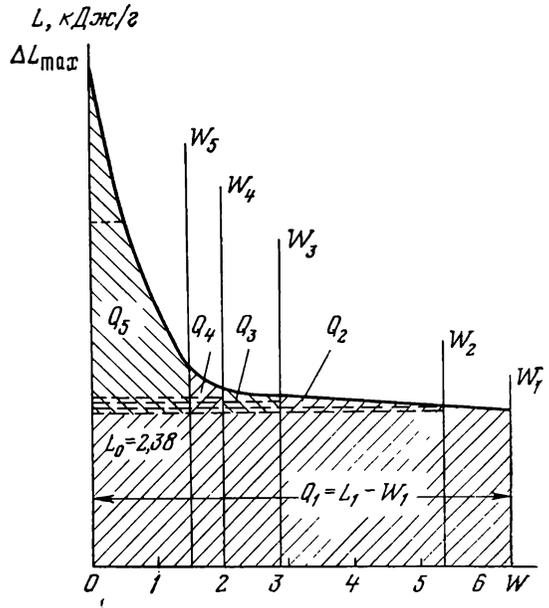


Рис. II.9. График расхода тепла на испарение влаги в зависимости от влажности материала

Таблица II.5

Виды связи влаги с углем и виды влаги

Вид		Влажность, %			Свободная энергия связи, кДж/г			Внутренняя энергия связи, кДж/г		
связи влаги	влаги	Шлам марки А	Флотоконцентрат		Шлам марки А	Флотоконцентрат		Шлам марки А	Флотоконцентрат	
			марки Ж	марки К		марки Ж	марки К		марки Ж	марки К
Физико-механическая	Полная влагоемкость угля	25—17,9	15—9,0	19,6—15,5	0	0	0	0	0	0
	Влага макропор и стыковая	17,9—3,8	9,0—2,9	15,5—2,5	0,01—0,1	0,005—0,112	0,03—0,112	0,03—0,118	0,025—0,13	0,037—0,12
	Влага микропор	3,8—3,3	2,9—2,6	2,5—1,6	0,10—0,115	0,112—0,118	0,112—0,205	0,02—0,14	0,13—0,16	0,12—0,24
Физико-химическая	Адсорбированная влага полислоя	3,3—0,7	2,6—0,9	1,6—0,4	0,115—0,32	0,118—0,278	0,205—0,32	0,14—0,33	0,15—0,33	0,24—0,41
	Адсорбированная влага монослоя	<0,7	<0,9	<0,4	<0,32	<0,278	<0,32	<0,33	<0,33	<0,04

А. В. Лыковым и разработана шкала определения экспериментального потенциала массопереноса. Поток влаги определяется, как и в случае теплопереноса, по градиенту потенциала:

$$q_m = \lambda_m \nabla \Theta, \quad (\text{II.13})$$

где q_m — удельный поток влаги; Θ — потенциал влагопереноса; λ_m — коэффициент массопроводности.

Для определения потенциала влагопереноса был использован метод термодинамического равновесия, а в качестве опытной установки — неизотермическая разрезная колонка, которая нашла широкое применение в области строительной теплофизики [43]. Опыт состоял в определении полей влажности на границе соприкосновения двух тел — эталона $W_э$ и исследуемого материала $W_{м.г}$.

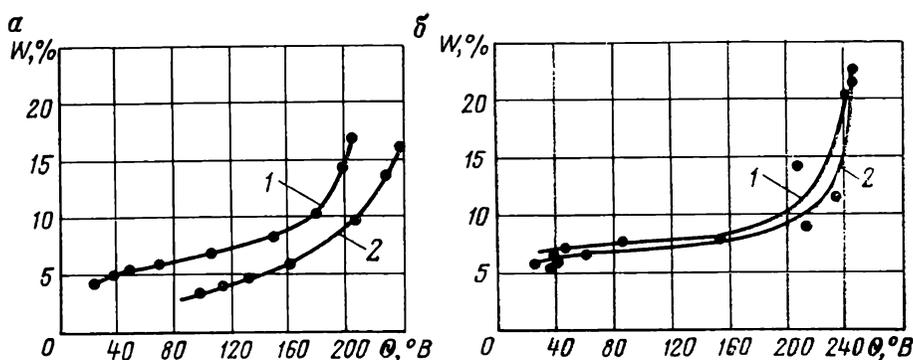


Рис. 11.10. Зависимость между влажностью и потенциалом влагопереноса нагольчанского антрацита (а) и угля шахты им. Ярославского марки Д (б) при температурах 20°C (1) и 40°C (2)

В качестве эталонного тела применялась фильтровальная бумага, которая имела высокое максимальное сорбционное удельное влагосодержание и для которой были характерны все основные виды связи влаги с материалом.

Потенциал влажности определялся из соотношения

$$\theta_t = \frac{W_э}{W_{м.г}} 100, \text{ °B}. \quad (\text{II.14})$$

Кривые зависимости потенциала влажности от вида связи влаги антрацита и угля марки Д имеют точки излома при некоторых значениях W и θ_t . Наличие этих точек излома объясняется переходом от одного вида связи влаги к другому, что достаточно четко выражено зависимостью, показанной на рис. 11.10.

Дифференциальное уравнение влагопроводности при изотермических условиях аналогично дифференциальному уравнению теплопроводности:

$$\partial \theta / \partial \tau = a_m \nabla^2 \theta. \quad (\text{II.15})$$

Для разных материалов их температура влияет на значение потенциала влагопереноса не в одинаковой степени.

Исследования показали, что температурный коэффициент потенциала влагопереноса ($\partial\theta/\partial T$) при различных температурах для угля марки Д является постоянным, для антрацита коэффициент $\partial\theta/\partial T$ составляет $5,15^\circ\text{В}/^\circ\text{С}$.

Одним из основных параметров тепло- и влагопереноса является коэффициент диффузии влаги или коэффициент потенциалопроводности, который зависит от вида материала, его температуры,

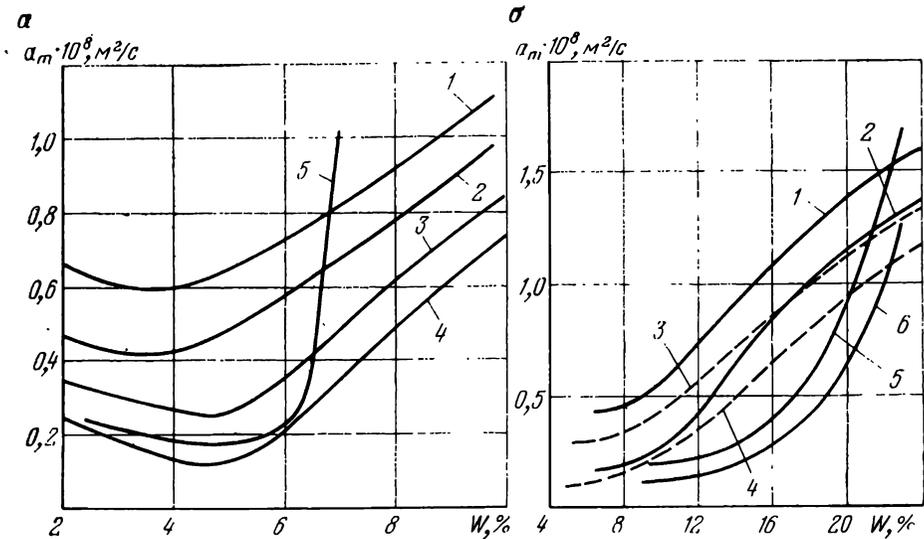


Рис. 11.11. Зависимость коэффициента диффузии (a_m) от влажности материала (W):

a — песок; 1 — басыновский, $t=25^\circ\text{С}$; 2 — то же; $t=10^\circ\text{С}$; 3 — кичигинский, $t=25^\circ\text{С}$; 4 — то же, $t=10^\circ\text{С}$; 5 — речной, $t=25^\circ\text{С}$; b — уголь: месторождения Якутии; 1 — чульманский, $t=25^\circ\text{С}$; 2 — то же, $t=10^\circ\text{С}$; 3 — кангаласский, $t=25^\circ\text{С}$; 4 — то же, $t=10^\circ\text{С}$; 5 — сангарский, $t=25^\circ\text{С}$; 6 — то же, $t=10^\circ\text{С}$

удельного влагосодержания, видов связи поглощенной влаги с молекулами твердого тела, вида переноса влаги в виде жидкости или пара и от вида дифференциальной кривой распределения пор по радиусам. Коэффициент диффузии влаги в области влажного состояния материала прямо пропорционален поверхностному натяжению жидкости и обратно пропорционален произведению коэффициента ее вязкости и дифференциального объема пор.

Для слоя песка характерна капиллярно связанная влага; значение a_m обратно пропорционально $\frac{\partial W}{\partial r} = f(r)$ — дифференциальному

объему пор тела. По характеру кривой $a_m = f_0(W)r$ можно видеть, что дифференциальная кривая распределения пор по радиусам для песка имеет максимум, соответствующий радиусу пор с небольшим дифференциальным объемом [44].

Для песков при $t = \text{const}$ и $W = \text{const}$ большей удельной поверхности соответствует меньшее значение коэффициента потенциалопроводности (рис. II.11,а). Влияние удельной поверхности на коэффициент потенциалопроводности объясняется тем, что, чем больше удельная поверхность песка, тем тоньше пленка жидкости на его поверхности и больше вязкость жидкости, так как вязкость связанной воды более вязкости свободной [44].

Для угля в области влажного состояния характерна капиллярно-связанная влага. Восходящие ветви кривых $a_m = f_1(W)r$ свидетельствуют о превалирующей роли молярного переноса капиллярно-связанной влаги (рис. II.11,б).

С понижением температуры коэффициент потенциалопроводности увеличивается, так как вязкость жидкости с возрастанием температуры уменьшается значительно, чем ее поверхностное натяжение. Так, при $u = 0,05$ кг/кг и при возрастании температуры от 10 до 25°C коэффициент потенциалопроводности для басыновского песка увеличивается от $\sim 0,5 \cdot 10^{-8}$ до $\sim 0,7 \cdot 10^{-8}$ м²/с. Для чульманского угля при $u = 0,16$ кг/кг в том же температурном интервале коэффициент потенциалопроводности возрастает от $0,87 \cdot 10^{-8}$ до $1,1 \cdot 10^{-8}$ м²/с [44].

По мере удаления влаги в процессе сушки происходит усадка материала как в объеме, так и в линейных размерах. В зависимости от свойств материала явление усадки имеет различные закономерности. Например, торф дает усадку на протяжении всего процесса сушки, глина — только в период постоянной скорости.

На основании многочисленных опытов по сушке разных материалов А. В. Лыковым установлено, что объем материала является линейной функцией влагосодержания:

$$V = V_0(1 - \beta_V u), \quad (II.16)$$

где V — объем тела при заданном влагосодержании; β_V — коэффициент объемной усадки; V_0 — объем абсолютно сухого тела.

Коэффициент объемной усадки некоторых материалов следующий.

Глина	1,8
Подмосковный уголь .	0,72
Фрезерный торф	0,36

В отличие от объемной усадки линейная усадка происходит как по закону прямой функции для материалов, в которых содержится в основном капиллярная влага, так и по закону степенной функции для материалов, имеющих большое содержание осмотически связанной влаги (торф):

$$F = F_0(1 + \beta_F u)^m, \quad (II.17)$$

где F — площадь при влагосодержании; F_0 — площадь для абсолютно сухого состояния материала; β_F — коэффициент усадки по площади.

Для торфа $m=2/3$, $\beta_F=0,15$.

Относительная усадка торфа может быть также определена по следующим формулам [28]:

- усадка длины $S_{дл}=0,562 W-7$;
- »— сечения $S_{сеч}=0,859 W-11$;
- »— поверхности $S_{п}=0,950 W-11$;
- объемная усадка $S_{об}=1,150 W-14$.

Коэффициент линейной усадки глины β_l можно определить по формулам [54]

$$\beta_l = \frac{S_l}{(W - W_1)} \quad (II.18)$$

или

$$\beta_l = \frac{S_l}{(W_H - W_{кр})}, \quad (II.19)$$

где $S_l = \frac{l_H - l_{кр}}{l_{кр}}$ — относительная усадка; l_H и $l_{кр}$ — линейные размеры тела при влажности W_H и $W_{кр}$; W_H и $W_{кр}$ — начальное и критическое влагосодержание глины.

Таблица II.6

Изменение кажущейся плотности и усадки при сушке ангреноского угля марки Б2

Влажность W , %	Плотность $\rho_{к'}$, кг/м ³	Усадка β , %	Влажность W , %	Плотность $\rho_{к'}$, кг/м ³	Усадка β , %
37,45	1190	—	23,50	948	25,5
32,25	1040	14,40	15,90	932	28,2
30,04	980	20,20	9,30	932	27,9
24,65	976	21,90	3,75	932	28,2
24,20	960	24,40	3,20	925	28,1

Значения коэффициента β_l для некоторых глин приведены ниже:

Спондиловая кирпичная (Киев)	. 0,0047
Полтавская черепичная . . . . .	. 0,0059
Селидовская (Донбасс) . . . . .	. 0,0055
Погореловская (Донбасс)	. 0,0050
Гродовская (Донбасс) . . . . .	. 0,0046

Численные значения коэффициента β_l являются характеристикой глины, так как они определяют степень усадки глины и ее сушильные свойства.

Бурые угли, имеющие неплотную, разрыхленную структуру и содержащие значительное количество воды, при сушке дают усадку. В качестве показателя усадки принято отношение

$$\beta = \frac{\rho_{к1} - \rho_{к2}}{\rho_{к2}} 100, \% \quad (II.20)$$

где $\rho_{к1}$ и $\rho_{к2}$ — кажущаяся плотность угля до и после сушки, кг/м³.

С удалением влаги из ангреноского угля происходит уменьшение кажущейся плотности и соответственно увеличение усадки (табл. II.6).

Примечательно, что в начале процесса сушки, когда содержание влаги в угле снижается от 37,45 до 17% вследствие удаления ее из крупных пор, происходит сжатие элементов структуры.

При дальнейшем уменьшении влажности (менее 17%) уголь заметно уплотняется и усадка практически прекращается. Одновременно происходит образование пор, число которых по мере сушки постепенно увеличивается. Челябинский бурый уголь марки Б₃ имеет более плотную структуру, в связи с чем в нем уже с самого начала сушки увеличивается пористость.

На основании вышеизложенного можно считать, что первоначальное удаление влаги из бурого угля сопровождается сплющиванием стенок капилляров и соответственно уплотнением угольного вещества. Дальнейшая сушка вызывает разрыв стенок капилляров в слабых местах и увеличение объема пор. Усадка бурого угля происходит в основном вследствие удаления свободной воды. Удаление связанной воды приводит к значительному увеличению пористости угля.

Глава III

БАРАБАННЫЕ ГАЗОВЫЕ СУШИЛКИ

Барабанные газовые сушилки широко применяются для сушки минерального сырья (уголь, руда, песок, глина, щебень, мел, известняк, калийная соль и др.).

Одним из основных преимуществ барабанных сушилок является возможность использования для сушки минерального сырья газов с достаточно высокой температурой (700—800°C) без перегрева материала. Применение газов с высокой температурой обеспечивает достаточно хорошую экономичность сушилки.

Значительным преимуществом барабанных сушилок является то, что в них можно сушить материалы, содержащие куски крупностью до 250 мм, и материалы, не обладающие сыпучими свойствами (флотационные концентраты, шламы, вязкие материалы и др.).

К недостаткам барабанных сушилок можно отнести:

довольно большие габариты, обусловленные малым количеством испаряемой влаги в 1 м³ ее рабочего объема;

значительную массу сушилки, составляющую 4—5 т на 1 т испаренной влаги в 1 ч;

большое количество материала, постоянно находящегося в сушилке во время ее работы, занимающего до 25% рабочего объема;

налипание влажного материала на внутренние устройства сушильного барабана, что значительно снижает эффективность работы сушилки.

Барабанные сушилки являются сушилками непрерывного действия. Они подразделяются на следующие группы:

с прямым теплообменом, в которых происходит непосредственное соприкосновение материала с горячими газами по прямоточной или противоточной схеме движения газов и материала;

с косвенным теплообменом, в которых тепло передается от газов к материалу через металлическую стенку;

с комбинированным теплообменом, в которых передача тепла материалу происходит через металлическую стенку, а также путем непосредственного соприкосновения материала с горячими газами.

Для сушки минерального сырья применяются, как правило, барабанные сушилки с прямым теплообменом и с прямотоком.

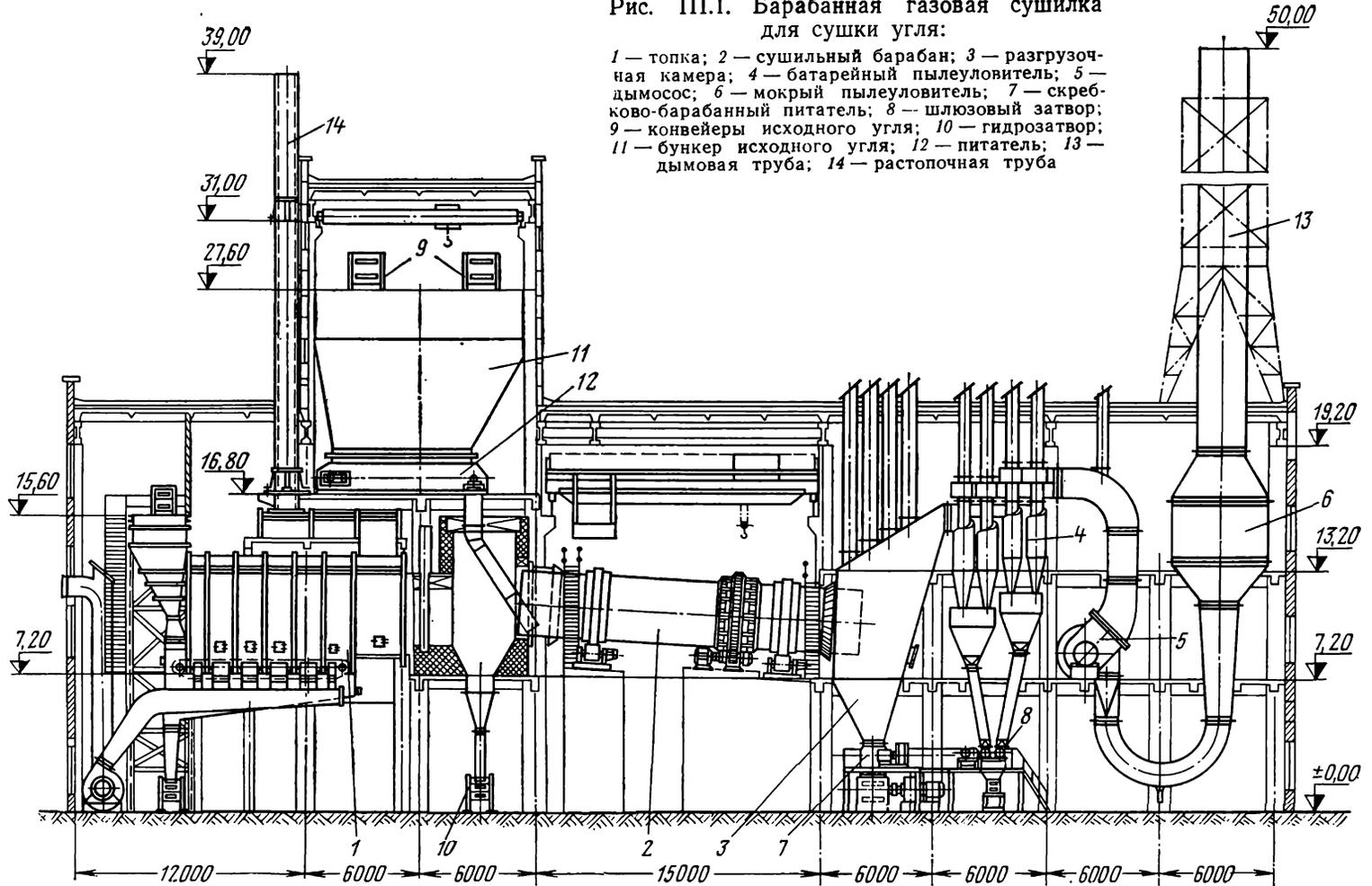
Барабанная сушильная установка для сушки угля показана на рис. III.1. Она состоит из топki со смесительной камерой и загрузочной точкой, сушильного барабана, разгрузочной камеры, циклонов, мокрого пылеуловителя, дымососа и дымовой трубы.

§ 1. ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ БАРАБАННОЙ СУШИЛКИ

Внутренняя часть барабана оборудована лопастями (рис. III.2). При вращении барабана они захватывают материал и рассыпают его тонкими параллельными каскадами (струйками), занимаю-

Рис. III.1. Барабанная газовая сушилка
для сушки угля:

1 — топка; 2 — сушильный барабан; 3 — разгрузочная камера; 4 — батарейный пылеуловитель; 5 — дымосос; 6 — мокрый пылеуловитель; 7 — скребково-барабанный питатель; 8 — шлюзовый затвор; 9 — конвейеры исходного угля; 10 — гидрозатвор; 11 — бункер исходного угля; 12 — питатель; 13 — дымовая труба; 14 — растопочная труба



щими все пространство барабана. Горячие газы, проходя между каскадами падающего материала, непосредственно соприкасаются с влажными поверхностями его частиц. Часть материала остается на дне барабана и подвергается другому способу теплообмена, в отличие от материала, который сыпается в виде каскадов. Число каскадов, образующихся в сушильном барабане, зависит от числа и формы лопастей.

При конструировании внутренних устройств сушильных барабанов учитываются крупность, плотность и сыпучие свойства подвергаемого сушке материала и необходимость обеспечения его равномерного распределения в поперечном сечении барабана.

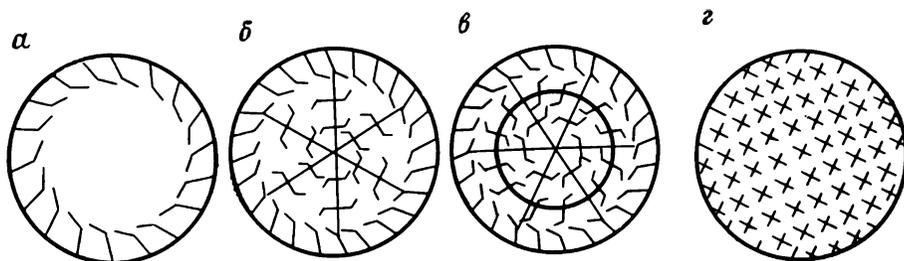


Рис. III.2. Внутренние насадки барабанных сушилок:

а — периферийная; *б* — секторная; *в* — секторная с внутренним кольцом; *г* — крестообразная

Подъемно-лопастная (периферийная) система применяется для крупнокусковых материалов и материалов, обладающих плохой сыпучестью (рис. III.2,*а*). Секторная насадка (рис. III.2,*б*) используется для крупнокусковых материалов с большой плотностью. Секторная насадка с внутренним кольцом (рис. III.2,*в*) предназначена для мелкокусковых материалов с хорошей сыпучестью. Крестообразная насадка (рис. III.2,*г*) используется для материалов с очень мелкими частицами, при сушке которых имеет место значительный унос пыли.

Материал все время находится в завале и при вращении барабана образуются новые поверхности испарения вследствие перевалки материала (рис. III.3).

При продвижении материала по барабану от места загрузки к месту выгрузки он становится более сухим и пересыпается более свободно. По мере высыхания материала и изменения его сыпучих свойств по длине барабана должны размещаться секции лопастей с постепенным увеличением их рядов по окружности барабана или с применением различных систем скребков.

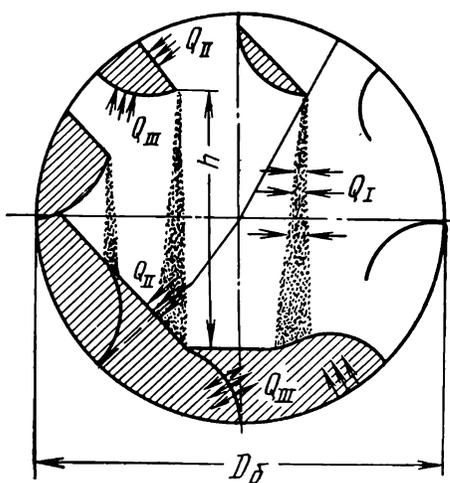


Рис. III.3. Схема передачи тепла в сушильном барабане

Перемещение материала вдоль сушильного барабана происходит в результате его наклона, вращения и сноса частиц. При этом для частиц в наружных слоях каскада, интенсивно смываемых газом, условия теплообмена близки к условиям при сушке во взвешенном состоянии. Для частиц во внутренних слоях каскада, хуже омываемых газами, условия теплообмена могут значительно отличаться от условий при сушке во взвешенном состоянии.

В барабанных сушилках тепло передается материалу при непосредственном соприкосновении газов с углем (см. рис. III.3):

$$Q = Q_I + Q_{II} + Q_{III}, \text{ кДж/ч}, \quad (\text{III.1})$$

где Q_I — количество тепла, передаваемого через поверхность частиц, падающих с лопастей, кДж/ч; Q_{II} — количество тепла, передаваемого через наружную поверхность материала, находящегося на лопастях и в завале, кДж/ч; Q_{III} — количество тепла, передаваемого в результате соприкосновения материала с более нагретыми деталями сушильного барабана, кДж/ч.

В общем случае количество тепла, передаваемого от газов к материалу,

$$Q = \alpha_V \Delta t_{cp} V_6, \text{ кДж/ч}, \quad (\text{III.2})$$

где α_V — объемный коэффициент теплообмена, характеризующий процесс теплообмена в барабанной сушилке, кДж/(м³·°C); Δt_{cp} — средняя разность температуры газов и материала, °C; V_6 — объем сушильного барабана, м³.

Основной величиной, характеризующей процесс теплообмена в барабанной сушилке, является объемный коэффициент теплообмена α_V , который показывает, какое количество тепла, отнесенного к единице объема сушилки, передается от газа к материалу.

Объемный коэффициент теплообмена определяется как сумма трех коэффициентов:

$$\alpha_V = \alpha_{V_I} + \alpha_{V_{II}} + \alpha_{V_{III}}, \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{ч} \cdot \text{°C)}, \quad (\text{III.3})$$

где α_{V_I} — коэффициент, учитывающий передачу тепла при падении частиц со скребков,

$$\alpha_{V_I} = \alpha_F (1 - a) F'_m, \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{ч} \cdot \text{°C)}, \quad (\text{III.4})$$

F'_m — суммарная поверхность частиц, падающих со скребков, отнесенная к 1 м³ объема сушилки, определяется по формуле

$$F'_m = 5,75 \frac{\rho_n}{\rho_m} \frac{D_6^{0,5} n B}{d_{m,cp}}, \text{ м}^2/\text{м}^3, \quad (\text{III.5})$$

B — параметр, характеризующий передачу тепла частицам материала во время их падения с лопастей,

$$B = \frac{F_{m,l}^m}{D_6^2} Z \sqrt{\frac{h_{cp}}{D_6}}; \quad (\text{III.6})$$

n — скорость вращения сушиллки, об/мин;

α'_F — коэффициент теплоотдачи от газа к поверхности падающих частиц,

$$\alpha'_F = 0,62\lambda \left(\frac{v_r}{\nu d_{м.сп}} \right)^{0,5}, \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°C}); \quad (\text{III.7})$$

λ и ν — значения коэффициента теплопроводности и коэффициента кинематической вязкости газа, выбираемые при температуре поверхности частиц; v_r — скорость газов у поверхности частиц; она складывается из двух составляющих, направленных под углом 90° по отношению друг к другу, — первая составляющая — средняя скорость газов в сушильном барабане $v_{г.сп}$, вторая — средняя скорость падения частиц со скребков $v_{пад}$, м/с;

$$v_r = \sqrt{v_{г.сп}^2 + v_{пад}^2}, \quad (\text{III.8})$$

$$v_{пад} = 2,22 \sqrt{h_{сп}}, \text{ м/с}; \quad (\text{III.9})$$

$h_{сп}$ — средняя высота падения частиц, определяемая по параметру $\frac{h_{сп}}{D_0}$ (см. табл. III.1) путем умножения этого параметра на диаметр барабана D_0 .

Средняя скорость газов в сушильном барабане

$$v_{г.сп} = \frac{V_{сп}}{(1-\varphi)0,785 D^2 3600}, \text{ м/с}, \quad (\text{III.10})$$

$V_{сп}$ — средний объем газов, м³/ч.

Поправка к коэффициенту теплоотдачи от газа к струе падающего материала, учитывающая неполное омывание газом падающих частиц, определяется по формуле

$$1 - a = \frac{2,24}{h_{сп}} \left(\frac{F_{общ}}{V_{стр}} \right)^{-0,8} K, \quad (\text{III.11})$$

где $h_{сп}$ — средняя высота падения частиц материала в сушильном барабане, м; $F_{общ}$ — поверхность частиц, находящихся в одной струе, м²,

$$F_{общ} = \tau_{п} \frac{6000}{d_{м.сп}} \frac{\rho_{п}}{\rho_{к}} F_{л} m_{п} n \frac{360}{\beta} 60, \quad (\text{III.12})$$

$\tau_{п}$ — среднее время падения частиц материала, определяемое по формуле

$$\tau_{п} = \sqrt{\frac{2h_{сп}}{g}}, \text{ с}; \quad (\text{III.13})$$

β — угол поворота барабана, соответствующий времени, в течение которого материал полностью ссыпается со скребка, градус; $l_{п}$ —

длина основной насадки, м; $V_{\text{стр}}$ — объем струи, определяемый по формуле

$$V_{\text{стр}} = l_{\text{ш}} h_{\text{ср}} \{b_{\text{стр}} + h_{\text{ср}} \operatorname{tg} [3,75 + 0,316 (\rho_{\text{г.ср}} v_{\text{г.ср}})^2]\}, \text{ м}^3, \quad (\text{III.14})$$

$[3,75 + 0,316 (\rho_{\text{г.ср}} v_{\text{г.ср}})^2]$ — угол раствора струи, градус; $b_{\text{стр}}$ — начальная ширина струи,

$$b_{\text{стр}} = \frac{F_{\text{Мл}}}{\frac{60\varphi}{n \cdot 3600} v_{\text{ск}}}, \text{ м}, \quad (\text{III.15})$$

$v_{\text{ск}}$ — скорость скатывания частиц в конце скребка,

$$v_{\text{ск}} = 4,43 \sqrt{\left(1 - \frac{\varepsilon}{\operatorname{tg} \psi} h\right)}, \text{ м/с}, \quad (\text{III.16})$$

h — высота скатывания частиц со скребков, м,

$$h = \frac{\Sigma S_{\text{ш}}}{D_6} D_6 Z^{-1} \sin \psi, \quad (\text{III.17})$$

$\frac{\Sigma S_{\text{ш}}}{D_6}$ — параметр, характеризующий конструкцию внутреннего устрой-

ства сушильного барабана; ε — коэффициент истинного трения; ψ — угол естественного откоса материала, градус; K — коэффициент, учитывающий уменьшение площади, участвующей в теплообмене вследствие слипания частиц; его значения, определяемые сыпучими свойствами материала, т. е. его углом естественного откоса, приведены ниже:

Угол естественного откоса, градус	30	45	60	70	90
Коэффициент K	1	0,9	0,8	0,7	0,6

$\alpha_{V_{\text{II}}}$ — коэффициент, учитывающий передачу тепла через наружную поверхность материала, находящегося на скребках и в завале, определяется по формуле

$$\alpha''_V = \alpha''_K F''_M, \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}), \quad (\text{III.18})$$

F''_M — наружная поверхность материала, находящегося на скребках и в завале,

$$F''_M = 1,27 \frac{\Sigma S_{\text{ш}}}{D_6} D_6^{-1}, \text{ м}^2/\text{м}^3; \quad (\text{III.19})$$

α''_K — коэффициент теплоотдачи от газа к наружной поверхности материала, находящегося на скребках и в завале,

$$\alpha''_K = \frac{0,347 \operatorname{Re}^{0,66\lambda}}{l_0}, \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}), \quad (\text{III.20})$$

$$\operatorname{Re} = \frac{v_{\text{г.ср}} l_0}{\nu}; \quad (\text{III.21})$$

l_0 — средняя длина скатывания частиц, м,

$$l_0 = \frac{2 \Sigma S_{\text{ш}}}{z}. \quad (\text{III.22})$$

В формуле (III.21) физические константы принимаются при средней температуре газов;

$\alpha_{v_{III}}$ — коэффициент, учитывающий передачу тепла теплопроводностью от более нагретых деталей внутреннего устройства к материалу,

$$\alpha_{v_{III}} = \frac{F_{\text{гол}} \alpha_{\text{н.г}} \left(t_{\text{ср}} - \frac{v_1 - v_2}{2} \right)}{\Delta t_{\text{ср}}}, \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}), \quad (\text{III.23})$$

$F_{\text{гол}}$ — поверхность деталей внутреннего устройства, не занятая материалом,

$$F_{\text{гол}} = 1,27 \frac{\Sigma S_{\text{гол}}}{D_6} D_6^{-1}, \text{ м}^2/\text{м}^3, \quad (\text{III.24})$$

$\frac{\Sigma S_{\text{гол}}}{D_6}$ — параметр, характеризующий конструкцию внутреннего устройства сушильного барабана; $\alpha_{\text{н.г}}$ — коэффициент теплоотдачи от газов к оголенной поверхности деталей внутреннего устройства,

$$\alpha_{\text{н.г}} = 4,4 + 3(\rho_{\text{г.ср}} v_{\text{г.ср}}), \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}). \quad (\text{III.25})$$

Количество тепла, переданного газами материалу в процессе сушки,

$$Q = W(q_0 + q_m), \text{ кДж}/\text{ч}, \quad (\text{III.26})$$

где W — количество испаренной влаги, кг/ч; q_0 и q_m — расход тепла на испарение влаги и нагрев материала, отнесенный к 1 кг испаренной влаги, кДж/кг.

Время прохождения материала через сушилку определяется по формуле

$$\tau = \frac{L_6}{n^a \left[t_{\text{г}} \varphi D_6 \left\{ p + \frac{c l_{\text{л.ср}} D_6}{\varepsilon} + \frac{860}{\rho_{\text{н}}} \frac{m}{d_{\text{м.ср}}} (\rho_{\text{г.ср}} v_{\text{г.ср}})^e \right\} \right]}, \quad (\text{III.27})$$

где φ — угол наклона сушильного барабана, градус; $l_{\text{л.ср}}$ — средняя длина лопасти в поперечном сечении барабана, м; ε — коэффициент заполнения барабана материалом, %.

Знак «плюс» перед произведением $\frac{860}{\rho_{\text{н}}} \frac{m}{d_{\text{м.ср}}} (\rho_{\text{г.ср}} v_{\text{г.ср}})^e$ берется

при расчете сушилок с прямоточным движением газа и материала, знак «минус» — при противоточном.

Значения коэффициентов a , p , c , m , e для основных насадок приведены ниже:

Насадка:	a	p	c	m	e
лопастная	0,65	169	1000	2,04	1,72
секторная	0,70	92	1690	0,423	1,80

На основании опытов установлено, что у сушилок с наиболее широко применяемыми секторными насадками объемный коэффициент теплообмена увеличивается прямо пропорционально массо-

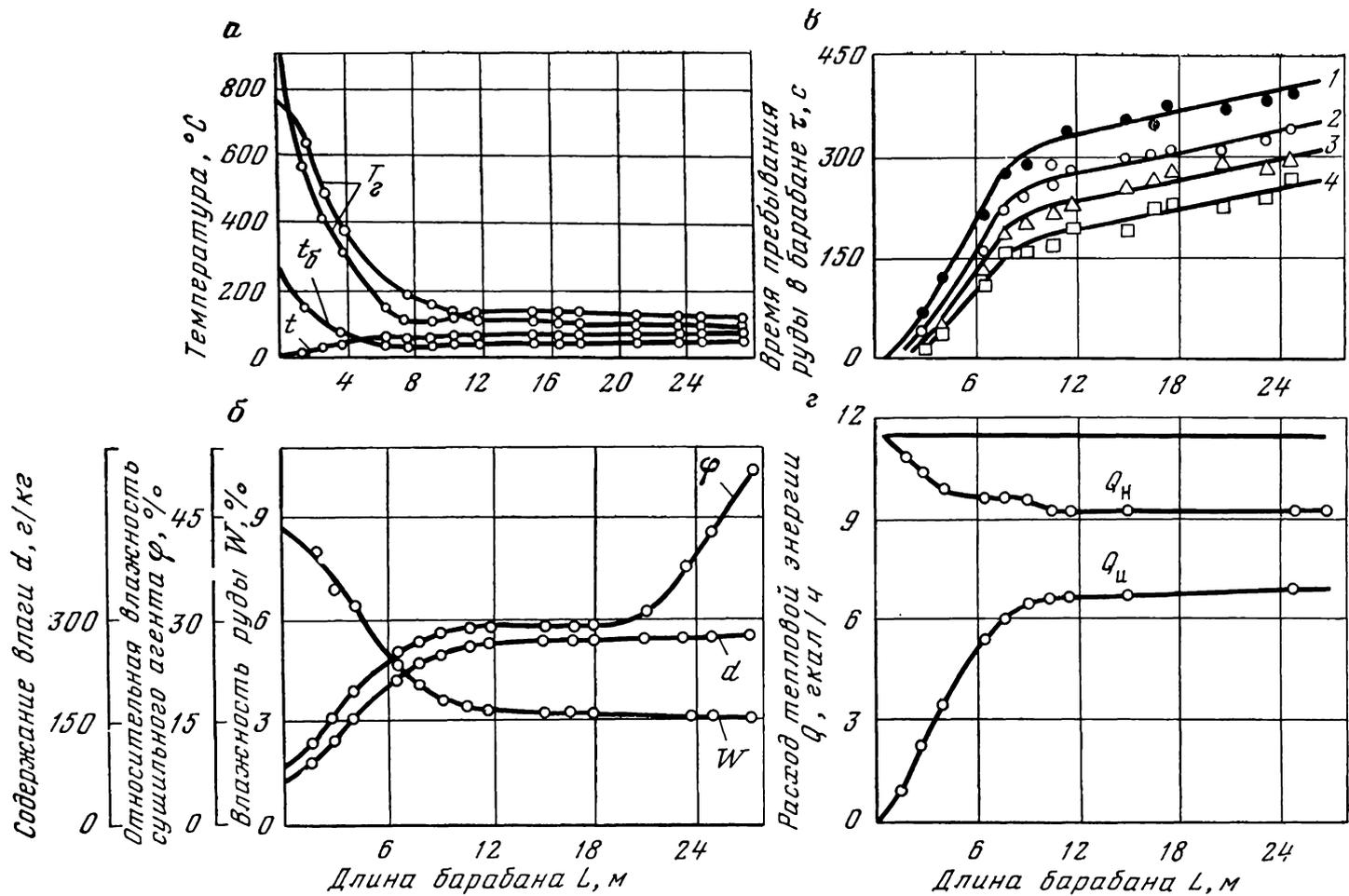


Рис. III.4. Изменения температуры (а), влажности руды и газов (б), времени пребывания руды в барабане (в), расхода тепловой энергии (г) на нагрев руды Q_H и испарение влаги Q_N по длине сушильного барабана:

T_g — температура газов; t_6 — температура барабана; t — температура материала; 1—4 — частота вращения барабана, об/мин

вой скорости газов, проходящих через барабан, в степени 0,7, частоте вращения в степени 0,6 и обратно пропорционально размеру частиц в степени 1,35 [28].

На Михайловском горно-обогатительном комбинате были проведены комплексные исследования работы барабанной сушилки диаметром 3,5 м, длиной 27 м, которые проводились Отраслевой центральной энергомеханической лабораторией (ОЦЭЛ) совместно с б. трестом «Энергоуголь» и работниками комбината, дробильно-сортировочной фабрики и кафедры физики горных пород Московского горного института.

Экспериментальные исследования позволили установить ряд зависимостей (рис. III.4) [42], анализ которых свидетельствует о том, что в среднем максимальная гигроскопическая влажность богатых товарных железных руд Михайловского горно-обогатительного комбината составляет 3,5%; подвергать сушке эту руду ниже указанной гигроскопической влажности нецелесообразно. Процесс сушки в основном заканчивается на активной длине барабана, равной 10,5 м, считая от его начала, при серийной конструкции внутренних устройств (приемно-винтовая и периферическая подъемно-лопастная насадка). Таким образом, для сушки железных руд целесообразно принимать длину сушильных барабанов не более 11 м.

В результате обработки статистического материала на ЭВМ «Минск-32» получена математическая модель процесса сушки в виде двух линейных уравнений [42]:

влажность высушенного материала

$$W_2 = -3,96 + 0,47 W_1 + 0,0279 G_1 - 0,00389 B - 0,00282 t_1 + 0,0969 \Phi, \quad \%, \quad (\text{III.28})$$

производительность сушилки

$$G_1 = 142,5 - 16,85 W_1 + 0,35,9 W_2 + 0,1395 B + 0,101 t_1 - 3,47 \Phi, \quad \text{т/ч}, \quad (\text{III.29})$$

где W_1 и W_2 — начальная и конечная влажность руды, %; G_1 — производительность сушильного барабана по исходной руде, т/ч; B — расход природного газа, м³/ч; t_1 — начальная температура дымовых газов на входе в сушильный барабан, °С; Φ — содержание железа в руде, %.

Эффективность внутреннего устройства барабанной сушилки оценивается как в отношении интенсивности теплообмена, так и в отношении продольного перемешивания сушеного материала.

Процессы тепло- и массообмена, протекающие в барабанных сушилках, довольно детально исследованы и на основании результатов этих исследований разработаны методы теплового расчета сушилок.

Метод теплового расчета барабанных сушилок изложен в отраслевом стандарте ОСТ 26-01-450—71. На общие технические условия, основные узлы и детали барабанных сушилок разрабо-

таны отраслевые стандарты ОСТ 26-01-746—73, ОСТ 26-01-436—71 и ОСТ 26-01-450—71. Метод определения мощности привода сушильного барабана представлен в отраслевом стандарте ОСТ 26-01-448—71.

Метод расчета барабанной сушилки сводится к определению диаметра и длины сушильного барабана. Для обеспечения высоких показателей эффективности и экономичности процесса сушки желательно иметь высокие скорости движения газов в сушильном барабане, однако при этом возрастает вынос частиц материала из барабана. С целью обеспечения небольших потерь материала и избежания громоздких систем пылеулавливания или ее перегрузки требуется выбрать низкую скорость газов или же принять барабан с большим диаметром.

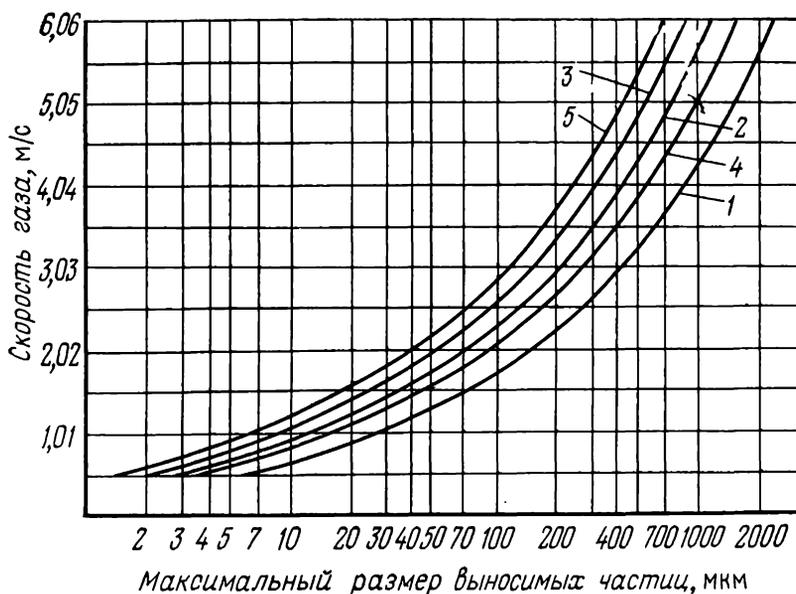


Рис. III.5. Зависимость между скоростью газов на выходе из сушильного барабана и крупностью выносимых частиц:

1—5 — плотность соответственно более 2500, 2500, 2000, 1500 и 600 кг/м³

Для отыскания наиболее оптимальной скорости газов в сушильном барабане можно воспользоваться графиком (рис. III.5).

На основании опыта сушки угольных концентратов в высокопроизводительных барабанных сушилках автором предложена эмпирическая зависимость по определению скорости газов на выходе из сушильного барабана, оборудованного лопастными и секторными насадками:

$$v_{г2}^{\max} = 0,5v_{\text{внт2}}^{0,25} \left(\frac{\mu_{\text{ср}}}{B}\right)^{0,25} \left(\frac{W_2}{W_{\max}}\right)^{1,25}, \quad (\text{III.30})$$

где $v_{\text{вит2}}$ — скорость витания частиц на выходе из сушилки, определяемая по формуле

$$v_{\text{вит2}} = 5,22 \sqrt{\frac{d_{\text{м.ср}} \rho_{\text{к2}}}{\rho_{\text{г2}}}}, \text{ м/с}; \quad (\text{III.31})$$

$d_{\text{м.ср}}$ — средний диаметр частиц, м; $\rho_{\text{к2}}$ — плотность материала на выходе из сушильного барабана, кг/м^3 ; $\rho_{\text{г2}}$ — плотность газа на выходе из сушилки, кг/м^3 ;

$$d_{\text{м.ср}} = \frac{\delta_1 d_1 + \delta_2 d_2 + \dots + \delta_n d_n}{\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n}, \quad (\text{III.32})$$

d_1, d_2, \dots, d_n — размер отверстий смежных сит; $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ — доля классов крупности в смеси, %; $\mu_{\text{ср}}$ — средняя массовая концентрация материала в сушильном барабане, кг/кг ; B — параметр, принимаемый для секторной насадки равным 0,35, для лопастной насадки — 0,105; W_2 и W_{max} — конечная влажность и максимальная гигроскопическая влажность материала, %; при $W_2 \leq W$ отношение $\frac{W_2}{W_{\text{max}}} = 1$.

Наличие в материале мелких частиц существенно влияет на величину поверхности, участвующей в теплообмене. Поэтому для расчетов с необходимой точностью нужно иметь гранулометрический состав материала, в котором указано процентное содержание по крайней мере четырех мелких классов (1—2; 0,5—1; 0,25—0,5; 0—0,25 мм).

Диаметр сушилки определяется по формуле

$$D_6 = \sqrt{\frac{4F_6}{\pi}}, \text{ м}, \quad (\text{III.33})$$

где F_6 — сечение сушилки, определяемое с учетом максимально допустимой скорости газов на выходе из барабана,

$$F_6 = \frac{V_{\text{г2}}}{(1 - \varphi) v_{\text{г2}}^{\text{max}} \cdot 3600}; \quad (\text{III.34})$$

$V_{\text{г2}}$ — объем газов, выходящих из сушилки, $\text{м}^3/\text{ч}$; φ — степень заполнения сушилки, доли единицы.

$$L_6 = \frac{4V_6}{\pi D_6^2}, \text{ м}, \quad (\text{III.35})$$

где V_6 — объем сушильного барабана, м^3 .

При получении расчетной длины сушилки меньше нормализованной следует принимать ее минимальной для расчетного диаметра.

Время пребывания материала в сушильном барабане приближенно можно определить по формуле

$$\tau = \frac{\varphi V_6 \rho_{\text{н}}}{G_{\text{ср}}}, \text{ ч}, \quad (\text{III.36})$$

где φ — степень заполнения сушильного барабана материалом, доли единицы; V_6 — объем сушильного барабана, м^3 ; $\rho_{\text{н}}$ — средняя

насыпная плотность материала, кг/м³; $G_{\text{ср}}$ — средняя производительность сушилки, кг/ч.

Из уравнения (III.36) вытекает, что время пребывания материала в сушильном барабане может быть сокращено путем увеличения количества материала, находящегося в сушилке.

Основной характерной величиной для барабанных сушилок является напряжение сушилки по испаренной влаге (т. е. количество испаренной влаги в 1 ч на 1 м³ объема барабана) A_6 .

Величина A_6 зависит от типа внутреннего устройства барабана, степени заполнения его объема, частоты вращения и угла наклона сушилки, а также от физических свойств, влажности и размеров частиц материала, температуры, влажности и скорости сушильного агента внутри барабана. Для барабанных сушилок при сушке угольных концентратов крупностью менее 13 мм A_6 может быть определено по эмпирической формуле, предложенной автором:

$$A_6 = 3,03 \frac{\rho_{\text{г.ср}} \nu_{\text{г.ср}}}{\sqrt{d_{\text{м.ср}}}} n B^{0,5} \sqrt{\frac{\text{tg } \beta}{\text{tg } \psi}} \left(\frac{W_2}{W_{\text{max}}} \right)^{0,65}, \quad (\text{III.37})$$

где $\rho_{\text{г.ср}}$ — средняя плотность газа, кг/м³; $d_{\text{м.ср}}$ — средний диаметр частиц, м; $\nu_{\text{г.ср}}$ — средняя скорость газов в сушильном барабане, м/с; n — частота вращения сушильного барабана в 1 мин; B — параметр, характеризующий конструкцию внутреннего устройства барабана (для секторной насадки $B=0,35$; для лопастной насадки — 0,105),

$$B = \frac{F_{\text{м.л}} z}{D_6^2} \sqrt{\frac{h_{\text{ср}}}{D_6}}; \quad (\text{III.38})$$

z — число лопаток; значения $\frac{F_{\text{м.л}}}{D_6^2}$ и $\frac{h_{\text{ср}}}{D_6}$ определяются из табл. III.1;

φ — степень заполнения барабана материалом, доли единицы; $\text{tg } \omega$ и $\text{tg } \psi$ — тангенс угла наклона барабана и естественного угла откоса материала, градус; W_2 и W_{max} — конечная влажность и максимальная гигроскопическая влажность материала, %; при

$$W_2 \geq W_{\text{гигр}}^{\text{max}} \quad \text{отношение} \quad \frac{W_2}{W_{\text{max}}} = 1.$$

Зная величину A_6 , можно приближенно определить объем сушильного барабана.

Выбор типоразмера сушильного барабана выполняют исходя из следующих предпосылок.

Для материалов, допустимая конечная влажность которых после сушки может быть ниже гигроскопической, можно использовать барабанные сушилки с противоточным движением газов и материала, т. е. для этих материалов допускается высокий нагрев.

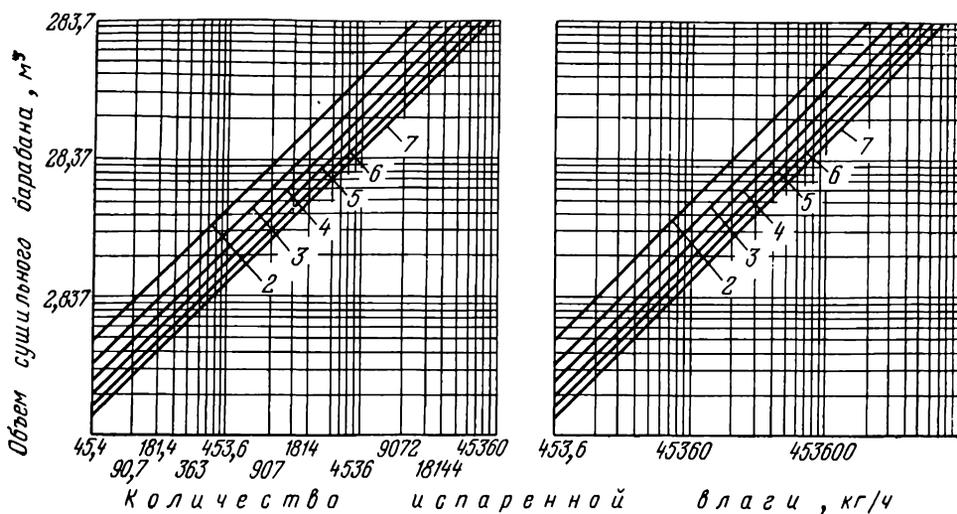


Рис. III.6. Зависимость между количеством испаренной влаги и объемом сушильного барабана:

1—7 — удельное объемное влагонапряжение соответственно 20, 30, 60, 90, 100, 120, 150 кг/м³ч

Таблица III.1

Параметры, характеризующие насадки сушильных барабанов

Параметры	Тип насадки			
	подъемно-лопастная (пери-ферийная) с Г-образными лопастями (рис. III.2, а)	секторная (рис. III.2, б)	секторная с внутренним кольцом (рис. III.2, в)	крестообразная (рис. III.2, г)
φ , %	18	25	27,5	20,0
$\Delta\varphi$, градус	140	140	140	90
$h_{ср}/D_0$	0,576	0,159	0,103	0,04
$F_{л}^M/D_0^2$	0,122	0,067	0,085	0,029

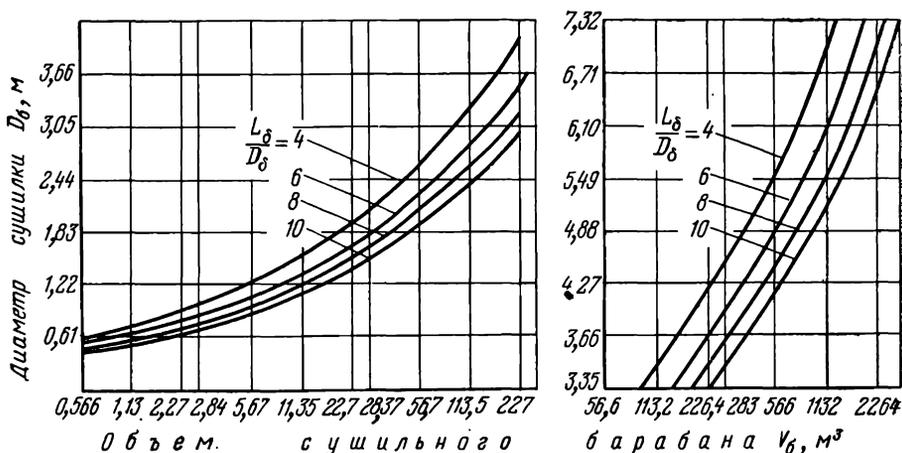


Рис. III.7. Зависимость диаметра и длины сушильного барабана от его объема

При сушке термочувствительных материалов, для которых не допускается влажность ниже гигроскопической, используют барабанные сушилки с параллельным движением материала и газов.

Как правило, для сушки всех материалов принимается средняя температура газов на входе в сушилку 700—850°C, предельный диапазон изменения температуры — 200—1000°C.

В зависимости от гранулометрического состава исходного материала и его сыпучих свойств определяется время сушки. Для кека, флотоконцентрата комкующихся и липких материалов, трудно поддающихся рыхлению, требуется более продолжительный период сушки (время пребывания материала в барабанной сушилке).

Удельное объемное влагонапряжение сушильного барабана (количество испаренной влаги, приведенное к единице объема барабана) находится в пределах 30—150 кг/(м³·ч). Нижний предел этого показателя соответствует сушке комкующихся и липких материалов, при которых применяются низкие температуры сушильного агента.

Степень заполнения материалом объема барабана составляет 3—20%, в среднем она принимается 10—20%.

Время пребывания материала в сушилке составляет 5—25 мин, в среднем — 7—15 мин.

При заданной расчетной производительности сушилки по испаренной влаге по графику (рис. III.6) определяется объем сушилки, т. е. из точки на оси абсцисс, соответствующей количеству испаренной влаги (W , кг/ч), восставляем перпендикуляр до пересечения с наклонными линиями значений удельного объемного влагонапряжения A_6 кг/(м³·ч) и из точки пересечения проводим горизонтальную линию до пересечения с осью ординат для определения объема сушилки V_6 (м³).

По известному объему сушилки, задаваясь диаметром барабана, определяют длину барабана (рис. III.7).

§ 2. КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СУШИЛЬНЫХ БАРАБАНОВ

Сушильный барабан представляет собой полый сварной цилиндр, к стенкам которого с внутренней стороны приварены лопасти. Сушильные барабаны выпускаются с наклоном 1/15—1/50, соотношение диаметра к длине барабана $\frac{L_6}{D_6} = 4 \div 8$.

Для сушильных барабанов диаметром до 2500 мм принимают угловые скорости вращения до 0,8 рад/с (7,64 об/мин), с барабанами диаметрами больше 2500 мм — до 0,63 рад/с (6,01 об/мин). Толщину стенок барабана определяют по формуле

$$\delta_6 = (0,0055 \div 0,007) D_6, \text{ мм}, \quad (\text{III.39})$$

где D_6 — диаметр сушильного барабана, мм.

Масса барабана зависит от его размеров, конструктивного выполнения внутренних устройств, ориентировочно она может быть подсчитана по формуле

$$G_6 = 1,3 V_6, \text{ т}, \quad (\text{III.40})$$

где V_6 — объем барабана, м^3 .

На рис. III.8 показан сушильный барабан диаметром 3,5 м, длиной 22 м, который устанавливают под углом 4° . Он может вращаться с частотой 2, 3, 4, 6 об/мин. Со стороны горячего конца сушильного барабана имеется кожух, благодаря которому мягкое манжетное уплотнение перенесено в часть сушильного барабана с более низкой температурой. Барабан со стороны горячего конца оснащен приемно-винтовыми лопастями длиной 2 м, затем на длине 3 м установлена лопастная насадка и на остальной части барабана размещена насадка, состоящая из шести секторов с Г-образными лопастями, которая называется секторной.

Намечается выпуск сушильных барабанов диаметром 4, 4,5 и 5 м, длиной 28—35 м.

Для уплотнения мест входа концов сушильных барабанов в топку и разгрузочных камер применяют различные уплотняющие устройства (рис. III.9).

Со стороны загрузки сушильного барабана обычно устанавливают секторное (рис. III.9,а), ленточное (рис. III.9,б) или лабиринтное уплотнения. При установке секторного уплотнения зазор между секторами и обечайкой должен быть не менее 4 мм. При выставке обечайки радиальное биение допускается не более 4 мм. Со стороны разгрузочной камеры устанавливают уплотнения различной конструкции (бандажное, ленточное, лабиринтное, секционное и аэродинамическое), а также из деревянных брусьев (рис. III.9,в) длиной 220—250 мм, прижатых к корпусу барабана.

Для уменьшения замазывания внутренних устройств барабанов углем применяют различные способы.

Лучшим способом устранения замазывания барабанных сушилок является сушка смеси флотационного угольного концентрата (шлама) и мелкого угольного концентрата, так как при этом не только устраняются затруднения, возникающие в связи с замазыванием, но и значительно повышается производительность сушилок.

В целях уменьшения замазывания сушильных барабанов влажным углем при сушке флотоконцентрата и шлама применяют различные конструкции цепных навесок (рис. III.10).

Навеска цепей в сушильных барабанах позволяет уменьшить замазывание внутренних насадок и повысить эффективность сушки комкующихся и липких материалов. Представленные на рис. III.10 насадки были размещены в сушильных барабанах ЦОФ «Ворошиловградская» и ЦОФ «Суходольская» взамен внутренних устройств, ранее применявшихся в этих барабанных сушилках. Отличительная особенность новых цепных насадок состоит в том,

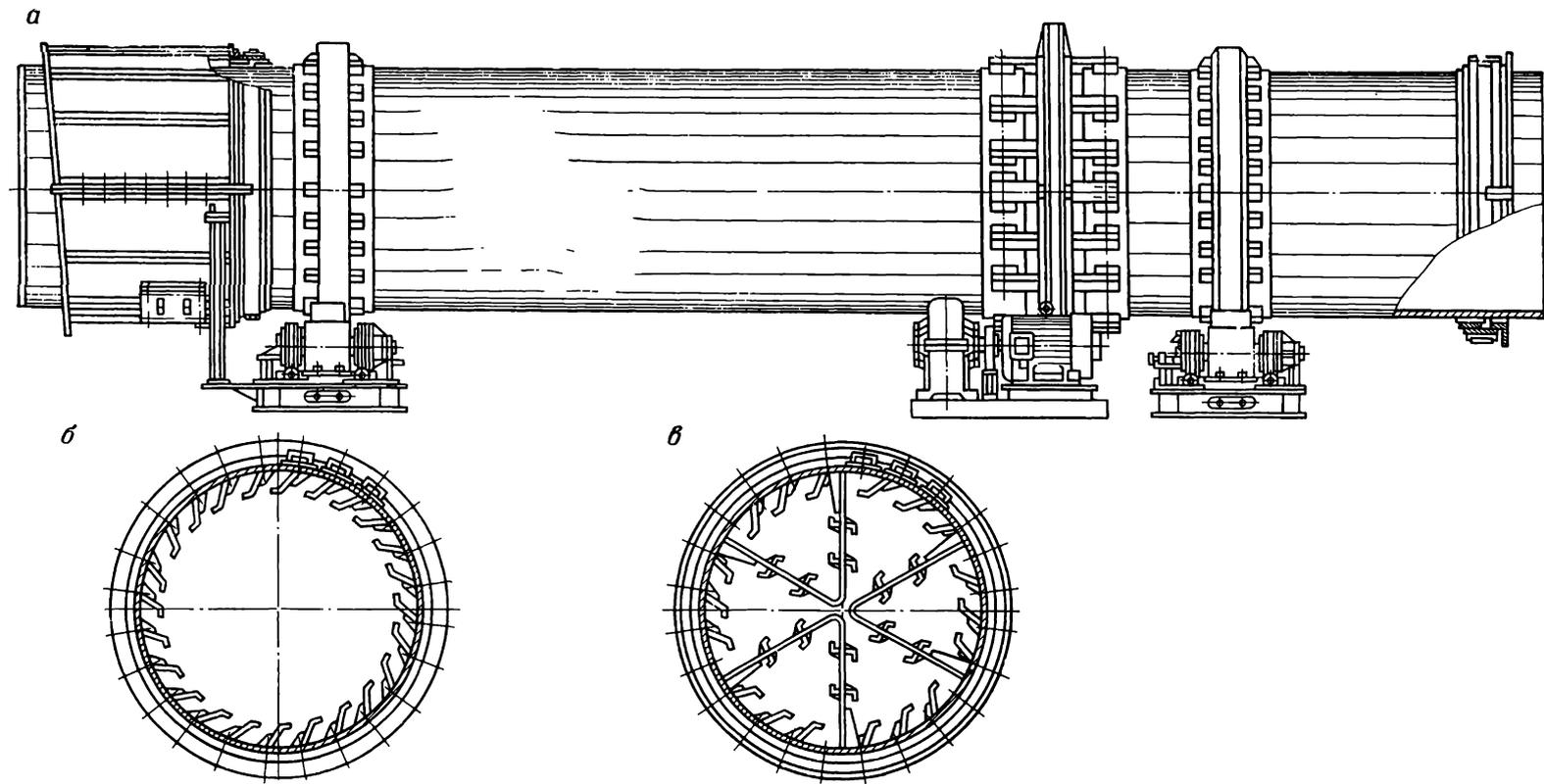


Рис. III.8. Сушильный барабан:
а — общий вид барабана; б — лопастная насадка; в — секторная насадка

что их перегородки выполнены из цепных подвесок и образуют гибкие просеивающие поверхности.

Приемно-винтовая насадка состоит из 10 лопастей, расположенных под углом 45—55°. Увеличение наклона лопастей и оборудование их цепными гирляндами обеспечивают поступательное перемещение угля без пересыпания его через переднее заградительное кольцо. После винтовых насадок расположены гибкие перегородки параболического профиля, образующие ячейки. Цепи закреплены по винтовым линиям и благодаря этому при вращении

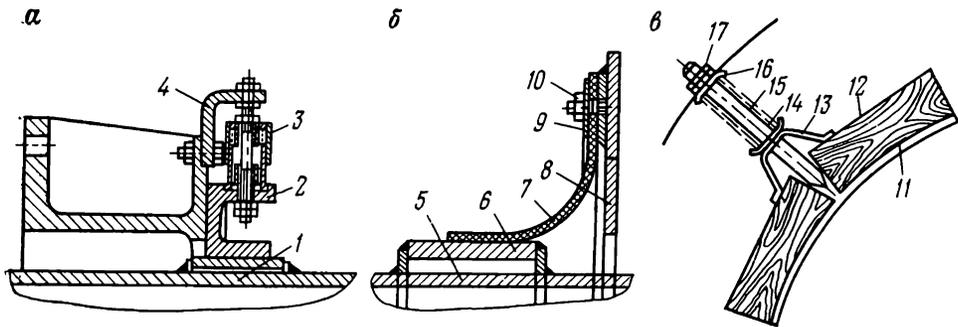


Рис. III.9. Уплотнения сушильных барабанов:

1 — сушильный барабан; 2 — сектор уплотнения; 3 — прижимная пружина; 4 — опорный кронштейн; 5 — сушильный барабан; 6 — обечайка; 7 — уплотнение; 8 — разгрузочная камера; 9 — прижимная планка; 10 — крепежная шпилька; 11 — сушильный барабан; 12 — уплотнительные деревянные брусья; 13 — прижимная пружина; 14 — пружина; 15 — распорный болт; 16 — шайба; 17 — гайка

барабана параболические подвески поочередно раскрываются и перегибаются в разных точках, что обуславливает их относительное перемещение. При вращении барабана скорость перемещения цепей по его сечению изменяется по синусоиде, что в сочетании с винтовым расположением подвесок способствует разрыхлению липкого продукта и его просеиванию через гибкие перегородки и очистке цепей. В средней части длины барабана насадка выполнена из цепных винтовых перегородок и периферийных подъемных лопастей. Перегородки образованы путем крепления цепей к лопастям или к корпусу барабана, а по его оси соединены кольцами. Цепи имеют провисание и осевое перемещение, что обуславливает их самоочистку. В разгрузочной части барабана секторные перегородки выполнены также из цепей. Подсушенные, сыпучие угольные частицы поднимаются периферийными лопастями и сыпаются продольными струями.

Цепи служат рассекателями сыпаемых с верхних лопастей угольных частиц. Крепление цепей выполнено таким образом, чтобы обеспечить их перемещение относительно друг друга в продольном и поперечном направлениях. Наблюдения показали, что имеет место налипание угля на элементы гибких насадок, который затем отделяется вследствие перегибов цепей и при соприкосновении цепей друг с другом. При этом цепи не замазываются и тем самым обеспечивается интенсивное раскрытие поверхности, повы-

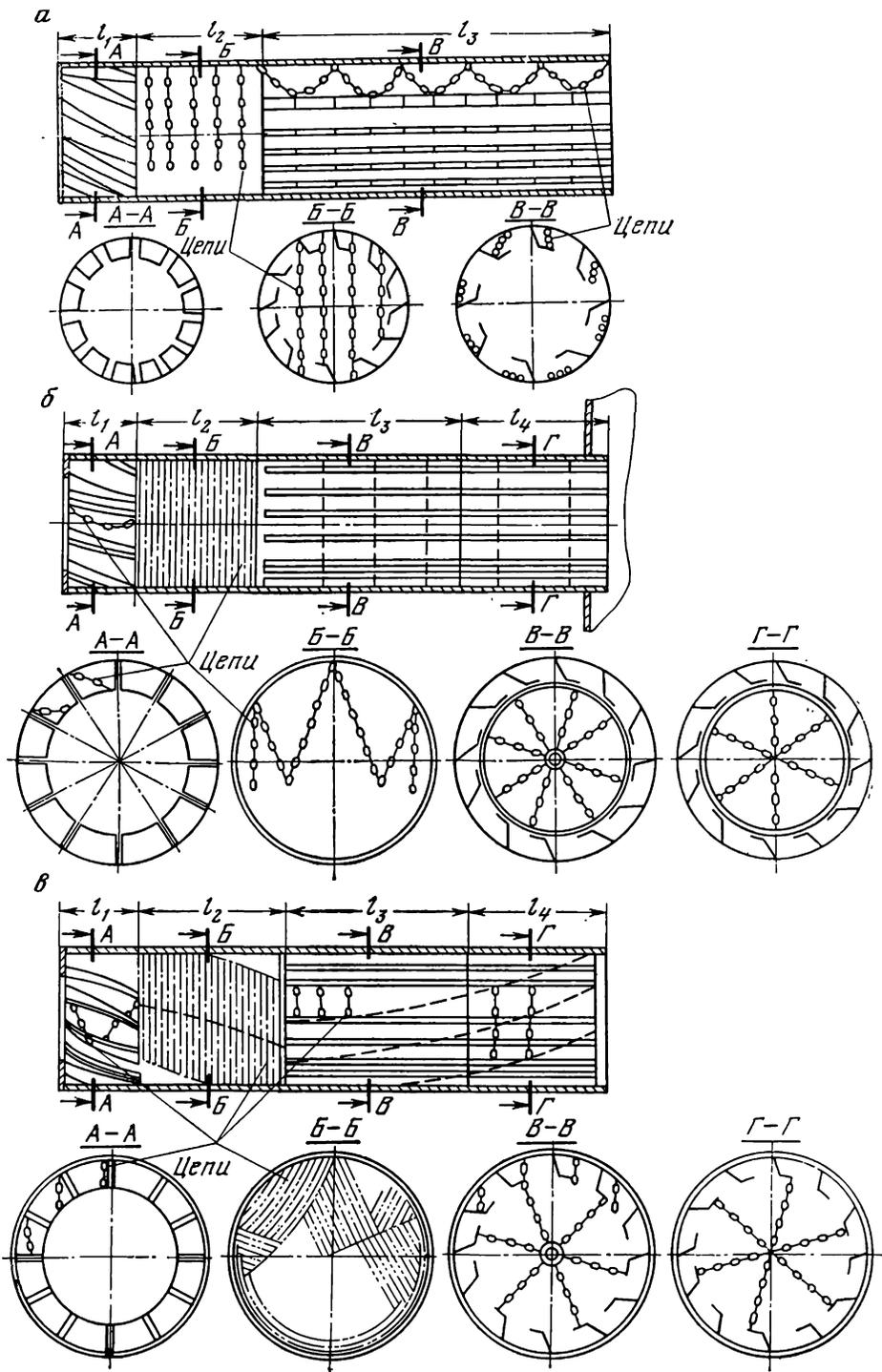


Рис. III.10. Насадки с цепными навесками в сушильных барабанах диаметром 2,8 м, длиной 14 м:

a — сложные листовые элементы с очищающими цепями; *б* — цепные насадки в барабанах на ЦОФ «Ворошиловградская»; *в* — цепные насадки в барабанах на ЦОФ «Суходольская»

шается также эффективность сушки комкующихся, липких материалов.

На рис. III.11 показаны схемы типовых внутренних насадок сушильных барабанов диаметром 2,8 м, длиной 14 м для сушки руд, глин и других сыпучих материалов, которые в зависимости

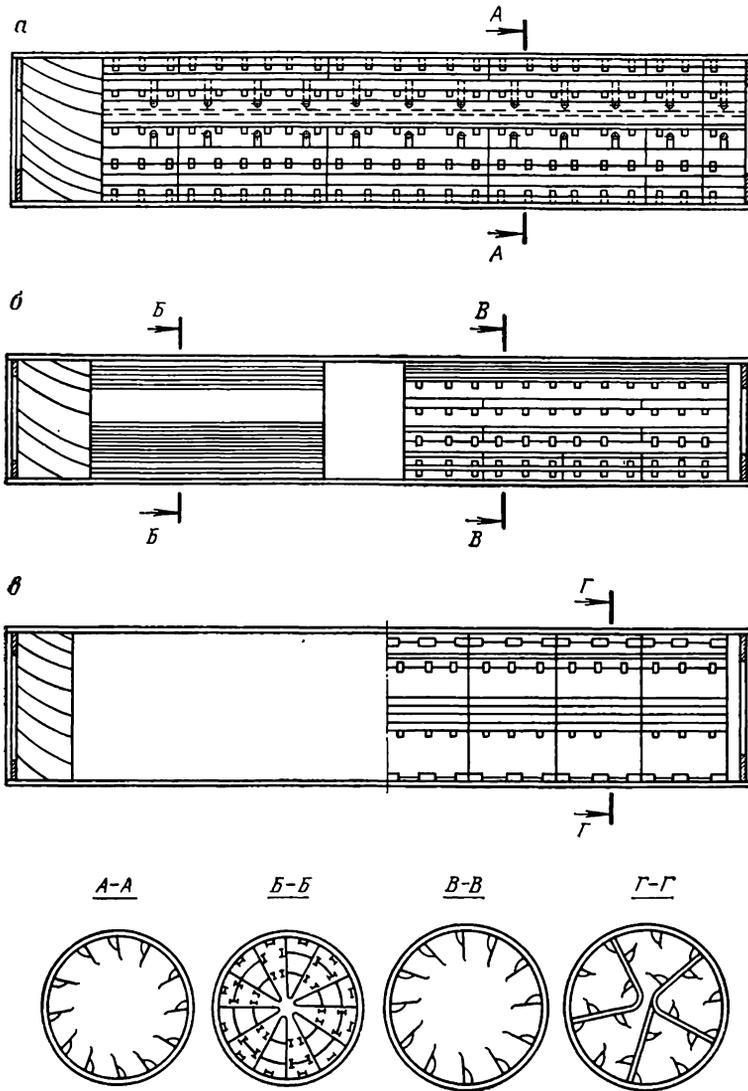


Рис. III.11. Схемы типовых внутренних насадок сушильных барабанов для сушки различных материалов

от просушиваемого материала имеют производительность 20—50 т/ч и частоту вращения 4,7 об/мин, угол наклона $2^{\circ}51'$. Температура газов на входе в сушилку 700°C , на выходе из сушильного барабана $90\text{—}110^{\circ}\text{C}$.

Насадки, показанные на рис. III.11,а, применяются для сушки: железного концентрата с насыпной плотностью $2250\text{—}2600\text{ кг/м}^3$ и начальной влажностью $7\text{—}8\%$, который сушится до влажности

1—2%; производительность сушилки по сухому продукту — 40 т/ч; железной руды крупностью 0—100 мм с начальной влажностью 17—18%, которая сушится до влажности 9—10%; производительность сушилки — 50 т/ч.

Насадки, показанные на рис. III.11,б, предназначены для сушки глин и насадки, показанные на рис. III.11,в — для сушки глины в виде гранул в производстве керамзита.

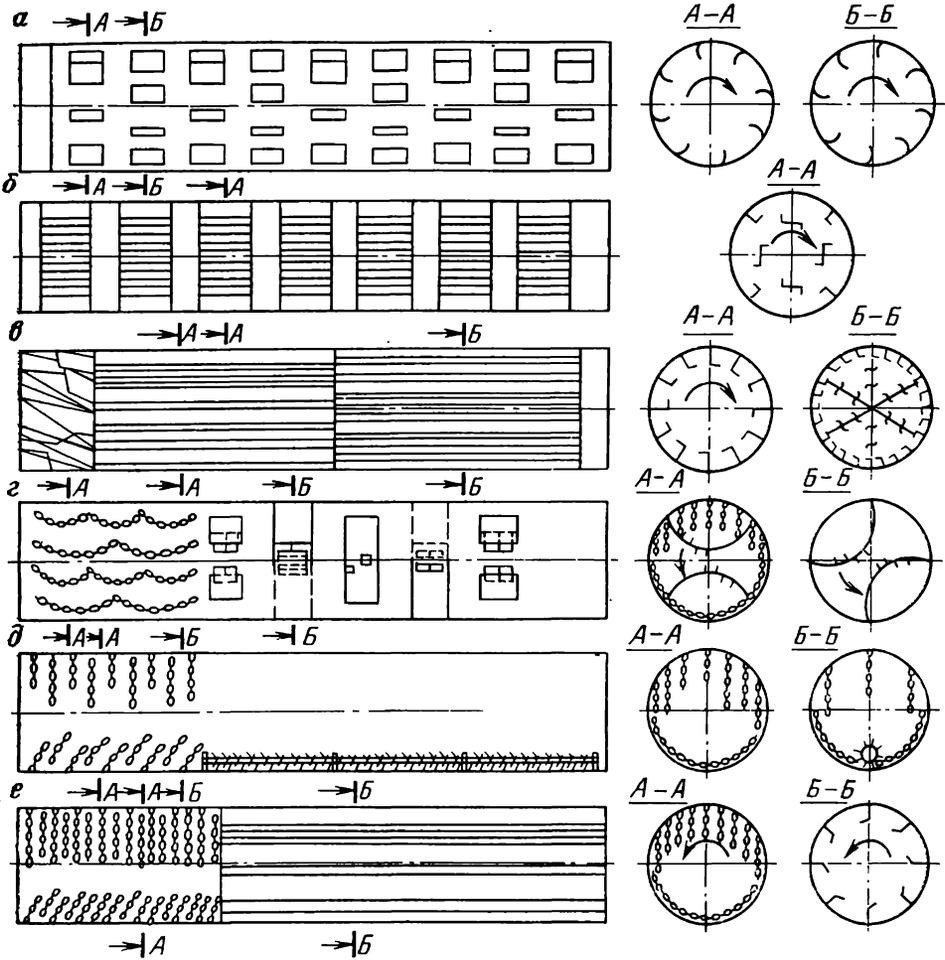


Рис. III.12. Конструкции внутренних устройств сушильных барабанов, применяемых на предприятиях цветной металлургии

На предприятиях металлургии цветных металлов применяются сушильные барабаны диаметром 1,4—2,8 м, длиной 8,0—19,5 м. На рис. III.12 показаны конструкции внутренних устройств сушильных барабанов, применяемых на предприятиях цветной металлургии. Большинство барабанных сушилок имеют внутренние устройства, состоящие из лопастей, размещенных либо только по периферии барабана (рис. III.12,а), либо дополнительно к ним на радиально установленных внутри барабана стальных листах

(рис. III.12,б и в). На многих предприятиях некоторые аналогичные устройства из-за значительного налипания материала были реконструированы. В частности, на ряде сушильных барабанов

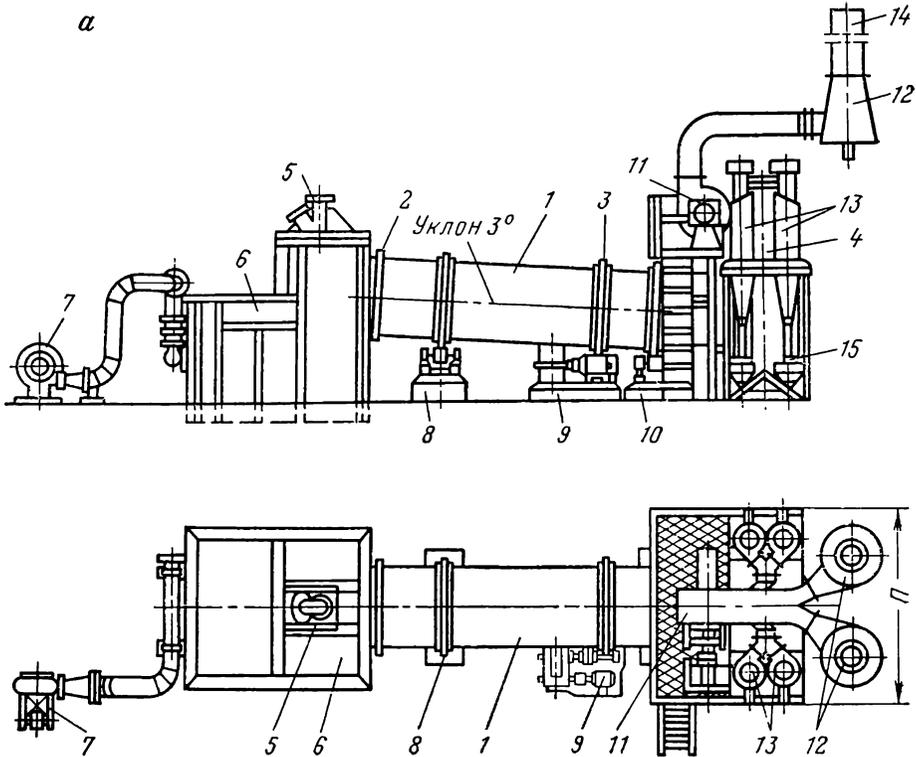


Рис. III.13. Сушильные установки:

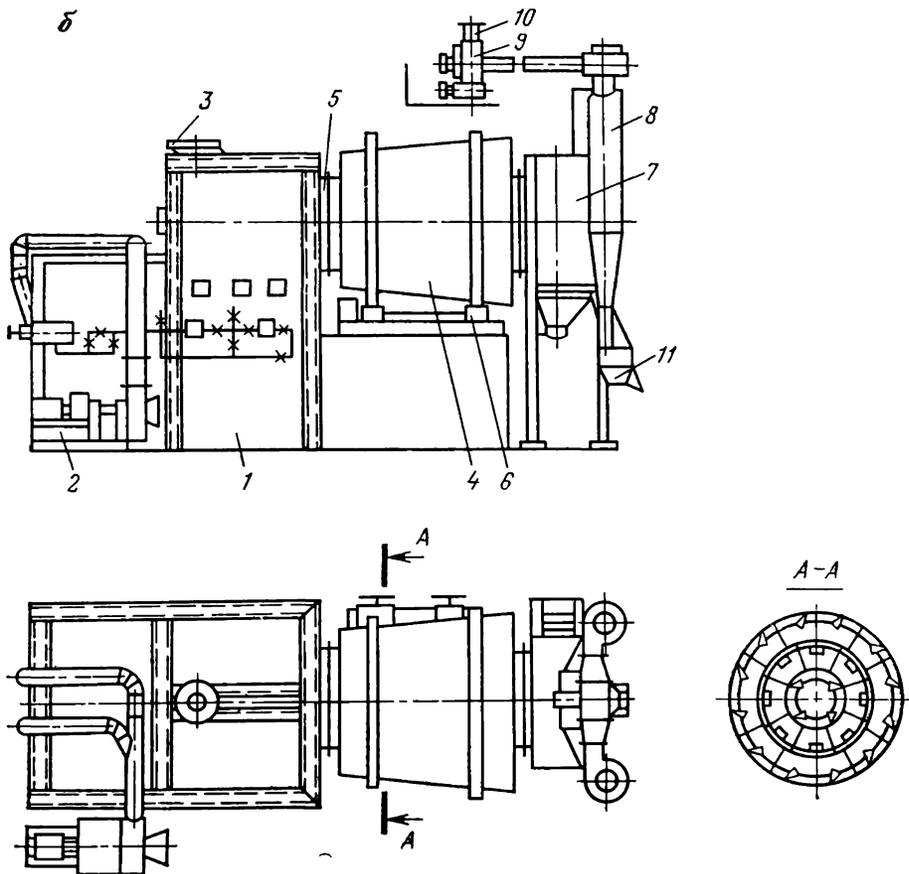
а — с прямоточным одноходовым сушильным барабаном для сушки глины и песка; 1 — сушильный барабан; 2 — сальниковое уплотнение; 3 — зубчатый венец; 4 — разгрузочная камера; 5 — загрузочная течка; 6 — топка; 7 — дутьевой вентилятор; 8 — опорная станина; 9 — привод; 10 — опорно-упорная станина; 11 — вытяжной вентилятор; 12 — циклон мокрой очи-

были подвешены гирлянды цепей (рис. III.12,г) или установлена по спирали стальная лента вдоль барабана.

Для очистки стенок барабана от налипшего материала применяется лопастной, перекатывающийся на катках шнек-ерш (рис. III.12,д). Представляет интерес комбинированное устройство, состоящее из двух зон (рис. III.12,е).

ВНИПИТеплопроект разработал одноходовые и многоходовые цилиндрической и конической форм барабанные сушилки для сушки глины и песка (рис. III.13, табл. III.2).

Трехходовой барабан состоит из трех вмонтированных друг в друга и жестко соединенных между собой металлических усеченных конусов. Передняя часть барабана оканчивается горловиной, входящей в топку; задняя часть барабана соединяется с разгрузочной коробкой. Материал загружают в установленный над топкой бункер, а из последнего питатель подает его в барабан. Газы и материал в таких барабанах сначала проходят по внутрен-



сти; 13 — циклоны сухой очистки; 14 — дымовая труба; 15 — затворы-мигалки; 6 — с трехходовым сушильным барабаном для сушки песка; 1 — топка; 2 — дутьевой вентилятор; 3 — загрузочная печька; 4 — сушильный барабан; 5 — сальниковые уплотнения; 6 — опорная станина с приводом; 7 — разгрузочная камера; 8 — циклоны сухой очистки; 9 — вытяжной вентилятор; 10 — дымовая труба; 11 — затворы-мигалки

Таблица III.2

Показатели работы одноходовых барабанных сушилок

Размеры барабанной сушилки, мм		Производительность, т/ч	Влажность материала, %	
диаметр	длина		до сушки	после сушки
Г л и н а				
1000	4000	0,6	25	3
1200	6000	1,2		
1600	8000	3,3		
1600	12 000	4,8		
П е с о к				
1200	1200	0,75	10	0,3
1500	1500	1,5		
1000	4000	3,0		
1200	6000	6,0		
1600	8000	15,0		
1600	12 000	24,0		

нему конусу, а затем — по наружным. Многоходовые барабаны занимают меньшую площадь, для них характерны меньшие потери в окружающую среду вследствие более низкой температуры наружной поверхности барабана.

Основная характеристика трехходового барабана

Рабочий объем барабана, м ³	3,4
Размеры наружного конуса (кожуха) барабана, м:	
диаметр	1,68
длина	1,62

§ 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ, КОМПОНОВКИ ОБОРУДОВАНИЯ И ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ БАРАБАННЫХ СУШИЛОК

Технологические схемы и компоновка оборудования барабанных сушилок разнообразны и отличаются типами топок, размерами сушильных барабанов, тягодутьевыми и пылеулавливающими установками.

Таблица III.3

Основные показатели работы барабанных газовых сушилок применяемых на обогатительных фабриках угольной промышленности

Размеры сушильного барабана, м		Частота вращения барабана, об/мин	Производительность, т/ч		Влажность, %		Температура газов, °С		Сушимые продукты
диаметр	длина		по исходному углю	по испаренной влаге	начальная	конечная	начальная	конечная	
2,8	14	4,7	33	5,2	24	10	800	100	100% ф. к. ¹ 55% м. к. ²
2,8	14	5	90	9,5	18,5	9	750	80	и 45% ф. к.
3,5	27	5,9	230	26	16,5	5,7	800	80	82% м. к. и 18% ф. к.
3,5	27	5,9	151	20	20	7,8	700	100	65% м. к. и 35% ф. к.
3,25	20,5	3	72	11	23	9	750	95	100% ф. к.

¹ Ф. к. — флотоконцентрат.

² М. к. — мелкий концентрат.

При компоновке технологического оборудования необходимо учитывать возможность механизации ремонтных и такелажных работ, компактность и рациональность размещения оборудования, ликвидацию подвальных помещений с пылящим оборудованием.

В табл. III.3 приведены основные показатели работы барабанных газовых сушилок, применяемых на обогатительных фабриках угольной промышленности, а в табл. III.4 — показатели работы барабанных сушилок диаметром 2,8 м, длиной 14 м, оснащенных насадками, показанными на рис. III.10.

Опыт работы барабанов показал, что только в результате применения цепных элементов удельное влагонапряжение повыси-

лось при сушке смеси мелкого и флотационного концентратов на 64% и при сушке флотоконцентрата на 19%.

Удельный расход тепла колеблется в пределах 950—1050 кДж/кг испаренной влаги, а расход электроэнергии на 1 т испаренной влаги — 20—75 кВт·ч. Большие колебания в расходе тепла и электроэнергии обусловлены состоянием оборудования, уплотнением сушильного тракта, видом сухого материала и топлива, производительностью сушильного барабана и др.

Таблица III.4
Показатели работы барабанных сушилок
диаметром 2,8 м, длиной 14 м

Наименование показателя	ЦОФ „Суходольская“		ЦОФ „Ворошиловградская“	
	к рис. III.10, а	к рис. III.10, в	к рис. III.10, а	к рис. III.10, б
Сушимый продукт	Флотоконцентрат	Флотоконцентрат	Флотоконцентрат (70%) в смеси с мелким концентратом (30%)	Флотоконцентрат (70%) в смеси с мелким концентратом (30%)
Влажность угля, %:				
до сушки	27,2	27,2	22,0	23,2
после сушки	10,3	10,3	13,0	12,1
Производительность, т/ч:				
по исходному продукту	35	43	60	81
по испаренной влаге	6,6	7,8	6,2	10,2
Напряжение объема барабана по испаренной влаге, кг/(м ³ ·ч)	76	90,7	72,0	118,6
Масса насадки, приходящаяся на 1 кг испаренной влаги, кг	2,12	1,30	1,40	1,06
Общая масса насадок, т	14	10,3	8,5	10,86

Одним из основных мероприятий, обеспечивающих повышение производительности барабанной сушилки, является создание условий перевода в сушилке сушеного угля во взвешенное состояние, что достигается путем применения рациональных внутренних насадок, увеличения скорости газов и частоты вращения сушильного барабана и подачи материала в сушилку в диспергированном состоянии. Выполнение указанных мероприятий на ЦОФ «Чумаковская» позволило увеличить производительность барабанной сушилки диаметром 2,8 м, длиной 14 м до 12—14 т/ч по испаренной влаге, что соответствует удельному влагонапряжению 140—160 кг/(м³·ч).

КузНИИУглеобогатение, выполнив указанные мероприятия на ЦОФ «Сибирь» (снижение присосов воздуха, уменьшение гидравли-

ческого сопротивления сушильного тракта и изменение конструкции загрузочного желоба), увеличил производительность барабанных сушилок диаметром 3,5 м и длиной 22 м с 20—25 до 28—30 т/ч по испаренной влаге.

Фирма «Вено-Пик» (Франция) разработала комбинированную барабанную сушилку производительностью 400 т/ч по исходному продукту и 70 т/ч по испаренной влаге, предназначенную для сушки углей. Температура газов на входе в сушилку — 850°C, на выходе из сушилки — 120°C. Она состоит (рис. III.14) из топки, выполненной в виде двух горизонтально расположенных цилиндров с внешним диаметром 5,85 м (внутренний диаметр 3,8 м), длиной 9,5 м. В качестве топлива используется мазут — 7,3 т/ч. Топка оборудована форсункой с запально-защитным устройством, двумя вентиляторами производительностью 115 и 145 тыс. м³/ч. Между топкой и сушилкой установлен соединительный короб толщиной 8 мм, в котором размещена загрузочная течка, выполненная с двойными стенками из листовой жаропрочной стали толщиной 6 мм. Сушильный барабан состоит из двух секций. Первая секция имеет длину 6 м и внутренний диаметр 6,35 м. В ней размещены подъемно-винтовая насадка и четыре ряда насадок с подвижными гребками, выполненными из полос толщиной 14 мм. Гребки навешены на вал диаметром 50 мм. Шарнирные устройства закреплены на корпусе барабана болтами диаметром 27 мм с помощью опорных конструкций, изготовленных из хромистого чугуна. Вторая секция барабана состоит из шести труб диаметром 2134 мм каждая, со стенками толщиной 16 мм. Длина труб 20 м. В каждой трубе размещены периферийные пересыпные лопасти толщиной 8 мм. Сушильный барабан имеет одну роликовую опорную станцию и в качестве другой опорной точки служит цапфа центральной трубы, к валу которой присоединен привод с электродвигателем мощностью 630 кВт.

Осаждение высушенного угля осуществляется в разгрузочной камере, от верхней части которой отходят два соединительных газохода ко второй ступени сухой очистки газов. Вторая ступень сухой очистки газов производительностью 540 тыс. м³/ч состоит из четырех секций батарейного пылеуловителя; каждая секция оборудована шестью циклонами диаметром 1600 мм.

Для мокрого пылеулавливания применены четыре аппарата «Эрмикс» в комплекте с четырьмя дымососами. Производительность одного дымососа и мокрого аппарата «Эрмикс» 135 тыс. м³/ч. Дымососы при частоте вращения рабочего колеса 1500 об/мин создают напор 4300 Н/м² (при температуре газов 120°C) и потребляют 250 кВт электроэнергии. Общая мощность электродвигателей дымососов 1000 кВт.

Основной сушильной установкой для сушки глины в настоящее время являются барабанные сушилки, которые работают как размалывающие и сушильные аппараты, так как в процессе сушки происходит измельчение кусков глины примерно на 40—50%. Конечная влажность глины зависит от крупности кусков. Например,

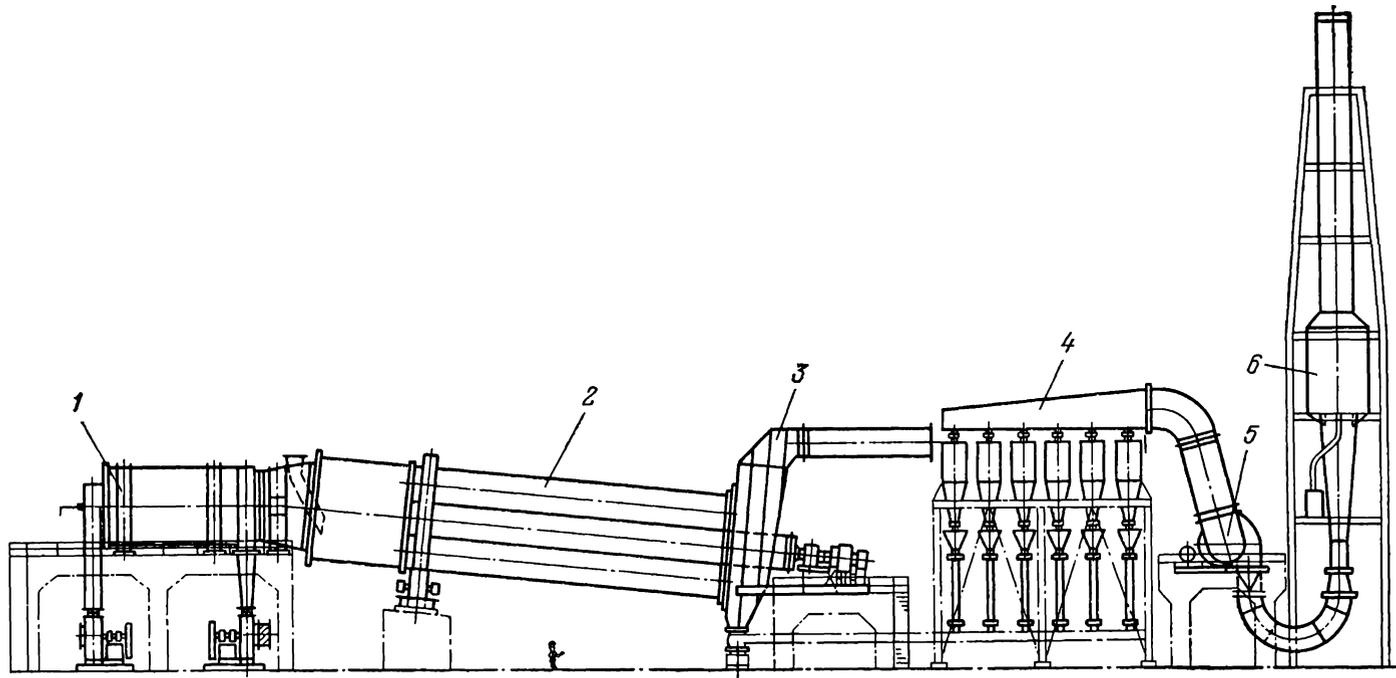


Рис. III.14. Крупногабаритная барабанная сушилка фирмы «Вено-Пик» (Франция):

1 — топка; 2 — сушильный барабан; 3 — разгрузочная камера; 4 — циклоны; 5 — дымосос; 6 — мокрый пылеуловитель

при сушке кусков глины размером 10 и 30 мм с начальной влажностью 20% конечная их влажность соответственно составляет 4 и 10%.

Для совмещения в одном агрегате процессов сушки и помола глины сушильные барабаны оборудуют цепной зоной. Цепи длиной 330—600 мм устанавливают в шахматном порядке по окружности с шагом 400—600 мм и по образующей—175—225 мм. Со стороны загрузки сушильного барабана на расстоянии 2 м лопасти не устанавливают, а футеруют барабан огнеупором.

Т а б л и ц а III.5

Показатели работы барабанных сушилок при сушке горно-химического сырья

Наименование показателя	Хлористый калий			Калийно-маг- ниевый кон- центрат
Размеры сушильного барабана:				
длина, м	14	14	22	20,5
диаметр, м	2,2	2,2	3,2	2,35
объем, м ³	53	53	177	76
Производительность, т/ч:				
по исходному продукту	21,4	13,4	60	18,1
по испаренной влаге	1,4	1,5	5,4	4,1
Влажность продукта, %:				
начальная	7,3	11,6	10,0	28
конечная	0,8	0,20	1,0	7
Температура газов, °С				
начальная	880	900	800	900
конечная	140	190	145	140
Влагонапряжение объема сушильно- го барабана, кг/(м ³ ·ч)	26	28	30	54

Сушка концентрата железной руды осуществляется в барабанных сушилках диаметром 3,5 м, длиной 27 м, оборудованных стандартными внутренними насадками (подъемно-винтовая, лопастная). Секторные насадки заменены двухзаходной винтовой спиралью той же длины. Барабанные сушилки оборудованы топками, в которых сжигают природный газ.

Техническая характеристика барабанных сушилок для сушки железной руды

Производительность, т/ч:	
по исходному продукту	150
по испаренной влаге	11
Влажность руды, %:	
начальная	5 — 12
конечная	1 — 5
Температура газов, °С:	
на входе в сушилку	600 — 1000
на выходе из сушилки	80 — 150
Производительность дымососа, тыс. м ³ /ч	50 — 150
Напор дымососа, Н/м ²	2700 — 3150

Для сушки горно-химического сырья также нашли применение барабанные сушилки (табл. III.5).

Надежная и устойчивая работа барабанной сушилки в значительной мере зависит от правильности монтажа сушильного барабана. Монтаж корпуса сушильного барабана должен осуществляться в полном соответствии с «Инструкцией по монтажу аппаратов с вращающимися барабанами» (10—380—4М).

Отклонения (мм) в положении смонтированного корпуса сушильного барабана от проектного положения не должны превышать следующих значений:

Биение корпуса в пролетах между роликоопорами	15
Биение концов корпуса	10
Отметка верха бандажа на роликоопорах	± 2
Овальность корпуса не более	$0,004D_6$
Аксиальное биение бандажа не более	2

Если при пуске в работу барабанной сушилки будет происходить перемещение барабана более чем на 15 мм вверх или вниз по отношению к продольной оси, то необходимо для удержания корпуса в нормальном положении произвести его регулировку путем незначительного перекоса опорных роликов (рис. III.15). Чтобы определить, в какую сторону должны быть развернуты опорные ролики, наблюдающий должен стать лицом к бандажу так, чтобы вращение бандажа происходило снизу вверх. Для перемещения корпуса вправо (по стрелке А) необходимо правую сторону ролика с подшипником и левую сторону ролика с подшипником (на другой стороне корпуса) приблизить с помощью упорного винта 1 («поджать» к оси корпуса), а другие стороны станин с роликами и подшипниками отодвинуть упорным винтом 2 («отпустить» от оси корпуса) на величину «поджатых» сторон роликов. Для перемещения корпуса влево необходимы обратные перемещения указанных станин с роликами и подшипниками. Если нормальное положение корпуса достигнуто переносом роликов и при этом не происходит нагрев подшипника до 65°C (в условиях эксплуатации) и не срабатывает цепь сигнализации, то регулировку сушильного барабана следует считать законченной.

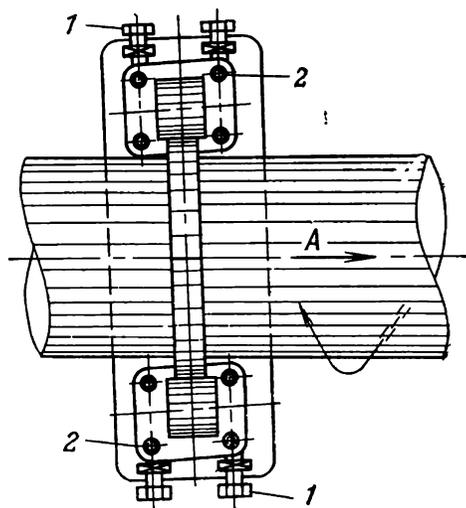


Рис. III.15. Схема регулирования положения корпуса сушильного барабана

Производительность барабанных сушилок в значительной степени зависит от присосов воздуха в сушильный тракт.

Только при частичном устранении присосов воздуха через выгрузочную камеру производительность барабанных сушилок может быть увеличена в 1,2—1,3 раза. Присос воздуха в сушильный тракт не должен превышать 20—30%.

Для сушки зернистых материалов целесообразно применять комбинированное внутреннее устройство сушильного барабана в сочетании с подъемно-лопастными и секторными насадками.

В барабанных сушилках, имеющих диаметр более 1 м, целесообразно разбивать сечение сушилки на изолированные секторы и лопасти в них размещать с минимальным расстоянием, при котором не будет происходить замазывание или заклинивание крупных кусков.

Глава IV

ГАЗОВЫЕ ТРУБЫ-СУШИЛКИ

Сушка материалов в трубах-сушилках протекает в условиях конвективного теплообмена и аэродинамического взаимодействия движущихся частиц материала с газовым потоком.

Однородное распределение влажного материала в начале сушилки и большая скорость сушки позволяют использовать высокие начальные температуры газов, которые не могут быть применены в других типах сушилок, производящих сушку угля, торфа и других материалов.

В трубах-сушилках однородное распределение влажного продукта способствует его равномерному высушиванию, а также лучшему использованию площади сушильной трубы, что обуславливает высокие показатели удельного влагонапряжения объема труб-сушилок по испаренной влаге, которые примерно в 8—10 раз больше, чем в барабанных сушилках.

Сушка материала в горячем газовом потоке происходит практически мгновенно. Материал находится в контакте с горячими газами около 0,5 с, а во всей системе — около 5 с. Таким образом, количество материала, одновременно находящегося даже в самых больших сушилках, не превышает 1/500 их производительности.

В трубах-сушилках имеет место высокая интенсивность передачи тепла от газов к взвешенным частицам материала. Чем меньше размер частиц материала, тем быстрее и глубже протекает процесс сушки.

В трубах-сушилках сушке подвергаются материалы, из которых требуется удалить свободную влагу, или материалы, обладающие малым сопротивлением внутреннего переноса влаги. Преимущественно в трубах-сушилках сушатся мел, кремнезем, уголь, торф, калийная и поваренная соль и др. Сушка в трубах-сушилках обычно происходит при параллельном токе газов и материала. Простейшая труба-сушилка состоит из прямолинейного отрезка трубы постоянного сечения, по которой горячие газы и взвешенные в их потоке частицы материала проходят при восходящем или нисходящем движении газов (рис. IV.1). Преимуществом труб-

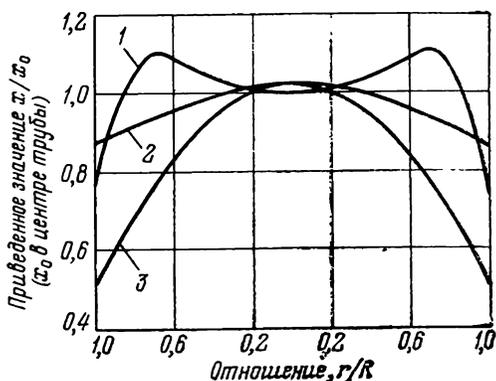


Рис. IV.1. Профили полей скоростей газа (1), материала (2) и концентрация материала (3) по сечению трубы-сушилки в восходящем двухфазном потоке (x , v — координаты, R — радиус трубы)

сушилок являются интенсивный тепло- и массоперенос, высокая скорость сушильного процесса, простая конструкция стационарно устанавливаемой сушилки, сравнительно низкие капитальные затраты, сравнительно малая занимаемая площадь. Трубы-сушилки имеют простые элементы конструкции. Однородное распределение влажного продукта в начале сушки способствует равномерному высушиванию его, а также лучшему использованию площади сушильной трубы, т. е. большей производительности сушилки по испаренной влаге.

Недостатком труб-сушилок являются довольно высокие требования к сепарации твердой фазы из потока газа и сравнительно большой расход энергии.

§ 1. ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРУБ-СУШИЛОК

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЗВЕШЕННЫХ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ С ГАЗОВЫМ ПОТОКОМ

Сушка материалов в трубах-сушилках протекает в условиях конвективного теплообмена и гидродинамического взаимодействия между движущимися частицами материала и газовым потоком.

В трубе-сушилке сушка материала происходит во время движения его частиц под действием газового потока. Поэтому важно иметь правильное представление о характере движения материала в трубе-сушилке.

Двигаясь поступательно, частицы одновременно вращаются, на что расходуется часть энергии и их поступательное движение замедляется.

Одновременно мелкие частицы, двигаясь с большей скоростью, чем крупные, подталкивают последние, в результате чего крупные частицы получают несколько большую скорость, а мелкие — меньшую, что приводит к сближению их скоростей движения.

Материал, движущийся в восходящем потоке газа, распределяется неравномерно по сечению трубы. В результате торможения частиц у стенок материал концентрируется ближе к центру трубы. Однако скорость его мало изменяется по сечению трубы. Газ, наоборот, прижимается материалом к периферии, поэтому скорость его в центре меньше (см. рис. IV.1).

Неравномерность профиля скоростей увеличивается с ростом концентрации материала и скорости газа в трубе. Исследования показали, что по высоте трубы-сушилки создаются различные фазы движения материала.

В зоне питания сушилки, где скорость движения частиц материала близка к нулю или отрицательна, образуется своего рода взвешенный слой и имеет место частичная фильтрация газового потока через этот слой.

С дальнейшим увеличением скорости движения материала наступает вторая фаза движения, характеризующаяся переносом

твердых частиц при существенном неравномерном распределении последних по сечению трубы-сушилки вследствие перегруппировки частиц, отличающихся размерами и формой.

Третья фаза движения наступает при скорости материала, близкой к скорости установившегося движения, когда создается практически равномерное распределение твердых частиц по сечению и высоте трубы-сушилки.

Визуальные наблюдения и скоростная киносъемка показали, что отдельные частицы транспортируемого материала в трубе-сушилке движутся не прямолинейно и не являются свободно взвешенными. Частицы совершают поперечные движения с некоторым ускорением и замедлением. Это объясняется влиянием твердых границ, наличием градиента скорости поперек потока, неправильностью форм частиц, а при высоких концентрациях — определенным эффектом их столкновения между собой и со стенками трубы-сушилки.

Объемная концентрация материала в трубе-сушилке определяется из выражения

$$B = \frac{V'''}{V_{\text{см}}} = \frac{V''}{V' + V''}, \quad (\text{IV.1})$$

где $V_{\text{см}}$, V' , V'' — объем соответственно смеси, газовой и твердой фаз, м³/ч.

Соотношение между объемной и массовой концентрациями материала выражается следующей зависимостью:

$$\mu_p = \frac{B}{1 - B} \cdot \frac{\rho'' V'''}{\rho' V'} = \frac{B}{1 - B} \cdot \frac{\rho''}{\rho'} a, \quad (\text{IV.2})$$

где μ_p — массовая концентрация материала, кг/кг.

При движении аэросмеси в восходящем потоке происходит скольжение фаз, которое можно представить как отношение между скоростью материала и скоростью газового потока:

$$a = \frac{v'''}{v'}. \quad (\text{IV.3})$$

В связи с этим расчетная концентрация материала не будет соответствовать действительной концентрации на вертикальном участке трубы и действительная будет всегда больше расчетной концентрации.

Действительная, или массовая, концентрация материала в потоке определяется по формуле

$$\mu_d = \mu_p \frac{V'}{V''}. \quad (\text{IV.4})$$

Среднюю скорость частиц сыпучих материалов в трубе-сушилке можно определить по формуле

$$\frac{v_{\text{м.ср}}}{v_{\text{г.ср}}} = 61,5 \text{Fr}_M^{0,5} \left(\frac{\rho_{\text{к.ср}}}{\rho_{\text{г.ср}}} \right)^{-1}, \quad (\text{IV.5})$$

где Fr_M — критерий Фруда,

$$Fr_M = \frac{v_{г.ср} - v_{вит.ср}}{\sqrt{gd_{м.ср}}}$$

Для определения средней скорости материала в трубе-сушилке при сушке фрезерного торфа Т. Ф. Таганцевой предложена формула

$$v_{м.усл} = \frac{v_{г} - v_{вит}}{3k_1}, \quad (IV.6)$$

где k_1 — поправочный коэффициент, зависящий от диаметра трубы (IV.8).

Для определения средней скорости материала в трубе-сушилке при сушке хлористого калия В. А. Шейман и В. И. Каспер рекомендуют зависимость

$$\frac{v_{м.ср}}{v_{г.ср}} = \frac{1}{kk_1}, \quad (IV.7)$$

где $k = 1,8 + 0,6\rho_k d_m \cdot 10^{-1}$,

$$k_1 = 0,35 + 0,243 \left(\frac{1}{D_{тр}} \right) \cdot 0,27, \quad (IV.8)$$

$D_{тр}$ — диаметр трубы-сушилки, м.

Эффективность сушильного аппарата обусловливается поверхностью раздела фаз в единице объема сушки:

$$F_M = \frac{G_{\mu} \rho_g v_g}{d_m \rho_k v_m} k, \text{ м}^2/\text{м}^3. \quad (IV.9)$$

На поверхность раздела фаз в значительной мере влияет слипание (комкование) частиц. Этот фактор учитывается в формуле (IV.9) коэффициентом k , который определяется из зависимости

$$k = \left(\frac{W_{ср}}{W_{гигр}^{max}} \right)^{-0,3}, \quad (IV.10)$$

где $W_{ср} = \frac{W_1 + W_2}{2}$ — средняя влажность угля, %.

Опытами установлено, что устойчивое перемещение частиц материала в газовом потоке зависит в основном от скорости витания. Скорость витания шарообразной частицы определяют, исходя из уравнения равновесия сопротивления среды и силы тяжести:

$$\frac{\pi d_M^3}{6} (\rho_k - \rho_g) = C \frac{\pi d_M^2}{4} \rho_g \frac{v_{вит}^2}{2g}. \quad (IV.11)$$

Решая уравнение (IV.11) относительно $v_{вит}$, получим

$$v_{вит} = \frac{3,62}{\sqrt{C}} \sqrt{\frac{d_M (\rho_k - \rho_g)}{\rho_g}}. \quad (IV.12)$$

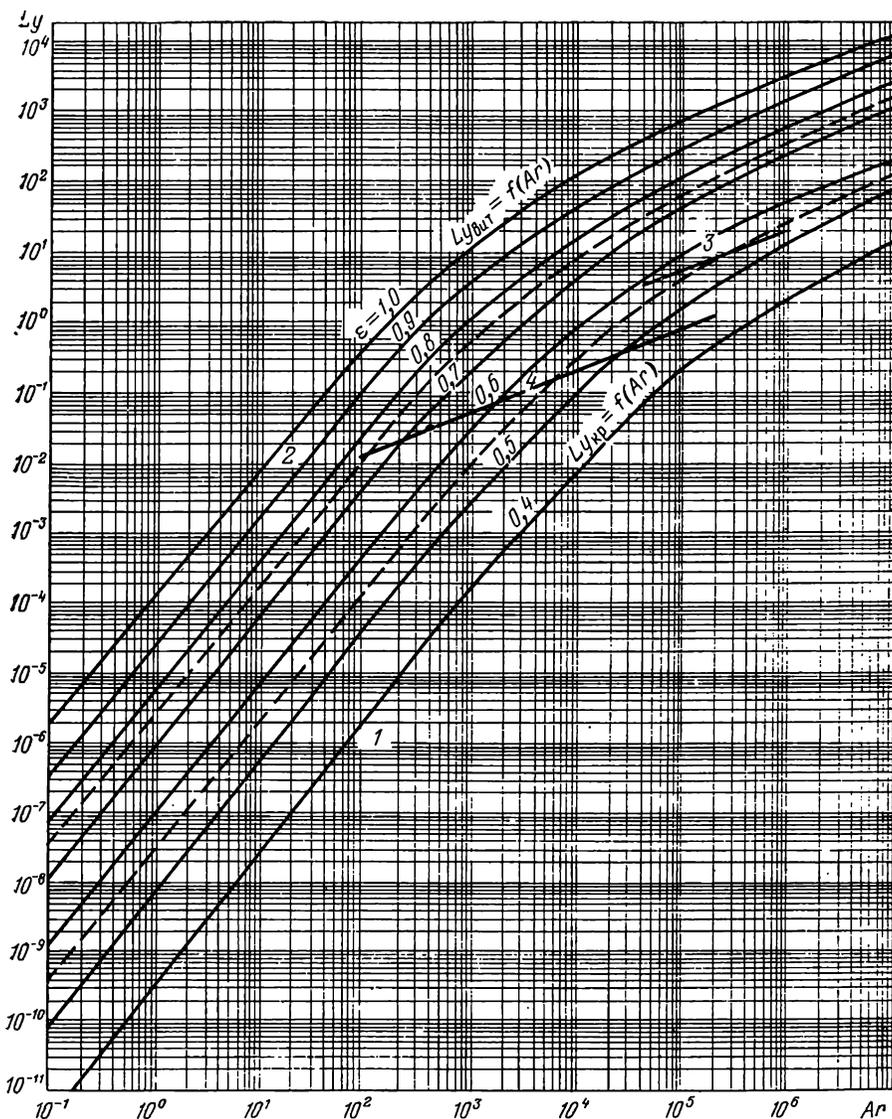


Рис. IV.2. Зависимость критерия Лященко Ly от критерия Архимеда Ar :
1 — шарообразные частицы; **2** — округленные частицы; **3** — угловатые частицы; **4** — продолговатые частицы

Уравнение (IV.12) можно представить в критериальной форме:

$$C \cdot Re_{вит}^2 = Ar \quad \text{или} \quad Fe = \sqrt[3]{Re_{вит}^2 C}, \quad (IV.13)$$

где Ar — критерий Архимеда,

$$Ar = \frac{g d_M^3}{\nu^2} \frac{\rho_k - \rho_r}{\rho_r}; \quad (IV.14)$$

Fe — критерий Федорова,

$$Fe = d_M \sqrt{\frac{3}{4} \frac{g}{\nu^2} \left(\frac{\rho_k - \rho_r}{\rho_r} \right)}. \quad (IV.15)$$

Впервые П. В. Лященко в 1935 г. была предложена методика определения скорости витания частиц через критерий, названный Лященко:

$$v_{\text{вит}} = \sqrt[3]{\frac{Ly \nu \rho_k g}{\rho_r}}. \quad (\text{IV.16})$$

Критерий Ly определяется из графика (рис. IV.2)

$$Ly = f(Ar).$$

Также подтвердилось положение о том, что с увеличением объемной концентрации материала B скорость витания уменьшается, при этом уменьшение $v_{\text{вит}}$ мелких твердых частиц, обусловленное их концентрацией, происходит более интенсивно, чем крупных.

О. М. Тодес на основании опытных данных предложил общую для всех режимов зависимость

$$Re_B = \frac{Ar(1-B)^{4.75}}{18 + 0.6 \cdot \sqrt{Ar(1-B)^{4.75}}}. \quad (\text{IV.17})$$

Чтобы можно было учесть форму частицы, отличающейся от шарообразной, определяют коэффициент формы

$$f_{\text{ср}} = \frac{v_{\text{вит.с}}}{v_{\text{вит.шар}}} = \sqrt{\frac{C_{\text{шар}}}{C_{\text{кр}}}}. \quad (\text{IV.18})$$

Несферические частицы по коэффициенту формы $f = \frac{F_T}{F_M}$ можно

разделить на четыре группы:

округлые, окатанные, без резких выступов ($f=1,15 \div 1,2$ — глина, шамот, окатанный песок и др.);

острозернистые, шероховатые и продолговатые ($f=1,5$ — неокатанный и нефракционированный песок, антрацит, щебень и др.);

неизометрические, очень шероховатые ($f > 1,5$ — каменный уголь, кокс, сланец и др.);

частицы одного материала, у которых коэффициент f заметно зависит от их размера.

В результате анализа и обработки опытных данных получена следующая формула для определения коэффициента лобового сопротивления:

$$C = K_1 K_2 \left(0,462 K_3 + \frac{30}{Re} \right) \quad (\text{IV.19})$$

или

$$Re = \frac{\sqrt{367 + (K_3/K_1 K_2) Ar - 19,15}}{0,588 K_3}, \quad (\text{IV.20})$$

где K_1 — коэффициент, учитывающий условия стесненности движения частиц вследствие их взаимодействия (концентрационный фактор); K_2 — коэффициент, учитывающий условия стесненности вследствие влияния стенок; K_3 — коэффициент, учитывающий влияние формы частиц; Re — критерий Рейнольдса.

Коэффициент K_1 для всех режимов обтекания принят следующим:

$$K_1 = (1 - B)^{4,75}. \quad (IV.21)$$

В связи с тем, что диаметр трубы оказывает существенное влияние на скорость витания, в формулу скорости витания частиц введена поправка на «стесненность» в виде коэффициента

$$K_2 = \left[1 - \left(\frac{d_M}{D_{тр}} \right)^2 \right]^n, \quad (IV.22)$$

где n принимается в пределах 1—1,5.

Коэффициент, учитывающий форму частиц, рассчитан через фактор формы (коэффициент несферичности):

$$K_3 = 11 - 10f, \quad (IV.23)$$

где $f = \frac{F'_M}{\pi d_M^2}$ — фактор формы; $F_M = \frac{\pi d_M^2}{4}$ — поверхность частицы, м².

Для определения скорости витания можно пользоваться формулой

$$v_{внт} = 5,22 \sqrt{\frac{d_M \rho_K}{\rho_r}}, \quad (IV.24)$$

где d_M — диаметр частицы, м; ρ_K и ρ_r — плотность материала и газа, кг/м³.

В трубе-сушилке движение частицы определенной крупности может быть представлено уравнением ее поступательного движения:

$$\frac{dv_M}{d\tau} = g \left(\frac{\rho_K}{\rho_r} - 1 \right) + \frac{3}{4} \cdot \frac{C}{d_M} \cdot \frac{\rho_K}{\rho_r} (v_r - v_{внт}). \quad (IV.25)$$

Если принять во внимание некоторое ускорение частиц на небольшом отрезке трубы-сушилки постоянным, то изменение скорости частицы материала на этом отрезке трубы можно определить по формуле

$$v_r - v_{внт} = \sqrt{2\Delta L_{тр} \left(\frac{dv_M}{d\tau} \right)}, \quad (IV.26)$$

где $\Delta L_{тр}$ — отрезок трубы.

Конечная скорость частицы, устанавливаемая за фазой ускорения, равна разности скоростей газа и витания.

Скорость частиц материала на различных участках трубы-сушилки может быть определена по формуле

$$v_M = v_r - \sqrt{K_1 e^{-2B\Delta L_{тр}} + K_2}, \text{ м/с}, \quad (IV.27)$$

где

$$K_1 = v_r^2 - \frac{g}{B}; \quad K_2 = \frac{g}{B}; \quad B = \frac{A}{1 + W'_{cp}}; \quad A = \frac{CF_{M\rho_r}}{2m_{M0}};$$

g — ускорение силы тяжести, м/с²; $\Delta L_{\text{тр}}$ — заданный участок трубы-сушилки, м; $W'_{\text{ср}} = \frac{W'_1 + W''_2}{2}$ — средняя влажность материала на заданном участке сушилки, доли единицы; $m_{\text{мо}}$ — масса абсолютно сухого материала, кг.

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРУБ-СУШИЛОК

При расчете трубы-сушилки определяют оптимальную скорость газов, диаметр и длину рабочего участка.

Минимальная скорость воздуха, обеспечивающая устойчивое перемещение, определяется границей «провала», т. е. началом выпадения из потока частиц материала.

Скорость газа на границе «провала» может быть выражена через концентрацию материала $\mu_{\text{ср}}$ и скорость витания частиц в виде следующего соотношения:

$$v_{\text{г}}^{\text{опт}} = K_2 \mu_{\text{ср}}^{0,28} v_{\text{вит}}^{\text{max}} \quad (\text{IV.28})$$

или

$$\psi = \frac{v_{\text{г}}^{\text{опт}}}{v_{\text{вит}}^{\text{max}}} = K_2 \mu_{\text{ср}}^{0,28} \quad (\text{IV.29})$$

Экспериментально установлено, что околотовальная скорость газового потока зависит от сыпучих свойств материала и способа его заброса в сушилку.

Исходя из условия, что для устойчивого пневмотранспорта торфа в трубе-сушилке с зоной противотока скорость газов должна быть больше скорости витания наиболее крупных частиц, можно написать:

$$v_{\text{г}} = \psi_0 v_{\text{вит}}^{\text{max}}, \quad (\text{IV.30})$$

где $v_{\text{г}}$ — скорость газового потока, м/с; $v_{\text{вит}}^{\text{max}}$ — скорость витания наиболее крупных частиц торфа, м/с; ψ_0 — коэффициент запаса скорости для условий пневмотранспорта.

Зависимость между коэффициентом запаса скорости ψ_0 и расходной массовой концентрацией μ описывается в условиях пневмотранспорта торфа уравнением [14]

$$\psi_0 = 1,308 \mu^{0,05}. \quad (\text{IV.31})$$

Влияние температуры газов на скорость витания частиц торфа в вертикальном участке трубы-сушилки аппроксимируется уравнением

$$\psi_1 = \psi_0 \left(\frac{T_t}{T_0} \right)^{-0,11}, \quad (\text{IV.32})$$

где ψ_1 — коэффициент запаса скорости для условий сушки; $v_{г1}$ — начальная скорость газов для условий сушки, м/с; $v_{вит}$ — скорость витания частиц торфа, м/с; T_t и T_0 — начальные температуры газов и материала, соответствующие условиям сушки.

Увеличение скорости газов, в свою очередь, изменяет структуру потока, интенсифицируя турбулентное перемешивание газов и взвешенных в них частиц.

Из совместного рассмотрения уравнений (IV.31) и (V.32) [15] следует:

$$\psi_1 = 1,308 \mu^{0,05} \left(\frac{T_t}{T_0} \right)^{-0,1}; \quad (IV.33)$$

$$v_{г} = 1,308 \mu^{0,05} \left(\frac{T_t}{T_0} \right)^{-0,11} v_{вит}^{max}. \quad (IV.34)$$

Выражение $\left[1,308 \mu^{0,05} \left(\frac{T_t}{T_0} \right)^{-0,11} \right]$ представляет собой коэффициент запаса скорости при расходных массовых концентрациях и температурах, соответствующих реальным гидродинамическим режимам работы трубы-сушилки.

Определение оптимальной рабочей скорости газового потока в трубе-сушилке при сушке сыпучих материалов можно произвести по формуле

$$\frac{v_{г.ср}}{v_{вит}^{max}} = (1 + 0,3) \mu_p^{0,28} \sqrt{\frac{W_n}{W_{гигр}^{max}}} m, \quad (IV.35)$$

где $v_{вит}^{max}$ — средняя скорость витания наиболее крупных частиц материала; μ_p — средняя массовая концентрация материала в трубе-сушилке, кг/кг; $W_n = W_1 - W_{гигр}^{max}$ — внешняя (свободная) влага материала перед сушкой, %; $W_{гигр}^{max}$ — максимальная гигроскопическая влажность материала (при $\phi = 96 \div 100\%$), %; m — коэффициент, учитывающий конструкцию питателя-забрасывателя, который определяется по формуле

$$m = 0,6 \sqrt[3]{\frac{b}{d_m^{max}}} \quad \text{при} \quad d_m^{max} \geq b; \quad \frac{b}{d_m^{max}} = 1,$$

где b — ширина или толщина рабочего органа забрасывателя (палец, цепь, щель и т. д.); d_m^{max} — максимальный размер частиц сушимого материала.

Л. М. Лурье предложил определять скорость газов в трубе-сушилке при сушке медных и пиритных концентратов по формуле

$$\frac{v_{г.ср}}{v_{вит.ср}^{max}} = 1,5 \mu_p^{0,085} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-0,143}, \quad (IV.36)$$

где T — начальная температура газов ($273 + t_1$), °C; $T_0 = 273$ °C.

Зная среднюю скорость газов, можно определить диаметр трубы-сушилки:

$$D_{\text{тр}} = \sqrt{\frac{4V_{\text{г}}}{3600\pi v_{\text{г.ср}}}}, \quad (\text{IV.37})$$

где $V_{\text{г}}$ — средний объем газов, м³/ч.

Рабочей длиной трубы-сушилки считается расстояние между местом забрасывания материала в сушилку и входом трубы-сушилки в циклон (сепаратор). Эта длина определяется в зависимости от скорости газов и температуры, вида сушимого материала, производительности трубы-сушилки, разрыхленности и равномерности распределения сырого материала по сечению трубы и т. д.

Рабочая длина трубы-сушилки определяется по формуле

$$l_{\text{раб}} = \frac{Q}{F_{\text{тр}} \alpha_V \Delta t_{\text{ср}}}, \quad (\text{IV.38})$$

где $Q = Q_{\text{исп}} + Q_{\text{нагр}}$ — количество тепла, необходимое для испарения влаги и нагрева материала, кДж/ч; $F_{\text{тр}}$ — площадь поперечного сечения трубы, м²; $\Delta t_{\text{ср}}$ — средняя логарифмическая разность температуры газа и сушимого материала, °C; α_V — объемный коэффициент теплообмена, кДж/ч:

$$\alpha_V = F_M \alpha_F, \quad (\text{IV.39})$$

где F_M — поверхность материала в 1 м³ трубы-сушилки; α_F — поверхностный коэффициент теплообмена, который определяется по формулам, приведенным ниже.

При обработке экспериментальных данных автором получено следующее критериальное уравнение для определения коэффициента теплообмена:

$$\text{Nu} = 0,065 \text{Re}_{\text{отн}} \cdot \left(\frac{W_2}{W_{\text{гигр}}^{\text{max}}} \right), \quad (\text{IV.40})$$

где $\text{Nu} = \frac{\alpha_F d_{\text{эв}}}{\lambda}$; $\text{Re}_{\text{отн}} = \frac{v_{\text{отн}} d_{\text{эв}}}{\nu}$;

$$d_{\text{эв}} = 0,8 d_{\text{м.ср}}; \quad v_{\text{отн}} = v_{\text{г.ср}} - v_{\text{м.ср}}, \text{ м/с.}$$

На основании экспериментальных исследований было установлено обобщенное критериальное уравнение теплообмена в трубе-сушилке при сушке угля с учетом влияния концентрации материала на передачу тепла:

$$\text{Nu} = 0,66 \text{Re}_{\text{ср}}^{-1,25} \left(\frac{W_2}{W_{\text{гигр}}^{\text{max}}} \right)^2, \quad (\text{IV.41})$$

где $\text{Re} = \frac{v_{\text{г.ср}} d_{\text{м.ср}}}{\nu}$ — критерий Рейнольдса.

При сушке материала до влажности $W_2 \geq W_{\text{гигр}}^{\text{max}}$ в формулах (IV.41) и (IV.42)

$$\frac{W_2}{W_{\text{гигр}}^{\text{max}}} = 1.$$

При сушке фрезерного торфа в полупромышленной трубе-сушилке Т. Ф. Таганцевой получена зависимость

$$\text{Nu} = A \text{Re}_{\text{усл}}^{1,7}, \quad (\text{IV.42})$$

где A — коэффициент, который составляет для древесно-тростникового торфа (степень разложения 45%) $0,63 \cdot 10^{-3}$, для сосново-пушицевого торфа (степень разложения 60%) — $0,26 \cdot 10^{-3}$ и для древесного торфа (степень разложения 55%) — $0,48 \cdot 10^{-3}$;

$$\text{Re}_{\text{усл}} = \frac{v_{\text{отн. ср}} d_{\text{м. ср}}}{\nu_{\text{ср}}};$$

$$v_{\text{отн. ср}} = v_{\text{г. ср}} - v_{\text{м. ср}}.$$

Формулой (IV.42) можно пользоваться при расчете процесса сушки фрезерного торфа до 20% влажности. При более глубокой сушке в формулу необходимо вводить поправочный коэффициент.

При использовании теории подобия экспериментально получены следующие критериальные уравнения теплообмена в трубе-сушилке с зоной противотока [15]:

$$\text{Nu} = A_1 \text{Re}_{\text{вит}}^n \left(\frac{v_{\text{м1}}}{v_{\text{г. ср}}} \right)^{0,3} \mu_p^{0,3}, \quad (\text{IV.43})$$

где A_1 — коэффициент; n — показатель степени; для низинного осокового торфа $A_1 = 4,2 \cdot 10^{-3}$ и $n = 1,3$; для верхового сфагнового торфа $A_1 = 6,0 \cdot 10^{-2}$ и $n = 1,25$; для верхового пушицево-сфагнового торфа $A_1 = 7,5 \cdot 10^{-3}$ и $n = 1,18$; $\text{Re}_{\text{вит}}$ — критерий Рейнольдса для витающей частицы; $v_{\text{м1}}$ — начальная скорость подачи материала в сушилку, м/с; $v_{\text{г. ср}}$ — средняя скорость газов в трубе-сушилке для неизотермических условий, м/с; μ_p — средняя массовая концентрация торфа в трубе-сушилке, кг/кг.

Высотой заброса материала считается расстояние между входом газов в трубу и местом заброса материала в сушилку.

Основными факторами, влияющими на определение оптимальной длины нижней части трубы, являются скорость газов на входе, производительность трубы-сушилки, количество комьев и частиц угля, выпадающих в нижнюю часть трубы, а также равномерность распределения газов по сечению трубы в зоне питания сушилки. Этот участок можно считать зоной, в которой происходит сложный процесс подъема и опускания комочков материала и их сушка.

Высоту заброса сыпучих материалов в трубу-сушилку можно определить по формуле

$$l_{\text{забр}} = 200 \frac{v_{\text{вит}}^* D_{\text{тр}}}{v_{\text{Г1}} \psi}, \quad (\text{IV.44})$$

где $v_{\text{вит}}^*$ — скорость витания наиболее крупных частиц материала, м/с; $v_{\text{Г1}}$ — скорость в начале трубы-сушилки, м/с; $D_{\text{тр}}$ — диаметр трубы-сушилки, м; ψ — угол входа газов в трубу-сушилку, градус.

Длина углеотводящего участка от места ввода топочных газов до места разгрузки провала $l_{\text{пр}}$ практически составляет 1—2 м. По данным эксплуатации труб-сушилок, а также по данным проведенных испытаний установлено, что этот участок можно принять равным $(0,5 \div 1) D_{\text{тр}}$.

Общую длину трубы-сушилки можно определить суммированием трех участков:

$$l_{\text{тр}} = l_{\text{раб}} + l_{\text{забр}} + l_{\text{пр}}.$$

Одним из основных показателей работы трубы-сушилки является напряжение объема ее по испаренной влаге A , определяемое по формуле

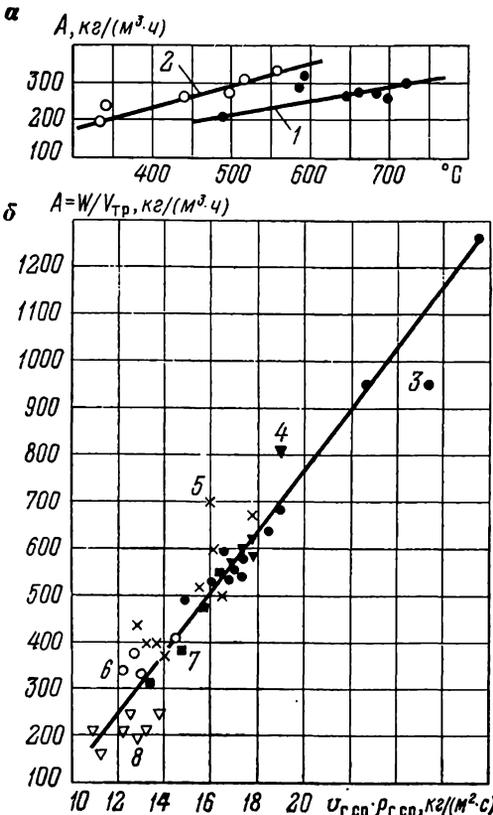
$$A = \frac{W}{V_{\text{тр}}} = \frac{4W}{\pi D_{\text{тр}} L_{\text{тр}}}, \quad \text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч}), \quad (\text{IV.45})$$

где W — количество испаренной влаги, кг/ч; $V_{\text{тр}}$ — объем трубы-сушилки, м^3 ; $D_{\text{тр}}$ — диаметр трубы-сушилки, м; $L_{\text{тр}}$ — длина трубы-сушилки, м.

Величина A зависит от размеров трубы-сушилки, влажности и размеров частиц материала, температуры, влажности и скорости сушильного агента. Рекомендуется при расчетах принимать напряжение трубы для сыпучих материалов 600—1200 $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$, для угольного шлама до 500—800 $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$ при начальных температурах сушильного агента 750—950°C.

Рис. IV.3. Зависимость напряжения объема сушилки по испаренной влаге от начальной температуры газов при сушке торфа (а), влаги от массовой скорости газового потока при сушке угольных концентратов (б):

1 — сушилка Михневского торфобрикетного завода; 2 — сушилка Дмитрово-Черкасского торфобрикетного завода; 3 — Кальмиусская ЦОФ; 4 — Чертинская ЦОФ; 5 — Карагадинская ЦОФ; 6 — Колосниковская ЦОФ; 7 — Узловская ЦОФ; 8 — Советская ЦОФ



Испытания промышленных труб-сушилок показали, что величина A изменяется в широких пределах — от 100 до 1200 кг/(м³·ч) и возрастает с увеличением скорости и начальной температуры сушильного агента (рис. IV.3).

С увеличением начальной температуры газов напряжение трубы-сушилки по испаренной влаге растет (см. рис. IV.3,а).

С увеличением массовой скорости газов напряжение объема трубы-сушилки по испаренной влаге пропорционально возрастает (см. рис. IV.3,б).

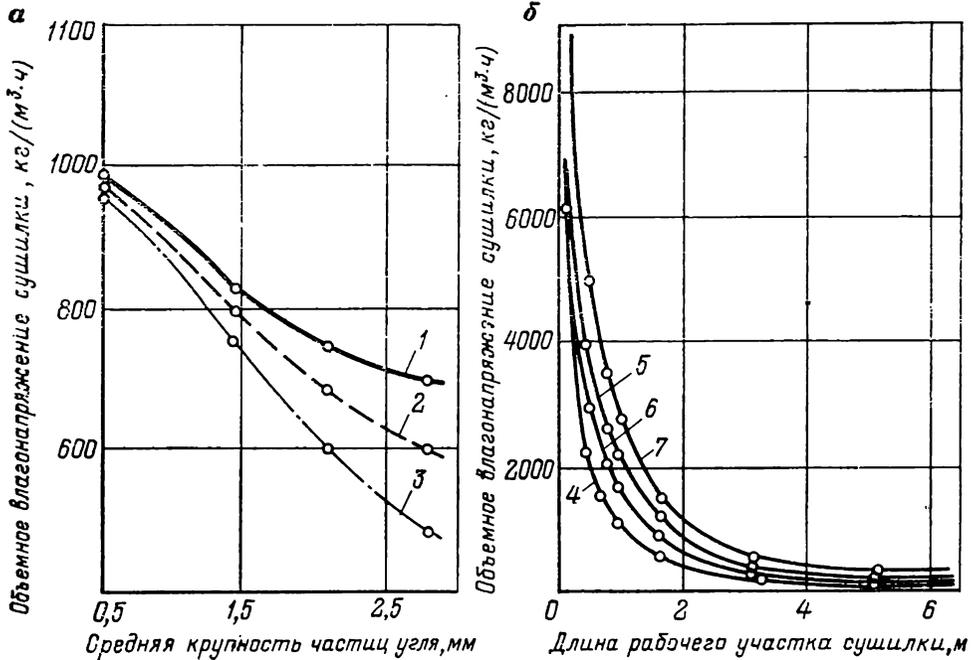


Рис. IV.4. Зависимость объемного влагонапряжения сушилки от крупности сушильного угля (а) при постоянной степени сушки и от начальной температуры газов (б) по длине рабочего участка при крупности угля 0—13 мм: 1—3 — влажность высушенного угля соответственно 8, 6 и 3,5; 4—7 — начальная температура газов соответственно 600, 750, 800 и 950°C.

На основании опыта работы лучших образцов промышленных труб-сушилок при сушке сыпучих материалов рекомендуется для расчетов определять значения A по формуле

$$A = 2,8 \frac{(v_{г.ср} \rho_{г.ср})^2}{\rho_{к.ср} d_{м.ср}} \frac{1}{\sqrt{D_{тр}}} \frac{W_2}{W_{гиг}^{max}}, \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч}), \quad (\text{IV.46})$$

где $v_{г.ср}$ — средняя скорость газового потока, м/с; $\rho_{г.ср}$ и $\rho_{к.ср}$ — средняя плотность газа и материала, кг/м³; $d_{м.ср}$ — средний диаметр частицы, м; $D_{тр}$ — диаметр трубы-сушилки, м; W_2 — конечная влажность материала, %; $W_{гиг}^{max}$ — максимальная гигроскопическая влажность материала, %.

При $W_2 \geq W_{\text{гигр}}^{\text{max}}$ отношение $\frac{W_2}{W_{\text{гигр}}^{\text{max}}} = 1$.

Интенсивность процесса сушки растет с уменьшением крупности и глубины сушки угля и увеличением начальной температуры газов (рис. IV.4).

Л. М. Лурье разработана методика расчета длины трубы-сушилки для сушки медного и пиритного концентратов через показатель объемного влагонапряжения сушилки A . Задаваясь минимально возможной длиной рабочего участка трубы-сушилки, равной 5 м, рассчитывают значение A по уравнению

$$A = K_t K_v K_{\mu_p} A_n e^{-0,106 l_{\text{тр}}}, \quad (\text{IV.47})$$

где K_t , K_v , K_{μ_p} — поправочные коэффициенты соответственно начальной температуры газов, скорости газов ($K_v = 0,92 V_{\text{г}}$) и массовой концентрации; $l_{\text{тр}}$ — длина рабочего участка трубы-сушилки, м.

Полученное значение A сравнивают со значением A_n , найденным из выражения

$$A_n = \frac{W}{V_{\text{тр}}}, \quad \text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч}). \quad (\text{IV.48})$$

Если $A \neq A_n$, то вновь задаются последовательно длиной 6, 7, 8 м и далее до тех пор, пока значения A и A_n не совпадут друг с другом. Значение $l_{\text{тр}}$, при котором $A = A_n$, и является искомой длиной рабочего участка трубы-сушилки.

§ 2. КОНСТРУКЦИЯ, ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ, КОМПОНОВКА ОБОРУДОВАНИЯ И ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ТРУБ-СУШИЛОК

Труба-сушилка (рис. IV.5) состоит из прямолинейного отрезка трубы 1 постоянного сечения, узла загрузки сушилки 2 материалом, разгрузочного аппарата (циклона 3 или сепаратора 4) и компенсатора 5.

Общая длина труб-сушилок изменяется в широких пределах. Длина рабочего участка $l_{\text{раб}}$ трубы-сушилки колеблется в пределах 15—25 м.

Высота загрузки трубы-сушилки изменяется в пределах 2,5—6 м.

Для сушки угля применяются трубы-сушилки с рабочей длиной до 10 м. На рабочем участке трубы-сушилки толщина стенки обычно принимается 6—8 мм. С целью увеличения срока службы она изготавливается из нержавеющей стали.

Для восприятия температурных перепадов по длине трубы-сушилки и в месте сопряжения ее с элементом узла питания устанавливают компенсаторы.

Нижняя часть трубы-сушилки (от узла питания до провальной части) футеруется с внутренней стороны огнеупорным кирпичом

(износостойким облицовочным материалом) толщиной, обеспечивающей температуру наружного металлического кожуха не более 45°C.

В зоне загрузки труба-сушилка выполняется круглого сечения с внутренней кирпичной футеровкой, которая заканчивается выше оси ротора забрасывателя на высоте, равной 1,5 диаметра трубы-сушилки.

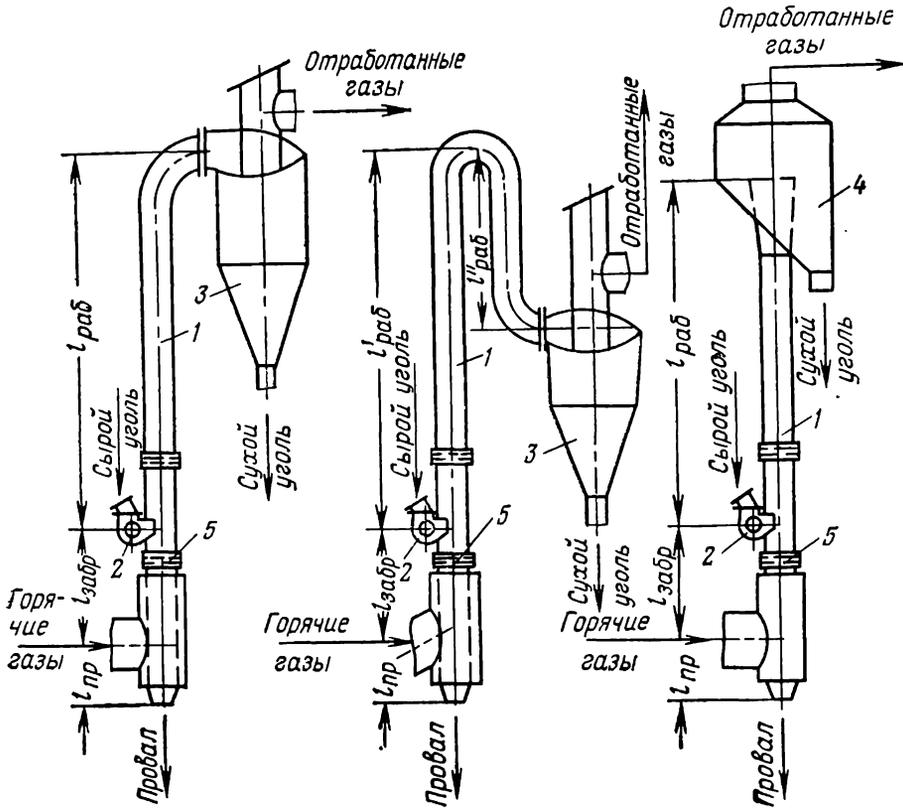


Рис. IV.5. Конструктивные схемы труб-сушилок:

$l_{раб}$ — длина рабочего участка; $l_{забр}$ — длина участка заброса; $l_{пр}$ — длина участка провала

Нормальные условия работы сушильных установок зависят от конструктивных особенностей узла загрузки. Узел загрузки труб-сушилок состоит из дозирочного устройства и питателя-забрасывателя.

В табл. IV.1 приведены технические характеристики труб-сушилок.

Технологические схемы и компоновка установок с трубами-сушилками весьма разнообразны и отличаются главным образом конфигурацией и габаритами сушильных труб, типами топок, размещением дымососов, системами пылеулавливающих устройств и др.

В трубах-сушилках на углеобогажительных фабриках подвергаются сушке наиболее влагоемкие продукты обогащения. К этим продуктам относятся: мелкий концентрат гравитационного обогащения каменных углей (класс 0—13 мм) с начальной влажностью 9—17%, флотационный концентрат (класс 0—1 мм) и шлам (класс 0—3 мм) с начальной влажностью 22—28%. Как правило, на сушку подается смесь указанных концентратов в различных процентных соотношениях.

Т а б л и ц а IV.1
Технические характеристики труб-сушилок

Наименование показателя	Типоразмеры			
	ТС-9	ТС-11	ТС-12,5	ТС-15
Диаметр трубы, мм	900	1100	1250	1500
Производительность, т/ч:				
по влажному углю	100	150	200	300
по испаренной влаге	10	15	20—25	30—35
Температура газов, °С:				
начальная	700—1000	700—1000	700—1000	700—1000
на выходе из трубы-сушилки	80—110	80—110	80—110	80—110

Большая часть труб-сушилок для угля имеет диаметр 900 и 1100 мм.

Производительность труб-сушилок при сушке угольных концентратов колеблется от 25 до 80 т/ч по сырому продукту и от 3 до 7 т/ч по испаренной влаге.

Влажность угля, поступающего на сушку, также имеет значительные колебания — от 12 до 24%. Влажность угля после сушки составляет 3—11%, в среднем 4—6%.

Трубы-сушилки работают при температуре газов на входе в сушилку 600—1100°С, в среднем 700—750°С и на выходе из сушилки 90—130°С, в среднем 90—100°С.

Расход электроэнергии на 1 т испаренной влаги колеблется в пределах 35—60 кВт·ч. Удельный расход тепла на 1 кг испаренной влаги составляет 3700—4600 кДж.

На рис. IV.6 показана компоновка технологического оборудования трубы-сушилки. В ней предусматривается сушка смеси флотационного и мелкого концентратов.

Для сушки флотационного концентрата наиболее перспективным типом сушильного аппарата является труба-сушилка, в которой сушка ведется в восходящем потоке газов.

На ЦОФ «Узловская» производится сушка одного флотационного концентрата. На некоторых фабриках на сушку подается промпродукт, предварительно обезвоженный в центрифугах.

Производительность труб-сушилок при сушке промпродукта примерно такая же, как и при сушке мелкого концентрата.

На рис. IV.7 показана схема трубы-сушилки, предназначенной для сушки флотоконцентрата (фирма «Бюттнер», ФРГ). Сушка

влажного материала производится во время продвижения его по трубе-сушилке. В конце трубы расположено колено, предусмотренное для введения подсушенного материала в циклон. Наружная обечайка этого колена отличается износоустойчивостью. С наружной стороны обечайки вделаны нагревательные стержни для предотвращения налипания материала в этом месте поворота.

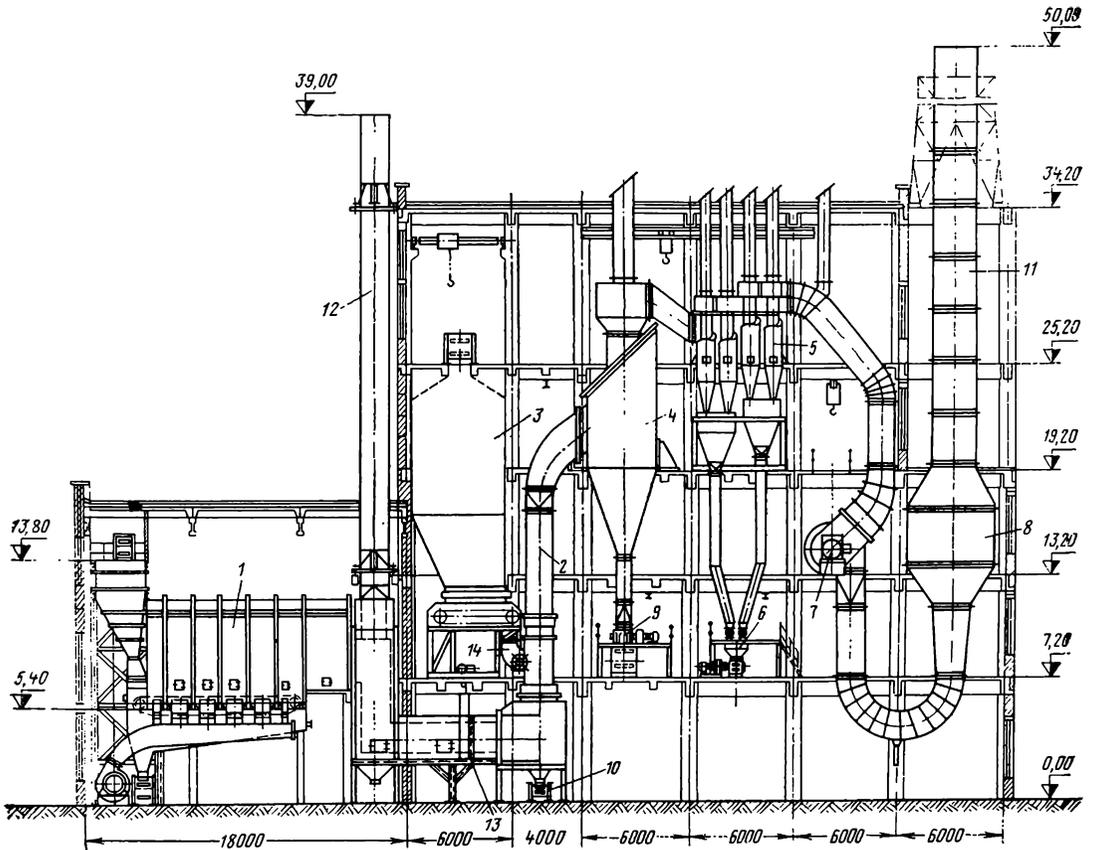


Рис. IV.6. Компонка технологического оборудования трубы-сушилки:

1 — топка; 2 — труба-сушилка; 3 — бункер сырого угля; 4 — циклон; 5 — батарейный пылеуловитель; 6 — шлюзовый затвор; 7 — дымосос; 8 — мокрый пылеуловитель; 9 — скребково-баранный питатель; 10 — гидрозатвор; 11 — дымовая труба; 12 — растопочная труба; 13 — шибер; 14 — узел загрузки

В двух параллельно установленных циклонах происходит отделение высушенного угля от газов. Разгрузка его из циклонов происходит внизу через шлюзовый затвор.

Рециркуляция газов применена на трубах-сушилках, в которых производится сушка флотационного концентрата. Подача флотационного концентрата производится в нижней части вертикальной трубы, т. е. в месте подачи горячих газов. Для бесперебойной работы установки данного типа принципиальное значение имеют соответствующий выбор системы подачи флотационного концентрата и его распределение по всему сечению сушильной трубы.

В настоящее время фирма «Бюттнер» (ФРГ) разработала трубы-сушилки для сушки флотоконцентрата производительностью 25 и 40 т/ч по испаренной влаге. Трубы-сушилки соответствующей производительности по испаренной влаге оснащаются унифицированными протирочными питателями-забрасывателями, отличающимися шириной в зависимости от диаметра трубы-сушилки. Например, труба-сушилка производительностью 25 т/ч имеет диаметр 1500 мм, аналогичную ширину имеет забрасыватель.

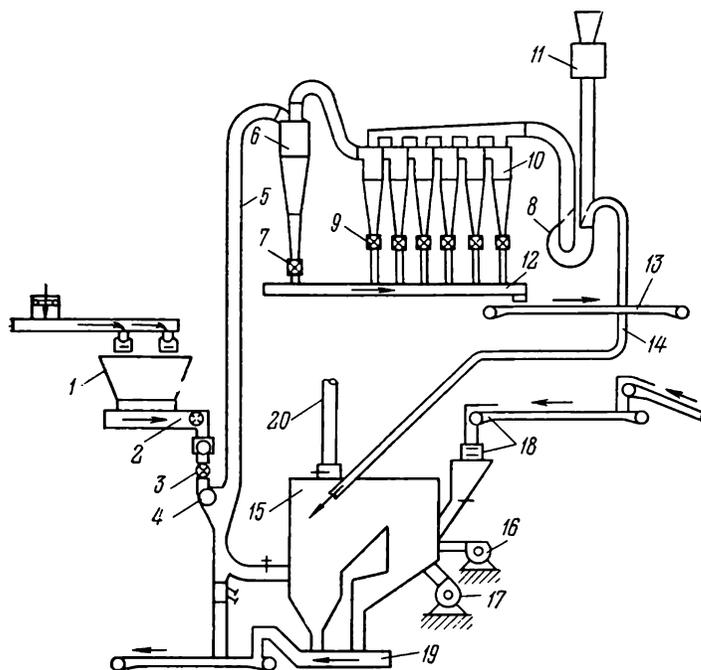


Рис. IV.7. Схема трубы-сушилки фирмы «Бюттнер» (ФРГ):

1 — бункер; 2 — питатель-смеситель; 3 — шлюзовый затвор; 4 — протирочный питатель-забрасыватель; 5 — труба-сушилка; 6 — циклон; 7 — шлюзовый затвор; 8 — дымосос; 9 — шлюзовые затворы; 10 — батарейный пылеуловитель; 11 — мокрый пылеуловитель; 12 — скребковый конвейер; 13 — конвейер; 14 — тракт рециркуляции газов; 15 — топка; 16, 17 — дутьевые вентиляторы; 18 — тракт подачи топлива; 19 — тракт золо-шлакоудаления; 20 — растопочная труба

За последние годы проводились работы в направлении интенсификации процессов сушки в трубах-сушилках. Данные работы были осуществлены при реконструкции ряда действующих труб-сушилок на обогатительных фабриках. Реконструкция труб-сушилок заключалась в замене существующих дымососов на более производительные и с большей напорной характеристикой, в увеличении теплопроизводительности топки и в повышении эффективности пылеулавливания.

В табл. IV.2 даны основные показатели работы высокопроизводительных труб-сушилок.

В результате реконструкции производительность труб-сушилок диаметром 1,1 м возросла с 50—60 до 120—140 т/ч по исходному углю, а на ЦОФ «Донецкая» она достигла 200 т/ч по исходному углю и 18—20 т/ч по испаренной влаге.

Все высокопроизводительные трубы-сушилки практически работают без «провала», т. е. обеспечивается высокая надежность пневмотранспорта материала в сушильной трубе, которая достигается увеличением скорости газов до 50 м/с и более вследствие

повышения их начальной температуры до 850—950°C и некоторого роста массового количества сушильного агента.

В настоящее время строятся трубы-сушилки диаметром до 1,25 м на углеобогатительных фабриках «Обуховская-Западная», «Краснолиманская», разрезов «Южный» и IV Артем. Производительность труб-сушилок 180—250 т/ч.

Т а б л и ц а IV.2

Показатели работы высокопроизводительных труб-сушилок

Наименование показателей	Углеобогатительная фабрика			
	„Кальмиус-ская“	„Томусин-ская“	„Судженская“	„Донецкая“
Производительность, т/ч:				
по исходному углю	130	130	160	180—200
по испаренной влаге	14	16	18	12—20
Температура газов, °С:				
начальная	800—900	850—950	850—900	800—900
конечная	100	98	95	75
Влажность угля, %:				
начальная	16	18,5	15,5	15—17
конечная	6	6	6	5
Количество газов перед дымо- сосом, тыс. м³/ч	100	115	125	140
Диаметр трубы-сушилки, м	1,1	1,1	1,1	1,1

Т а б л и ц а IV.3

Сравнительные показатели труб-сушилок

Наименование показателей	Труба-сушилка	
	с дымососом Д-15,5	с мельничным вентилятором ВМ-100/1200у
Производительность, т/ч:		
по испаренной влаге	6,5	9
по сырому углю	55—57	90
Температура отработанных газов, °С	72	60
Производительность дымососа, тыс. м³/ч	55,5	74
Влажность угля, %:		
поступающего	11,4—15,8	11,4—15,8
высушенного	2,3—8,8	5,6—9,3

Интенсификация процесса сушки в трубах-сушилках показала, что их производительность определяется не размерами сушильной трубы, а главным образом количеством тепла и газов, подводимых в сушильный аппарат. Эта особенность труб-сушилок очень важна при создании высокопроизводительных сушилок этого типа. Их мощность может наращиваться без значительного увеличения размеров сушильного аппарата. С целью увеличения пропускной спо-

способности труб-сушилок на многих из них была проведена реконструкция и модернизация отдельных узлов.

На трубах-сушилках № 2 и 3 ГОФ «Коксовая» вместо дымососа Д-15,5 установлены мельничные вентиляторы ВМ-100/1200у с высоковольтными двигателями мощностью 400 кВт и скоростью вращения 1500 об/мин.

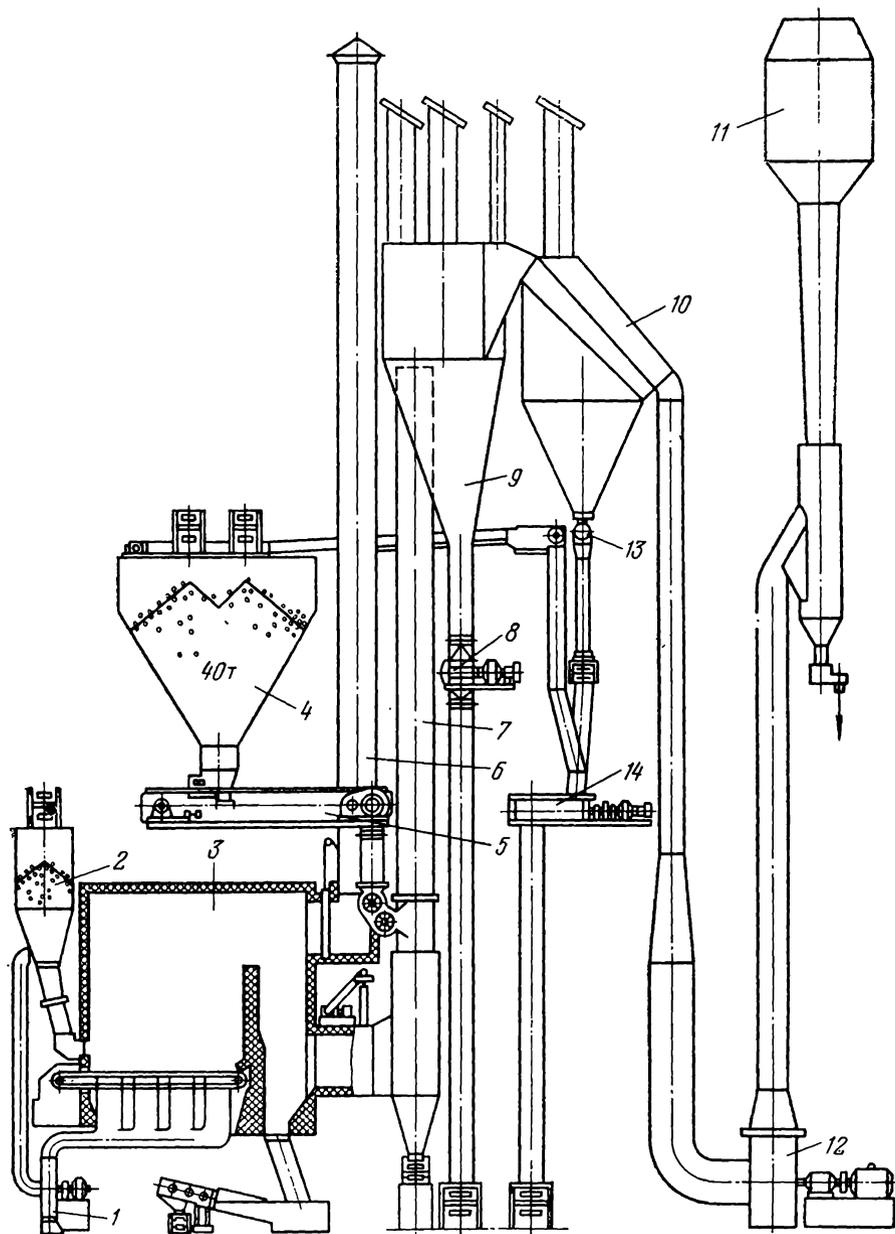


Рис. IV.8. Схема реконструированной трубы-сушилки ЦОФ «Абашевская»: — дутьевой вентилятор; 2 — топливный бункер; 3 — топка; 4 — бункер сырого угля; 5 — скребковый питатель; 6 — растопочная труба; 7 — труба-сушилка; 8 — скребково-барabanный пылеуловитель; 9 — разгрузочная камера; 10 — батарейный пылеуловитель БЦУ; 11 — мокрый пылеуловитель; 12 — дымосос; 13 — шлюзовый затвор; 14 — смеситель

В табл. IV.3 приведены сравнительные показатели работы труб-сушилок диаметром 900 мм с дымососом Д-15,5 и с мельничным вентилятором ВМ-100/1200у.

Применение мельничного вентилятора позволило увеличить производительность сушилки по испаренной влаге в 1,5 раза и регулировать производительность по сырому углю в пределах 65—95 т/ч.

По проекту б. треста «Энергоуголь» осуществлена реконструкция труб-сушилок на ЦОФ «Абашевская». Схема реконструированной трубы-сушилки показана на рис. IV.8 [45].

На реконструированной трубе-сушилке диаметром 1100 мм, длиной 17 м установлена топка (17,55 м²) с индивидуальной растопочной трубой диаметром 1200 мм, высотой 30,2 м.

На реконструированных трубах-сушилках используются топки ТЧ 2700×6500 с индивидуальной растопочной трубой. Вместо дымососов Д-15,5 применяются мельничные вентиляторы ВМ-100/1200 на трубе-сушилке № 1 и ВМ-100/1000 на трубах-сушилках № 2, 3.

Т а б л и ц а IV.4

Показатели работы труб-сушилок на ЦОФ «Абашевская»

Наименование показателей	Труба-сушилка		
	№ 1	№ 2	№ 3
	с вентилятором		
	ВМ-100/1200 у	ВМ-100/1000	
Производительность, т/ч:			
по испаренной влаге	11,5—13,9	10,9	9,9—12,4
по сырому углю	109—143,0	105,3	76,9—126
Температура газов, °С:			
в борове	695—715	697	685—798
перед дымососом	91—101	91	62—80
Производительность дымососа, тыс. м ³ /ч	120	106,5	91
Сопrotивление трубы-сушилки, Н/м ²	5870	5750	5950
Влажность угля, %:			
поступающего	15,0—17,2	15,9	14,1—24,2
высушенного	3,6—6,9	4,4	5,2—9,2

Угольный концентрат класса 0—13 мм загружается в бункер сырого угля вместимостью 50 т, из которого с помощью загрузочного устройства УЗТ-11 он подается в трубу-сушилку. Высушенный уголь из разгрузочной камеры скребково-барабанным питателем СПБ-300 выдается на конвейер. Газы от угольной пыли очищаются в аппарате типа БЦУ, который имеет 169 элементов диаметром 250 мм.

Уловленная пыль удаляется шлюзовым питателем ПШ-400РВ, затем смешивается с сырым углем. Окончательно газы очищаются в мокром пылеуловителе ПМТ-100.

Особенностью труб-сушилок № 2 и 3 является использование на них в качестве дымососов мельничных вентиляторов ВМ-100/1000. Впрыск воды перед пылеуловителем ПМ осуществляется двумя форсунками типа ФМП конструкции КузНИИУглеобогащения.

Реконструкция труб-сушилок с применением трехступенчатой системы очистки отработанных газов, топков ТЧ 2700×6500, мельничных вентиляторов позволила увеличить их производительность по испаренной влаге и сырому углю.

В табл. IV.4 приведены показатели работы реконструированных труб-сушилок на ЦОФ «Абашевская».

Применение мельничных вентиляторов позволило увеличить скорость газов в трубе-сушилке в зоне забрасывателя на 40% и ее производительность.

Результаты опробования системы газоочистки показали, что эффективность работы мокрого пылеуловителя ПМТ-100 составила 97%, аппарата БЦУ — 85%.

С целью увеличения производительности сушильного отделения на ЦОФ «Сабурханская» без расширения производственных площадей на фабрике проведена реконструкция сушильного отделения. Циклоны типа ЦПКБ заменены разгрузочной камерой диаметром 4300 мм, на второй ступени вместо батарейного циклона БЦГ-5 установлен батарейный пылеуловитель БЦУ, состоящий из 104 элементов диаметром 231 мм. Вместо мигалок на первой и второй ступенях пылеулавливания смонтированы скребково-барабанные питатели СБП-100 и шлюзовые затворы ПШ-400РВ.

Установка этого оборудования позволила снизить аэродинамическое сопротивление трактов сушильной установки.

Таблица IV.5
Сравнительные технологические показатели работы
сушильного отделения ЦОФ «Сабурханская»

Наименование показателей	До реконструкции	После реконструкции
Производительность трубы-сушилки, т/ч:		
по сырому углю	63—66	110—120
по испаренной влаге	4,5—5,6	6,6—8,4
Температура газов, °С:		
начальная	600—700	850—950
перед дымососом	110—120	100—110
Влажность угля, %:		
поступающего на сушку	11—13	11—13
после сушки	4,0—5,5	5,0—6,0

После реконструкции влажность товарного отсева в зимнее время снизилась на 0,5%. Сравнительные технологические показатели работы сушильного отделения до и после реконструкции приведены в табл. IV.5.

На торфобрикетных заводах сушке подвергается главным образом фрезерный торф.

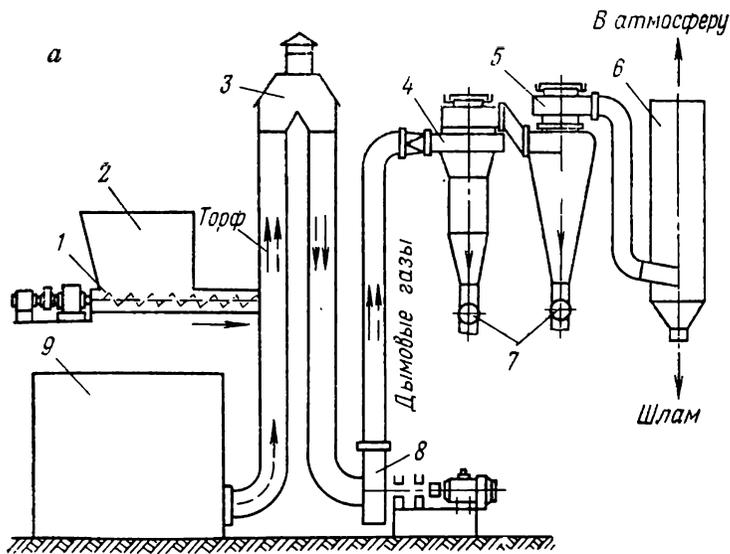
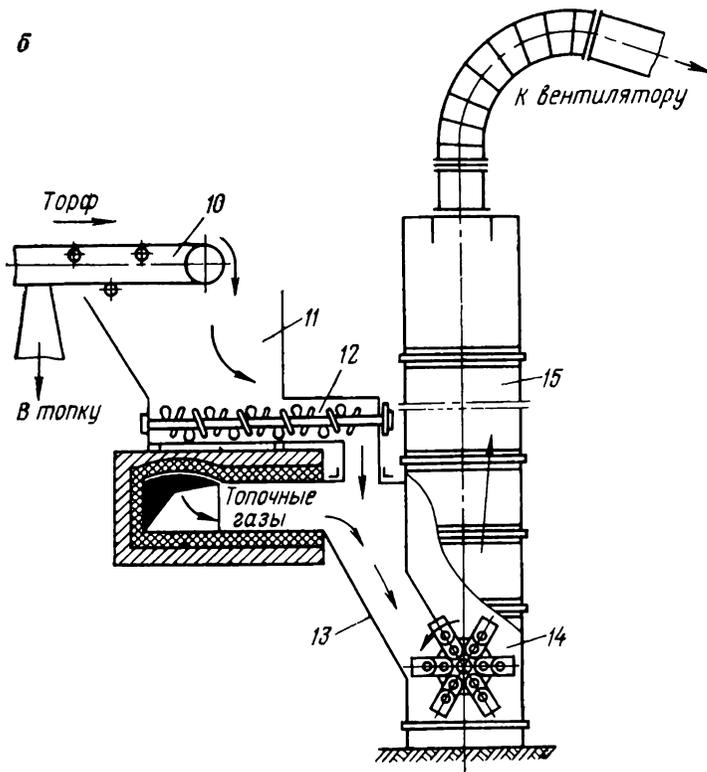


Рис. IV.9. Схемы пневмогазовой трубы-сушилки с мелющим вентилятором (а) и трубы-сушилки с шахтной мельницей (б):

1 — шнек-питатель; 2 — бункер сырья; 3 — труба-сушилка; 4 — первая ступень сухой очистки; 5 — вторая ступень сухой очистки; 6 — скруббер; 7 — затворы-питатели; 8 — мелющий вентилятор; 9 — толка; 10 — конвейер; 11 — бункер; 12 — смеситель-питатель; 13 — подсушивающая шахта, 14 — шахтная мельница; 15 — шахта



На торфобрикетных заводах малой и средней мощности применяются газовые трубы-сушилки. К ним относятся обычные трубы-сушилки и трубы-сушилки с мелющим вентилятором (рис. IV.9,а). Обычная труба-сушилка отличается от сушилки с мелющим вентилятором тем, что она имеет две ветви: восходящую длиной 15 м и нисходящую длиной 13 м. Вентилятор в ней

расположен в конце тракта. Сушилка с мелющим вентилятором имеет три ветви: длина первой 5,2 м, второй — 7,8 м и последней — 13 м. В нижней части второй ветви расположен мелющий вентилятор.

Таблица IV.6

Показатели работы труб-сушилок на Михневском и Дмитрово-Черкасском торфобрикетном заводах

Производительность, кг/ч		Влажность, %		Температура газов, °С		Напряжение объема сушилки по испаренной влаге, кг/(м ³ .ч)	Вид торфа
по исходному торфу	по испаренной влаге	начальная	конечная	начальная	конечная		
Обычная труба-сушилка							
1414	416	40	15	600	68	210	Низинный, степень разложения 40—45%
1431	505	45	15	625	75	255	
1462	604	50	15	640	95	305	
1515	713	55	15	670	103	360	
Труба-сушилка с мелющим вентилятором							
6515	2300	45	15	500	165	200	Низинный, степень разложения 45—50%
6679	2760	50	15	520	71	240	
7331	3450	55	15	550	80,5	300	

Таблица IV.7

Технико-экономические показатели труб-сушилок

Наименование показателей	Труба-сушилка	
	обычная	с мелющим вент и л я т о р о м
Удельный расход тепла на 1 кг испаренной влаги, кДж	1085—1600	1160—1360
Удельный расход на 1 т испаренной влаги:		
электроэнергии, кВт	1,7	23,4
металла, т	5	7
топлива, %	21	18,2
Средневзвешенный диаметр частиц торфа, мм:		
до сушки	1,9	2,1
после сушки	0,662	0,3
Унос торфа, %	1,1	1,6

В табл. IV.6, IV.7 приведены результаты промышленных испытаний трубы-сушилки диаметром 0,3 м и длиной 28 м на Михневском торфобрикетном заводе и трубы-сушилки с мелющим вентилятором диаметром 0,75 м, длиной 26 м на Дмитрово-Черкасском торфобрикетном заводе.

Начальная скорость газов в обычной трубе-сушилке 25—30 м/с, в трубе-сушилке с мелющим вентилятором 21—29 м/с.

Авторы проектов труб-сушилок с мелющими вентиляторами считали, что предлагаемые ими конструкции сушилок должны обеспечить измельчение торфа, глубокую сушку, равномерную влажность высушенного торфа и эффективную работу циклонов под давлением. Эксплуатация этих сушилок на торфобрикетных заводах показала, что улучшение процесса сушки в трубах-сушилках с мелющим вентилятором не достигнуто, так как помол торфа производится в конце второй ветви пневмогазовой сушилки, когда процесс сушки фактически заканчивается. Сплошной помол торфа приводит к бесполезной трате энергии на переизмельчение мелких фракций и повышенному износу мелющего вентилятора. Работа циклонов под давлением при наличии неплотностей ухудшает санитарные условия и увеличивает взрывоопасность сушильной установки.

При замене сушилки с мелющим вентилятором сушилкой с шахтной мельницей и применении шнековых питателей вместо пластинчатых и барабанных дозаторов значительно улучшилась работа сушильных установок.

Работа сушильно-топочной системы под разрежением повышает взрывобезопасность технологического процесса и создает благоприятные условия для обслуживающего персонала. Трубы-сушилки с шахтными мельницами применяются для сушки бурых углей, торфа, глины, известняка, доломита, сульфата.

Принципиальная схема трубы-сушилки с шахтной мельницей для торфа показана на рис. IV.9,б. Сушилка имеет топку, подсушивающую шахту, молотковую мельницу, питатель и систему пылеулавливания.

В трубе-сушилке с шахтной мельницей предусматривается подсушивающая шахта для облегчения дробления торфа в мельнице и снижения температуры газов перед мельницей во избежание температурного воздействия на молотки мельницы. Некоторые показатели труб-сушилок с молотковой мельницей, установленных на Мельчевском и Пикинском торфобрикетных заводах, приведены ниже.

Размер мельницы, мм . . . . .	. . . . .	1000×470
Вид торфа . . . . .	. . . . .	Древесный, древесно-осоковый, древесно-тростниковый и гипповый
Степень разложения торфа, %		25—55
Влажность торфа, %:		
перед сушкой		41—65
после сушки		16,4—28,0
Производительность сушилки, т/ч:		
по сырому торфу		3,2—3,6
по испаренной влаге		1,4—1,5
Количество испаренной влаги от общего количества влаги, %:		
в подсушивающей шахте		35
в мельнице		60
в шахте		5

Температура газов, °С:	
до сушки	586—590
после подсушивающей шахты	325—445
после сушки	75
Средняя скорость газов в подсушивающей шахте, м/с	15—17
Средний размер частиц торфа, мм:	
до сушки	2,47—2,76
после сушки	0,38—0,62
Удельный расход тепла, кДж/кг влаги	1160—1190

При сушке глины с карьерной влажностью 10—15% в сушилках с шахтными мельницами расход электроэнергии составляет от 4 до 10 кВт·ч на 1 т сухого порошка глины, расход тепла на испарение 1 кг влаги не превышает 1040—1160 кДж/кг.

Трубы-сушилки производительностью 60 т/ч по исходному продукту и 2,6 т/ч по испаренной влаге нашли применение для сушки фосфатного песка и железной руды.

Средние технологические показатели работы трубы-сушилки при сушке медного концентрата на Алмалыкском медеплавильном заводе приведены ниже.

Размеры трубы-сушилки, м:	
диаметр	0,9
длина	22
Производительность, т/ч:	
по исходному продукту	60
по испаренной влаге	3—4,2
Влажность шихты, %:	
начальная	5—7
конечная	0,0—0,5
Крупность частиц менее 0,315 мм, %	80—90
Температура газов, °С:	
на входе в сушилку	500
на выходе из сушилки	110

В последнее время институтом ВНИПИТеплопроект разработаны трубы-сушилки для сушки песка, состоящие из трубы, в верхней части которой расположен сепаратор для отделения и выгрузки песка, циклонов и мокрой очистки отработанных дымовых газов. В верхней части трубы расположен питатель сырого песка.

Материал поступает из бункера через питатель в трубу, подхватывается дымовыми газами с температурой примерно 800°С, идущими из топки со смесительной камерой, расположенной под трубой, высушивается, отделяется в сепараторе.

Ряд установок, спроектированных ВНИПИТеплопроект и Гипростанком, работает на Рязанском и Одесском литейных заводах. Сушке подвергается песок с 10 до 0,3% влажности.

Для сушки калийной соли нашли применение трубы-сушилки.

Основные параметры и технологические показатели работы труб-сушилок, эксплуатируемых в настоящее время на Березниковских калийных рудоуправлениях (БКРУ) следующие:

	БКРУ-1	БКРУ-3	
Диаметр аппарата, м	0,8	1,1	1,1
Высота аппарата, м	13,5	10	10
Эквивалентный диаметр частиц, мм	0,331	0,432	1,23
Влажность концентрата:			
начальная	4—5	5,5—6,5	6—8
конечная	0,1—0,2	0,2—0,4	0,5—0,6
Температура материала, °С:			
начальная	20	20	20
конечная	80—90	100—130	110—130
Температура газа, °С:			
начальная	780	650	350
конечная	120	120	160
Скорость газа, м/с:			
начальная	46,2	39	32
конечная	25,8	16,6	22,2
Концентрация материала, кг/кг	2	1,6	0,42
Гидравлическое сопротивление аппарата, Н/м ²	1100	1200	1400
Производительность по сухой соли, т/ч	67	75	25

Опыты показали, что практически на всех установках по высоте труб-сушилок в пределах 4 м влагосодержание изменяется от начального до конечного значений.

Изменение влагосодержания материала по высоте аппаратов удается аппроксимировать формулой

$$W = W_1 e^{-kh},$$

где W_1 — начальное влагосодержание материала, %; h — высота аппарата от забрасывателя, м; k — коэффициент, м⁻¹.

Найденные значения A и k следующие:

	W_1 , %	k , м ⁻¹
БКРУ-1	$5,39 \pm 1,07$	$0,70 \pm 0,03$
БКРУ-3	$5,7—7,01$	$0,39—0,95$

На БКРУ-2 производственного объединения «Уралкалий» была осуществлена замена двух сушилок кипящего слоя площадью 8 м² на две укороченные трубы-сушилки диаметром 1100 мм и длиной рабочего участка 6,5 м при сохранении существующей системы пылеулавливания и тягодутьевых машин (рис. IV.10). Испытания показали высокую эффективность работы укороченных труб-сушилок. При производительности 120 т/ч первой сушилки и 150 т/ч второй обеспечивалась сушка хлористого калия с начальной влажности 6—8% до конечной — 0,2—0,5%.

Показатели работы трубы-сушилки диаметром 150 мм, длиной 10 м при сушке спасских туфов следующие:

Производительность, т/ч:	
по исходному продукту	1,24
по испаренной влаге	0,27
Влажность, %:	
начальная	23,0
конечная	1,5
Температура газов, °С:	
начальная	910
конечная	120

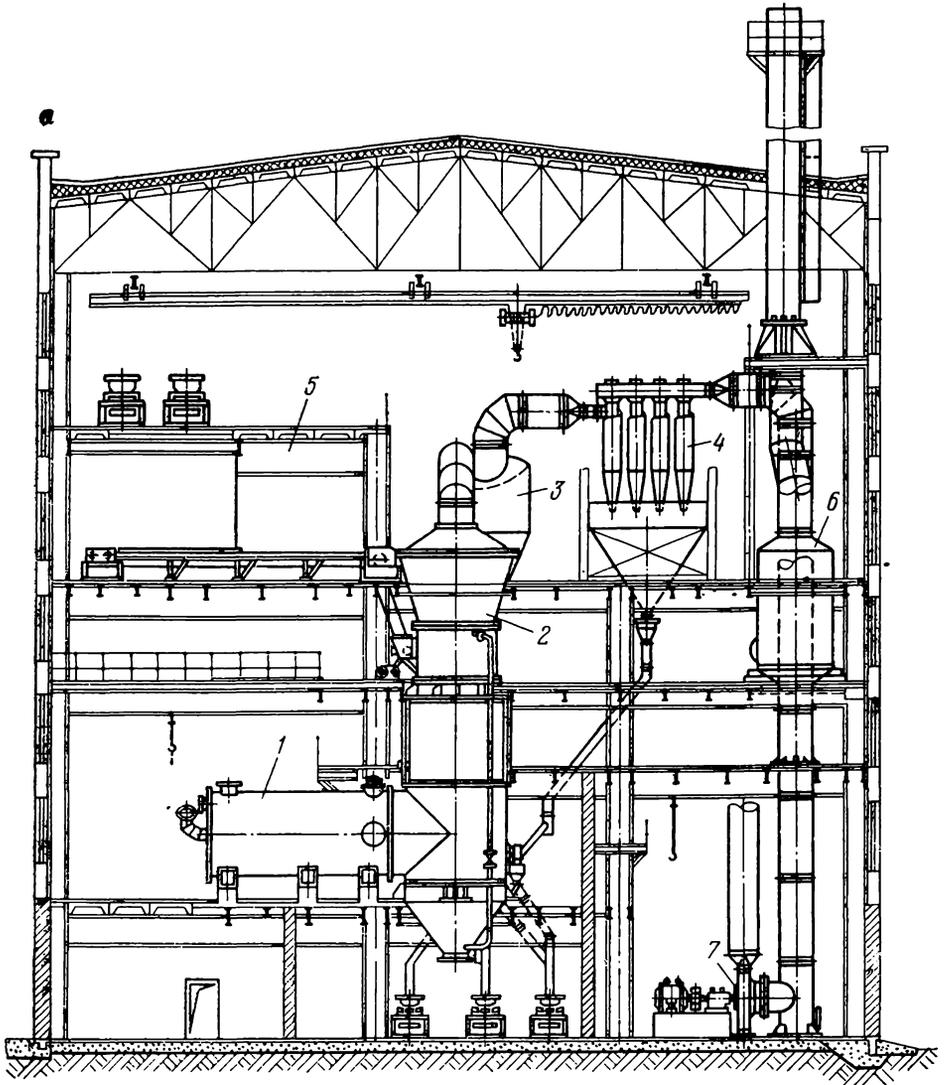


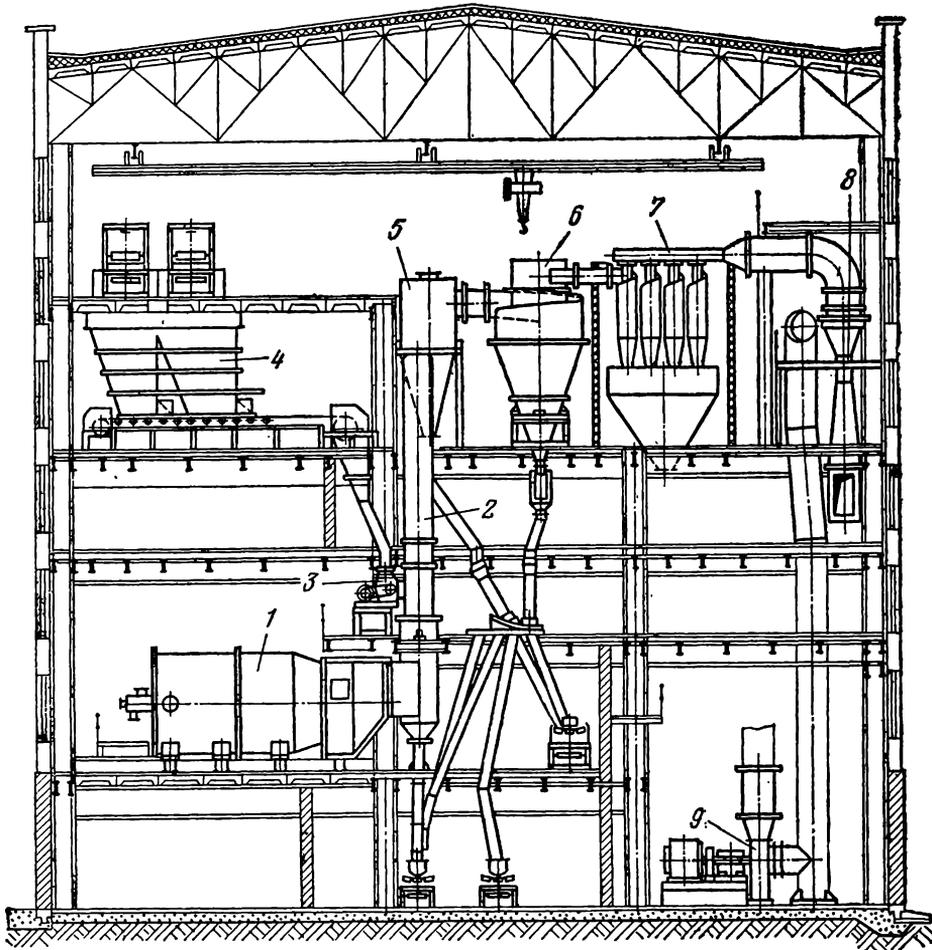
Рис. IV.10. Сушильные установки

a — сушилка кипящего слоя; 1 — топка; 2 — сушилка кипящего слоя; 3 — бункер; 4 — батарейный топка; 2 — труба-сушилка; 3 — узел загрузки; 4 — бункер; 5 — разгрузочная

Гранулометрический состав продукта, %:

6—13 мм . . . . .	.6,6—7,0
3—6 » . . . . .	.13—19
1—3 » . . . . .	.11—17
0—1 » . . . . .	.56—70

На скорость газов в трубе-сушилке в значительной степени влияет присос воздуха в сушильный тракт. Присосы воздуха значительно снижают скорость газов в начале трубы-сушилки, увеличивают объем газов, проходящих через систему пылеулавливания и дымососы, что приводит к снижению эффективности и очистки газов, повышению расхода электроэнергии, ухудшению процесса сушки и транспортирования материала в трубе-сушилке.



производственного объединения «Уралкалий»:

пылеуловитель; 5 — циклон; 6 — мокрый пылеуловитель; 7 — дымосос; 8 — труба-сушилка; 1 — камера; 6 — циклон; 7 — батарейный пылеуловитель; 8 — труба Вентури; 9 — дымосос

§ 3. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ И НОВАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ ВО ВЗВЕШЕННОМ СОСТОЯНИИ

В настоящее время техника сушки развивается в направлениях максимальной автоматизации, механизации и значительной интенсификации процессов сушки.

Условная удельная интенсивность процессов сушки определяется активной поверхностью теплообмена в единице объема или поверхности сушильного аппарата.

Изыскание рациональных способов сушки и эффективных сушильных аппаратов является одним из важнейших вопросов тех-

нологии сушки. В зависимости от технологических требований при сушке разных материалов определяется конструкция сушильного аппарата и метод сушки.

Создание экономичной и высокопроизводительной автоматизированной сушилки неразрывно связано с интенсификацией процесса сушки и сокращением ее длительности.

Интенсификация процесса сушки и повышение эффективности работы сушилки могут быть достигнуты главным образом проведением следующих мероприятий:

Таблица IV. 8

Результаты сушки антрацита класса 0—6 мм в трубе-сушилке

Производительность трубы-сушилки, кг/ч		Влажность антрацита, %		Температура, °С				Напряжение объема сушилки по испаренной влаге, кг/(м ³ ·ч)	Рост производительности трубы-сушилки по испаренной влаге, %
				антрацита		дымовых газов			
по исходному углю	по испаренной влаге	до сушки	после сушки	до сушки	после сушки	перед дымососом	на входе в трубу-сушилку		
1600	150,5	12,1	3,0	20	50	88	400	750	100,0
1900	177,7	11,9	2,8	20	65	91	600	890	118,0
3100	348,6	12,2	2,2	20	76	112	1200	1743	261,6
3400	377,8	13,4	2,7	10	78	108	1300	1890	244,4

использованием высоких начальных температур сушильного агента; с повышением температуры сушильного агента резко сокращается длительность сушки;

использованием высоких локальных скоростей сушильного агента, особенно в зоне подачи материала в сушилку;

максимальным уплотнением сушильных трактов, так как известно, что присосы воздуха снижают производительность сушилок на 30—50% и ухудшают условия безопасной эксплуатации последних;

комплексной автоматизацией и механизацией сушильной установки.

Наиболее высокие показатели по интенсификации процесса сушки могут быть достигнуты при использовании высоких начальных термогидродинамических параметров (температура, скорость) теплоносителя.

В табл. IV.8 приведены результаты сушки антрацита класса 0—6 мм при различной температуре газов на входе в трубу-сушилку диаметром 150 мм, длиной 10 м, сооруженной на Жилевской ОПОФ.

С увеличением температуры газов с 600 до 1300°С производительность сушилки по испаренной влаге возрастает более чем в 2 раза, а объемное влагонапряжение увеличивается с 890 до 1890 кг/(м²·ч).

Ниже приведены показатели работы трубы-сушилки (диаметр 150 мм, длина 10 м) при сушке белитового шлама плотностью 2900 кг/м³, крупностью 0—3 мм.

Производительность, кг/ч	. 2600—2700
Влажность, %:	
начальная . . . . .	. 22—24
конечная . . . . .	. 1,30—1,80
Температура газов, °С:	
начальная . . . . .	. 1100—1200
конечная . . . . .	. 106—113
Температура материала, °С:	
начальная . . . . .	. 12—17
конечная . . . . .	. 57—65
Напряжение объема сушилки по испаренной влаге, кг/(м ³ ·ч)	: 3870—5100

Из приведенных данных видно, что сушка белитовых шламов в трубе-сушилке протекает интенсивно, достигаются высокие напряжения объема трубы-сушилки по испаренной влаге.

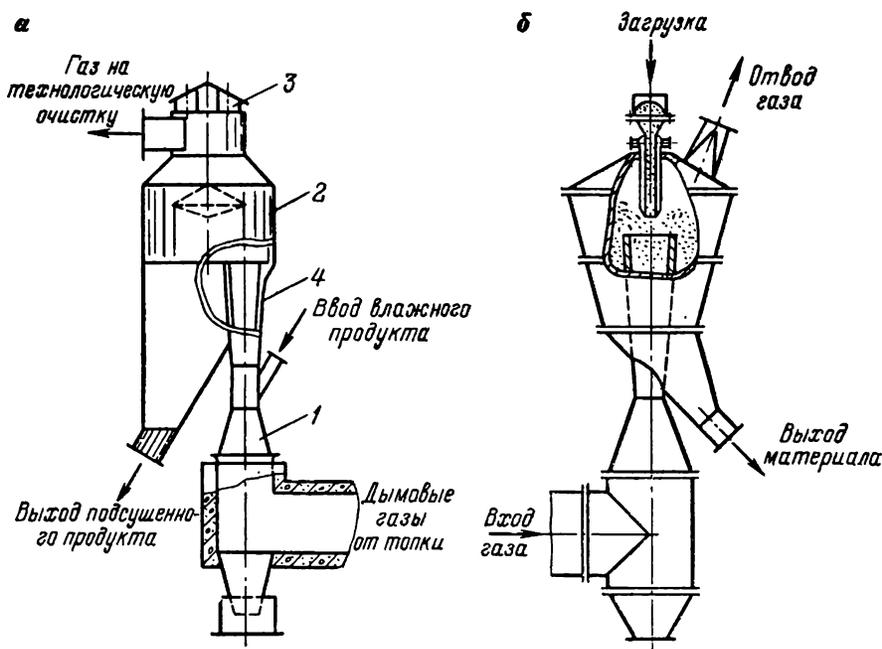


Рис. IV.11. Схемы пневмосоплового сушильного аппарата и противоточной пневмосопловой сушилки:

1 — труба Вентури; 2 — проходной сепаратор; 3 — предохранительный клапан; 4 — футеровка

Таким образом, можно заключить, что с увеличением температуры газов рабочая длина сушилки резко сокращается и основной процесс сушки сосредоточивается в зоне загрузки материала в сушилку. Это указывает на то, что при применении высокой температуры и большой скорости газа необходима новая организация процесса сушки во взвешенном состоянии.

С точки зрения интенсификации процесса сушки представляется целесообразным применение аппаратов, имеющих конфузorno-диффузorno-форму в виде трубы Вентури (рис. IV.11,а).

При конфузorno-диффузornoм течении газа вследствие использования эффекта турбулизации потока значительно повышается эффективность сушки.

В трубе Вентури активный аэродинамический режим реализуется более рационально, чем в прямой трубе-сушилке, так как большая скорость газа, определяющая эффективность теплообмена, создается только локально в горловине, а плавное сжатие струи в конфузоре позволяет избежать дополнительные потери напора, имеющие место во входном участке трубы-сушилки.

Загрузка влажного материала в горловину трубы Вентури — зону с высокой локальной скоростью газового потока обеспечивает интенсивное омывание вводимого материала газовым потоком. Под воздействием высокого скоростного напора разрушаются агрегированные скопления исходного продукта, что приводит к развитию активной поверхности теплообмена фаз, приближая ее к общей суммарной поверхности частиц твердой фазы.

Благодаря исполнению сушилки в виде трубы Вентури представляется возможным интенсифицировать процесс сушки в 3—4 раза и разработать малогабаритные сушильные аппараты большой производительности. В табл. IV.9 представлены показатели пневмосопловой сушилки с горловиной диаметром 150 мм, длиной диффузора 2,5 м, диаметром наиболее широкой части 300 мм.

Таблица IV.9
Показатели работы пневмосопловой сушилки

Производительность, кг/ч		Влажность материала, %		Температура, °С				Напряжение объема сушиллки по испаренной влаге, кг/(м ³ ·ч)
				газов		материалов		
по исходному продукту	по испаренной влаге	начальная	конечная	начальная	конечная	до сушки	после сушки	
6000	417	11,9	5,4	1190	109	15	64	3475
6000	389	12,0	5,8	1200	105	15	64	3241
6000	458	12,3	4,7	1178	100	15	60	3816
6000	473	12,6	4,5	1184	85	15	72	3941
6000	450	12,1	5,0	1184	104	15	62	3450

В этой сушилке (см. табл. IV.9) достигается напряжение единицы ее объема по испаренной влаге 3500—3800 кг/(м³·ч), в то время как значение этого показателя на трубах-сушилках не превышает 800—1200 кг/(м³·ч). Простота конструкции, высокая тепловая мощность, широкий диапазон регулирования производительности создает благоприятные условия широкого внедрения этих аппаратов.

В пневмосопловых сушилках в горловине трубы Вентури газовая струя разгоняется до скорости $v=90\div 150$ м/с, увлекая за со-

бой частицы твердой фазы. Высокие начальные теплосодержание и скорость топочных газов на входе в пневмосопловой сушильный аппарат обеспечивают интенсивный процесс межкомпонентного тепло- и массообмена; сушка носит мгновенный характер. Условия нестационарного взаимодействия фаз по всей длине сушильного тракта уже на расстоянии 3—4 м от места загрузки обеспечивают кондиционную влажность материала, т. е. практически на начальном разгонном участке пневмотранспорта сушеного продукта.

Газовый поток, входящий в диффузор со значительно сниженной температурой, расширяется и теряет скорость. Ввиду этого разгон сушеного продукта невелик. Так, при сушке антрацита класса 0—6 мм в пневмосопловом сушильном аппарате при $t_1=1300^\circ\text{C}$ и $v_{г1}=95$ м/с средняя скорость движения материала $v_{м}=6,1$ м/с, а при сушке того же продукта в трубе-сушилке при $t_1=800^\circ\text{C}$ и $v_{г1}=31$ м/с зафиксировано значение средней скорости материала $v_{м}=7,9$ м/с, т. е. в 1,3 раза выше. Важно отметить, что благодаря малому интервалу разгона твердой фазы на коротком рабочем участке с переменным по высоте диаметром пневмосопловой сушилки и вследствие этого невысоких скоростей ее движения интенсивность абразивного износа тракта с увеличением начальных скоростей сушильного агента при одновременном использовании повышенных температур не увеличивается.

Начальная скорость сушильного агента, значительно превышающая взвешивающую скорость материала, позволяет в режиме устойчивого пневмотранспортирования его осуществлять глубокое регулирование пропускной способности сушильного аппарата. Дополнительное регулирование можно производить при необходимости изменением начальной температуры дымовых газов.

Т а б л и ц а IV.10

Результаты сушки антрацита класса 0—6 мм в пневмосопловом сушильном аппарате

Начальная температура газов, °C	Производительность установки по влажному материалу, кг/ч	Влажность антрацита, %	
		до сушки	после сушки
400	1700	12,1	3,0
600	3000	11,9	4,8
1200	6000	12,2	4,2
1300	6550	13,4	4,7

Оптимально выбранные конструктивные параметры рабочего участка пневмосопловой сушилки (диаметр и длина горловины, угол раскрытия и длина диффузора трубы Вентури) дают возможность вести процесс достаточно экономично, так как повышенные параметры газа имеют место на малом участке тракта, а затем ввиду резкого падения температуры скорость газового потока значительно уменьшается и на выходе из диффузора в разгрузочную

камеру она только на 5—6% превышает скорость витания наиболее крупных частиц материала.

В табл. IV.10 приведены результаты сушки антрацита класса 0—6 мм при различной начальной температуре сушильного агента в пневмосопловом сушильном аппарате.

Процесс сушки в пневмосопловой сушилке также значительно интенсифицируется с увеличением температуры газов на входе в сушилку (см. табл. IV.10).

Ниже приведены основные показатели работы пневмосопловой сушилки на Жилевской ОПОФ при сушке нефелиновых шламов.

Производительность, т/ч:	
по исходному продукту	2,7
по испаренной влаге	6,65
Влажность шлама, %:	
до сушки	25,1
после сушки	1,34
Температура газов, °С:	
на входе в сушилку	1180
на выходе из сушилки	124
Температура высушенного материала, °С	59
Удельное влагонапряжение объема сушилки, кг/(м ³ ·ч)	5374

Из приведенных данных видно, что сушка нефелиновых шламов протекает достаточно эффективно в пневмосопловой сушилке.

В результате экспериментальных исследований получен ряд зависимостей, определяющих процесс сушки в пневмосопловом сушильном аппарате. При увеличении начальной температуры газа влагонапряжение объема сушилки растет. Характер этой зависимости аппроксимируется уравнением

$$A=4,8t_1-1340, \quad (IV.49)$$

где t_1 — температура газов на входе в сушилку.

Снижение влажности материала в процессе сушки в пневмосопловой сушилке с нижней боковой подачей описывается эмпирической зависимостью

$$W=w_1(1-e^{-by}), \quad (IV.50)$$

где W_1 — начальная влажность материала;

$$b=0,43 \cdot 10^{-6} \frac{T_{г1}}{T_{м1}} Re_{г1}^{1,15}, \quad (IV.51)$$

$$y = \frac{x}{\Delta L_{тр}}; \quad (IV.52)$$

$$Re_{г1} = \frac{v_{г1} d_{м.ср}}{\nu}; \quad (IV.53)$$

$T_{г1}$ и $T_{м1}$ — начальная температура газа и материала; $v_{г1}$ — скорость газов в горловине трубы Вентури; $\Delta L_{тр}$ — участок длины диффузора трубы Вентури.

Критериальное уравнение теплообмена в пневмосопловой сушилке с нижней боковой подачей:

$$Nu = 0,114 \cdot 10^{-3} Re_{\text{отн}}^{1,15} \mu_{\text{ср}}^{-0,424} \left(\frac{w_2}{w_{\text{кр}}} \right)^{0,24}, \quad (\text{IV.54})$$

где $Nu = \frac{\alpha_V d_{\text{м.экв}}^2}{\lambda}$ — критерий Нуссельта;

$$Re = \frac{(v_{\text{г.ср}} - v_{\text{м2}}) d_{\text{м.ср}}}{\nu} \text{ — критерий Рейнольдса;}$$

α_V — объемный коэффициент теплообмена, $\text{кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C})$; $d_{\text{м.ср}}$ и $d_{\text{м.экв}}$ — средний и эквивалентный диаметры частиц, м; λ — коэффициент теплопроводности газа, $\text{кДж}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{ч})$; ν — коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; $v_{\text{г.ср}}$ — средняя скорость газов в сушильной камере, м/с; $v_{\text{м2}}$ — скорость материала на выходе из сушилки, м/с.

Величина, характеризующая скольжение фаз транспортирующего газа относительно взвешенной в потоке твердой фазы, определяется по формуле

$$a = \frac{v_{\text{м.2}}}{v_{\text{г.ср}}} = 0,022 Fr^{-0,1} \left(\frac{L_{\text{тр}}}{D_{\text{ср}}} \right)^{2,25} \left(\frac{v_{\text{внт}}^{\text{max}}}{v_{\text{г.ср}}} \right)^{0,2}, \quad (\text{IV.55})$$

где $Fr = \frac{v_{\text{г.ср}}}{\sqrt{g d_{\text{м.ср}}}}$ — критерий Фруда; $L_{\text{тр}}$ и $D_{\text{ср}}$ — длина и средний

диаметр пневмосопловой сушилки; $v_{\text{внт}}^{\text{max}}$ — скорость витания частиц максимального размера, м/с; $v_{\text{г.ср}}$ — средняя скорость газов в сушилке, м/с; $v_{\text{м.2}}$ — скорость материала на выходе из сушилки, м/с.

Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления пневмосопловой сушилки с нижней боковой подачей от расходной концентрации материала и массовой скорости газа описывается уравнением

$$\xi_{\text{н}} = \xi_{\text{с}} \left[1 - 0,28 \left(\frac{v_{\text{г.ср}} \rho_{\text{г.ср}}}{10} \right)^{0,3} - \mu_{\text{п}}^{-0,6} \right]. \quad (\text{IV.56})$$

Эффективность работы пневмосопловой сушилки значительно повышается при организации противоточного движения газового потока и сушимых частиц угля и интенсивной циркуляции аэровзвеси. На рис. IV.11,б показан сушильный аппарат, в котором осуществляется указанный принцип сушки. В этом аппарате влажный продукт загружается не в горловину трубы Вентури, а в ее верхнюю часть — диффузор.

Частицы сушеного материала подаются навстречу тормозящему их газовому потоку, затем они меняют направление движения, прижимаются к стенкам диффузора и перемещаются вверх, где отделяются в сепараторе.

Напряжение единицы объема по испаренной влаге в противоточном сушильном аппарате при сушке угля достигает $A = 3700 - 4000 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$.

Таблица IV.11

Основные показатели работы противоточной пневмосопловой сушилки
при сушке различных материалов

Наименование показателей	Крупнозернистая калийная соль, $\rho_M = 2550 \text{ кг/м}^3$	Уголь марки Г, $\rho_M = 1350 \text{ кг/м}^3$	Обогащенный кварцевый песок, $\rho_M = 2600 \text{ кг/м}^3$	Фрезерный торф, $\rho_M = 1450 \text{ кг/м}^3$
Производительность, т/ч:				
по исходному продукту	3,2	4,5	3,5	1,6
по испаренной влаге	0,28	0,31	0,27	0,37
Температура газов, °С:				
на входе в сушилку	433	530	780	800
на выходе из сушилки	126	130	130	100
Влажность продукта, %:				
до сушки	7,94	13,2	6,6	33,0
после сушки	0,24	6,7	0,1	12,2
Температура высушенного продукта, °С	92	46	81	48
Удельное влагонапряжение объема сушилки, $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$	3000	3300	2900	4500
Гранулометрический состав сушеного продукта, %	1—3 мм—18,4; 0,5—1 мм—69; —0,5 мм—12,6	+6 мм—8,8; 3—6 мм—27,2; 1—3 мм—50; 1 мм—14	0,5—1 мм—0,7; 0,1—0,5 мм—97,8; —0,1 мм—1,5	6—13 мм—5,8—13,1; 3—6 мм—8,5—18,1; 1—3 мм—27,1—37,8; 0,5—1,0 мм— 22,4—19,6; —0,5 мм— 36,2—11,4

Поскольку сушимый материал состоит из частиц, отличающихся размерами и скоростью витания, постольку время их контакта с теплоносителем неодинаково. Это обуславливает неравномерное содержание влаги в высушенном материале. Лучшие результаты дает сушильный аппарат, в котором непосредственно над диффузором трубы Вентури установлен кольцевой расширитель газозвеси, разгружающий крупные частицы угля, в то время как мелкие продолжают перемещаться вверх в потоке теплоносителя.

Испытания полупромышленного сушильного аппарата с расширителем газозвеси при сушке угля класса 0—13 мм показали, что в этой сушилке напряжение объема сушилки по испаренной влаге достигает $A=4500\div 4700$ кг/(м³·ч).

Сушилка с противоточным движением материала и газового потока может найти широкое применение для сушки угля и других материалов крупностью от 0 до 25 мм. Эти сушилки отличаются компактностью и высокой производительностью.

В табл. IV.11 приведены показатели работы противоточной пневмосопловой сушилки при сушке различных материалов.

§ 4. ПИТАТЕЛИ-ЗАБРАСЫВАТЕЛИ ТРУБ-СУШИЛОК

Повышение эффективности сушки в трубах-сушилках возможно только при тех условиях, если обеспечивается всесторонний контакт с горячими газами отдельных частиц сушеного материала.

Так как в трубах-сушилках производится сушка высоковлажных мелких материалов, конструкция питателя-забрасывателя должна учитывать специфические свойства сушеного материала, особенно флотоконцентрата.

УкрНИИУглеобогащение разработал и внедрил цепные питатели-забрасыватели, которые нашли широкое применение.

Питатель-забрасыватель обеспечивает разрыхление подаваемого материала и равномерное распределение его по всей площади сечения трубы-сушилки.

Применение в качестве забрасывающего органа цепей исключает возможность заштыбовки ротора.

КузНИИУглеобогащение разработал конструкцию узла загрузки (рис. IV.12), состоящую из бункера емкостью не менее часовой производительности установки, скребкового питателя, цепного забрасывателя ПЦ-9 или ПЦ-11, в котором шлюзовый затвор заменен на ротор с цепями, и стальной отливки в зоне забрасывания, представляющий собой трубу со стенкой толщиной 40—60 мм и внутренним диаметром, равным диаметру трубы-сушилки. Узел загрузки трубы-сушилки УЗТ-9 (УЗТ-11) смонтирован и надежно работает на многих обогатительных фабриках угольной промышленности.

Равномерная подача сырого угля на забрасыватель обеспечивается скребковым питателем, производительность которого регулируется дистанционно с помощью секторного затвора, приводимого в действие колонкой дистанционного управления.

Первоначальное разрыхление комков угля происходит при выгрузке его из бункера скребковым питателем, вторая стадия разрыхления — в цепном роторе, который установлен вместо шлюзового затвора, и окончательное — при забросе угля в тракт трубы-сушилки цепным забрасывателем.

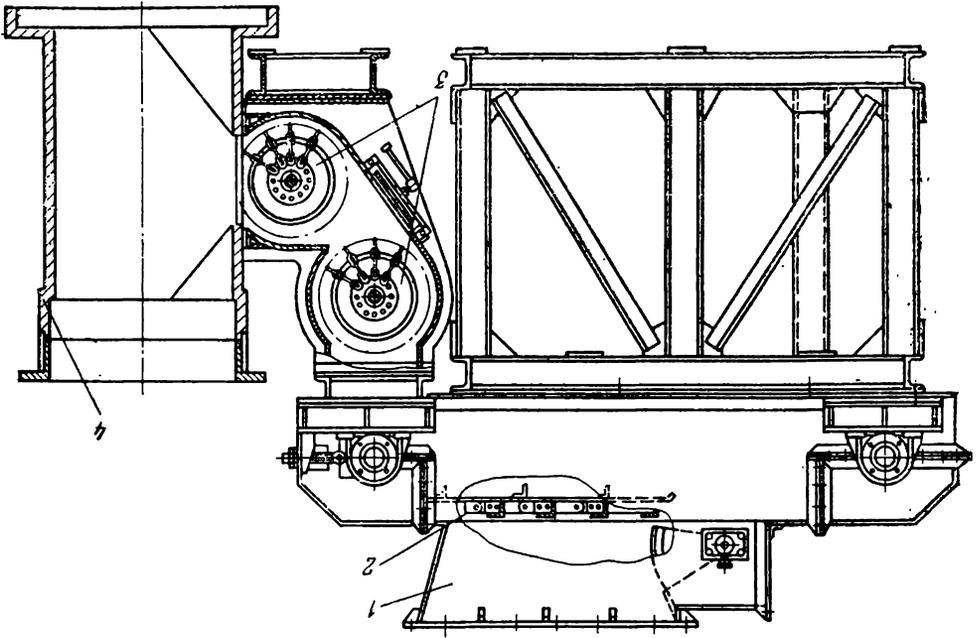


Рис. IV.12. Узел загрузки УЗТ-9 трубы-сушилки:
1 — бункер; 2 — цепь; 3 — цепные роторы; 4 — участок трубы-сушилки

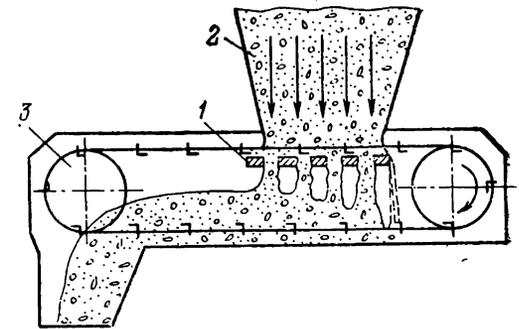
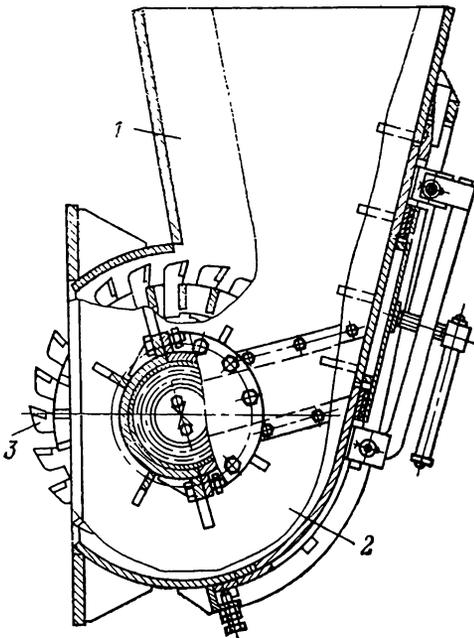


Рис. IV.13. Схема устройства для выгрузки влажного угля из бункера

Рис. IV.14. Питатель-забрасыватель с зубчатым ротором:

1 — корпус; 2 — ротор; 3 — палец

Наблюдения показали, что при работе скребкового питателя узла загрузки УЗТ уголь загружается на рабочую цепь только при входе ее в бункер, т. е. значительный объем бункера не используется.

Для выгрузки из бункера сыпучих материалов по всему сечению отверстия бункера разработано устройство (рис. IV.13), которое снабжено решеткой 1, устанавливаемой под всей площадью разгрузочного отверстия бункера 2 вместо верхней постели скребкового питателя 3. При движении скребков влажный уголь продавливается через щели решетки и падает на нижнюю ветвь питателя.

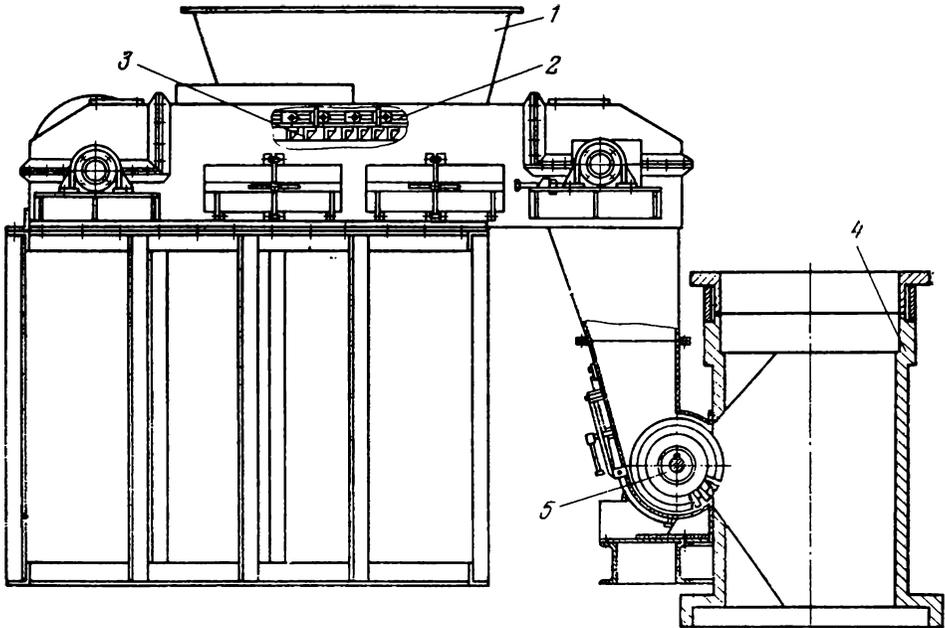


Рис. IV.15. Новый узел загрузки трубы-сушилки:

1 — бункер; 2 — цель; 3 — скребки (зубья); 4 — труба-сушилка; 5 — питатель (забрасыватель)

Опыт эксплуатации модернизированных питателей показал, что практически удается исключить зависание угля в бункерах перед сушилками, улучшить разрыхление и перемешивание смеси флотоконцентрата и мелкого концентрата.

На ЦОФ «Чертинская» разработана и испытана новая конструкция забрасывателя (рис. IV.14), в котором вместо цепного ротора установлен зубчатый. Зубья-рыхлители приварены к лопаткам винтообразно, что позволяет за один оборот ротора очистить материал по всей ширине корпуса. Наличие свободного пространства между лопатками и втулкой ротора исключает залипание влажным углем. Материал, попадая между корпусом и ротором, раздавливается, затем зубьями отрезается на порции и забрасывается в трубу-сушилку. Частота вращения ротора забрасывателя 250—300 об/мин.

Зубчатыми забрасывателями оборудованы все трубы-сушилки ЦОФ «Киселевская» и ГОФ «Тайбинская». Опыт их эксплуатации показал, что количество угля, выпадающего в провал, снизилось на 50%. Сравнительные испытания забрасывателя новой конструкции с цепным ротором показали, что зубчатый ротор работает более эффективно и имеет бóльший срок службы.

КузНИИУглеобогащение усовершенствовал и внедрил конструкцию зубчатого ротора на ряде углеобогатительных фабрик Кузбасса. В результате модернизации конструкции скребкового питателя и зубчатого ротора разработан новый узел загрузки труб-сушилок (рис. IV.15).

На трубах-сушилках фирмы «Бюттнер» (ФРГ), предназначенных для сушки флотоконцентрата и шлама, применяют питатели-забрасыватели протирачного типа. Забрасыватель состоит из вала с лопастями и решетки с щелью шириной 20 мм. Применение последней исключает попадание в трубу-сушилку комков и образование «провала».

На трубах-сушилках торфобрикетных заводов в качестве питателей применяют шлюзовые затворы.

Глава V

СУШИЛКИ КИПЯЩЕГО СЛОЯ

Продолжительность сушки в трубах-сушилках обычно составляет несколько секунд. При необходимости увеличения продолжительности сушки размеры труб-сушилок получаются слишком большими.

В этом случае более целесообразно переходить от обычного принципа работы труб-сушилок к принципу работы в псевдооживленном слое. Сушилка псевдооживленного слоя позволяет увеличивать продолжительность сушки материала во много раз и регулировать ее в очень широких пределах. Этот принцип сушки наиболее приемлем для таких материалов, продолжительность сушки которых исчисляется десятками секунд или минутами. Таким образом, сушка материалов в псевдооживленном слое позволяет значительно расширить область применения метода сушки во взвешенном состоянии.

Процесс сушки в псевдооживленном состоянии заключается в продувке газа через слой материала, находящегося на газораспределительной решетке, с такой скоростью, при которой устойчивость слоя нарушается, высота его постепенно увеличивается и частицы приходят в беспорядочное движение.

В сушилке псевдооживленного слоя газ-теплоноситель, проходя через отверстия в газораспределительной решетке с высокой скоростью, создает хороший контакт между газами и материалом, последний «течет» по решетке от точки питания к разгрузочному устройству сушилки.

Крупный высушенный материал разгружается из сушилки через шлюзовую затвор с механическим приводом; мелкий материал, унесенный потоком газов в циклон, — разгружается также с помощью затвора, а затем обычно смешивается с высушенным крупным материалом.

Газы из сушильной камеры направляются в пылеулавливающие аппараты, из которых они после очистки вентилятором выбрасываются в атмосферу.

Для сушки минерального сырья в промышленности применяют в основном однокамерные сушилки непрерывного действия, которые наиболее просты в конструктивном и эксплуатационном отношении. При сушке в этих сушилках получают высокие экономические показатели. Топочные камеры сушилок псевдооживленного слоя могут работать как под давлением, так и под разрежением.

Сушилки псевдооживленного слоя выполняются с направленным движением потока сушимого материала, к ним относятся сушилки с прямоугольным или квадратным сечением сушильной камеры. В сушилках с круглым сечением камеры, как правило, нет четко направленного движения сушимого материала.

Наибольшее применение нашли сушилки кипящего слоя в химической, калийной и угольной промышленности, в промышленности строительных материалов, цветной металлургии и т. д.

§ 1. ТЕОРИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ В КИПАЮЩЕМ СЛОЕ

В сушилках кипящего слоя изменение кинетической энергии транспортирующего газового потока происходит в результате преодоления им сопротивления газораспределительной решетки и слоя материала, который переходит из спокойного состояния в состояние псевдооживления.

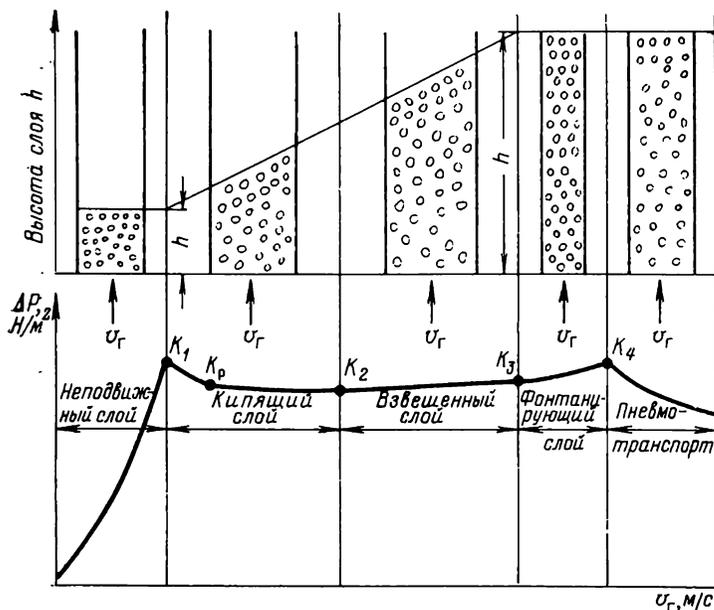


Рис. V.1. Изменение высоты слоя h и его гидравлического сопротивления ΔP в зависимости от скорости газовой фазы u_g

При прохождении потока газа с малыми скоростями через слой сыпучего материала, лежащего на газопроницаемой поверхности, состояние слоя не изменяется, он остается неподвижным, и объем его не изменяется.

При постепенном увеличении скорости газового потока слой сыпучего материала становится похожим на малоподвижную вязкую жидкость. При дальнейшем увеличении скорости газов слой становится легко подвижным, он ведет себя, как жидкость. Различают три состояния псевдооживленного слоя сыпучего материала: кипящий, взвешенный и фонтанирующий (рис. V.1). Появление в слое быстро движущихся к поверхности газовых пузырей вызывает резкое увеличение конвекции, и весь слой приобретает вид кипящей жидкости, чем обусловлено название этого режима — кипящий слой (K_1) (см. рис. V.1).

Скорость газового потока, соответствующая началу кипения слоя, носит название критической скорости $u_{кр}$.

При последующем увеличении скорости газового потока весь слой переходит во взвешенное состояние, при определенной скорости создается взвешенный слой (K_2) (см. рис. V.1).

При дальнейшем возрастании скорости газа наступает состояние фонтанирующего слоя (K_3) (см. рис. V.1).

На рис. V.1 также показан график изменения гидравлического сопротивления псевдооживленного слоя в зависимости от скорости газов в зоне газораспределительной решетки.

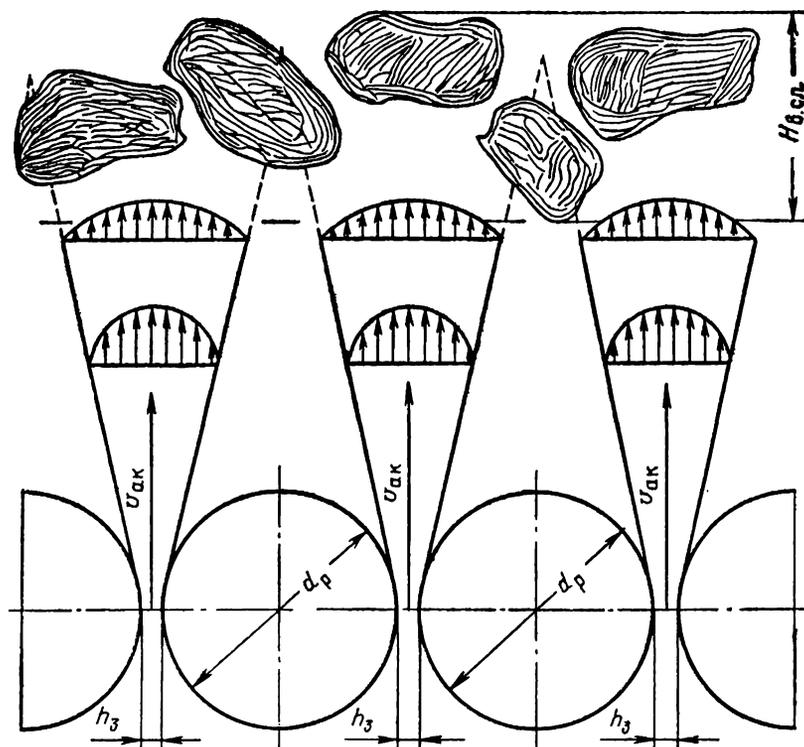


Рис. V.2. Схема образования псевдооживленного слоя в зоне газораспределительной решетки

Точка K_1 соответствует началу образования кипящего слоя, точка K_2 — переходу аэродинамического режима в зону взвешенного слоя. Точка K_3 показывает начало образования фонтанирующего слоя и точка K_4 — переход на режим пневмотранспорта.

Три вида состояния псевдооживленного слоя можно представить в виде схемы (рис. V.2). На рисунке показана газораспределительная решетка, состоящая из металлических прутков. Если обозначить через $v_{ак}$ активную скорость горячих газов, определяемую из отношения секундного расхода газов V_r к площади живого сечения газораспределительной решетки $F_{жив}$

$$v_{ак} = \frac{V_r}{F_{жив}}; \quad (V.1)$$

а через $v_{\text{вит}}^{\text{макс}}$ скорость витания частиц сушеного материала, то условием образования кипящего слоя по результатам исследований автора можно считать выражение

$$v_{\text{ак}} \leq 2v_{\text{вит}}^{\text{макс}}. \quad (\text{V.2})$$

При этом наличие газораспределительной решетки обязательно. При равномерном кипении всего слоя частиц сушеного материала объем его увеличивается примерно в 2—3 раза по сравнению с объемом свободно насыпанного слоя материала.

Образование однородного кипящего слоя зависит от размеров площади решетки. На лабораторных и полупромышленных установках достигается однородный кипящий слой при расходе газов 1400—2000 кг/(м²·ч).

Достаточно надежно работают промышленные сушилки кипящего слоя при расходе газов 5000—13 000 кг/(м²·ч).

На отечественных и зарубежных сушилках кипящего слоя достигнут влагосъем с 1 м² газораспределительной решетки 1,8—2,5 т/(м²·ч).

Необходимым условием образования взвешенного слоя является $v_{\text{ак}} = (2 \div 3)v_{\text{вит}}^{\text{макс}}$. В этом случае газораспределительная решетка нужна не для удержания основной массы сушеного материала, а для турбулизации и равномерного распределения горячих газов по сечению сушильной камеры и образования большого числа элементарных струй, в которых витают частицы сушеного материала. Взвешенный слой получается более однородным по своим аэродинамическим параметрам, чем кипящий слой [40].

Сопrotивление взвешенного слоя не превышает сопротивления кипящего слоя при одних и тех же количествах сушеного материала, находящегося в сушильной камере. Это объясняется тем, что с увеличением подачи горячих газов под газораспределительную решетку в устье сушильной камеры увеличивается пространство между витающими частицами, а скорость газов в межкусковом пространстве остается практически постоянной.

Устойчивый взвешенный слой достигается при удельном расходе газов 25 000—35 000 кг/(м²·ч).

В ИОТТ установлено, что в сушилках взвешенного слоя достигается удельный влагосъем с 1 м² газораспределительной решетки, равный 4—6 т/(м²·ч), что почти в 1,5—2 раза больше, чем в сушилках кипящего слоя. Можно отметить, что зарубежные сушилки кипящего слоя с прямоугольными сушильными камерами, т. е. с направленным потоком материала, работают в режиме взвешенного слоя.

При условиях соблюдения соотношения $V_{\text{ак}} \geq 3V_{\text{вит}}^{\text{макс}}$ слой материала расширяется на весь объем сушильной камеры и происходит интенсивная циркуляция материала, т. е. образуется фонтанирующий слой.

Условие перевода сыпучего материала в псевдооживленное состояние можно выразить формулой

$$\Delta P_{\text{сл}} = \frac{G}{F} = H_0 (1 - \epsilon_0) (\rho_{\text{к}} - \rho_{\text{г}}), \text{ Н/м}^2, \quad (\text{V.3})$$

где $\Delta P_{\text{сл}}$ — перепад давления в псевдооживленном слое, Н/м²; G — масса твердых частиц слоя, кг; F — площадь решетки, м²; H_0 — высота неподвижного слоя, м; ϵ_0 — порозность неподвижного слоя; $\rho_{\text{к}}$ и $\rho_{\text{г}}$ — плотность твердых частиц и газа, кг/м³.

Для практики наиболее важным является определение гидравлического сопротивления слоя $\Delta P_{\text{сл}}$, скорости газа $v_{\text{кр}}$, при которой слой материала переходит в кипящий слой, скорости, при которой происходит унос частиц из аппарата, а также порозности слоя ϵ .

Высота псевдооживленного слоя определяется по формуле

$$H = H_0 \frac{1 - \epsilon_0}{1 - \epsilon}, \quad (\text{V.4})$$

где H_0 и ϵ_0 — высота и порозность неподвижного слоя;

$$\epsilon_0 = 1 - \frac{\rho_{\text{н}}}{\rho_{\text{к}}}, \quad (\text{V.5})$$

$\rho_{\text{н}}$ и $\rho_{\text{к}}$ — насыпная и кажущаяся плотности частиц, кг/м³.

Критическая скорость псевдооживленного слоя частиц различной крупности может быть определена по формуле

$$\text{Re}_{\text{кр}} = \text{Ar}_{\text{кр}} \left(150 \frac{1 - \epsilon}{\epsilon^3} + \sqrt{\frac{1,75}{\epsilon^3}} \sqrt{\text{Ar}_{\text{кр}}} \right), \quad (\text{V.6})$$

где Re — критерий Рейнольдса; Ar — критерий Архимеда.

Скорость потока $v_{\text{ун}}$, при которой начинается интенсивный унос частиц из аппарата, что соответствует порозности $\epsilon = 1$, можно определить по уравнению

$$\text{Re}_{\text{ун}} = \frac{\text{Ar}}{18 + 0,61 \sqrt{\text{Ar}}}. \quad (\text{V.7})$$

Экспериментальные исследования показали, что создание устойчивого взвешенного слоя в значительной степени зависит от длины прохождения частиц материала в сушильной камере. Имеется зависимость между активной скоростью газов и длиной газораспределительной решетки.

С увеличением длины газораспределительной решетки требуется увеличение активной скорости газов. В результате математической обработки экспериментальных данных по испытанию полупромышленной сушилки взвешенного слоя и данных зарубежных промышленных сушилок взвешенного (кипящего) слоя прямоугольного сечения с решеткой, выполненной из круглых металлических прутков, автором получена зависимость

$$v_{\text{ак}} = 1,45 v_{\text{вит}}^{\text{max}} \sqrt{\mu_{\text{п}} \cos \varphi} \left(\frac{L_{\text{р}}}{nd_{\text{пр}}} \right)^{0,7} \left(\frac{W_{\text{ср}}}{W_{\text{гигр}}^{\text{max}}} \right)^{0,8} \text{ м/с}, \quad (\text{V.8})$$

где μ_p — расчетная массовая концентрация материала, кг/кг; φ — угол наклона решетки, градус; L_p — длина решетки, м; n — число прутков; $d_{пр}$ — диаметр прутка, м.

Зависимость (V.8) может быть использована для расчета промышленных сушилок взвешенного слоя производительностью до 50—60 т/ч по испаренной влаге.

Для сушилок взвешенного слоя с газораспределительной решеткой длиной от 4 до 7 м можно определять величину активной скорости газов по формуле

$$v_{ак} = 2,45 v_{вит}^{max} \sqrt{\mu_p \cos \varphi}. \quad (V.9)$$

Другим важным параметром сушилки взвешенного слоя является живое сечение газораспределительной решетки. Живое сечение решетки зависит от плотности ρ_k и среднего размера частиц $d_{м.ср}$ сушеного материала, угла наклона решетки и зазора $h_{зая}$ между прутками газораспределительной решетки. Живое сечение решетки можно определить по эмпирической зависимости

$$\omega = 1,2 \left(\frac{d_{м.ср}}{\rho_k} \right)^{0,25} h_{зая} (1 + \operatorname{tg} \varphi) 10^3. \quad (V.10)$$

Формула (V.10) получена автором в результате обработки данных по зарубежным промышленным установкам и испытанию экспериментальной полупромышленной сушилки взвешенного слоя.

Для сушилок взвешенного слоя важным параметром является критическая высота сушильной камеры, при которой завершается сепарация частиц материала.

Для расчета сушилок взвешенного слоя большое значение имеют оптимальные размеры высоты сушильной камеры.

В сушильном аппарате взвешенного слоя сушка материала протекает во взвешенном состоянии, при этом материал находится в основной своей массе по высоте сушильной камеры на некотором расстоянии от газораспределительной решетки.

На основании обработки данных по полупромышленной сушилке взвешенного слоя и зарубежным промышленным сушилкам этого типа автором получена эмпирическая формула по определению критической высоты сушильной камеры

$$\frac{H_{кр}}{D_{экр}} = 0,08 Fr^{0,65} \left(\frac{\mu_p}{\omega} \right)^{0,25} \left(\frac{v_{г.ср}}{v_{вит.ср}} \right)^{0,35}, \quad (V.11)$$

где $D_{экр} = \sqrt{\frac{4F_p}{\pi}}$ — эквивалентный диаметр распределительной решетки, м; F_p — площадь газораспределительной решетки, м²; $Fr = \frac{v_{г.ср}}{\sqrt{g d_{м.ср}}}$ — критерий Фруда; $v_{г.ср}$ — средняя скорость газов в су-

шильной камере, м/с; μ_p — расчетная массовая концентрация угля в газовом потоке, кг/кг; ω — живое сечение решетки, доли единицы; $v_{вит.ср}$ — скорость витания средних размеров частиц материала, м/с.

В табл. V.1 приведены оптимальные значения числа псевдоожигения для различных материалов.

Исследования показывают, что с увеличением влажности материала возрастает критическая скорость начала псевдоожигения. Эта зависимость может быть выражена формулой

$$v_{кр} = v'_{кр} \left(\frac{W_{ср}}{W_{гигр}^{max}} \right)^{0,8},$$

где $v'_{кр}$ — скорость начала псевдоожигения при влажности материала, равной $W_{гигр}^{max}$, м/с; $W_{гигр}^{max}$ — максимальная гигроскопическая влажность, %; $W_{ср}$ — влажность материала, %.

Т а б л и ц а V.1
Характеристика различных материалов

Материал	Эквивалентный диаметр $d_э$, мм	Плотность, кг/м ³	Рабочая скорость газа при максимальной теплоотдаче, м/с	Расчетные данные	
				Ar	$K_W = \frac{v_r}{v_{кр}}$
Гематит	0,17	4630	0,35	787	7,5
Карборунд	0,14	3200	0,22	308	9,5
Песок кварцевый	0,65	2600	0,50	24 650	1,95
Ферросилиций	0,82	6800	0,30	123,5	18,0
Шарики стеклянные	1,16	2500	0,76	135 000	1,4
Угольный шлак	1,0	1500	2,50	15 000	4,5
Руда	2,5	5000	2,40	—	7,5

Скорость начала псевдоожигения для полидисперсного материала при одинаковой влажности изменяется в зависимости от содержания в слое крупных и мелких частиц.

Расширение слоя в момент перехода его в псевдоожигенное состояние для монодисперсного материала возрастает в 1,15—1,2 раза по сравнению с начальной высотой материала и в 1,25—1,4 раза для полидисперсного материала.

Скорость полного псевдоожигения для полидисперсного слоя марганцевой руды может быть определена по формуле

$$Re_{п} = 0,049 [(1 - \epsilon_0) Ar]^{0,8} S^{0,48} \left(\frac{\rho_r}{\rho_k} \right)^{0,2} \left(\frac{W_{ср}}{W_{гигр}^{max}} \right)^{0,8},$$

где $Re_{п} = \frac{v_{п} d_э}{\nu}$ — критерий Рейнольдса; $v_{п}$ — скорость псевдоожигения, м/с; ϵ_0 — порозность неподвижного слоя; Ar — критерий Архимеда; $S = \frac{d_{м}^{max}}{d_э}$ — модифицированное число полидисперсности; $d_э$ — средний эквивалентный диаметр частиц; $d_{м}^{max}$ — максимальный размер

частиц; ρ_r и ρ_k — плотность газовой фазы и твердых частиц, кг/м³;
 $W_{cp} = \frac{W_1 + W_2}{2}$ — средняя влажность материала, %; W_1 , W_2 — начальная и конечная влажность материала, %; $W_{гигр}^{max}$ — максимальная гигроскопическая влажность материала, %.

Тепло- и массообмен в процессе сушки в кипящем слое может значительно изменяться в зависимости от свойств высушиваемого материала и режима сушки. Для сушки смеси, состоящей из мелкого и флотационного угольных концентратов, коэффициент теплообмена может быть определен по формуле

$$Nu = 0,227 \cdot 10^{-3} Re^{1,82}. \quad (V.12)$$

Эта формула рекомендована А. Ф. Гребенюком для сушилок кипящего слоя с направленным потоком.

М. В. Лыков предложил зависимость, применяемую в том случае, если влажность материала после сушки ниже гигроскопической:

$$Nu = 0,0016 Re^{0,95} \left(\frac{v_r}{v_{вит}} \right)^{-1,5} \left(\frac{W_2}{W_{гигр}} \right)^n. \quad (V.13)$$

В этой формуле критерий

$$Re = \frac{v_r d_a}{\epsilon_0 \nu},$$

где v_r — скорость газов, отнесенная к полному сечению, м/с; d_a — эквивалентный диаметр частиц, м.

Показатель степени n зависит в основном от молекулярной природы высушиваемого материала.

Для угля $n = 1,35$ ($W_{гигр} = 8,2\%$, $W_2 = 0,5 \div 5\%$). Для никелевого концентрата $n = 0,65$ ($W_{гигр} = 15\%$, $W_2 = 0,5 \div 9,8\%$).

При сушке материала до влажности $W_2 \geq W_{гигр}$ в формуле (V.13) член $\frac{W_2}{W_{гигр}} = 1$.

§ 2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ, КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ СУШИЛОК КИПЯЩЕГО СЛОЯ

Сушилки кипящего слоя начали широко применяться для сушки минерального сырья в последние 15—20 лет.

Первые опытно-промышленные сушилки кипящего слоя для сушки угля были установлены на Макеевском, Харьковском, Донецком и Днепродзержинском КХЗ. В настоящее время находятся в эксплуатации две сушилки на Донецком и Днепродзержинском КХЗ. Общим для этих сушилок являлось использование газообразного топлива, которое сжигалось в топках под давлением. Однако по конструктивному оформлению и виду подвергаемого сушке продукта они отличались. В дальнейшем УкрНИИУглеобогащением на ЦОФ «Колосниковская» были проведены опытно-

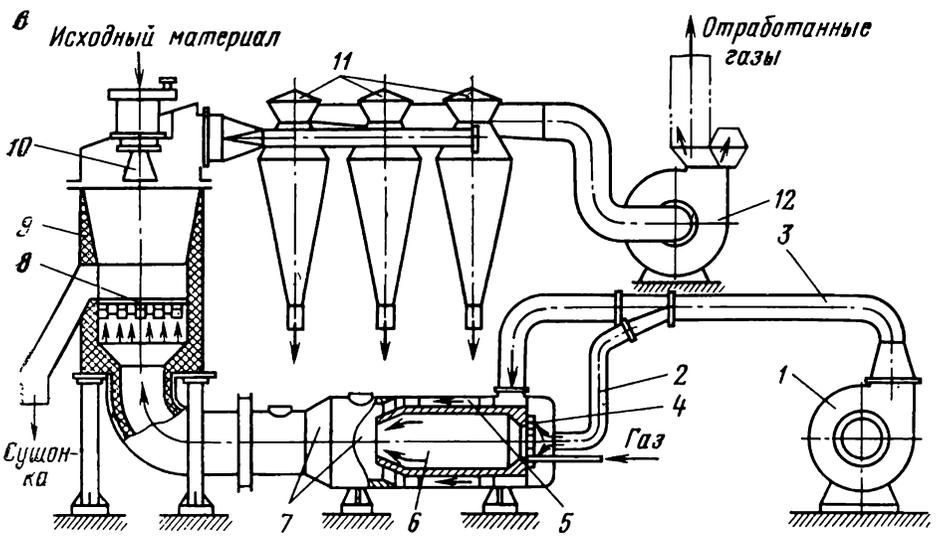
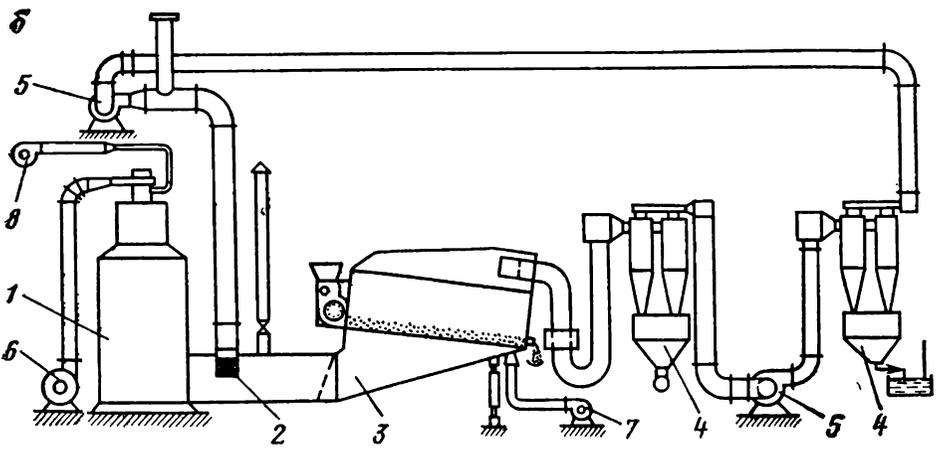
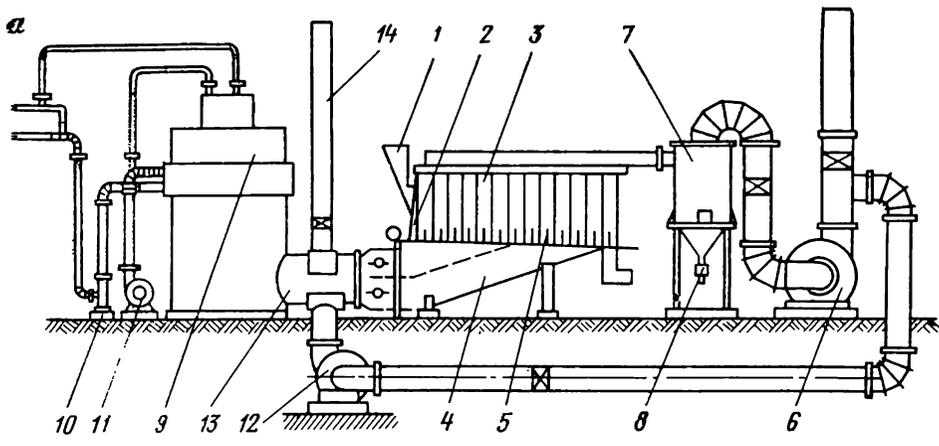


Рис. V.3. Схема сушильной установки:

а — Макеевского КХЗ; 1 — бункер; 2 — цепной забрасыватель; 3 — камера; 4 — газораспределительная коробка; 5 — решетка; 6 — дымосос; 7 — циклоны; 8 — секторный питатель; 9 — топка; 10 — газодувка; 11 — воздуходувка; 12 — вентилятор; 13 — смеситель; 14 — растопочная труба; *б* — Донецкого КХЗ; *в* — Днепродзержинского КХЗ; 1 — вентилятор; 2 — подача первичного воздуха; 3 — подача вторичного воздуха; 4 — горелка; 5 — топка; 6 — камера сгорания; 7 — камера смешения; 8 — распределительная решетка; 9 — аппарат; 10 — разбрасыватель; 11 — циклоны; 12 — дымосос

промышленные испытания установки для сушки угля в кипящем слое, работающей под разрежением в комплексе со слоевой топкой, сжигающей твердое топливо.

На Донецком и Макеевском КХЗ были применены сушилки с направленным движением кипящего слоя в аппаратах прямоугольного сечения.

Сушилка Макеевского КХЗ предназначалась для сушки смеси мелкого угля и флотоконцентрата с начальной влажности 15—16% до конечной 8—9%. Сушильная камера имела трапецеидальное сечение — ширина со стороны питания 1550 мм, у разгрузочного конца 1250 мм, длина 6700 мм; поверхность решетки 9,25 м². Благодаря сужению решетки теплоноситель по-разному распределяется по длине камеры. Для устойчивого направленного перемещения крупных частиц решетка установлена под углом 1,5° в сторону разгрузки.

Решетка была выполнена из стального перфорированного листа толщиной 20—30 мм, свободно уложенного во фланцах камеры. Диаметр отверстий решетки 4 мм, живое сечение 7%.

В аппарате с направленным перемещением кипящего слоя значительно низкий унос материала. Так, при скорости газов над слоем 2,46—2,51 м/с и конечной влажности угля 8,4—8,5% унос мелочи составлял 0,3—0,37% расхода сухого угля, а при скорости газа 3,43—3,5 м/с — не превышал 0,67—0,71%.

При сушке флотационного концентрата до влажности 10,9—11,2% унос составлял 1,1—1,2%, а при конечной влажности 7% — 3,6—3,9%.

Донецким КХЗ совместно с Донецким филиалом института «Гипросталь» введена в эксплуатацию установка для сушки продуктов обогащения угля в кипящем слое.

Сушильная установка Донецкого КХЗ состоит из топки 1 для сжигания коксового газа, смесительной камеры 2, в которой смешиваются горячие газы, выходящие из топки, с холодными газами рециркуляции для получения необходимой температуры теплоносителя, реактора 3 с направленным русловым потоком псевдоожиженного слоя, сухих и мокрых циклонов 4, двух дымососов 5 для подачи теплоносителя и вентилятора 6, нагнетающего воздух на горение, системы охлаждения шихты 7, газодувки 8 для подачи коксового газа в топку.

Т а б л и
Средние показатели работы сушилки

Производительность, т/ч		Влажность угля, %		Температура	
по исходному углю	по испаренной влаге	до сушки	после сушки	под решеткой	в слое
81,31	7,02	14,6	6,5	570	90
94,00	3,99	12,8	5,8	656	87
95,2	8,29	17,0	9,1	582	107

На сушильной установке Донецкого коксохимического завода в качестве газораспределительного устройства использовалось щелевое сито, установленное под углом 7° с уклоном в сторону разгрузки. Размеры решетки $0,5 \times 5$ м, размер щелей 0,5 мм, живое сечение решетки 11%, гидравлическое сопротивление около 1000 Н/м^2 . Площадь решетки 2,5 м, производительность по испаренной влаге 3,2 т/ч.

Сушильная установка кипящего слоя Днепродзержинского КХЗ была построена по проекту УкрНИИУглеобогащения.

Реактор представляет собой металлический цилиндр, футерованный шамотным кирпичом. Высота реактора 3,75 м, диаметр 3,5 м, площадь решетки 7 м^2 . Решетка изготовлена из листа нержавеющей стали толщиной 8—10 мм. Рабочее давление под решеткой составляет $4000\text{—}4500 \text{ Н/м}^2$, высота переливного порога 600—800 мм над решеткой.

Основные показатели работы сушилки кипящего слоя Днепродзержинского КХЗ следующие:

Влажность продукта, %:	
исходного:	23—24
высушенного	12—13
Площадь решетки, м^2	7
Высота слоя, мм	500—600
Влагонапряжение, $\text{т}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	1,8

При сушке флотоконцентрата или его смеси с мелким концентратом высокий слой обеспечивает дополнительное рыхление и лучшую равномерность псевдоожижения материала, высота его в этом случае должна быть равной 500—800 мм, а число псевдоожижения — 3—4.

На ЦОФ «Колосниковская» были проведены испытания опытно-промышленной сушилки кипящего слоя конструкции УкрНИИУглеобогащения с топкой на твердом топливе, работающей под разрежением; площадь решетки 5 м^2 (рис. V.3, в).

На сушку подавался флотоконцентрат в смеси с мелким концентратом. В табл. V.2 приведены средние показатели работы сушилки кипящего слоя на ЦОФ «Колосниковская».

Предусматривается установка на новой углеобогатительной фабрике «Должанская-Капитальная» сушилок кипящего слоя с газораспределительной решеткой площадью 12 м^2 (рис. V.4).

ца V.2

кипящего слоя на ЦОФ „Колосниковская“

газов, °С		Разрежение, Н/м^2			Сопротивление слоя, Н/м^2	Удельный влагосъем, $\text{т}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$	Объем газов, тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$
над слоем	перед дымососом	в топке	в борове	перед дымососом			
50	58	40	100	7500	4040	1,4	75—80
50	63	25	100	7000	3780	0,8	75—80
50	63,4	7	100	6820	3180	1,66	75—80

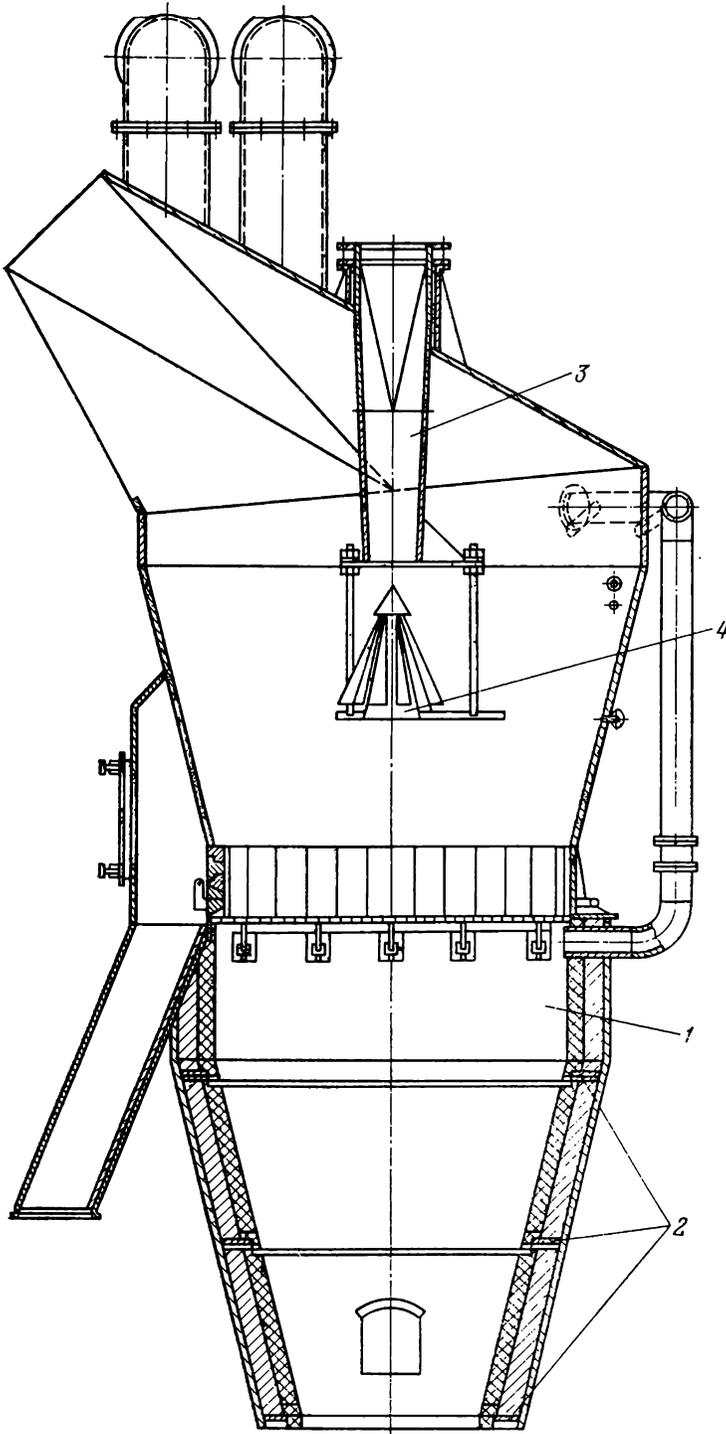


Рис. V.4. Камера сушилки кипящего слоя фабрики «Должанская-Капитальная»

Сушильная камера представляет собой сварную конструкцию из листового металла диаметром 3900 мм. Футеровка нижней части камеры 1 состоит из трех секций, опирающихся на разгрузочные кольца 2. Для распределения влажного материала по сечению сушильной камеры к загрузочной течке 3 крепится двухконусно-лепестковый разбрасыватель 4.

Для удаления слоя высушенного угля при остановках поточно-транспортной системы сухого материала или шлюзового затвора, а также для аккумуляции материала при пиковых нагрузках на сушильную камеру служит бункер объемом 10 м³.

Производительность одного агрегата, принятого для ГОФ «Должанская-Капитальная», составляет 180—250 т/ч по исходному материалу или 18—25 т/ч по испаренной влаге при сушке антрацита класса 0—6 мм.

Схема цепи аппаратов сушильного цеха показана на рис. V.5.

Теплоноситель из газо-мазутной топки 1, работающей под давлением, по борову 2 подается в сушильную камеру 4. Влажный уголь из бункера 6 дозируется скребковыми питателями 5 и с помощью разбрасывателя распределяется по сечению сушильной камеры. Перешедший в псевдооживленное состояние материал подсушивается и по разгрузочной течке попадает в бункер 8, откуда он выдается в смеси с пылью скребково-барабанным питателем 10 на тракт сухого продукта 11.

Запыленные газы поступают в систему пылеулавливания: два циклона НИИОГаз 7 диаметром 3000 мм, два батарейных пылеуловителя БПР-100 12, два мокрых пылеуловителя МПР-100 15.

Тяга газов осуществляется двумя параллельными дымососами ДН-21 14.

Пыль, уловленная в аппаратах сухой ступени, через сдвоенные лопастные затворы 13 подается конвейером 9 на присадку к высушенному углю. Для выбросов топочных газов в атмосферу при остановках сушилки и во время розжига топки последние оборудуются растопочной трубой 3.

В качестве основного топлива используется природный газ, а резервного — мазут.

Сибгипрошахт предусматривает в проекте сушильного отделения углеобогадательной фабрики разреза «Нерюнгринский» (Южная Якутия) сушилки кипящего слоя производительностью 72,2 т/ч по испаренной влаге. Общий вид сушилки показан на рис. V.6. Проектные показатели этой сушилки следующие:

Производительность, т/ч:	
по исходному углю	623
по испаренной влаге	72,2
Удельный влагосъем, т/(м ² ·ч)	2,5
Влажность угля, %:	
начальная	17,8
конечная	5,0
Площадь газораспределительной решетки, м ²	29
Гранулометрический состав исходного угля, %:	
0—0,5 мм	55
0,5—30 мм	45

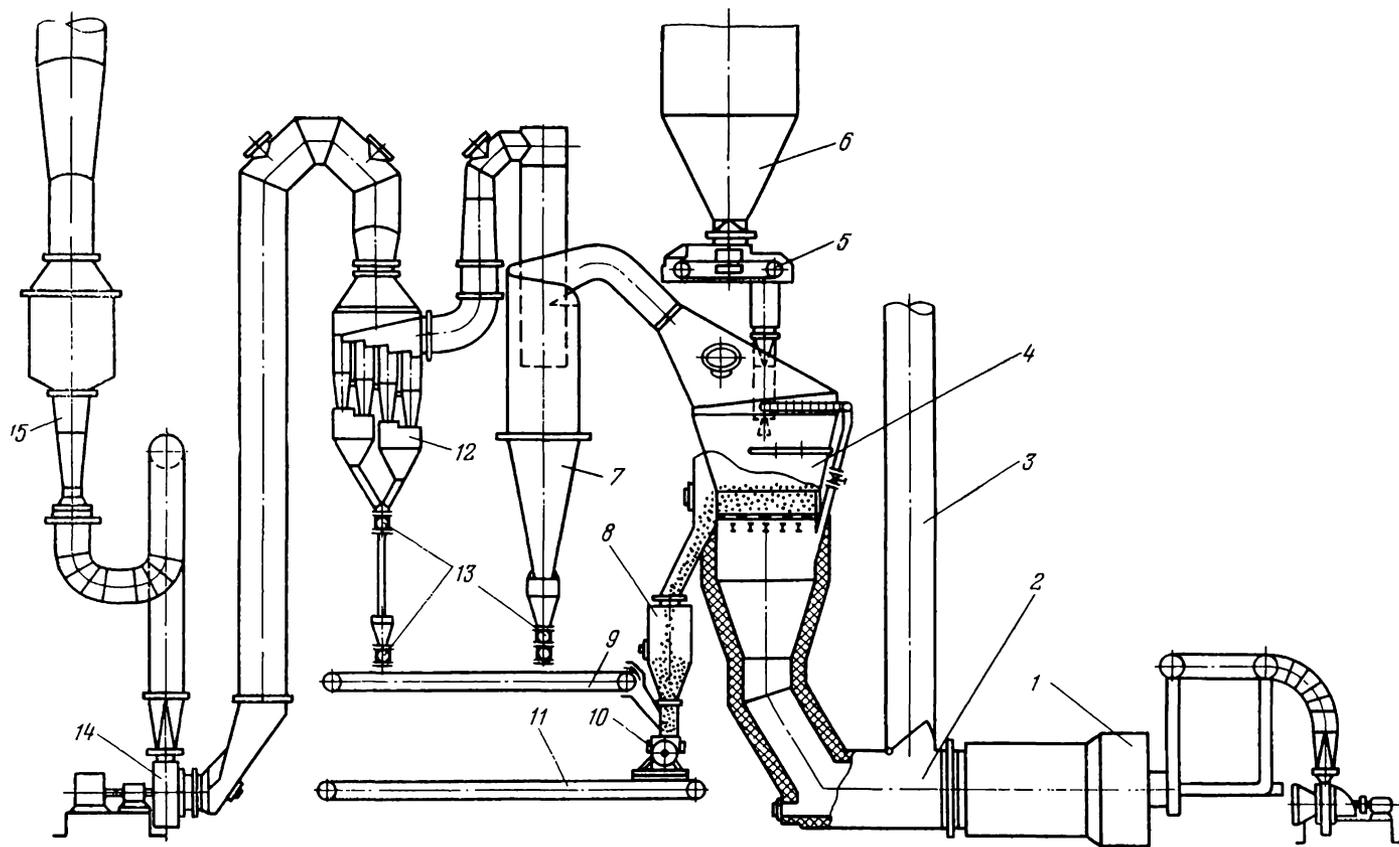


Рис. V.5. Схема сушильной установки ГОФ «Должанская-Капитальная»

Температура газов, °С:

на выходе из топки	500 — 600
на входе в сушилку	450 — 510
в сушильной камере	67 — 78
в циклоне	62 — 69
после дымососа	59 — 66

Объем газов, проходящих через сушилку, составляет 730 тыс. м³/ч, или 10 тыс. м³/ч на 1 т испаренной влаги. Влажный уголь с фабрики направляется в аккумулирующий бункер 1 емкостью 700 т. Наклонные стенки бункера на высоте 3,4 м зафутерованы нержавеющей сталью. Под бункером установлен вибрационный

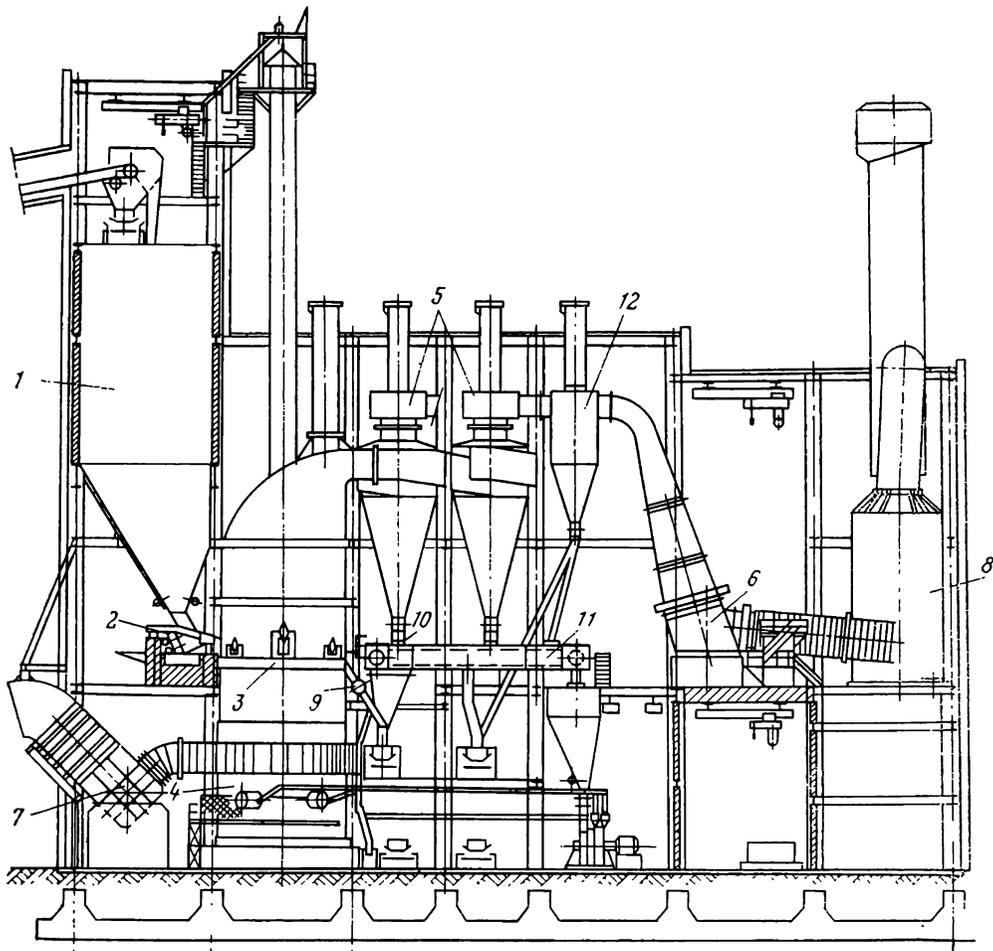


Рис. V.6. Сушилка кипящего слоя ОФ разреза «Нерюнгринский»

питатель 2, который подает уголь из бункера в сушилку. Сушильный аппарат площадью 29 м² имеет газораспределительную решетку 3 с живым сечением около 9% и наклоном 1,5°. Решетка состоит из продольно расположенных металлических прутков диаметром 22,2 мм с зазором между ними 3 мм. Она поддерживается попереч-

ными балками, имеющими устройства для возможности расширения их. Высота сушильной камеры около 18 м. Решетка и ее опоры изготовлены из нержавеющей стали. Под газораспределительной решеткой установлена вертикальная пылеугольная топка 4 круглого сечения диаметром 6,5 м, высотой 8 м, работающая на угольной пыли, которая улавливается в четырех циклонах 5 диаметром 4,5 м и в батарейных циклонах 12.

Тяга газов осуществляется двумя параллельно установленными дымососами с двусторонним всасом 6. Воздух в топку подается дутьевым вентилятором 7. Окончательная очистка газов происходит в двух мокрых скрубберах с трубой Вентури 8. Уголь с решетки в желоб разгружается с помощью шлюзового затвора 9. На выгрузке циклонов применены ротационные затворы 10, под которыми установлен конвейер 11.

Примечательной особенностью компоновки является размещение дымососа на верхнем перекрытии — сушильная камера выполнена в одном блоке с камерной топкой, работающей под давлением.

В полость, образуемую со стороны загрузки наклонной пластиной и решеткой, подается воздух через две трубы диаметром по 203 мм. Воздух нагнетается из воздушного короба топки.

На выходе высушенного угля с решетки в разгрузочный желоб установлено подпорное устройство, которое регулирует высоту взвешенного слоя в сушильной камере. Это устройство работает аналогично клапанной мигалке с противовесами. Подпор угля создается наклонной пластиной, расположенной по ширине разгрузочного бункера. Пластина крепится к подвескам, соединенным с валом. Концы вала выходят наружу и на них закрепляются рычаги с противовесами. Вследствие изменения положения груза на рычагах вала регулируется усилие, которое передается подпорной пластине. Минимальный зазор между торцами прутков решетки и подпорной пластиной устанавливается с помощью фиксатора; он равен 51 мм.

На предприятиях калийной промышленности нашли широкое применение сушилки кипящего слоя с сушильными камерами круглого и прямоугольного сечения с газораспределительными решетками площадью 3,1; 6,2; 8 и 9,0 м², в которых осуществляется сушка мелко- и крупнозернистого хлористого калия.

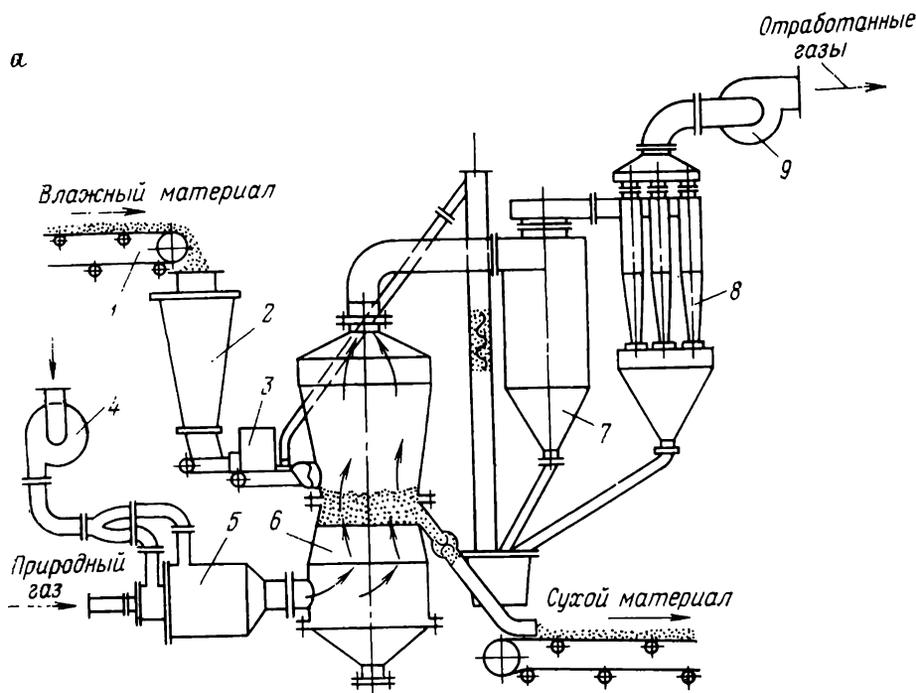
Техническая характеристика сушилки кипящего слоя для сушки калийной соли (рис. V.7) приведена ниже:

Расчетная производительность сушилки, т/ч	80—120
Влажность материала, %:	
начальная	5—10
конечная	0—0,1
Площадь решетки, м ²	8
Живое сечение, %	5
Унос соли из сушилки, %	15—18

Очистка дымовых газов от пыли хлористого калия осуществлялась в три стадии.

В качестве первой ступени пылеулавливания применен циклон диаметром 3200 мм; размеры входного патрубка 1000×700 мм; диаметр выходного патрубка 1730 мм.

Эксплуатация сушилок кипящего слоя на предприятиях производственного объединения «Уралкалий» показала, что при скорости газов 1,5—2,5 м/с имело место зарастание отверстий решетки солью, образование застойных зон и др. Для повышения надеж-



б

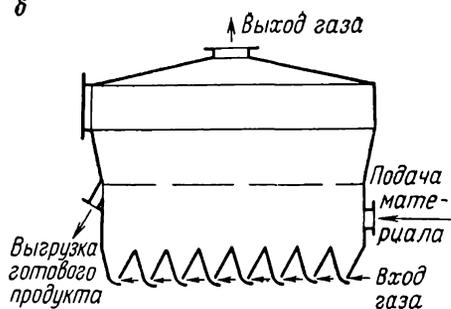


Рис. V.7. Сушильная установка кипящего слоя для сушки калийной соли (а) и щелевой сушильный аппарат вихревого слоя (б) Ленинградского технологического института:

1 — конвейер; 2 — бункер; 3 — питатель; 4 — вентилятор; 5 — топка; 6 — камера; 7 — циклоны; 8 — батарейный циклон; 9 — дымосос

ности работы сушилок при сушке калийных солей было предложено увеличить скорость газов в зоне газораспределительной решетки до 4—5 м/с. В табл. V.3 приведены показатели работы ряда сушилок кипящего слоя при сушке продуктов горно-химического сырья. Ленинградским технологическим институтом разработан щелевой аппарат вихревого слоя для сушки формовочного песка класса 0,1—0,4 мм (см. рис. V.7). Он состоит из нижней распре-

делительной части и сепарационного пространства. Распределительная часть предназначена для равномерной подачи теплоносителя по сечению аппарата.

Первая (нижняя) стенка ячейки имеет закругление с радиусом 22 мм. Вторая стенка прямая, жестко закрепленная, подходит к первой, образуя внизу аппарата боковую прерывистую щель. Скорость воздуха в щели 55—60 м/с, сопротивление аппарата 2300 Н/м², слоя — 2500 Н/м². Скорость воздуха по сечению зеркала слоя 1,4 м/с, в сепарационном пространстве — 0,9 м/с.

Таблица V.3

Показатели работы сушилок кипящего слоя при сушке горно-химического сырья

Наименование показателей	Хлористый калий			Калийно-магнийевый кхццентрат	Шенит	Поваренная соль
	мелкое зерно 0—1 мм	крупное зерно 0—30 мм	мелкое зерно 0—1 мм			
Производительность, т/ч:						
по исходному продукту	105,4	86,5	104,6	19,15	5,4	5,73
по испаренной влаге	5,4	6,5	4,6	5,25	1,4	0,23
Влажность продукта, %:						
начальная	5,5	7,7	4,5	28	28	5
конечная	0,5	0,2	0,1	1	3	1
Площадь газораспределительной решетки, м ²	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	1,45
Температура газов, °С:						
начальная	550	500	600	500	520	520
конечная	140	175	165	145	151	150
Температура продукта, °С:						
до сушки	20	20	20	20	20	20
после сушки	130	150	155	150	80	90
Влагонапряжение газораспределительной решетки, кг/(м ² ·ч)	675	813	575	656	175	160

Фонтанирование песка в аппарате со щелевидными подводами воздуха устойчивое, без застойных зон и с хорошей организацией движения потока материала.

Температура воздуха на входе в сушилку 270—300°С, в слое — 90—100°С. Влажность песка до сушки 9%, после сушки — 0,3—0,49%.

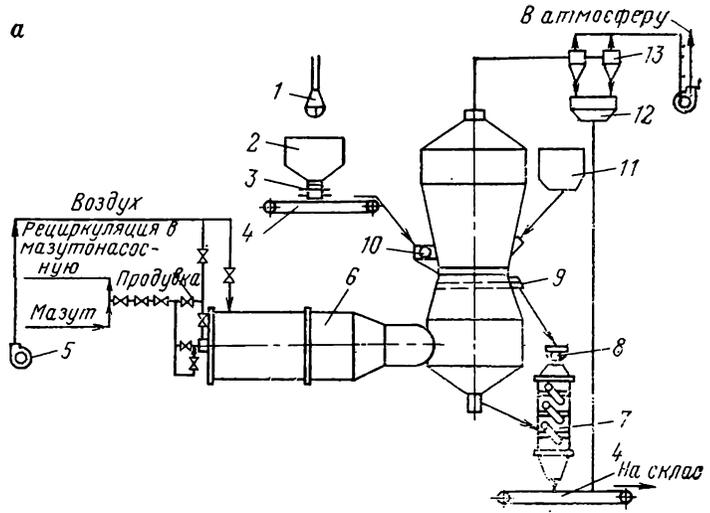
На Средне-Уральском медеплавильном заводе пущена в эксплуатацию сушилка кипящего слоя для сушки гранулированной шихты. Распределительная решетка шириной 1000 мм, длиной 1245 мм состоит из 58 воздухораспределительных коробов, в каждом из которых 15 колпачков с 10 отверстиями диаметром 5 мм. Общая площадь решетки 7,72 м², живое сечение решетки 6,5%. Производительность сушилки 35 т/ч, влагосъем 370 кг/(м²·ч), пылеунос из сушилки 1,57—3%. Влажность материала исходная 7,5—

10%, конечная 1,5%. Температура газов начальная 180—200°C, в слое — 40—70°C. Высота кипящего слоя 400 мм.

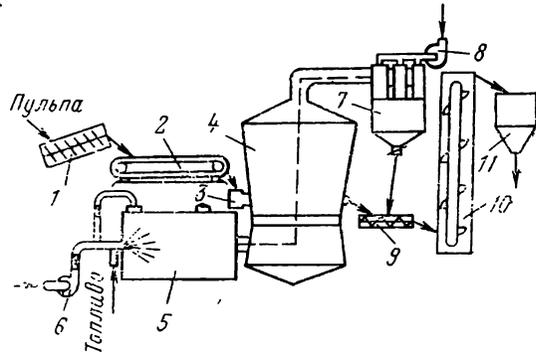
На Иршинском горно-обогатительном комбинате внедрена сушилка кипящего слоя для сушки ильменитового концентрата (рис. V.8).

Рис. V.8. Технологическая схема сушилки концентрата кипящего слоя:

а — для ильменитового; 1 — кран грейдерный; 2 — расходный бункер; 3 — тарельчатый питатель; 4 — ленточный конвейер; 5 — воздуходувка ИВ-18 № 9; 6 — топка для сжигания мазута; 7 — охладитель; 8 — секторный затвор; 9 — газораспределительная решетка; 10 — забрасыватель; 11 — бункер с сухим концентратом; 12 — бункер для пыли после циклонов; 13 — циклоны НИИЮГаз; б — для полевошпатового концентрата; 1 — классификатор; 2 — ленточный вакуум-фильтр; 3 — лопастной забрасыватель; 4 — печь кипящего слоя; 5 — выносная топка; 6 — дутьевой вентилятор; 7 — групповой циклон; 8 — дымосос; 9 — шнек; 10 — ковшовый элеватор; 11 — бункер



б



Диаметр топки 1000 мм, объем топочного пространства 1,9 м³, объем камеры смешения 2,72 м³, площадь газораспределительной решетки 1,77 м², живое сечение 6%, объем сушильной камеры 15 м³. Надрешетная полость расширяется кверху под углом 11° для образования сепарационной зоны. Топка футеруется хромомагнетитовым кирпичом. Между топкой и наружным кожухом создан зазор 40 мм, образующий канал для вторичного воздуха. Мазут в топку подается шестеренчатым насосом под давлением 1,5—2 кгс/см². Две форсунки низкого давления системы «Стальпроект» обеспечивают его сжигание. Газораспределительная решетка провального типа изготовлена из стали марки Ст. 3 толщиной 20 мм и установлена с температурным зазором 3 мм, заполненным асбестовой прокладкой. Решетка расположена раззенковкой вниз.

На сушку подается ильменитовый концентрат, содержащий более 80% класса 0,14—3 мм влажностью 5—8%. Тарельчатым питателем и конвейером концентрат направляется на механический забрасыватель, который установлен на высоте 1 м над газораспределительной решеткой. Теплоноситель под решетку подается с температурой до 560—600°C.

Над слоем поддерживается разрежение в пределах 80—100 Н/м². Запыленность газов, покидающих слой, не превышает 0,5% от производительности сушилки по сухому продукту.

Выгрузка сухого продукта производится на уровне решетки с помощью подпорного регулирующего устройства — секторного затвора. Сушилка выполнена герметично, запыленность воздуха вокруг нее отсутствует.

В схему установки включен охладитель, который снижает температуру концентрата до 80—90°C. Высушенный концентрат влажностью 0,6% конвейером подается на склад.

В период освоения сушилки проектная схема установки совершенствовалась. Так, при розжиге установки решетка нагревалась и при подаче на нее сырого концентрата коробилась, отверстия залипали. В результате этого решетка часто выходила из строя. Этот недостаток удалось устранить созданием первоначальной постели за счет дополнительного бункера с сухим концентратом.

ВНИИЦветметом совместно с Белогорским горно-обогатительным комбинатом проведены промышленные испытания сушилки кипящего слоя для полевошпатового концентрата (см. рис. V.8).

Она имеет высоту 3,7 м, площадь решетки 1,8 м², живое сечение 2%. Решетка выполнена из двух металлических секций толщиной 20 мм с отверстиями диаметром 4 мм. Разгрузочный порог сушилки установлен на высоте 300 мм от решетки. Для подачи топочных газов под решетку сушилка снабжена нижним конусом, футерованным шамотным кирпичом. Свод сушилки куполообразный с отверстием для отвода запыленных газов.

Выносная топка для сжигания жидкого топлива имеет цилиндрическую форму.

Воздух подается вентилятором ВВД-8 производительностью 10 тыс. м³/ч под давлением 4500 Н/м².

Система очистки газов от пыли состоит из группового циклона типа ЦН-24 (диаметр патрубка 500 мм) с шестью элементами. Тяговый режим создается с помощью дымососа Д-8 производительностью 10 тыс. м³/ч и развиваемым полным напором 1700 Н/м².

При помощи лопастного забрасывателя на сушку подаются предварительно отфильтрованные до влажности 10—15% полевошпатовые концентраты.

Средний диаметр частиц исходного концентрата менее 0,074 мм.

Скорость газов в кипящем слое 0,8—1,2 м/с. Температура в слое 120—130°C. Удельная производительность по концентрату составляет 110—130 т/(м²·сут), по влаге — 17—25 т/(м²·сут).

При сушке основное количество высушенного материала с остаточной влажностью 0,1—0,5% разгружается через сливной порог

(80—85%), 20—15% улавливается в циклоне в виде пыли и 0,2% пыли теряется во внешнюю среду с выбрасываемыми газами.

На очистку в групповой циклон газы поступают со средней температурой 110°C и с содержанием в них 169—250 г/м³ пыли.

ИОТТ проведены экспериментальные исследования полупромышленной сушилки взвешенного слоя при сушке различных углей. В табл. V.4 приведены показатели работы указанной сушилки.

На основании проведенных исследований институтом ИОТТ разработаны конструкции сушильных аппаратов, работающих на принципе взвешенного слоя, производительностью от 50 до 300 т/ч по исходному углю. Принципиальная схема сушилки показана на рис. V.9.

На Шаргуньской брикетной фабрике введена в эксплуатацию промышленная сушилка взвешенного слоя производительностью до 50 т/ч, в которой осуществля-

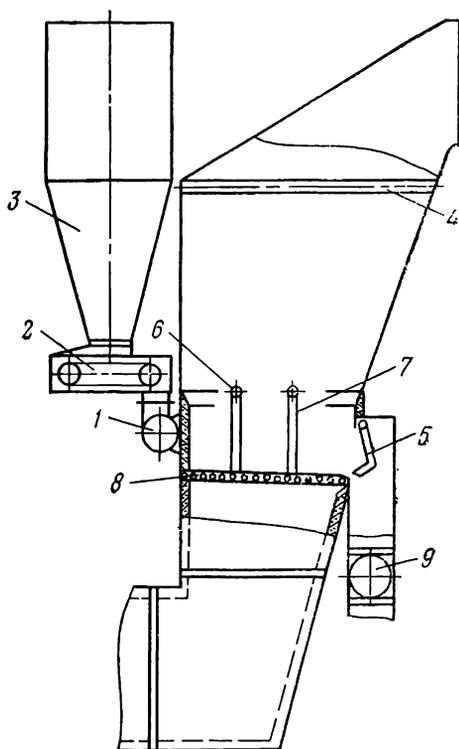
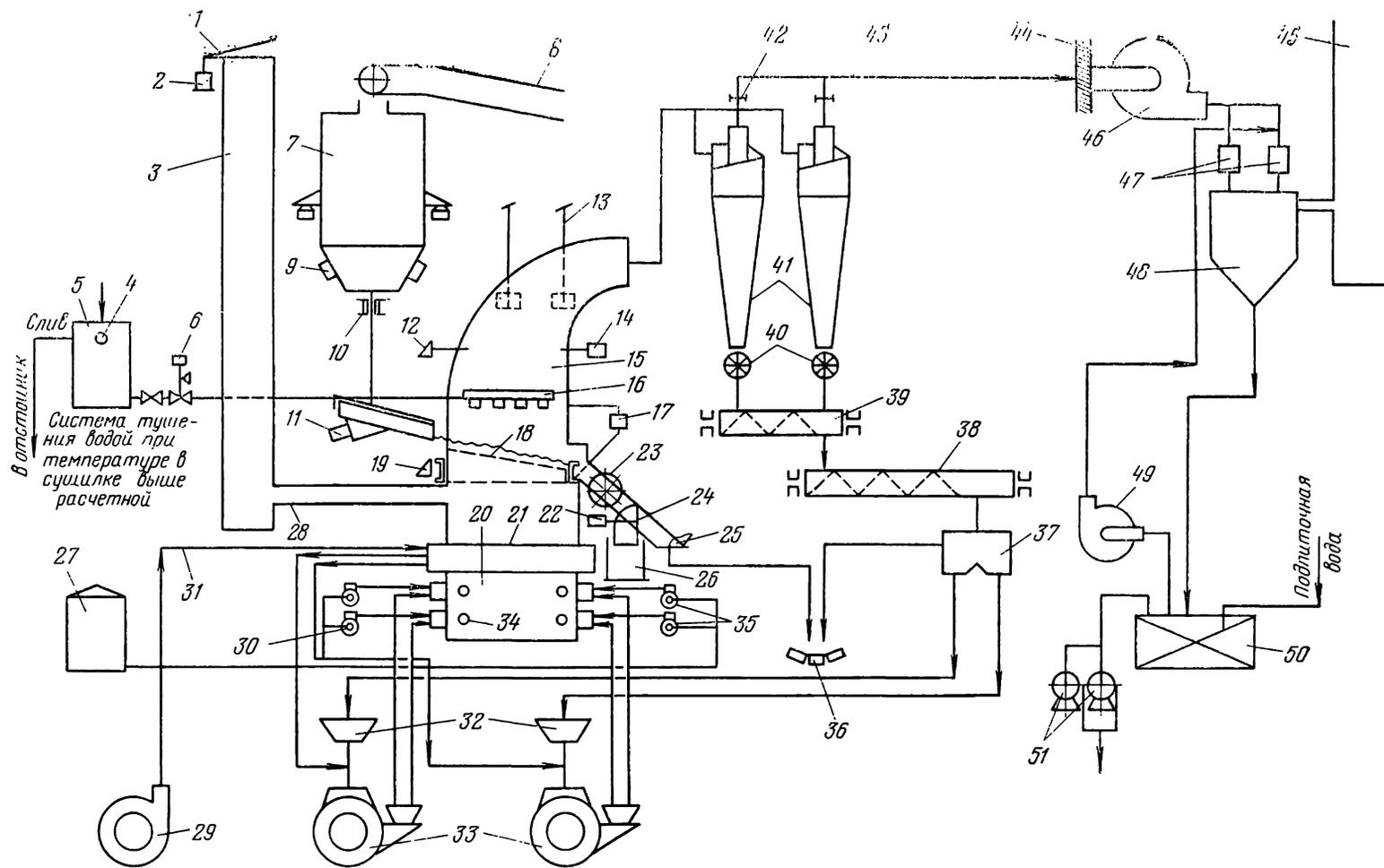


Рис. V.9. Сушилка взвешенного слоя института ИОТТ:

1 — забрасыватель; 2 — питатель скребковый; 3 — бункер; 4 — балка жесткости; 5 — подпальное устройство; 6 — балка опорная; 7 — штанга; 8 — газораспределительная решетка; 9 — питатель

Таблица V.4
Основные показатели работы полупромышленной сушилки взвешенного слоя при сушке углей

Производительность установки, т/ч		Влажность угля, %		Температура газов, °С		Удельный вла-госъем с площади решетки, т/(м ² ·ч)	Вид сушеного продукта
по сырому углю	по испаренной влаге	сырого	высушенного	под решеткой	на выходе из сушилки		
15,0	1,6	12,8	2,7	482	91	6,2	Концентрат 0—13 мм, ЦОФ «Кальмиусская»
15,5	1,4	12,6	3,9	500	94	5,6	
15,5	1,6	13,2	3,5	500	90	6,2	Концентрат 0—13 мм, ЦОФ «Березовская»
15,5	1,35	13,2	4,0	499	90	6,0	
15,0	1,46	14,0	4,7	500	100	5,9	Концентрат марки Г, 0—13 мм, ГОФ «Комсомолец»
15,5	1,8	15,4	4,5	510	95	7,1	



ется сушка и классификация угля. В настоящее время разработана сушилка взвешенного слоя ВСС-35 производительностью 35 т/ч по испаренной влаге. Сушилка предназначена для сушки углей крупностью до 50 мм.

Техническая характеристика сушилки ВСС-35:

Производительность, т/ч:	
по исходному углю	300
по испаренной влаге	35
Влажность, %:	
начальная	18
конечная	6
Площадь решетки, м ²	12
Температура газов, °С:	
начальная	600
конечная	100
Удельный влагосъем с 1 м ² решетки, т/(м ² ·ч)	3,0
Сопrotивление решетки, Н/м ²	1500
Живое сечение решетки, %	10

На углеобогатительных фабриках США преобладающее распространение получили сушилки взвешенного (кипящего) слоя с прямоугольным сечением сушильной камеры и с газораспределительными решетками, рабочая поверхность которых выполнена из металлических прутков круглого сечения.

Сушилки кипящего слоя в США проектируются и строятся в основном фирмами «Мак-Нелли Питтсбург», «Хейл энд Паттерсон», «Линк-Белт» и «Дорр-Оливер».

Фирма «Мак-Нелли» выпускает сушилки кипящего слоя производительностью от 2 до 80 т/ч по испаренной влаге, которые называются «Флоу-Драйер». На рис. V.10 показана технологическая схема сушилки кипящего слоя фирмы «Мак-Нелли» с газораспределительной решеткой площадью 20,5 м².

Техническая характеристика сушилки фирмы «Мак-Нелли»:

Производительность, т/ч:	
по испаренной влаге	42,2—47,7
по исходному углю	515,3—522,3
Влажность, %:	
исходного угля	11,6—13,6
высушенного угля	5,2—5,6
Объем газов на выходе из сушилки, тыс. м ³ /ч	
Удельная нагрузка по съему влаги с 1 м ² решетки, т/(м ² ·ч)	440 2,6
Температура газов, °С:	
под газораспределительной решеткой	500
над взвешенным слоем	80
перед дымососом	75

Рис. V.10. Схема сушилки кипящего слоя фирмы «Мак-Нелли» (США):

1 — клапан растопочной трубы; 2 — пневмопривод; 3 — растопочная труба; 4 — поплавковый выключатель; 5 — резервуар воды; 6 — задвижка; 7 — бункер; 8 — ленточный конвейер; 9 — вибратор; 10 — шибер; 11 — вибрационный питатель; 12 — термометр; 13 — взрывной клапан; 14 — датчик давления; 15 — сушильная камера; 16 — брызгала; 17 — дифференциальный датчик давления; 18 — решетка; 19 — термометр; 20 — толка; 21 — воздушный короб; 22 — пневмопривод; 23 — шлюзовой затвор; 24 — поворотная заслонка; 25 — клапанная мигалка; 26 — бункер; 27 — мазутохранилище; 28 — газоход; 29 — дутьевой вентилятор; 30 — мазутный насос; 31 — трубопровод дутьевого воздуха; 32 — питатель; 33 — молотковая мельница; 34 — датчик контроля пламени; 35 — мазутный насос; 36 — ленточный конвейер; 37 — бункер угля для мельниц; 38, 39 — шнековые конвейеры; 40 — шлюзовые затворы; 41 — циклоны; 42 — шибер; 43 — газоход; 44 — направляющий аппарат; 45 — дымовая труба; 46 — дымосос; 47 — труба Вентура; 48 — каплеуловитель; 49 — насос скруббера; 50 — бак; 51 — насос бака

Давление газозвушной смеси под газораспределительной решеткой, Н/м ²	3300
Разрежение над газораспределительной решеткой (в зоне кипения угля), Н/м ²	0—250
Аэродинамическое сопротивление сушильного тракта, Н/м ²	9940
В том числе:	
сушильная камера с газораспределительной решеткой	3550
Мощность электродвигателей, кВт:	
дымососа	1860
дутьевого вентилятора	480

Фирмой «Хейл энд Паттерсон» разрабатываются сушилки взвешенного слоя для сушки угля, песка, фосфатов и других материалов. Для сушки угля фирмой выпускаются сушилки взвешенного слоя шести типоразмеров производительностью от 10 до 45 т/ч по испаренной влаге (рис. V.11). Сушилка состоит из слоевой топки 1 с вибрационной колосниковой решеткой, работающей под разрежением сушильной камеры 2 прямоугольного сечения, валкового

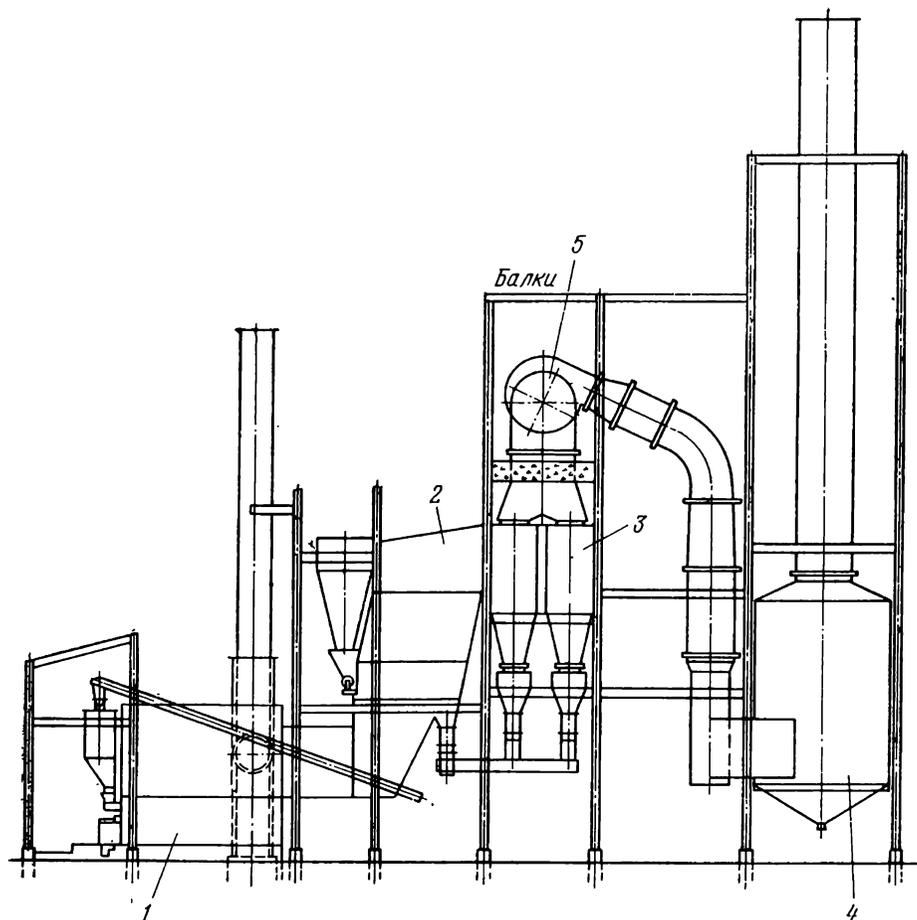


Рис. V.11. Схема сушилки кипящего слоя фирмы «Хейл энд Паттерсон» (США)

питателя, двух или четырех спаренных циклонов 3, одного мокрого пылеуловителя с трубой Вентури 4, дымососа 5, дутьевого вентилятора, вентилятора острого дутья, клапанных мигалок, шнеков и конвейеров.

В прямоугольной сушильной камере обеспечивается равное время пребывания (5 с) и одинаковая сушка для всех частиц продукта.

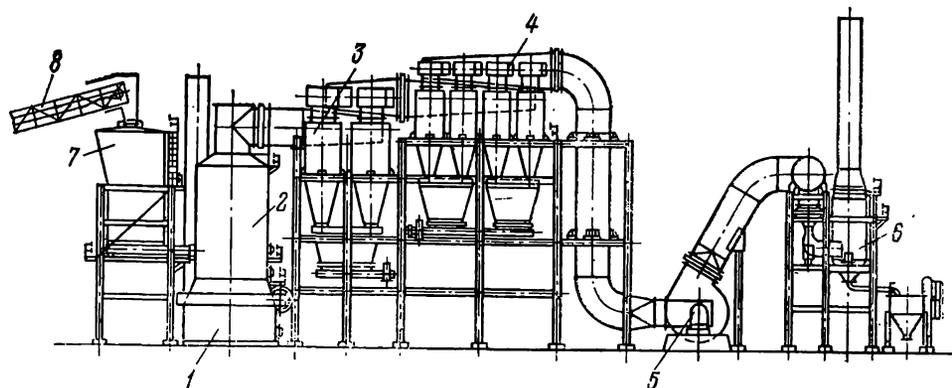


Рис. V.12. Схема сушилки кипящего слоя фирмы «Дорр-Оливер» (США):

1 — топка; 2 — сушилка; 3 — циклоны первой ступени пылеулавливания; 4 — циклоны второй ступени пылеулавливания; 5 — дымосос; 6 — мокрый скруббер; 7 — бункер; 8 — конвейер подачи угля

Скорость газов в верхней части камеры 3,6 м/с, в зоне взвешенного слоя 5,5 м/с. Участок стенок камеры в зоне активного кипения материала имеет защитную антиабразивную футеровку высотой от решетки 315 м. Высота взвешенного слоя 450—500 мм. Уголь в сушилку подается на высоте 600 мм от решетки.

Питатель исходного угля представляет собой вращающийся с постоянной скоростью цилиндрический барабан с секторным затвором, который равномерно распределяет исходный уголь по сечению сушильной камеры.

Барабан питателя имеет диаметр 914 мм и длину, равную ширине решетки — около 3000 мм. На выгрузке угля с решетки предусмотрены две заслонки. Верхняя заслонка высотой 900 мм управляется вручную, нижняя (донная) имеет высоту 450 мм и управляется автоматически.

Сушилки фирм «Линк-Белт» и «Хейл энд Паттерсон» имеют много одинаковых узлов: слоевые топки с вибрационными колосниковыми решетками, работающими под разрежением, валковые питатели на загрузке угля в сушилку и др.

Сушилка кипящего слоя фирмы «Линк-Белт» с газораспределительной решеткой площадью 13 м² имеет производительность 320 т/ч по исходному углю и 20 т/ч по испаренной влаге. На сушку поступают уголь крупностью 0—32 мм, в том числе 20% угля крупностью до 32 мм, 60% угля класса 0,5—18 мм и 20% флотоконцентрата (менее 0,5 мм).

Влажность сушимой шихты начальная 10—12%, конечная — 5—6%.

Мелкие угольные частицы, выносимые из сушильной камеры, улавливаются в батарейном циклоне (мультициклоне).

Для сушки глины, доломита, известняка, цемента, мергеля и угля в США нашли применение сушилки кипящего слоя фирмы «Дорр-Оливер» системы Флоу-Солидз круглого сечения, выполненные в одном блоке с пылеугольной топкой, работающей под давлением.

В настоящее время в эксплуатации находятся сушилки кипящего слоя фирмы «Дорр-Оливер» (рис. V.12) с решетками площадью 2, 4, 5, 7, 10, 12, 14 и 16 м².

Технологические показатели работы сушилки производительностью 70 т/ч по испаренной влаге следующие:

Производительность, т/ч:	
по исходному углю	548
по испаренной влаге	70
Влажность угля, %:	
до сушки	18
после сушки	7
Площадь решетки, м ²	28
Температура газов, °С:	
под решеткой	600—700
в слое угля	68—75
перед дымососом	60—65
Влагосъем, т/(м ² ·ч)	2,5
Крупность сушимого угля, мм	0—32
Сопrotивление газораспределительной решетки, Н/м ²	5000

Скорость газов в сушильной камере около 3 м/с, влагосодержание газов на входе в циклоны 0,2 кг/м². В сушильной камере одновременно находится около 12 т материала.

Таблица V.5

Показатели работы сушилки кипящего слоя фирмы «Дорр-Оливер»

Материал	Диаметр аппарата, м	Производительность, т/ч	Размер частиц, мм	Начальная влажность, %	Температура газов, °С	
					на входе	на выходе
Доломит	1,7	45	4,7—0,2	2,0	400	75
Известняк	2,75	125	—	2—3	—	100
Цемент	3,7	150	6,5	5,0	150—200	—
Мергель	1,2	60	9,5	2,5	—	52

Разделительной частью сушильной и топочной камер является керамическая газораспределительная решетка.

Топка не имеет механизированного шлакозолоудаления, так как в ней сжигают уголь зольностью не более 9—10%.

Узел загрузки сырого угля в сушилку состоит из бункера прямоугольного сечения 6000×4500×4500 мм объемом 160 м³. Время

опорожнения бункера 15 мин. Он изготовлен из малоуглеродистой стали с покрытием толщиной 2 мм из нержавеющей стали марки 08X18H10 и оснащен вибратором.

В качестве питателя применен сдвоенный шнек диаметром 900 мм, длиной 7000 мм; частота вращения одного шнека 18 об/мин, другого — 20 об/мин.

При сушке глины в сушилках кипящего слоя фирмы «Дорр-Оливер» (США) производительностью 10 т/ч влажная глина, содержащая 5—6% влаги и имеющая 97% частиц размером 0,2—2,8 мм, направляется в верхнюю сушильную камеру, а затем досушивается в камере, расположенной ниже. Так как глина во избежание окисления должна сушиться при небольшом содержании кислорода в дымовых газах, для снижения температуры газов с 1200 до 450°C в камеру смешения впрыскивается вода.

Показатели работы сушилки кипящего слоя фирмы «Дорр-Оливер» системы Флоу-Солидз при сушке доломита, известняка, цемента и мергеля приведены в табл. V.5.

§ 3. ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ РЕШЕТКИ

Работоспособность и надежность работы сушилок кипящего слоя во многом зависят от конструкции газораспределительной решетки.

С этой целью конструкции решеток должны выполняться прочными, термоустойчивыми и коррозионностойкими. Прочность газораспределительной решетки создается необходимым числом поддерживающих балок достаточной жесткости, которые не перекрывают живое сечение решетки и оказывают минимальное сопротивление газовому потоку.

Наибольшее распространение получили перфорированные решетки, которые применяются в аппаратах при сушке калийной соли, угля и других материалов. Эти решетки состоят из отдельных перфорированных секторов, уложенных на две полые опорные балки и на сварное периферийное кольцо. Площадь отверстий составляет 5—8% общей площади решетки. Диаметр отверстий 5 мм. Опыт работы перфорированной решетки на сушилке кипящего слоя Днепродзержинского КХЗ при сушке угля показал, что срок службы решетки не превышает 20—25 дней. Перфорированные решетки (диаметр отверстий 5—6 мм, живое сечение около 5%) сложны в изготовлении, легко забиваются, чистка их весьма затруднительна. Кроме того, между выходящими из отверстий газовыми струями материал лежит, т. е. имеются застойные зоны. В ряде случаев это приводит к заплыванию отверстий материалом или к его перегреву. На рис. V.13 показаны схемы щелевых газораспределительных решеток, которые нашли применение при сушке различных материалов в сушилках кипящего слоя. Решетки (см. рис. V.13, а, б, в) создают более благоприятные условия равномерного кипения слоя, т. е. они образуют как бы локальные очаги кипящего слоя.

На сушильной установке Донецкого КХЗ в качестве газораспределительного устройства использована газораспределительная решетка, выполненная в виде отдельных полок (пластин), установленных параллельно одна над другой. В результате прохождения теплоносителя через поперечные щели, образованные пластинами, материал сдувается с пластины на пластину в направлении выгрузки и сушится в так называемом «сдуваемом» слое (см. рис. V.13,з). Решетка обеспечивает перемещение материала в горизон-

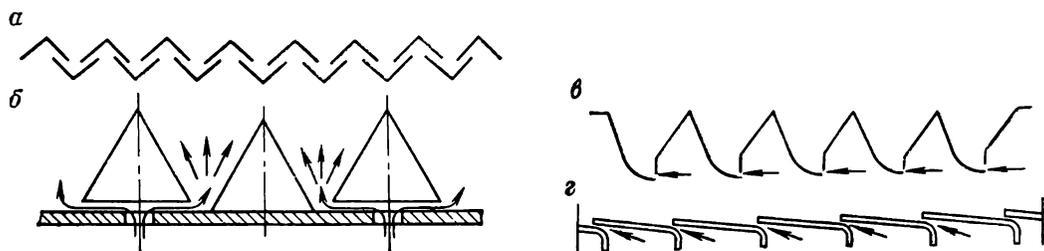


Рис. V.13. Схемы щелевых газораспределительных решеток

тальном направлении вблизи решетки, т. е. в зоне наиболее высоких температур. Тепло отводится от решетки интенсивно, застойные зоны полностью отсутствуют, практически отсутствует также провал через решетку. Опыт эксплуатации этих решеток показал их достаточно высокую надежность. Такую решетку рекомендуется использовать для комкующихся материалов. Для волокнистых продуктов следует предпочесть желобчатое днище с закручиванием частиц в нижней части аппарата (газы подаются тангенциально через вертикально установленную пластину с несколькими рядами отверстий) (см. рис. V.13,в). На рис. V.14,а показана газораспределительная решетка с продольным размещением металлических прутков.

Она состоит из прутков круглого сечения диаметром 16 мм, расположенных вдоль движения материала, с зазором между ними 2,4 мм, с уклоном $1/25$ к выгрузке. Живое сечение решетки 8%, скорость газов в зазорах между прутками 130—150 м/с. Каждый пруток длиной 4,5 м свободно лежит в полукруглых пазах поперечных балок. Со стороны загрузки концы прутков защемлены от осевого и вертикального смещения пластиной, а другие концы прутков свободны. Поперечные балки, на которых лежат прутки, сварены из вертикально расположенных пластин и опираются на заделанные в стенку сушильной камеры опоры решетки. Один конец балки защемлен в опорах решетки болтами, а другой, расширительный, свободно опирается на брусья, которые входят в пазы опор решетки.

На рис. V.14,б показан поперечный разрез газораспределительной решетки, которая изготовлена из прутков круглого сечения диаметром 22,2 мм, расположенных вдоль сушильной камеры,

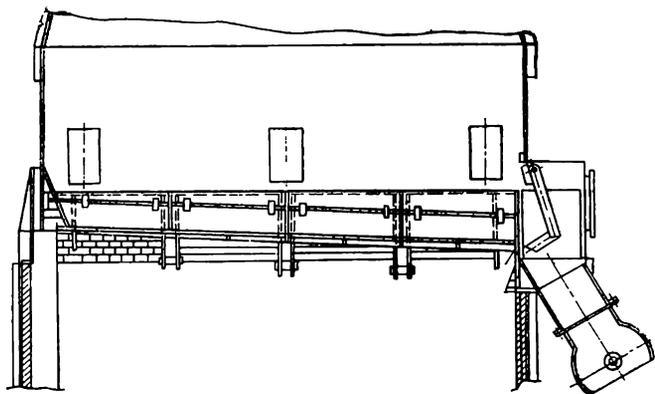
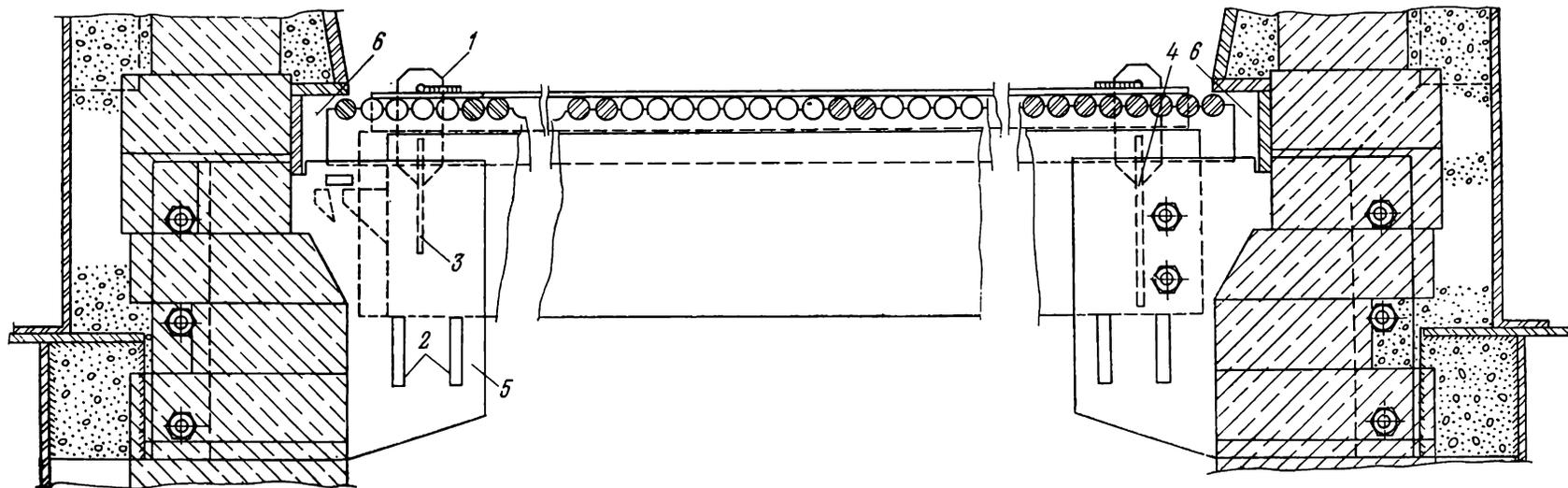


Рис. V.14. Газораспределительная решетка с продольным размещением прутков и поперечное сечение газораспределительной решетки с продольным размещением прутков

б



с зазором между ними 2,34 мм. Прутки изготовлены из нержавеющей стали X18H10. Каждый ряд прутков, расположенных по длине решетки, разрезан на ряд отрезков, длиной 1160 мм каждый, зазор между отрезками на их стыке 25 мм.

К боковым стенкам сушильной камеры приварены вертикальные пластины, к которым болтами крепятся опоры решетки, имеющие брусья. На брусьях опор решетки установлены поперечные балки. Один конец балок защемлен болтами в опоре решетки, другой конец, расширительный, имеет возможность перемещаться, скользя по брусьям опор решетки, в пределах теплового зазора.

Вдоль поперечной балки в пазах установлены (без крепления) две пластины с полукруглыми пазами. Прутки своими концами уложены в полукруглые пазы и прижаты сверху полосой-профилем, в который входит проушина поперечной балки, удерживаемая прутком-фиксатором.

Пруток-фиксатор вставляется в ушко проушины и гнется после того, как все прутки решетки установлены на место.

На рис. V.15,а показан общий вид газораспределительной решетки с поперечным расположением металлических прутков. Решетка имеет подвесные штанги, равномерно расположенные по сечению сушильной камеры, которые воспринимают большую часть нагрузки от силы тяжести конструкции решетки и материала, одновременно находящегося в сушилке. В результате этого отпадает необходимость в применении балок-опор под решеткой, что значительно снижает металлоемкость конструкции и увеличивает ее срок службы.

Отдельные узлы этой газораспределительной решетки показаны на рис. V.15,б.

Поверхность решетки состоит из металлических прутков круглого сечения диаметром 20 мм, установленных горизонтально с зазором между ними 2,5 мм. Вся поверхность решетки разбита на три продольные секции. В каждой секции по два швеллера 1 специальной конструкции, в пазы которых уложены прутки 2. На каждом прутке с одной стороны приварены скобы 3 толщиной 2,5—3,0 мм для выдерживания зазоров. Стержни с приваренными скобами уложены в пазы швеллеров в шахматном порядке и фиксированы прижимными устройствами 4, приваренными к одному из концов швеллера.

Прижимное устройство состоит из корпуса 5, болта 6, пружины 7 и упорного штока 8.

Прутки и швеллеры с прижимным устройством изготовлены из жаропрочной стали X18H10. Гидравлическое сопротивление решетки 1000—1200 Н/м².

Газораспределительная решетка с вращающимися прутками, продольно расположенными в сушильной камере, показана на рис. V.16.

Она установлена горизонтально и состоит из круглых прутков диаметром 30 мм, которые свободно лежат на поперечных балках-гребенках 2. Каждый из них имеет возможность поворачиваться

вокруг своей продольной оси. Со стороны загрузки угля в сушилку прутки выходят наружу через стенку 3 сушильной камеры 4, а концы 5 прутков 1 загнуты под углом 90° поочередно вверх и вниз. Загнутые концы прутков расплющены и имеют вертикальные пазы, в которые свободно продеты пальцы 6 жесткой прямо-

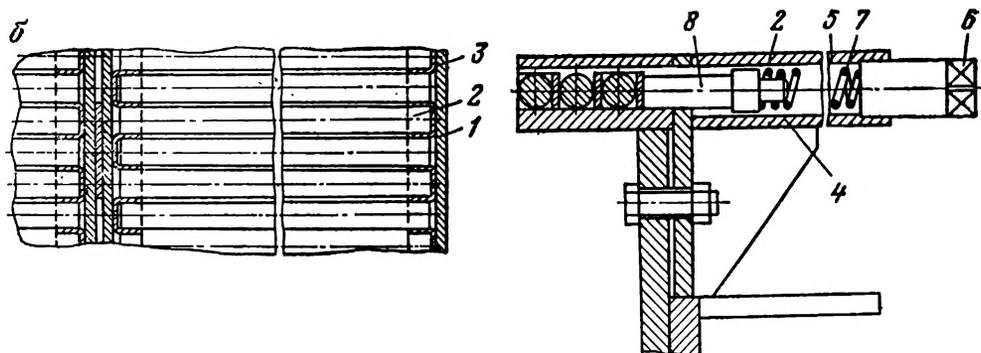
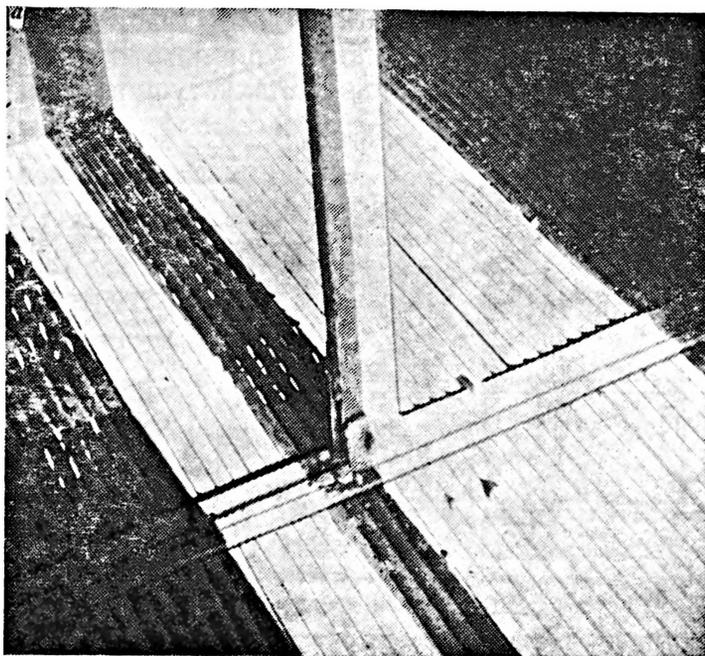


Рис. V.15. Общий вид (а) газораспределительной решетки с поперечным размещением прутков в сушильной камере и отдельные узлы (б) газораспределительной решетки с поперечным размещением прутков

угольной рамы 7. Рама совершает горизонтальное возвратно-поступательное движение в направляющих роликах 8 под действием кривошипно-шатунного механизма 9, угловая скорость вращения которого около 30 об/мин.

Направляющие ролики 8 ограничивают прутки 1 решетки от продольного смещения. От вертикального смещения прутки 1 ре-

шетки ограничены расположенными под ними поперек прутками 10, которые тугами 11 крепятся к поперечному стержню 12.

Движение рамы вызывает поворот прутков на определенный угол, причем направление вращения рядом лежащих прутков противоположно. Знакопеременное вращение прутков исключает возможность забивания решеток.

На рис. V.17 показана металлическая газораспределительная решетка с колпачковыми насадками сушилки кипящего слоя круглого сечения, которая предназначена для сушки песка.

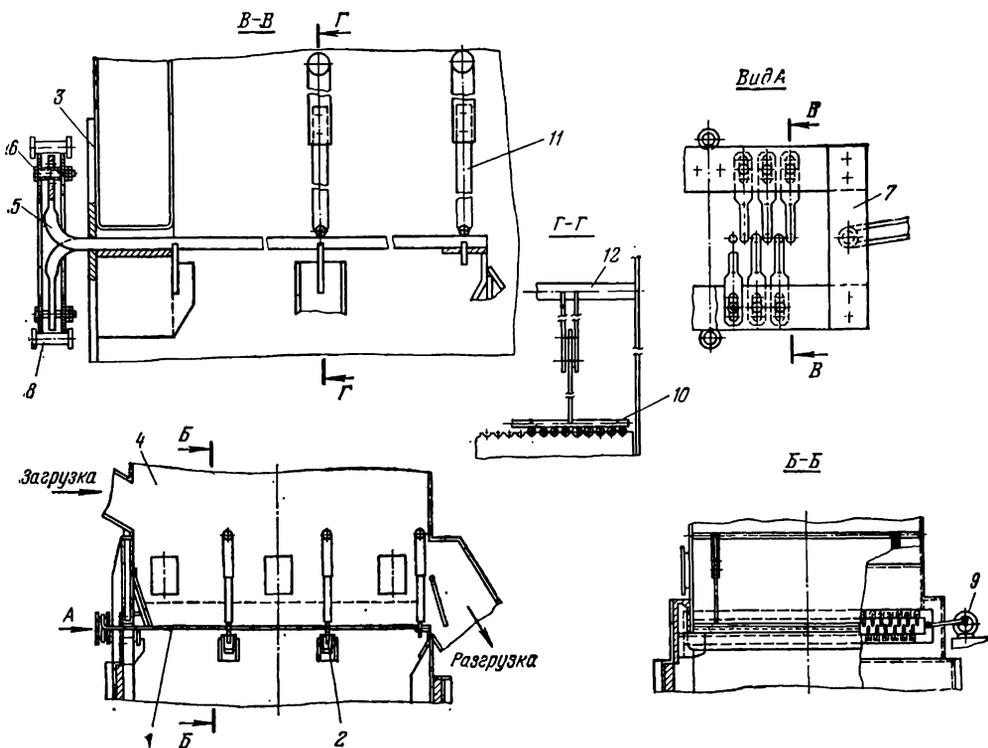


Рис. V.16. Газораспределительная решетка с вращающимися прутками, продольно расположенными в сушильной камере

К стенке сушильной камеры диаметром 3582 мм, площадью 10 м² привариваются опорные пластины, соединенные двумя кольцевыми пластинами, образующими паз с тепловым зазором 25,4 мм. В эти пазы вставляется газораспределительная решетка, которая собирается из шести секторов, имеющих ребра жесткости. Крепление секторов решетки друг к другу осуществляется болтами.

Шесть секторов образуют горизонтальную газораспределительную поверхность, имеющую 130 отверстий диаметром 40 мм, в которые вставлены и закреплены точечной сваркой колпачковые насадки. Колпачковые насадки изготовлены из жаропрочной стали и имеют восемь боковых отверстий диаметром 6,35 мм, расположенных равномерно по окружности колпачковой насадки.

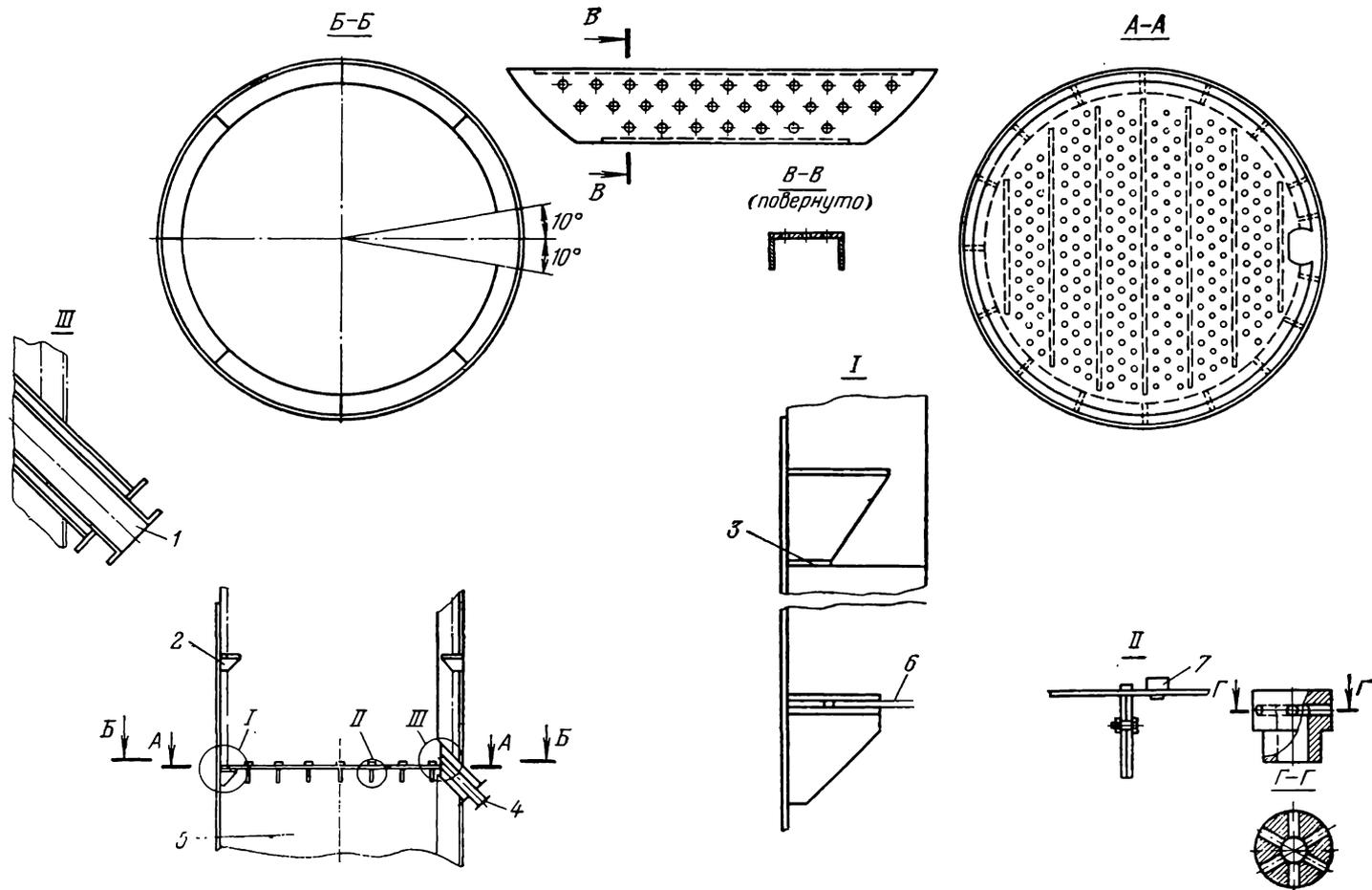


Рис. V.17. Металлическая газораспределительная решетка круглого сечения с колпачковыми насадками:
 1, 4 — разгрузочная труба; 2, 3 — отражательные кольца; 5 — редуктор; 6 — решетка; 7 — фура

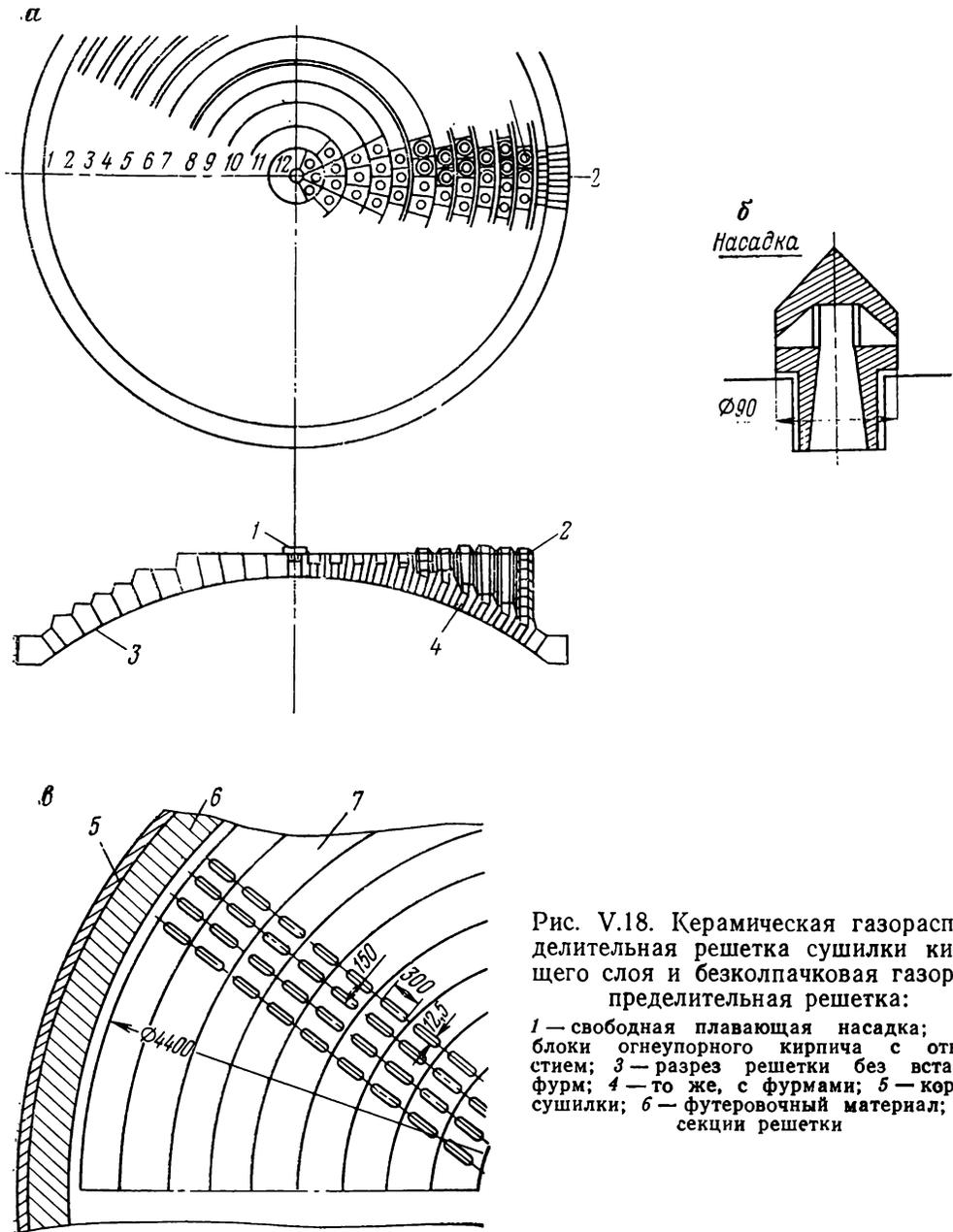


Рис. V.18. Керамическая газораспределительная решетка сушилки кипящего слоя и безколпачковая газораспределительная решетка:

1 — свободная плавающая насадка; 2 — блоки огнеупорного кирпича с отверстием; 3 — разрез решетки без вставки фурм; 4 — то же, с фурмами; 5 — корпус сушилки; 6 — футеровочный материал; 7 — секции решетки

Горизонтальное расположение отверстий в сочетании с большой скоростью прохода газов через отверстия колпачковой насадки исключает провал материала через решетку и забивание отверстий. Гидравлическое сопротивление газораспределительных решеток этой конструкции составляет 2500—3000 Н/м².

На рис. V.18,а показана конструкция керамической газораспределительной решетки сушилки кипящего слоя, предназначенная для сушки угля, фосфатов, песка и др.

Решетка диаметром 6 м состоит из керамического основания с отверстиями и набора керамических форм-втулок, которые вставлены в отверстия. Керамическое основание имеет форму шарового сегмента с радиусом сферы 4300 мм.

Промежутки между установленными на место керамическими формами-втулками заливаются жаропрочным цементом, образуя монолит с плоской поддерживающей поверхностью, имеющей радиальное расположение отверстий, в которые вставляются и удерживаются на плоскости силой своего веса грибообразные плавающие насадки с боковыми отверстиями. Плавающая насадка (рис. V.18,б) изготавливается из специального жаропрочного сплава.

Скорость газовой струи на выходе из насадки около 60 м/с. Давление газов под газораспределительной решеткой 6000—10000 Н/м².

Разработана конструкция керамической безколпачковой газораспределительной решетки (рис. V.18,в), которая проста и надежна в работе.

СУШИЛКИ ПАРОВЫЕ ТРУБЧАТЫЕ, ТАРЕЛЬЧАТЫЕ, ПНЕВМОПАРОВОДЯНЫЕ, ПАРОГАЗОВЫЕ И СУШКА ПАРОМ

§ 1. ПАРОВЫЕ ТРУБЧАТЫЕ СУШИЛКИ

Сушилки этого типа получили широкое применение на углебрикетных фабриках для сушки бурых углей, на торфобрикетных заводах для сушки торфа, на электростанциях для подсушки бурого и каменных углей, а также и в химической промышленности для сушки кристаллических материалов.

Паровые трубчатые сушиллки являются аппаратами, работающими при давлении греющего пара 0,35—0,40 МПа.

Сушка проходящего по трубам материала осуществляется за счет скрытой теплоты парообразования при конденсации пара, подаваемого в межтрубное пространство сушилки.

Сушильная установка с паровой трубчатой сушилкой показана на рис. VI.1. Она состоит из сушилки 1, бункера 2, электрофилт-ра 3, загрузочного 4 и разгрузочного 5 устройств.

Паровые трубчатые сушиллки имеют следующие преимущества: сравнительная простота в эксплуатации; небольшой унос материала; низкая энергоемкость сушилки.

Использование этой сушилки на электростанциях для подсушки топлива отработанным паром турбины дает сравнительно большой экономический эффект.

К недостаткам паровых трубчатых сушилок можно отнести: довольно большую разность во влажности мелких и крупных частиц в высушенном материале; низкую эффективность работы при сушке материалов с повышенным содержанием поверхностной влаги; высокую металлоемкость, превышающую 20 т металла на 1 т испаренной влаги.

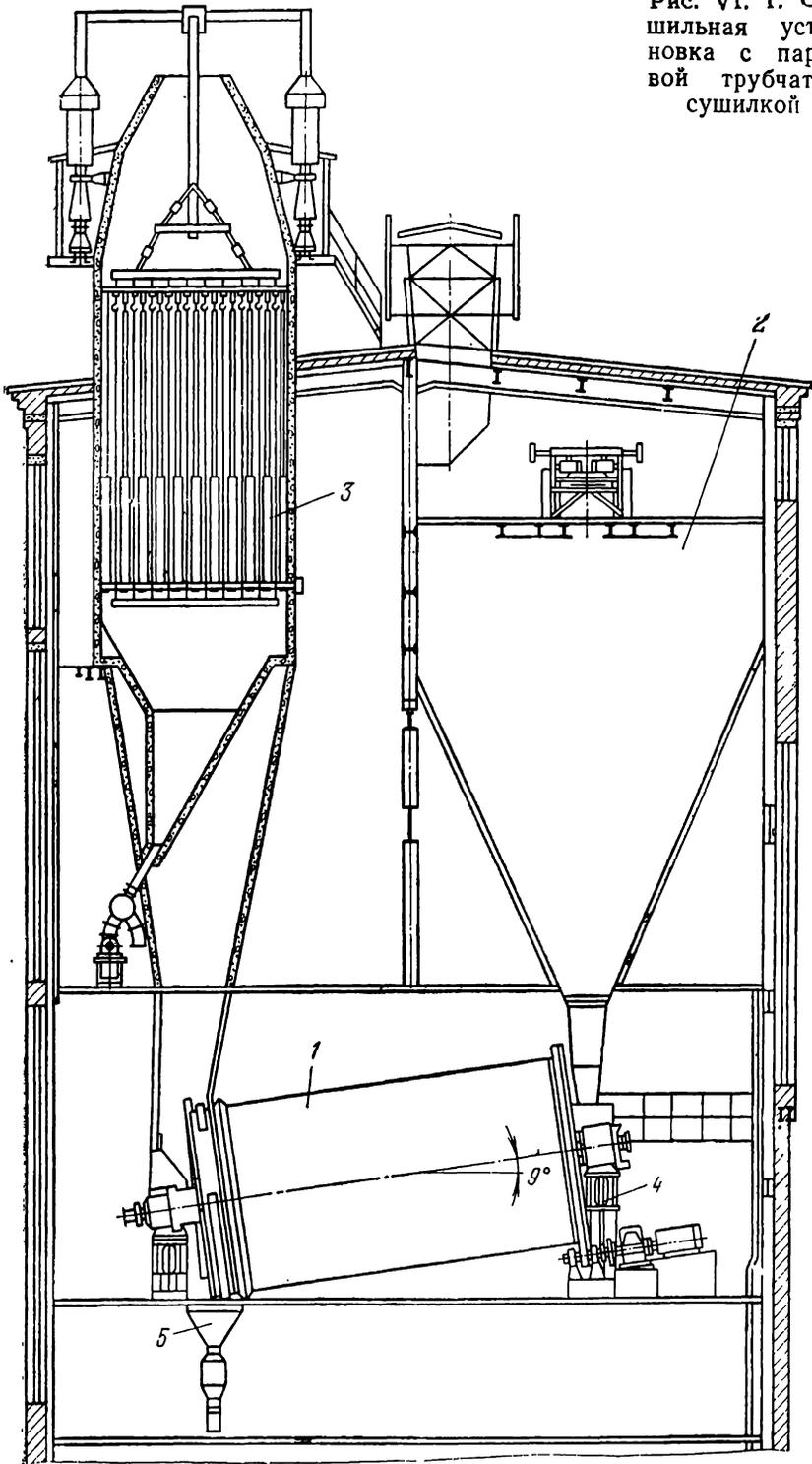
Работа паровых трубчатых сушилок характеризуется: удельным расходом тепла на 1 кг испаренной влаги Σq ; напряжением поверхности нагрева по влаге a [кг/(м²·ч)], т. е. количеством влаги, испаряемой с 1 м² поверхности нагрева сушилки в 1 ч; удельным расходом пара на 1 кг испаренной влаги $d_{\text{п}}$ (кг/кг).

ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ СУШИЛОК

Работа паровых трубчатых сушилок определяется эффективностью процесса сушки материала при прохождении его через трубки сушилки. Движение сыпучего материала в трубках сушилок представляет собой сложный процесс.

Пропускная способность сушильной трубки и скорость движения материала в ней зависят от степени среднего заполнения труб-

Рис. VI. 1. Су-
шильная уста-
новка с паро-
вой трубчатой
сушилкой



ки, ее наклона, угла естественного откоса материала и угла наклона плоскости пересыпания к оси трубки, зависящего от вставок в трубке.

На рис. VI.2,а показаны различные моменты пересыпания угля по свободной поверхности в трубке, вращающейся по окружности. Независимо от положения трубки относительно оси вращения подъем материала в ней в течение одного оборота происходит в сторону, обратную вращению, при этом сохраняется наклон поверхности материала соответственно в сторону вращения.

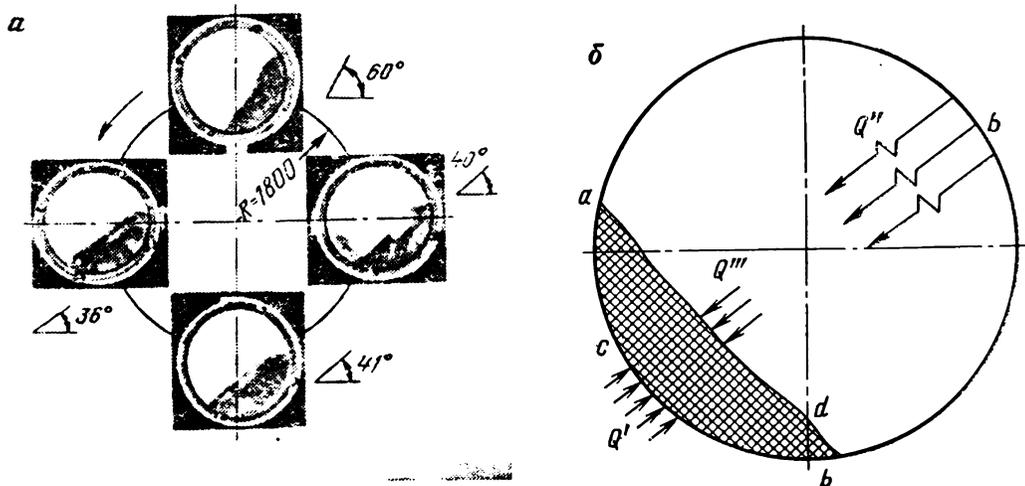


Рис. VI.2. Схемы движения частиц угля в сушильной трубке (а) и передачи тепла материалу в паровых трубчатых сушилках (б)

Заполнение трубки материалом ψ связано с центральным углом сегментов соотношением

$$\psi = \frac{1}{2} \left(\frac{\varphi}{180} - \frac{\sin \varphi}{\pi} \right) 100, \% , \quad (\text{VI.1})$$

$$\varphi = 45,5 \sqrt[3]{\psi} , \quad (\text{VI.2})$$

где φ — центральный угол сегмента, градус; ψ — заполнение трубки материалом, %.

В результате вращения сушилки происходит непрерывное перемешивание находящегося в трубках материала. Частицы материала, соприкасающиеся с горячей поверхностью трубки, и частицы, находящиеся на наружной поверхности слоя, непрерывно заменяются новыми, что выравнивает нагрев отдельных частиц и увеличивает интенсивность передачи тепла от трубки к материалу.

Передача тепла материалу в паровых трубчатых сушилках в основном происходит следующим образом (рис. VI.2,б):

путем теплопроводности от поверхности стенки, закрытой материалом, к слою материала (Q'). Сушимый материал занимает

в трубке сегмент, длина дуги которого, умноженная на длину трубки, является поверхностью соприкосновения материала с поверхностью трубки;

излучением от стенки трубки, не закрытой материалом, к наружной поверхности, слоя материала (Q''). Длина хорды сегмента, заполненного материалом, умноженная на длину трубки, является поверхностью передачи тепла материалу излучением от стенки трубки, не закрытой материалом;

путем конвективного теплообмена между паровоздушной смесью и наружной поверхностью слоя материала (Q''').

Количество тепла, полученного материалом в процессе сушки, можно вычислить по формулам:

$$Q' = F' \alpha_{\text{лм}} (t_{\text{п}} - \vartheta), \text{ кДж/ч}, \quad (\text{VI.3})$$

$$Q'' = F'' \alpha_{\text{луч}} (t_{\text{п}} - \vartheta), \text{ кДж/ч}; \quad (\text{VI.4})$$

$$Q''' = F''' \alpha_{\text{к}} (t_{\text{в}} - \vartheta), \text{ кДж/ч}, \quad (\text{VI.5})$$

где F' — поверхность соприкосновения материала с трубкой,

$$F' = \pi d_{\text{тр}} \frac{\varphi}{360} l_{\text{тр}}, \text{ м}^2, \quad (\text{VI.6})$$

F'' — наружная поверхность находящегося в трубке материала,

$$F'' = d_{\text{тр}} \sin \frac{\varphi}{2} l_{\text{тр}}, \text{ м}^2. \quad (\text{VI.7})$$

Экспериментальное определение количества тепла, переданного каждым из указанных путей, затруднено тем, что по мере прохождения материала и воздуха в трубке непрерывно изменяются их свойства. В связи с изменением влажности изменяются насыпная плотность материала, коэффициент теплопроводности, теплоемкость, а также температура.

Коэффициент теплообмена лучеиспусканием определяется по формуле

$$\alpha_{\text{луч}} = \frac{4,94 \varepsilon_{\text{п}} \left[\left(\frac{273 + t_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + \vartheta}{100} \right)^4 \right]}{t_{\text{п}} - \vartheta}, \quad (\text{VI.8})$$

где

$$\varepsilon_{\text{п}} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{F''}{F'''} \left(\frac{1}{C_2} - 1 \right)}; \quad (\text{VI.9})$$

C_1 и C_2 — степень черноты для слоя материала и поверхность трубки, равная 0,85—0,9; F''' — оголенная поверхность трубки, м²;

$$F''' = \pi d l \frac{360 - \varphi}{360}. \quad (\text{VI.10})$$

Коэффициент теплообмена от горячей поверхности трубки к слою материала приближенно вычисляется по формуле Гребера, выведенной им для прогрева пластины при постоянной температуре на ее поверхности:

$$\alpha_n = 1,13 \sqrt{\lambda_m C_m \rho_m} \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{120n}}}, \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С} \cdot \text{ч}), \quad (\text{VI.11})$$

где λ_m — коэффициент теплопроводности материала, кДж/(м²·°С·ч); C_m — теплоемкость материала, кДж/(кг·°С); ρ_m — плотность материала, кг/м³; n — частота вращения сушилки.

Коэффициент теплообмена между наружной поверхностью слоя материала и воздухом зависит от длины скатывания угля по наружной поверхности. Значение коэффициента теплоотдачи при непрерывном обновлении наружной поверхности слоя материала вычисляется по формуле, полученной Ю. П. Курочкиным:

$$\text{Nu} = 0,37 \text{Re}^{0,66}. \quad (\text{VI.12})$$

Формула (VI.12) справедлива при $\text{Re} = 10^3 \div 10^5$.

За определяющий размер в этом уравнении принимается величина сегмента, занятого материалом в трубке. За определяющую температуру принята средняя температура воздуха.

Для практических целей Н. М. Михайлов рекомендует пользоваться условным коэффициентом теплоотдачи, если количество переданного тепла относится ко всей поверхности трубки:

$$\alpha_{\text{усл}} = \frac{Q' + Q'' + Q'''}{\Delta t_{\text{ср}} \pi D_{\text{тр}} l_{\text{тр}}}, \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С} \cdot \text{ч}), \quad (\text{VI.13})$$

где $\pi D_{\text{тр}} l_{\text{тр}}$ — номинальная поверхность 1 м трубки.

На рис. VI.3,б показана полученная Н. М. Михайловым зависимость условного коэффициента теплоотдачи и заполнения трубки ψ от скорости воздуха в ней, частоты вращения сушилки и размера частиц материала. Зависимости показывают, что изменение скорости воздуха в трубке в пределах 1,1—2 кг/(с·м²) повышает условный коэффициент теплообмена примерно на 20%, изменение частоты вращения сушилки с 8 до 20 об/мин — условный коэффициент теплоотдачи примерно на 16—18 кДж/(м²·°С·ч), а увеличение размера частиц материала с 4 до 16 мм снижает условный коэффициент теплоотдачи примерно на 8—12 кДж/(м²·°С·ч).

Промышленные испытания показали, что при увеличении частоты вращения сушилки от 4,8 до 8 об/мин производительность возрастает почти в 2 раза. При этом удельные расходы электроэнергии сокращаются от 20 до 11 кВт/т испаренной влаги.

Производительность сушилки возрастает с увеличением давления пара, поступающего на обогрев трубок. Например, при возрастании давления пара от 0,09 до 0,175 МПа напряжение поверхности нагрева сушилки увеличивается приблизительно на 35%.

Для приближенного вычисления количества тепла, переданного паром бурому углю в трубчатых сушилках, можно использовать формулу Баунака

$$Q = 175 \left(\frac{F_{ид}}{20} \right)^{0,167} \left(\frac{n}{6} \right)^{0,22} \left(i_n - i_m \frac{i_n - 143}{4} \right) F_{сущ}, \text{ кДж/ч, (VI.14)}$$

где $F_{сущ}$ — поверхность сушилки, соприкасающаяся с углем, м²; $F_{ид}$ — идеализированная поверхность частиц 1 кг угля, характеризующая гранулометрический состав, м²/кг; n — частота вращения сушилки, об/мин.

Эта поверхность названа идеализированной, так как при ее вычислении принимают, что частица имеет форму шара или куба плотностью 1000 кг/м³.

Т а б л и ц а VI.1

Температура угля (°С) после сушки при различных давлениях греющего пара

Давление пара, МПа	Разрежение за сушилкой, Н/м ²				
	10	20	30	40	50
0,1	92	89,0	87,5	85,0	82
0,2	97	93,5	92,0	88,5	86
0,3	101	98,0	96,0	94,0	90
0,4	104	102,0	98,5	96,0	94

Потери тепла сушилкой в окружающую среду q_5 обычно оцениваются по существующим опытным данным. В значительной степени они зависят от внешней поверхности сушилки ($q_5=72 \div 80$ кДж/кг при $H_{п}=2200$ м² и $q_5=100 \div 120$ кДж/кг при $H_{п}=1160$ м²).

Температура угля после сушки зависит от давления греющего пара и количества проходящего через сушилку воздуха. В табл. VI.1 приведены значения температуры угля после сушки при различных давлениях греющего пара и разрежения за сушилкой при сушке бурого угля от $W_1=58$ до $W_2=16\%$.

Ниже приведены температуры подмосковного угля при выходе из трубчатой сушилки в зависимости от его влажности после сушки (давление пара 0,3 МПа, начальная влажность угля 32,5%, разрежение за сушилкой 20 Н/м²).

Влажность угля после сушки, %	15	16	18	20	24
Температура угля при выходе из сушилки, °С	89	87	85	84	81

Расход тепла на 1 кг испаренной влаги у паровых трубчатых сушилок равен 3070—3270 Дж. Наиболее значительным является расход тепла на нагрев угля. Ниже приведен расход тепла на 1 кг

испаренной влаги при сушке бурого угля от начальной влажности 53% до влажности 10—20%.

Влажность угля при выходе из сушилки, %	10	16	25	40
Расход тепла на 1 кг испаренной влаги, кДж	3080	3101	3226	3310

Расход пара на обогрев сушилки

$$d_n = \frac{a \Sigma q F}{i_n - i_k}, \text{ кг/ч,} \quad (\text{VI.15})$$

где a — напряжение поверхности нагрева сушилки по испаренной влаге, кг/(м²·ч); Σq — удельный (видимый) расход тепла на 1 кг испаренной влаги, кДж/кг; F — поверхность труб сушилки, м²; i_n — теплосодержание пара, кДж/кг; i_k — теплосодержание конденсата, кДж/кг.

При обогреве трубчатых сушилок отборным паром турбин расход тепла, вычисленный из теплового баланса, является фиктивным, так как ему не будут соответствовать действительные затраты тепла топлива на электростанции. В этом случае на сушку будет затрачено тепло, значительная часть которого для электростанции, работающей по конденсационному режиму, является отбросной, так как оно не может быть использовано непосредственно для выработки энергии. Фактическая тепловая ценность отборного пара учитывается коэффициентом ценности тепла K , предложенным Н. М. Михайловым. Этот коэффициент представляет собой отношение между количеством тепла острого пара, которое нужно дополнительно подать в турбину, и количеством тепла, выведенного из турбины с отборным паром. Для ориентировочных расчетов коэффициент ценности тепла отборного пара с давлением до 0,5 МПа можно определить по формуле

$$K = 0,34 (P_{\text{отб}})^{0,343}, \quad (\text{VI.16})$$

где $P_{\text{отб}}$ — давление пара в отборе, МПа.

Отсюда следует, что фактический расход тепла пара в паровых сушилках

$$q_{\phi} = \Sigma q K, \text{ кДж/кг.} \quad (\text{VI.17})$$

Таким образом, вместо расхода тепла 3352—3562 кДж/кг при испарении влаги в топке парового котла расход тепла на 1 кг влаги в паровых сушилках составит 1383—1802 кДж (из расчета давления отборного пара 2,5 МПа, $K = 0,438 \div 0,574$).

Удельный расход пара на 1 кг испаренной влаги определяется по формуле

$$d_n = \frac{\Sigma q}{i - q_k}, \quad (\text{VI.18})$$

где Σq — удельный расход тепла на 1 кг испаренной влаги, кДж/кг; i — теплосодержание греющего пара при давлении P (МПа), кДж/кг; q_k — теплосодержание конденсата, уходящего из сушилки, кДж/кг.

Расход пара обычно $d_n=1,4\div 1,5$ кг/кг испаренной влаги и может быть принят в расчетах 1,5 кг/кг.

При расчете d_n величину q_k определяют по температуре и давлению насыщенного пара, поступающего в сушилку.

Определение поверхности нагрева сушилки производится по формуле

$$H_k = \frac{W}{a}, \text{ м}^2, \quad (\text{VI.19})$$

где W — количество влаги, удаляемой из угля в сушилке, кг/ч; a — напряжение поверхности нагрева по испаренной влаге, кг/(м²·ч).

КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СУШИЛОК

Общий вид паровой трубчатой сушилки показан на рис. VI.3. Основными узлами сушилки являются сушильный барабан, привод, загрузочное и разгрузочное устройства, система подвода пара, отвод конденсата и система смазки подшипников.

Сушильный барабан 1 с сушильными трубками 4 определяет поверхность нагрева. В зависимости от размеров сушильного барабана число трубок изменяется от 240 до 1400.

Кожух барабана соединен с лобовыми стенками 2 и 6, которые имеют отверстия. Одной стороной кольца 3 с отверстиями 30 приварены к лобовым стенкам, а другой — прикреплены к кожуху.

В середине лобовых стенок выточены отверстия большого диаметра, в которые своими краями входят цапфы. Для связи цапф служит сварная труба 7, имеющая монтажный люк 8.

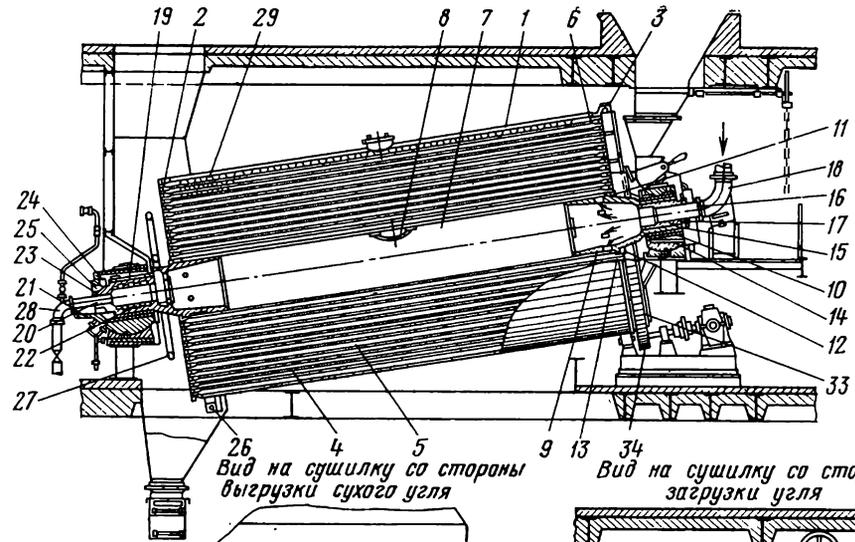
Средняя часть трубы защищена от попадания пара стенками 9. Передняя опорная цапфа 10 изготовлена из стального литья с отверстиями для пропуска пара в межтрубное пространство сушильного барабана. Цапфа соединена с центральной сварной трубой при помощи болтов 11 и 12, а также фланцевым кольцом 13. На опорную часть цапфы снаружи в горячем состоянии насажена рабочая втулка 14, изготовленная из специального чугунного литья, а внутрь вставлена букса 15.

Для ввода пара в межтрубное пространство 5 барабана служит труба 16, которая прикреплена с помощью фланца к паропроводу 18. Между вращающейся цапфой с буксой 15 и неподвижной трубой 16 вставлена сальниковая набивка, которую нажимает грандбукса 17.

Задняя опорная цапфа 19 соединена с трубой 20 при помощи болтов и фланца 21. На цапфу снаружи насажена рабочая втулка 22. Между вращающейся цапфой и неподвижной трубой вставлена для уплотнения набивка, нажимаемая грандбуксой 23.

Упорное кольцо 25 имеет упорный роликовый подшипник 24, воспринимающий осевое давление от массы сушильного барабана. В разгрузочной части барабана помещаются три сборника 26 для сбора конденсата и отвода его по трубам 27, 31 через полуцапфу

Продольный разрез сушилки



Общий вид сушильной установки

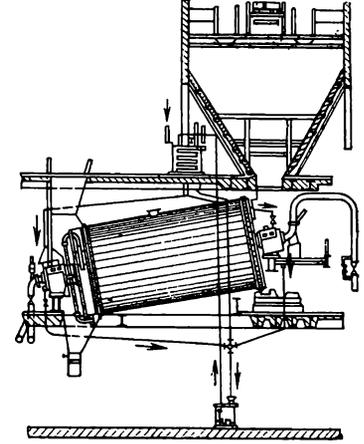
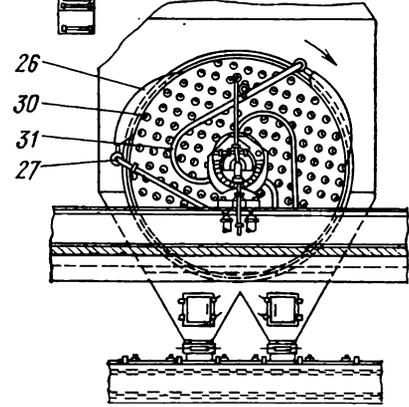
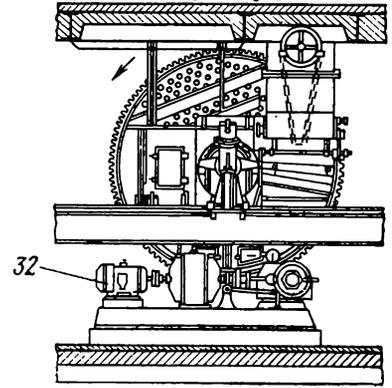


Рис. VI.3. Общий вид паровой трубчатой сушилки

Вид на сушилку со стороны выгрузки сухого угля



Вид на сушилку со стороны загрузки угля



в сливную трубу 28. Для лучшего перемешивания материала во время сушки и регулирования скорости продвижения его в трубках помещаются спиральные полосы 29.

Частота вращения сушильного барабана регулируется. Она при нормальной его работе изменяется в пределах 4—8 об/мин. Изменение частоты вращения сушильного барабана производится электрическим, механическим или гидравлическим способами.

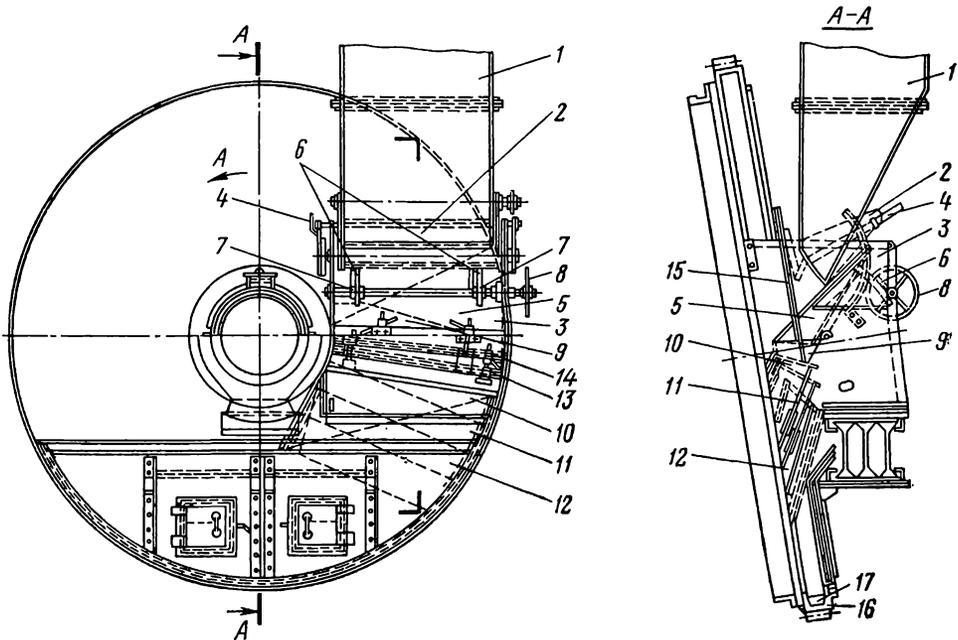


Рис. VI.4. Загрузочное устройство паровой трубчатой сушилки

К сушильному барабану снаружи крепится зубчатый венец 33, при помощи которого барабан приводится в движение от электродвигателя 32 через шестерню 34, насаженную на вал редуктора. При механическом способе регулирования частоты вращения сушилки между электродвигателем и редуктором устанавливается вариатор скорости, а при гидравлическом способе — турбомуфта.

Загрузочное устройство (рис. VI.4) паровой трубчатой сушилки предназначено для равномерной загрузки трубок сушильного барабана материалом, поступающим из бункера, расположенного над сушилкой. При открытии секторного затвора 2 материал из бункера 1 поступает в загрузочную камеру 3 на изогнутую полку 5, скрепленную с двумя зубчатыми секторами 6, находящимися в сцеплении с шестернями 7.

Поступление материала на направляющие полки 10, 11 и 12 регулируется опусканием или поднятием изогнутой полки при вращении штурвала 8, а также поднятием или опусканием вертикальной заслонки 15 при помощи рычага 4.

Материал, ссыпаясь с изогнутой полки 5, поступает на промежуточную полку 9, а затем на направляющие полки 10, 11 и 12,

расположенные одна над другой с приближением их к лобовой стенке барабана. Нижняя полка 12, укрепленная неподвижно, почти вплотную примыкает к лобовой стенке сушильного барабана. Две верхние полки могут передвигаться по направляющим и устанавливаться ближе к лобовой стенке барабана или дальше от нее. При этом материал может распределяться по различным направляющим полкам вплоть до полного прекращения поступления его на отдельные полки.

Наивыгоднейшее расположение полок, при котором загрузка материала в трубки наилучшая, достигается при помощи болтов 13 и гаек 14.

Направляющие полки, кроме наклона к лобовой стенке сушильного барабана, имеют наклон от его оси к кожуху для того, чтобы дать больший поток материала к трубкам, удаленным от центра барабана, загрузка которых затруднена вследствие их большей окружной скорости. Материал скатывается по направляющим полкам вниз к лобовой стенке барабана и засыпается в трубки.

Просыпавшийся мимо сушильных трубок материал падает вниз в выемки обода зубчатого венца 16, где имеются поперечные ребра 17, которыми он снова поднимается вверх и сыпается на наклонные полки 10, 11 и 12.

Разгрузочное устройство паровой трубчатой сушилки состоит из камеры, желобов для замедления спуска материала и уплотнительного устройства кожуха камеры. Камера служит для сбора и направления сухого материала на конвейерные устройства, а также для обеспечения отсоса паровоздушной смеси из трубок сушилки и разгрузочного устройства. Для уменьшения пыления сухого материала вся кольцевая поверхность лобового листа с трубками разбита на ряд секторов, каждый из которых представляет собой систему спускных желобов для материала. Во избежание присоса воздуха через неплотности в месте обхвата сушильного барабана кожухом камеры предусмотрены установки уплотнительного устройства в виде лабиринта, состоящего из отдельных сегментов.

Обогрев сушилок производится паром с давлением до 0,35—0,4 МПа. Схема подвода пара и отвода конденсата из паровой трубчатой сушилки показана на рис. VI.5,а.

Пар после редукционного вентиля 1 с давлением 0,2—0,4 МПа и температурой 135—170°C по общему распределительному паропроводу через главный вентиль 2 или отводный вентиль 3 направляется к отдельным сушильным аппаратам.

Соприкасаясь с наружными стенками трубок, внутри которых проходит материал, пар отдает свое тепло и конденсируется. Конденсат стекает вниз и по мере вращения сушильного барабана по трубам 4 и 5 со сборниками 6 переливается в полую цапфу 7, затем по трубопроводу 8 отводится в резервуары 9 конденсата.

Пар подается к сушилкам по трубопроводу диаметром 500—600 мм, отводы к сушилкам выполняются диаметром 150 мм. Конденсатопроводы от сушилок имеют диаметр 150 мм.

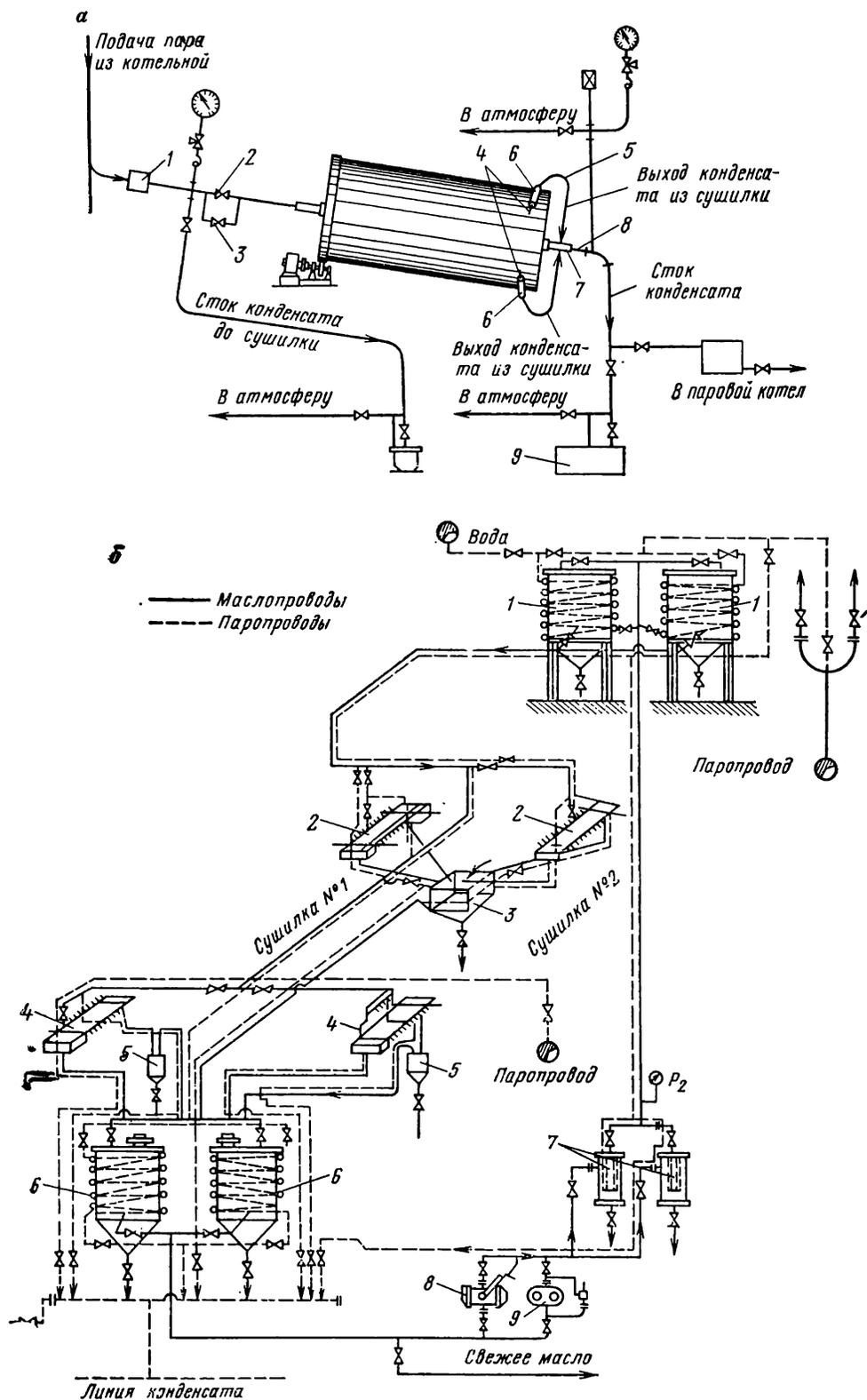


Рис. VI.5. Схемы подвода пара и отвода конденсата из паровой трубчатой сушилки (а) и масляной системы паровой сушилки (б)

Для смазки подшипников, работающих в тяжелых условиях, применяются специальные масляные системы. Подшипники сушилки всегда имеют высокую температуру.

На рис. VI.5,б изображена схема масляной системы паровых сушилок. Циркуляция масла осуществляется насосами 8 и 9. Одним из этих насосов циркулирующее в системе и добавляемое свежее масло подается в фильтры 7, имеющие в качестве фильтрующей ткани мелкую медную сетку. Затем масло поступает в баки 1. Очищенное масло самотеком подается на передние 2 и задние 4 подшипники сушилок. Отработанное масло передних подшипников

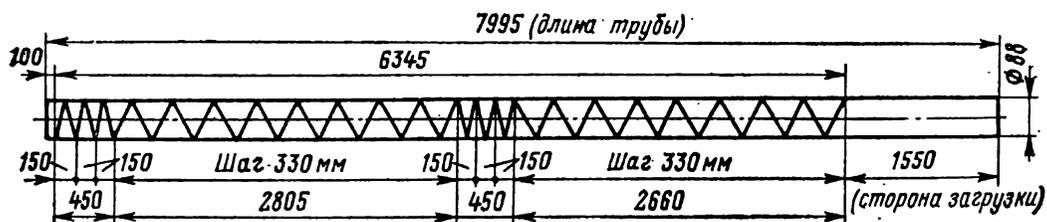


Рис. VI.6. Винтовая вставка «Цемаг» (ГДР)

сначала собирается в отстойник 3, имеющий небольшую вместимость, где происходит выделение из масла сравнительно крупных частиц, затем масло самотеком поступает в отстойники 6, имеющие большую вместимость. Отработанное масло задних подшипников сначала проходит предварительную очистку в отстойниках 5, а затем поступает в отстойник 6, который имеет паровой обогрев. Очищенное в отстойнике 6 масло забирается насосом 9 и снова подается в баки 1. Каждый отстойник имеет внизу спускной кран, через который выпускается образовавшийся шлам. Подогрев масла при движении по трубам осуществляется паровыми трубами, которые проложены рядом с маслопроводами. Обе трубы вместе покрыты слоем изоляции толщиной около 50 мм. На каждый подшипник подается 8—12 кг/ч масла. Безвозвратный расход масла составляет 9 кг/сут на одну сушилку.

Производительность паровых трубчатых сушилок по испаренной влаге зависит от степени и характера заполнения трубок. Неравномерное заполнение трубок уменьшает производительность сушилок, особенно при обработке рыхлых, поверхностно влажных материалов, отличающихся плохой сыпучестью.

Поэтому особое внимание уделяется вставкам, устанавливаемым внутри трубок. Испытания экспериментальной паровой трубчатой сушилки в Бёлене (ГДР) позволили исследовать вставки различного рода. Лучшей оказалась вставка «Цемаг» (ГДР) с обратными спиралями длиной 5,6—6,3 м и с ходом 330—350 мм (рис. VI.6).

Она изготавливается из полосовой стали с полосой шириной 20 мм и толщиной 5 мм. Шаг спирали в начале трубки равен 330—350 мм, а затем он убывает к концу ее до 150 мм. Наружный диа-

метр спиральной вставки делается на несколько миллиметров больше внутреннего диаметра сушильных трубок, и при установке ее в трубку под влиянием упругих сил она плотно прижимается к внутренней поверхности трубок.

Удельная производительность паровых трубчатых сушилок по влаге на Кумертауской брикетной фабрике составляет 5,2 кг/(м²·ч).

На большинстве брикетных фабрик ГДР эта величина близка к 6 кг/(м²·ч).

Производительность паровой трубчатой сушилки по испаренной влаге зависит от давления греющего пара, степени заполнения трубок материалом, крупности, влажности и сыпучих свойств материала, частоты вращения и разрежения на разгрузочной стороне сушилки, а также от ее уплотнения и др.

На отечественных углебрикетных фабриках установлены сушилки с поверхностью нагрева от 900 до 4000 м².

Техническая характеристика паровых трубчатых сушилок			
Типовой размер . . .	3×8	4×8	5×8
Размер барабана, мм:			
диаметр	3140	3990	5240
длина	8000	8000	8000
Число трубок	600	876	1581
Поверхность нагрева, м ²	1325	2230	4000
Частота вращения, об/мин	От 4,2	До 11,2	От 3 до 9
Производительность по высушенному продукту, т/ч	8,5	14	26
Мощность электродвигателя, кВт	10	17,5	22
Масса сушилки, т	65	120	190

Основные показатели сушки бурых углей в паровых трубчатых сушилках на углебрикетных фабриках следующие:

Влажность, %:	
сырого угля	50—60
высушенного продукта	20—22
Крупность угля, мм	0—6
Время пребывания угля в сушилке, мин	20—25
Температура, °С:	
пара	160—180
высушенного продукта	80—90
после сушки паровоздушной смеси	90—100
Напряжение поверхности нагрева сушилки, кг/(м ² ·ч)	5—6,5
Расход пара на испарение влаги, кг/кг	1,4—1,5
Количество пыли, улавливаемой в электрофильтрах, %	3—6

Качество сушки материала в паровой трубчатой сушилке определяется значением разности влажности крупных и мелких частиц в сушимом материале, которая составляет около 10—12%.

Неравномерность сушки материала зависит также от расстояния трубок, по которым движется материал, от центра барабана.

При движении материала по трубкам, расположенным дальше от центра барабана, материал высыхает больше, чем в трубках, расположенных ближе к центру (табл. VI.2). Это объясняется тем,

что периферийные трубки загружаются на 16% меньше по сравнению с центральными.

Масса паровых трубчатых сушилок без транспортных и пылеулавливающих устройств составляет 5—6 т на 100 м² поверхности нагрева. Расход энергии на вращение сушилок 0,8—1 кВт на 100 м² поверхности нагрева.

**Техническая характеристика паровых трубчатых сушилок
диаметром 3,6 м и длиной 8 м**

Число труб	623
Поверхность нагрева, м ²	1650
Частота вращения сушилки, об/мин	4,2; 5,9; 7,3 и 8,9
Угол наклона барабана, градус:	
бурые угли	8
каменные угли	От 12 до 15
Крупность углей, подаваемых на сушку, мм	От 0 до 3(6)
Мощность электродвигателя, кВт	22,5
Масса сушилки, т	120

Сопротивление проходу воздуха сушилки составляет 20—80 Н/м² (скорость воздуха в трубках 1,5—2,5 м/с). Унос пыли из сушилки воздухом зависит от гранулометрического состава высушиваемого материала и глубины сушки. Обычно унос не превосходит 3—6% массы высушиваемого продукта.

Таблица VI.2

**Содержание влаги в буром угле после сушки в паровой
трубчатой сушилке, %**

Крупность угля, мм	Трубки		
	центральные	средние	внешние
6—13	35,35	32,87	30,22
3—6	32,25	29,99	25,43
1—3	22,85	22,63	20,50
0—1	19,05	18,98	16,43
0—13	24,41	23,67	20,30
Напряжение поверхности нагрева по влаге, кг/(м ² ·ч)	3,75	2,98	2,46

Для паровых трубчатых сушилок устанавливаются электрофильтры, которые вместе с подводящими воздухопроводами имеют общую высоту около 30 м и создают разрежение в летних условиях 70—80 Н/м².

Унос угля из электрофильтров не превышает 0,1% массы высушенного в сушилке угля.

Возникающая в электрофильтре и подводящих каналах самотяга оказывается вполне достаточной для преодоления всех сопротивлений воздушного тракта сушилки. Поэтому для вентиляции сушилки при наличии электрофильтров не устанавливаются венти-

ляторы. Влагосодержание отработанного воздуха у трубчатых сушилок составляет 1000—1500 г/кг, т. е. расход воздуха на 1 кг испарения влаги не превышает 0,7—1 кг. При установке циклонов унос угля не превосходит 0,2—0,3% высушенного материала.

При очистке отработанного воздуха в циклонах обычно применяется вторая ступень очистки в мокрых скрубберах.

На торфобрикетных заводах эксплуатируют паровые трубчатые сушилки с различными поверхностями нагрева (табл. VI.3).

Напряжение поверхности нагрева паровой трубчатой сушилки по испаренной влаге возрастает с увеличением влажности исходного торфа, но одновременно производительность по сырому и высушенному торфу снижается:

Средняя влажность исходного торфа, %	Влагонапряжение поверхности нагрева сушилки, кг/(м ² ·ч)
41,1	1,83
43,8	1,96
46,5	2,01
49,8	2,16
52,0	2,26

Примечание. Давление греющего пара 0,20—0,25 МПа, температура 140—145°С.

В паровых трубчатых сушилках сушится торф крупностью 0—16 мм, влажностью 44,5—53% до конечной влажности 15—18%. Максимальная влажность торфа, поступающего в сушилку, 55%. Барабан установлен с углом наклона к горизонту 10°, частота вращения барабана изменяется от 4 до 8 об/мин.

Некоторые эксплуатационные данные по паровым трубчатым сушилкам Ореховского торфобрикетного завода приведены ниже.

Влажность торфа, %:	
начальная . . . . .	. 46,5—53
конечная . . . . .	. 11,3—20,7
Давление греющего пара, МПа	. 0,1—0,17
Температура, °С:	
греющего пара . . . . .	. 111—123,4
торфа до сушки . . . . .	. 88—23
» после сушки . . . . .	. 63—79
Параметры воздуха на входе в сушилку:	
температура, °С . . . . .	. 25—30
влагосодержание, г/кг . . . . .	. 12,6—19,5
Параметры воздуха на выходе из сушилки:	
температура, °С . . . . .	. 81,0—98,5
влагосодержание, г/кг . . . . .	. 176—415
Удельный расход на 1 кг испаренной влаги:	
воздуха, кг . . . . .	. 2,51—6,3
тепла, кДж . . . . .	. 3059—3352

Движение воздуха в системе осуществляется при помощи вентилятора, создающего давление до 3000 Н/м². Очистка запыленного воздуха происходит в пылесадительных камерах и циклонах. На окончательной очистке газов установлены мокрые скрубберы. Расход электроэнергии равен 10,7 кВт/т испаренной влаги.

Важное значение для работы паровых трубчатых сушилок имеет уменьшение присосов воздуха через каналы вентиляционной системы сушилки, имеющие зазор между неподвижной стенкой приемной камеры и корпусом. Для устранения присосов через зазор между приемной камерой и сушилкой обычно применяется устройство в виде манжеты.

Т а б л и ц а VI.3
Характеристика паровых трубчатых сушилок

Наименование показателей	Поверхность нагрева, м ²	
	1180	1820
Размер барабана, мм:		
диаметр	3150	3750
длина	8000	8000
Число трубок	468	720
Масса сушилки, т	60	90

Объем здания, занимаемого сушилкой (без бункеров), составляет около 2000 м³ или 265 м³ на 1 т испаренной влаги в 1 ч. Объем здания вместе с электрофильтром в 2 раза больше.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОТЫ И КОНСТРУКЦИИ СУШИЛОК

В последнее время в конструкцию трубчатых сушилок внесены усовершенствования, которые в значительной мере увеличили надежность работы, повысили производительность и экономичность этих сушилок. Существенное значение для работы сушилки имеет устройство для загрузки угля в трубки сушилки.

Передача тепла (90—95%) от конденсирующегося пара к сушимому материалу в трубчатых сушилках происходит в основном вследствие контакта материала с греющей поверхностью. Поэтому увеличение заполнения трубок материалом является одним из основных способов повышения производительности сушилок.

Загрузка сушильных трубок материалом происходит в виде разовых засыпок при прохождении трубками загрузочного устройства сушилки.

Материал из загрузочного устройства поступает в трубки в результате свободного пересыпания под влиянием силы тяжести.

При существующей обычной загрузке сушилок входное сечение трубок при выходе их из загрузочного устройства бывает полностью или почти полностью закрыто пробкой засыпавшегося в трубки материала. При дальнейшем повороте сушилки эти пробки в начале трубок начинают разрушаться, однако свободное пространство для прохода воздуха остается незначительным, что препятствует поступлению необходимого количества воздуха в трубки

и затрудняет процесс сушки. Это явление особенно характерно для центральных трубок, а также при плохо сыпучих и мелких материалах с повышенным содержанием поверхностной влаги.

Для поддержания необходимого количества воздуха, поступающего в трубки сушилки, на брикетных фабриках ГДР применяется пневматическое вдувное устройство, обеспечивающее дополнительное поступление воздуха в трубки и повышающее пропускную способность по воздуху более чем на 50%. Подача воздуха осуществляется в небольшую камеру, которая прижимается к трубной доске с помощью пружин. Внутри камеры имеются сопла, которые открытым концом направлены к трубкам сушилки. Выходящий из сопел сжатый воздух оказывает давление на находящийся в трубках материал и продвигает его внутрь трубки. Это позволяет загрузить в сушилку за один оборот большее количество материала и увеличить производительность сушилки.

Пневматическое вдувное устройство было применено ИОТТ на Кумертауской углебрикетной фабрике. Воздух, нагнетаемый в воздушную камеру с сопловой плитой, состоящей из щелевидных отверстий, через которые он вдувается в трубки сушилки, предварительно подогревается в калорифере КДБ-10 до температуры 70—80°C. Подача воздуха осуществляется вентилятором ВВД-11.

Загрузка угля в трубки существенно улучшилась и увеличилась производительность сушилки по испаренной влаге. Выяснилось, что с применением поддува необходимо увеличивать частоту вращения барабана (более 10 об/мин), так как в противном случае происходит пересушка угля. Значительное влияние на процесс сушки угля оказывает температура подогретого воздуха. Повышение температуры воздуха, подводимого к сопловой плите, от 15 до 78°C увеличивает производительность сушилки по испаренной влаге на 15—20%. Расход воздуха $6 \cdot 10^3$ м³/ч.

На брикетных фабриках ГДР успешно применяются барабанные сушилки с уменьшенным диаметром трубок.

Техническая характеристика паровой трубчатой сушилки до и после уменьшения диаметра трубок

	До переделки	После переделк.,
Размер барабана, мм:		
диаметр	3000	3000
длина	7000	7000
Угол наклона сушилки, градус	7	7
Число трубок	343	792
Размер трубок, мм	102×3,25	83×2,75
Поверхность нагрева, м ²	715	1345
Увеличение поверхности нагрева, %	100	188
Частота вращения барабана, об/мин	8,32	13,17
Производительность сушилки по сухому углю, т/ч	3,78	7,65 (203%)
Напряжение поверхности нагрева по испаренной влаге, кг/(м ² ·ч)	6,04	6,34 (106%)

В ГДР были проведены работы по оптимизации процесса сушки в паровых трубчатых сушилках. На первом этапе оптимизации

работы трубчатой сушилки определялись оптимальные значения частоты вращения барабана, давления пара, степени заполнения трубок и разрежения в них. Второй этап охватывал оптимизацию угла наклона сушилки, диаметра трубок и формы поворотных вставок. В процессе оптимизации, проведенной с применением ЭВМ, был использован метод наиболее крутого восхождения (метод Бокса — Уилсона) и метод неопределенных сомножителей (метод Лагранжа).

В результате опытов удельная производительность сушилки была повышена более чем на 3 кг/(м²·ч), ее максимальное значение достигло 7,37 кг/(м²·ч).

Показатели работы паровой трубчатой сушилки после оптимизации параметров процесса сушки следующие:

Производительность, т/ч:	
исходный уголь	7,75
высушенный уголь	3,59
испаренная влага	3,36
Влажность, %:	
исходный уголь	53,6
высушенный уголь	18,9
пыль	11,7
Температура, °С:	
пар	170
парогазовая смесь	97,6
Объем парогазовой смеси, м ³ /ч	9042
Количество пыли, т/ч	0,413
Частота вращения сушилки, об/мин	9,7
Угол наклона, градус	7,5
Температура точки росы, °С	87,8
Тип поворотных вставок	«Цемаг» при тол-
	щине пластины
	20 мм
Крупность угля, мм	6—10

Удельная производительность сушилок по съему влаги в результате выполнения различных технологических и конструктивных усовершенствований на брикетных фабриках ГДР достигла следующих показателей:

Удельная произво-					
дительность,					
кг/(м ² ·ч)	4,5—5,0	5,0—5,5	5,5—6,0	6,0—6,5	Более 6,5
Число фабрик, %	15	21	34	19	11

Фактором, отрицательно влияющим на производительность сушилок, является низкая частота вращения — 5,5—7,5 об/мин, при которой в большинстве случаев работают сушилки. На рис. VI.7 для 20 брикетных фабрик ГДР показана зависимость между частотой вращения сушилки и ее производительностью. В приближенно линейной тенденции обнаруживается, что с увеличением частоты вращения барабана возрастает производительность сушилки (см. рис. VI.7). Оптимальная технология сушки предусматривает увеличение частоты вращения трубчатой сушилки до 10 об/мин.

Следует отметить, что обычно применяемые винтовые поворотные вставки не удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям, так как они не обеспечивают достаточное торможение угля и удовлетворительное использование поверхности нагрева сушилки в зоне второй половины трубок, перемешивание и аэрацию подвергаемого сушке материала. С точки зрения оптимизации работы трубчатой сушилки шаг витков вставок 300—400 мм и длину трубок, свободную от вставок, 1,5—2,5 м следует считать довольно большими, а число витков и ширину вставок—слишком маленькими.

При оптимальном способе работы сушилки была использована широкополосная вставка с небольшим шагом и оптимальными параметрами длины. Ее шаг должен составлять 120—150 мм при ширине полосы 20—25 мм. Длина трубки, свободная от поворотной вставки, не должна превышать 5—8% длины сушилки. Такие поворотные вставки с уменьшенным шагом успешно используются на ряде углебрикетных фабрик ГДР.

Таким образом, достижение высокой производительности сушилок основывается на определении оптимума, характеризующего процесс сушки по следующим ступеням оптимизации:

I — двухпараметровая оптимизация скорости вращения и степени загрузки материалом трубок сушилки.

Эта ступень оптимизации осуществляет согласование частоты вращения и степени загрузки сушилки влажным материалом и определяет оптимальное сечение загрузки трубок сушилки.

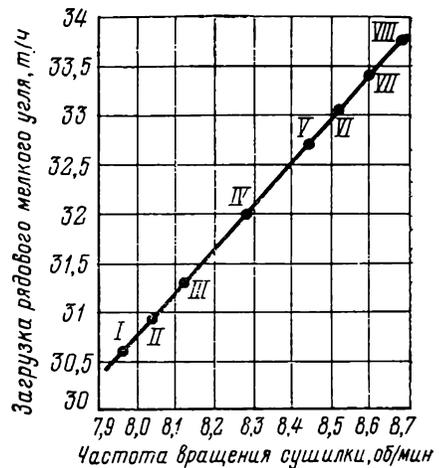


Рис. VI.7. Зависимость между производительностью и частотой вращения сушилки при постоянном давлении пара и влагосодержании воздуха 18—20%:

I—VIII — группы фабрик

Т а б л и ц а VI.4

Показатели работы паровой трубчатой сушилки трех ступеней оптимизации

Наименование показателей	I ступень	II ступень	III ступень
Удельная производительность сушилки по испаренной влаге, кг/(м ² ·ч)	6,73—7,30	7,44	7,11—7,45
Производительность, т/ч	29,5—33,5	35,7	36,5—38
Частота вращения, об/мин	7,8—8,6	8,2	8,6—9,25
Заполнение трубок, %	45	45	45
Количество воздуха, м ³ /ч	—	5800	3800—4200
Влажность высушенного угля, %	16—18	15	15—16

II — трехпараметровая оптимизация частоты вращения, степени загрузки и количества воздуха.

III — трехпараметровая оптимизация с учетом вставок для трубок сушилок, т. е. переход к винтовым вставкам с малым шагом 100—150 мм и оптимальными параметрами длины, шага и высоты полос реек и при увеличенной частоте вращения сушилки.

Показатели работы паровой трубчатой сушилки трех ступеней оптимизации приведены в табл. VI.4.

Конечная ступень — многопараметровая оптимизация частоты вращения, степени загрузки, пропускной способности воздуха, крупности сушеного материала, наклона сушилок и конструкции вставок — позволяет достичь высокой удельной производительности сушилки по испаренной влаге — 8 кг/(м²·ч). Данный путь оптимизации работы сушилок делает возможным продолжение дальнейшего усовершенствования существующих трубчатых сушилок, поверхность нагрева которых в соответствии с новейшими исследованиями и точными результатами измерений используется лишь на 25—35%.

§ 2. ПАРОВЫЕ ТАРЕЛЬЧАТЫЕ СУШИЛКИ

Паровые тарельчатые сушилки применяются для сушки бурого угля, флотоконцентратов каменных углей, руды, особенно сульфидных руд, чтобы избежать окисления серы.

В паровых тарельчатых сушилках достигаются равномерная влажность материала по крупности и незначительное пылеобразование. Тарелки в сушилках выполняют диаметром до 5 м с внутренним диаметром отверстия до 2 м. Число тарелок колеблется от 20 до 40 (высота тарелки 50 мм, расстояние между ними 200 мм) в зависимости от сорта и влажности материала.

Наиболее крупная сушилка имеет 44 тарелки с поверхностью нагрева 880 м², в которой подвергается сушке бурый уголь от 55 до 15% влажности.

Напряжение поверхности нагрева зависит от свойства подсушиваемого материала, его влажности, давления пара; оно находится в пределах 3—8 кг/(м²·ч) рабочей поверхности тарелки. Расход тепла составляет около 3143—3562 кДж/кг испаренной влаги. Масса сушилки 17—18 т на 100 м² рабочей поверхности.

Тарельчатая паровая сушилка (рис. VI.8) имеет металлический кожух цилиндрической формы, внутри которого расположены полые металлические тарелки, нагреваемые изнутри паром. Подача материала производится на центральную часть верхней тарелки, откуда он лопатками передвигается к периферии, затем сбрасывается через отверстия на следующую тарелку, на которой материал лопатками, направляемыми в другую сторону, передвигается снова к центру и сбрасывается на третью тарелку, и т. д. Иногда тарелки снабжаются дробильными вальцами для измельчения крупных недосушенных кусков и ситом, через которое просеиваются мелкие

классы угля. Крупные куски поступают на последующие тарелки для досушки, а мелочь отводится по течке к последней тарелке.

При использовании нижних тарелок с целью охлаждения высушенного угля вместо пара в их полости вводится охлаждающая вода.

Лопатки насаживаются на крестовины, укрепленные на общем вертикальном валу; число лопаток изменяется в зависимости от

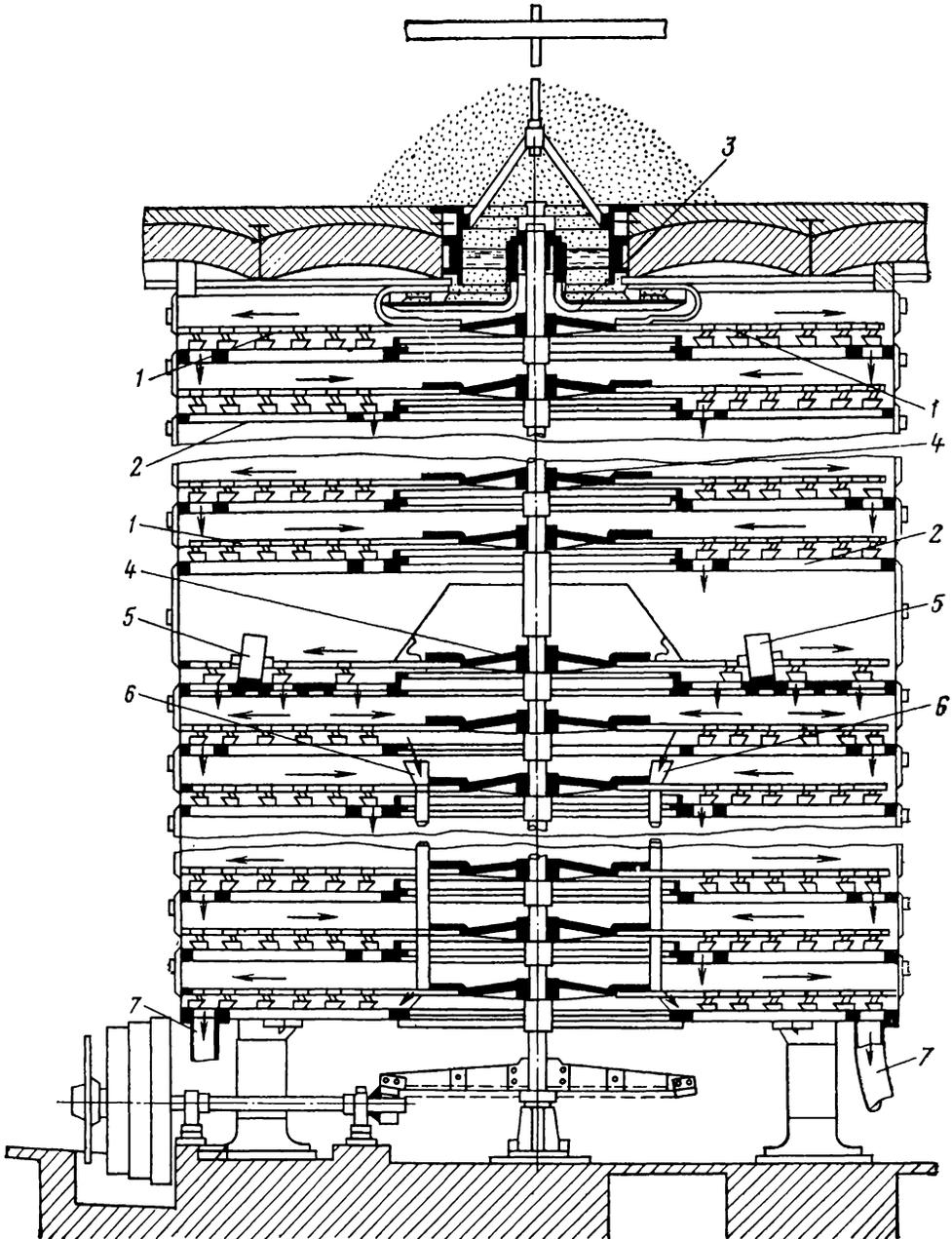


Рис. VI.8. Схема тарельчатой паровой сушилки:

1 — лопатки; 2 — тарелка; 3 — питатель влажного угля; 4 — крестовина; 5 — дробильные пальцы; 6 — выход мелочи; 7 — выход высушенного угля

влажности материала. Иногда лопатки заменяются скребками специальной конструкции или чередуются с ними.

Подвод пара и отвод конденсата осуществляются при помощи четырех стояков (два — для пара, два — для конденсата), на которые опираются тарелки.

Регулировка подачи материала осуществляется изменением частоты вращения вала (2—8 об/мин).

Для сушки бурого угля от влажности 50—56% до влажности 18—20% требуется 20—25 мин; необходимую температуру (45—50°C) уголь приобретает к концу прохождения второй тарелки при давлении греющего пара 0,11—0,12 МПа.

В табл. VI.5 приведены основные показатели работы тарельчатой сушилки с поверхностью нагрева 120 м² при подсушке бурого угля.

Таблица VI.5
Показатели работы тарельчатой сушилки

Производительность по углю, т/ч	Напряжение поверхности нагрева, кг/(м ² ·ч)	Влажность угля, %		Давление греющего пара, МПа
		до сушки	после сушки	
40,4	5,03	56,5	55,8	0,10
31,8	5,33	53,7	56,4	0,12
41,4	7,98	57,5	56,5	0,15
34,2	8,00	57,3	56,1	0,20
47,2	5,13	55,9	54,6	0,22
43,7	5,10	56,7	54,8	0,25

Давление пара достигает 0,3—0,35 МПа, расход его составляет 1,4—1,5 кг/кг испаренной влаги. При этих условиях напряжение поверхности нагрева достигает 6,5—8 кг/(м²·ч).

При сушке сульфидных концентратов с начальной влажностью 16% и конечной 4—6% удельную производительность тарельчатых подовых сушилок принимают по твердому 0,9 т/(м²·сут).

Техническая характеристика тарельчатой шестиподовой сушилки Д-5000 [58]

Производительность, т/ч	6—12
Влажность материала после сушки, %	1—4
Диаметр пода тарелки, мм	5000
Общая площадь пода сушилки, м ²	96,8
Толщина слоя материала на поду, мм	50
Время пребывания материала в сушилке, мин	45
Рабочее давление греющего пара, МПа	0,25
Расход пара, м ³ /ч	1,2
Температура в сушилке, °С	100
Мощность электродвигателя привода, кВт	11
Габаритные размеры сушилки, мм:	
длина	6600
ширина	6200
высота	7000
Масса сушилки, т	416,0

§ 3. ПНЕВМОПАРОВОДАЯНЫЕ СУШИЛКИ

Пневмопароводяная сушилка, или сушилка «Пеко», используется в торфобрикетном производстве. Сушка торфа в этой сушилке осуществляется во взвешенном состоянии в потоке горячего воздуха, проходящего по трубам, обогреваемым отработанным после турбин паром и горячей водой, которая нагревается отходящим теплом сушилок.

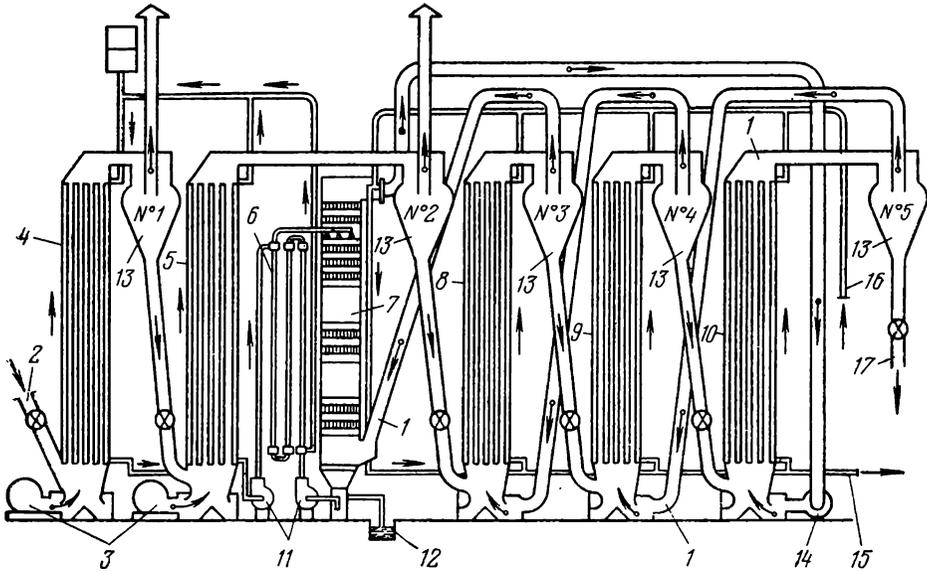


Рис. VI.9. Схема пневмопароводяной сушилки торфобрикетного завода:

1 — точки контроля температуры; 2 — вход торфа в сушилку; 3 — вентиляторы водяных корпусов; 4 — водяной корпус № 1; 5 — водяной корпус № 2; 6 — теплообменник; 7 — скруббер; 8 — паровой корпус № 3; 9 — паровой корпус № 4; 10 — паровой корпус № 5; 11 — циркуляционные насосы; 12 — отвод в канализацию; 13 — циклоны; 14 — вентилятор паровых корпусов; 15 — отвод в конденсационный бак; 16 — подвод пара в сушилку; 17 — подача сушенки к прессам: \curvearrowright — движение торфа: $\circ \rightarrow$ — движение воздуха

Пневмопароводяная сушилка торфобрикетного завода представляет собой сушилку (рис. VI.9), состоящую из пяти отдельных вертикальных корпусов. Корпуса сушилки имеют порядковую нумерацию, и сушка, считая в направлении движения торфа, начинается в первом корпусе, а заканчивается в последнем, пятом.

Корпус пневмопароводяной сушилки показан на рис. VI.10. Наружный вертикальный кожух выполнен в виде цилиндра из листовой стали толщиной 10, 8 и 6 мм. Высота цилиндрической части 12 м. Диаметр корпуса равен 1,83; 1,75 и 1,7 м. К верхнему и нижнему торцам цилиндрического кожуха 1 приварены трубчатые днища 2 и 3 толщиной 40 мм, в которых просверлены отверстия для трубок. Спиральные трубки 4 сушилки имеют наружный диаметр 51 мм, толщину стенок 2,5 мм и длину 12 м. По длине трубка выполнена в виде спирали с шагом 750 мм, просвет между внутренними стенками спирали равен 25 мм. Концы трубок на длине 125 мм гладкие для возможности развальцовки их в днищах. Чис-

ло трубок в каждом корпусе, считая по ходу торфа, составляет 627, 627, 588, 554 и 515. Всего в сушилке из пяти корпусов имеется 2911 трубок. Внутренняя поверхность нагрева трубки равна $1,67 \text{ м}^2$, общая поверхность нагрева сушильной установки — 4861 м^2 . Масса металла всей сушилки с воздухопроводами, пароконденсаторами составляет около 200 т.

Так как при большом диаметре днищ возможен их прогиб, по середине сушилки имеется полая опорная стойка 5 с опорными

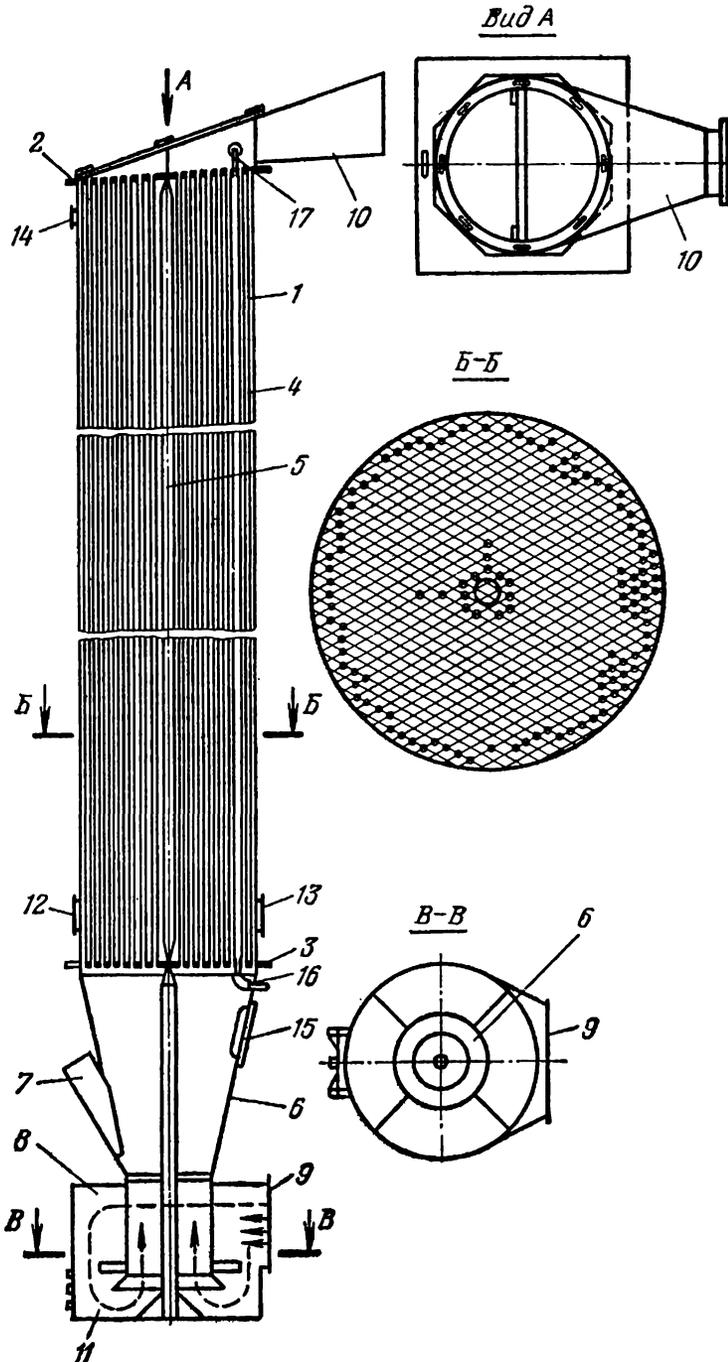


Рис. VI.10. Корпус пневмопароводяной сушилки

фланцами на концах. К нижнему днищу корпуса прикреплена конусная смесительная часть 6, в которой торф встречается с воздухом. Эта конусная часть внизу переходит в цилиндр с раструбом, который оканчивается в воздушной камере 8, не доходя на 200 мм до пола. Воздух от вентилятора через патрубок 9 входит в нижнюю камеру, проходит вверх в конусную часть, подхватывает там торф, поступающий из патрубка 7, и проносит его равномерно вверх по трубкам сушилки. Так как межтрубное пространство сушилки заполнено горячей водой или паром, тепло последних передается стенкам трубок, от которых нагревается движущийся материал и насыщает транспортирующий воздух водяными парами. Сверху сушилка закрыта косо расположенным патрубком 10, фланец которого присоединен к циклону. На кожухе устроена съемная крышка, закрепляемая клиньями, для чистки трубок, которые в работе иногда забиваются торфом. Скорость движения воздуха с торфом в трубках сушилки равна около 12 м/с. После каждого корпуса установлен циклон, в котором происходит отделение торфа от воздуха. Из циклона торф самотеком ссыпается вниз и лопастным питателем барабанного типа подается в следующую сушилку.

Корпус своим нижним фланцем опирается на специальную опорную конструкцию. В нем имеются люк 12 в межтрубное пространство, патрубки 13 и 14 для подвода и отвода теплоносителя, а также краны 16 и 17 для выпуска воздуха при пуске. В нижней части воздушной камеры также устроен люк 15 для чистки пода 11. Корпуса сушилки, все трубопроводы и горячие поверхности, относящиеся к системе, для снижения потерь тепла изолированы.

Для транспортирования торфа через корпуса сушилки имеются вентиляторы по одному на каждый водяной корпус и один вентилятор на три паровых корпуса. Вентиляторы засасывают воздух из специальной шахты и нагнетают его в нижнюю часть сушильного корпуса и далее через циклон и очистные устройства он выбрасывается в атмосферу.

Вентилятор паровых корпусов работает по замкнутому циклу, а вентиляторы водяных корпусов — по разомкнутому. Создаваемый вентиляторами поток воздуха подхватывает снизу сушильного корпуса фрезерный торф и прогоняет образовавшуюся аэросмесь (воздух и фрезерный торф) через сушильные трубы снизу вверх. Выходящая из верхней части сушилки смесь торфа и воздуха направляется по трубе в циклон, в котором воздух с большим содержанием испаренной влаги отделяется от высушиваемого материала. Из циклона торф по трубе самотеком через соответствующий питатель проходит в следующий сушильный корпус, а воздух с содержащимся в нем водяным паром от корпусов № 1 и 2 через циклоны и трубы выбрасывается в атмосферу или в очистку.

Сушильные корпуса № 1 и 2 (см. рис. VI.9) называют по теплоиспользованию вторым эффектом, так как их обогревают горячей водой, полученной за счет отходящего тепла (сокового пара) сушилок, обогреваемых паром. Последние три сушильных корпуса

(см. рис. VI.9, № 3, 4 и 5) называют первым эффектом; они обогреваются отработанным паром турбины. В их систему включен скруббер.

Испаренная в паровых корпусах влага вместе с циркулирующим в этой закрытой системе воздухом после сушилки попадает в скруббер.

В скруббере горячий воздух, насыщенный испарившейся из фрезерного торфа влагой, проходит через деревянную насадку камеры, куда через специальные форсунки сверху впрыскивают воду. Воздух, вступая в контакт с водой, охлаждается в скруббере, вследствие этого происходит конденсация содержащихся в нем водяных паров. При конденсации пара освобождается много тепла, которое нагревает загрязненную скрубберную воду, поддерживая ее температуру на выходе в пределах 70—80°C. Горячая грязная вода скруббера в количестве 250—280 т/ч прогоняется насосом через поверхностный теплообменник, в котором подогревается чистая циркуляционная вода, обогревающая водяные корпуса сушилки.

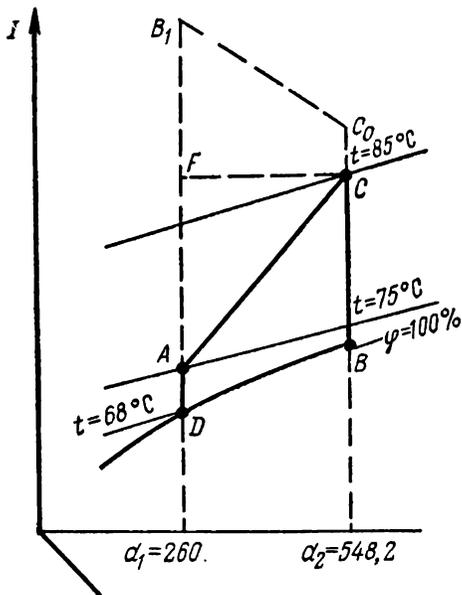


Рис. VI.11. Схема сушильного процесса в паровых корпусах по $I-d$ -диаграмме

Схема сушильного процесса в паровых корпусах по $I-d$ -диаграмме показана на рис. VI.11.

Давление пара, поступающего в три последних корпуса сушилки (№ 3, 4, 5), не превышает 0,3 МПа и температура его достигает 140—160°C.

Первые два корпуса (№ 1 и 2) обогреваются горячей водой, циркулирующей по замкнутому контуру, в количестве 265—300 т/ч с температурой на входе около 55—60°C и на выходе 48—51°C.

В табл. VI.6 приведены технологические показатели работы сушилки.

Пневмопароводяные сушильные установки, изготавливаемые в ГДР, производительностью по сухому торфу 60 тыс. т/год имеют следующие основные показатели (табл. VI.7).

В последних выпусках оборудования высота сушильных корпусов 15 мм, диаметр трубок 72 мм, толщина стенок 3 мм.

Преимуществами пневмопароводяной сушильной установки перед другими сушилками, кроме использования тепла сокового пара для технологических целей, являются: сравнительно низкая скорость пневмотранспорта аэросмеси, которая в 2—3 раза меньше, чем в пневмогазовых трубах-сушилках; повышенная по сравнению

Т а б л и ц а VI.6
Показатели работы пневмопароводяной сушилки

Наименование показателей	№ корпуса сушилки				
	1	2	3	4	5
Напряжение поверхности нагрева, кг/(м ² ·ч)	0,92—2,23	0,86—1,46	1,21—3,9	2,78—4,55	0,37—1,54
Поверхность нагрева, м ²	1047	1047	982	925	860
Среднее снижение влажности торфа, %	3	4	9,5	16	4
Съем влаги, кг/ч	966—2330	901—1535	1191—3848	1569—3798	373—1228
Съем влаги из общего количества в среднем, %	15,75	14	28	35,1	7,15
Средняя температура воздуха (вход/выход), °С	24/38,6	24/41,4	97,3/85	97,8/97,3	77,5/97,8
Влагосодержание воздуха на выходе, г/кг	39—49	46—56	503—635	490—560	269—385
Средняя скорость воздуха в трубках, м/с	11,5	10,5	12,2	12,3	11,5
Гидравлическое сопротивление корпуса, Н/м ²	2960—3160	1970—3280	1860—2050	1180—1920	1790—2390
Концентрация торфа в воздухе, кг/м ³	0,360—0,695	0,381—0,625	0,477—0,524	0,268—0,503	0,275—0,544

Примечание. Общая производительность сушилки по испаренной влаге 8,26—9,5 т/ч, расход тепла на 1 кг испаренной влаги 2053—2413 кДж.

с последними в 2—3 раза концентрация материала; применение противотока для испарения прочно связанной воды.

Для пароводяной сушилки показатель влагоразности наиболее низкий по сравнению с этим показателем для других сушилок, применяемых для сушки торфа. Средняя влагоразность сушенки 2,1% по сравнению с 9,4% для паровой трубчатой сушилки Ореховского торфобрикетного завода.

Таблица VI.7

Показатели пневмоводяной сушилки, изготовленной в ГДР

Наименование показателей	Сушильные корпуса II эффекта			Сушильные корпуса I эффекта	
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Наружный диаметр, мм	1830	1830	1830	1750	1700
Число сушильных трубок	627	627	588	554	515
Площадь поперечного сечения всех трубок сушилки, м ²	1,13	1,13	1,06	1,00	0,93
Поверхность нагрева, м ²	1047	1047	982	925	860
Теплоноситель	Горячая вода с температурой 55—70°С			Пар давлением 0,3 МПа с темпе- ратурой до 160°С	

§ 4. ПАРОГАЗОВЫЕ СУШИЛКИ

Для сушки торфа находят применение парогазовые сушилки барабанного типа, которые основаны на комбинированном использовании различных источников тепла, пара и дымовых газов.

Парогазовая барабанная сушилка имеет паровую и газовую части для одновременной работы на паре и дымовых газах.

Сушилка (рис. VI.12) состоит из двух концентрично расположенных вращающихся барабанов.

Во внутреннем барабане 1 производится сушка торфа уходящими газами парового котла. В пространстве между наружным 2 и внутренним барабанами расположены трубчатые поверхности нагрева 3, обогреваемые изнутри паром. Торф загрузочным шнеком 4 подается во внутренний барабан, где он перемещается вдоль сушилки с помощью лопаток 5. Затем подсушенный торф поступает в паровую часть, по которой он совершает обратный путь и затем шнек 7 выгружает его через камеру 6. Горячие газы из котельной установки поступают в сушилку через загрузочную коробку 8, затем, пройдя через газовую и паровую части сушилки, попадают в циклоны НИИОГАЗ 9 и дымосос 10 выбрасывает их в атмосферу.

Подвод пара и отвод конденсата из трубчатых поверхностей нагрева осуществляются через пароконденсатную головку 11.

На торфобрикетном заводе «Вертелишки» Гродненской области находятся в эксплуатации две парогазовые сушилки, изготовлен-

ные бердичевским заводом химического машиностроения «Прогресс», с внутренним (газовым) барабаном сушилки объемом 3,95 м³, паровой поверхностью нагрева 235 м², массой сушилки 28,4 т.

Производительность парогазовой барабанной сушилки зависит от многих факторов, основными из которых являются: углы конуса барабанов, степень заполнения их материалом, поверхность нагрева, частота вращения сушилки, параметры греющего пара, насыпная плотность материала и др.

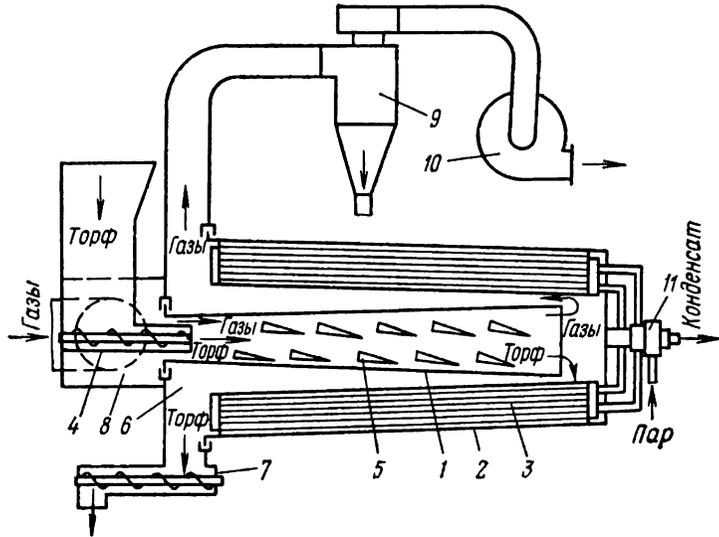


Рис. VI.12. Схема парогазовой сушилки

В процессе эксплуатации производительность сушилки может изменяться в зависимости от частоты вращения и параметров греющего пара.

Показатели работы парогазовой сушилки [29]

Напряжение объема газового барабана сушилки по влаге, кг/(м ³ ·ч)	50
Напряжение паровой поверхности сушилки по влаге, кг/(м ² ·ч)	5,9
Влажность торфа, %:	
начальная	44,1
после газовой части сушилки	41,8
после паровой » »	17,9
Общее количество испаренной влаги, кг/ч	1585
Давление пара, МПа	0,35
Температура, °С:	
пара	151
газов перед сушилкой	128
» после сушилки	83
Влагосодержание газозвушной смеси, г/кг:	
перед сушилкой	62,5
после сушилки	206
Расход газозвушной смеси перед сушилкой, кг/ч	10950
Расход пара на сушилку, кг/ч	1940
Гидравлическое сопротивление сушилки, Н/м ²	340
Общий расход тепла, пара и газов на сушку, кДж/(кг·с)	0,95
Потери торфа с уносом, %	1,25—1,4

Расчеты показывают, что с увеличением угла конуса барабана и его диаметра увеличивается пропускная способность сушилки. Наиболее оптимальными углами конуса являются: для газового барабана 1,5—2°, для парового барабана — 20—30°.

При одном и том же давлении пара 0,27 МПа напряжение поверхности нагрева в паровой трубчатой сушилке составляет 3 кг/(м²·ч), в то время как в парогазовой сушилке оно достигает 5,4 кг/(м²·ч).

Основная масса высушенного материала в парогазовой сушилке имеет влагоразность менее 3,8%.

В настоящее время в Белорусской ССР эксплуатируется ряд торфобрикетных заводов с парогазовыми барабанными сушилками. Применение в парогазовых сушилках нового принципа сушки в межтрубном пространстве значительно повысило надежность работы сушилок при сушке торфа высокой степени разложения.

§ 5. СУШКА ПАРОМ

Как показала практика, при сушке кускового бурого угля обычными конвективными способами расходуется значительное количество тепла на изменение агрегатного состояния всей удаляемой из угля воды. При этом способе сушки объем воды в капиллярах увеличивается, в результате чего уголь растрескивается и распадается в мелочь, не пригодную для многих видов использования.

Отрицательные явления, связанные с сушкой бурого угля, можно предотвратить, если воду из угля выделять в том же агрегатном состоянии, в котором она находится в нем, т. е. в жидком состоянии. Сушка бурых углей и лигнитов в среде насыщенного пара под давлением нашла широкое применение в Югославии, Венгрии, Австрии и других странах. Этот метод был впервые применен Флейснером для сушки бурых углей, затем Розином — для лигнитных бурых углей и Клейном — для лигнитов. В жидком состоянии влага выделяется из угля во время прогрева паром, тогда как при продувке воздухом она удаляется с поверхности угля в виде пара. Пар под давлением разрушает коллоидно-капиллярную структуру угля, вызывает равномерное сжатие его частиц и вытесняет воду из них. Розин считает, что прогрев понижает вязкость воды, которая содержится в угле. При сжатии капилляры оказывают давление на находящуюся в них воду и вытесняют ее. При автоклавной обработке бурого угля значительная часть связанной и слабосвязанной влаги переходит в свободную, заполняя пространство микрокапилляров и пор, а также она выдавливается на поверхность тела. При прогреве бурого угля влажностью 50% паром при давлении 2 МПа освобождается более 40—50% связанной влаги. При полном удалении влаги объем исходного ирша-бородинского бурого угля (класс 0—13 мм) уменьшается на 21%, а обработанного паром — на 9%.

При удалении автоклавным методом 50—75% влаги из кускового бурого угля повышается более чем на 40% его низшая теплота сгорания, улучшаются теплотехнические характеристики обработанных бурых углей. По данным фирмы «Альпине» (Австрия), расход пара на обработку ирша-бородинского бурого угля составляет 0,65 кг на 1 кг удаленной влаги, 0,207 кг на 1 кг обработанного угля.

Отличительной особенностью метода Флейснера является то, что во время автоклавной обработки куски угля, несмотря на большую усадку, сохраняют свою форму и приобретают определенную прочность. В результате усадки плотность обработанного угля приближается к плотности исходного (сырого).

Для предохранения угля от растрескивания очень важно плавное повышение и снижение давления, так как именно в эти периоды происходит сушка угля. При этом вся структурная влага, содержащаяся в угле, при давлении 1,6—1,9 МПа и соответствующей температуре находится в равновесии; при снижении окружающего давления влага начинает испаряться за счет избыточного тепла, накопленного массой угля при его предыдущем нагреве.

Если давление снижать недостаточно плавно, то значительно ухудшится механическая прочность угля.

После окончательного снятия давления из автоклава выпускается вся дренажная вода и уголь разгружается в бункер, который вентилируется воздухом. Весь процесс сушки по операциям имеет следующую продолжительность (мин):

Орошение горячей водой	2,5
Предварительный подогрев отработанным паром	21,5
Подогрев отработанным паром	16
Пропаривание свежим паром	69
Первый сброс давления	8
Второй сброс давления	21,5
Выброс пара и воды перед разгрузкой угля .	7,5
Разгрузка-загрузка автоклава углем	8

Общее время одного автоклавного цикла — 154 мин.

Установлено, что с повышением давления остаточная влажность понижается. Обезвоживание происходит более или менее равномерно при повышении давления до 0,7 МПа, затем оно несколько замедляется, достигая 79% при давлении 2 МПа; более резко замедляется обезвоживание при давлениях, находящихся в интервале 0,8—1,2 МПа.

При равных начальных давлениях пара из варполотских бурых углей (ВНР) с начальной влажностью 44% удаляется в 2,2 раза больше воды, чем из ирша-бородинских бурых углей с начальной влажностью 33%.

Длительность прогрева и выдержка материала под максимальным давлением особого влияния на остаточную влажность не оказывают. Длительность прогрева необходима для получения однородной температуры по всему объему кусков материала.

Влияние размера частицы угля на эффект обезвоживания в значительной мере определяется равномерностью прогрева тела. Ухудшение влагоотдачи для мелких классов материала обусловлено плохой продуваемостью шихты, а для крупных кусков — трудностями их равномерного прогрева.

Удельный расход тепла определяется количеством удаляемой влаги. Наименьшие удельные расходы тепла будут у тех материалов, из которых удаляется наибольшее количество влаги, и особенно в тех случаях, когда значительная часть влаги удаляется в виде жидкости.

Количество влаги, удаляемой из материала, или его остаточная влажность не зависят от продолжительности сброса давления, но имеют прямую связь с температурой насыщения пара.

В ВНР при обработке паром в автоклаве ирша-бородинского бурого угля крупностью 50—150 мм с начальной влажностью 33% были получены следующие данные:

Температура насыщения пара, °С . . .	191	204	214	240
Влажность угля после обработки, % . . .	12,51	9,86	8,11	7,59

Прочность ирша-бородинского угля на истирание (%) до и после обработки его паром и после погружения обработанного угля в воду на 5 мин приведена ниже:

До обработки паром	После обработки паром	После погружения угля (обработанного паром) в воду на 5 мин
87	70	47

В последнее время автоклавная обработка материалов привлекла большое внимание с точки зрения облагораживания кускового бурого угля. По зарубежным данным установлено, что при сушке бурого угля и лигнита по методу Флейснера: уменьшается влажность обработанного угля на 70—75%; обуглероживается угольное вещество в результате уменьшения содержания кислорода и азота и увеличивается теплота сгорания чистого угля; происходит усадка и упрочнение структуры угля; уголь приобретает гидрофобные свойства; повышается температура плавкости золы и снижается зольность угля вследствие растворения глинистых составных частей и удаления солей, растворенных в воде.

Процесс сушки по методу Флейснера пригоден не для всех бурых углей; одни бурые угли отдают при одинаковых параметрах сушки 22% влаги, другие — 52%, т. е. эффект Флейснера определяется в конечном счете коллоидной и капиллярно-пористой структурой бурого угля.

Принципиальная схема автоклавной установки показана на рис. VI.13.

Исходный уголь крупностью не менее 20—30 мм поступает в бункер 1, расположенный над автоклавом 4. Из бункера уголь подается в автоклав, в который также подается насыщенный водяной пар под давлением по трубопроводу 2 для пропарки угля. Затем, после обработки угля паром, последний выпускается из

автоклава по трубопроводу 3. Конденсат и выделенная в жидком виде влага угля направляются в конденсационный сосуд 9 по трубопроводу 6. Пропаренный уголь из автоклава разгружается в бункер 7 для охлаждения и частичного испарения влаги путем вентиляции бункера воздухом с помощью вентилятора 5, в который поступает из бункера паровоздушная смесь. После охлаждения уголь из бункера разгружается на конвейер 8. Оработанная автоклавная вода из резервуара 10 направляется с помощью насоса 11 в наружные отстойники по трубопроводу 12.

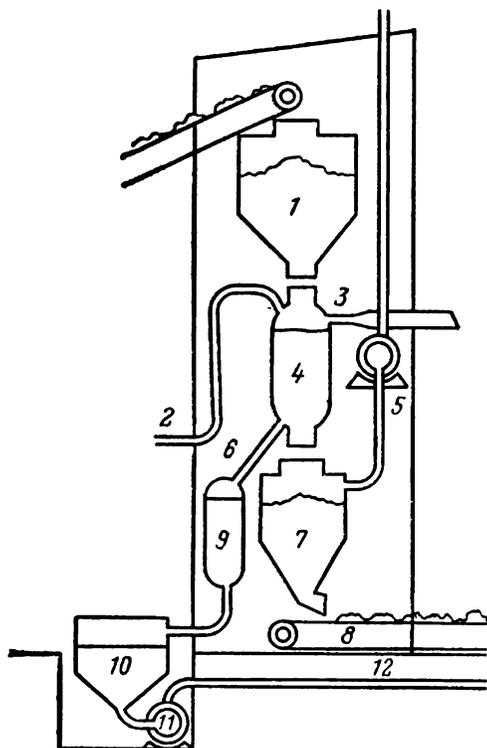


Рис. VI.13. Принципиальная схема автоклавной установки для сушки кускового бурого угля

В целях повышения эффективности использования тепла автоклавной обработки угля, как правило, автоклавы вместе с конденсационными сосудами группируются по четыре или шесть. Каждая группа автоклавов соединена между собой системой трубопроводов. Благодаря последовательному графику очередности работы автоклавов процесс сушки протекает непрерывно.

Автоклавному процессу сушки соответствует ряд фаз изменения давления пара в автоклаве (рис. VI.14).

Показатели работы автоклавной установки следующие: удельные расходы пара 183 кг/т сухого угля; электроэнергии

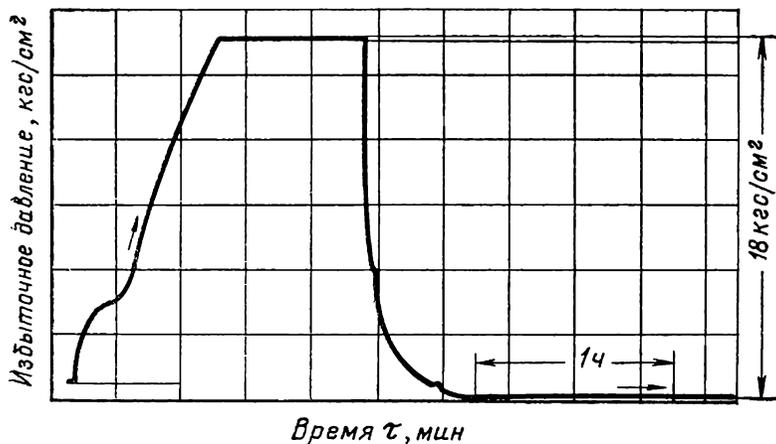


Рис. VI.14. График изменения давления пара в автоклаве

4,681 кВт·ч/т сухого угля, тепла на 1 т удаленной влаги — 1272 кДж.

Автоклавная обработка бурого угля нашла широкое применение в Югославии в Колубарском угольном бассейне. Уголь обрабатывается паром под давлением 1,8—2 МПа при температуре 300—310°C. Автоклавы, в которых производится обработка угля, представляют собой вертикальные цилиндрические сосуды объемом 25, 32, 48 и 56 м³.

Открытие и закрытие загрузочных (верхних) и разгрузочных (нижних) люков автоклавов осуществляются с помощью гидравлических приводов.

Каждая группа автоклавов имеет свою вентиляционную систему, которая автоматически может подключаться к бункеру, в который производится разгрузка угля из автоклава для охлаждения. Воздух, отсасываемый из охлаждающих бункеров, очищается в циклонах, специальных мокрых пылеуловителях и выбрасывается в атмосферу.

На каждую группу автоклавов предусматривается установка одного вентилятора.

Проведены исследования в промышленном масштабе по автоклавной обработке ирша-бородинского бурого угля на автоклавных установках в ВНР и Австрии. Также проведены лабораторные исследования по автоклавной обработке кускового бурого угля Павловского разреза Чихезского месторождения до 12—15% остаточной влажности при давлениях насыщенного пара в автоклаве в интервале 1,5—2 МПа. При этом уголь сохраняет такую крупность, которая необходима для эффективного использования его как кускового топлива.

ПРОТИВОТОЧНЫЕ БАРАБАННЫЕ, ШНЕКОВЫЕ,
РАСПЫЛИТЕЛЬНЫЕ, ВИХРЕВЫЕ
И ВИБРАЦИОННЫЕ СУШИЛКИ

§ 1. ПРОТИВОТОЧНЫЕ БАРАБАННЫЕ СУШИЛКИ

Для сушки угольных шламов применяют противоточные барабанные сушилки (рис. VII.1).

Материал для сушки поступает в барабан из бункера, на дне которого для равномерной и регулируемой загрузки установлен шнек. С разгрузочной стороны барабана установлена топка для сжигания нефти, газа или угольной пыли. Горячие газы движутся навстречу материалу (противоточно) и удаляются через трубу. Транспортирование материала внутри барабана осуществляется шнеком, вращение которого противоположно вращению барабану. У разгрузочного конца барабана установлен неподвижный нож.

Барабан вращается с такой скоростью, что подвергаемый сушке материал центробежной силой прижимается к стенке, на которой он образует равномерный слой. Шнеком материал транспортируется к разгрузочному концу барабана. Неподвижный нож отсекает наружный слой высушенного материала.

В результате интенсивного перемешивания поток горячего газа все время омывает новые поверхности частиц. В результате перемешивания материала предотвращается перегрев частей барабана, шнека и ножа. Принцип противотока позволяет обойтись без пылеулавливающей аппаратуры, так как увлекаемые потоком газа частицы пыли попадают в поток влажного материала и оседают в нем. Влажность материала регулируется автоматически в зависимости от температуры отходящих газов. При длине барабана 6 м продолжительность сушки составляет 30 с. Толщина слоя материала при диаметре барабана 1,3 м составляет 20 мм. Температура в зоне сушки доходит до 1200—1400°C, а газов на выходе из сушилки — до 200°C. Для сушки шламов изготавливают барабанные сушилки длиной 8 м и диаметром 1,3 м, которые могут за 1 ч высушить 11 т шлама влажностью 30%. Следовательно, производительность сушилки по испаренной влаге составляет 2,5 т/ч. Объем загрузочного бункера — около 6 м³. В нем установлены четыре распределительных шнека длиной по 2 м, с внешним диаметром 700 мм и шагом 300 мм. Благодаря тому, что соответствующие шнеки вращаются в противоположных направлениях на небольшом расстоянии (20 мм) один от другого, почти полностью исключается образование сводов из липкого шлама.

Сушилка работает под разрежением, обеспечиваемым вытяжным вентилятором. Уплотнение концов барабана лабиринтное. Для уменьшения износа спираль шнека выполнена из стали X18H10T. В сушилке можно подвергать сушке как зернистый, так

и илистый шламы с содержанием в них класса менее 0,04 мм до 90% и влажностью до 30%. На двух обогатительных фабриках ЧССР установлены противоточные барабанные сушилки фирмы «Гюнтер-Унгер» (ФРГ) диаметром 1,8 м, длиной 6 м, которые имеют производительность 10 т/ч.

Украинским Угледобыванием разработана противоточная барабанная сушильная установка для сушки шлама (см. рис. VII.1).

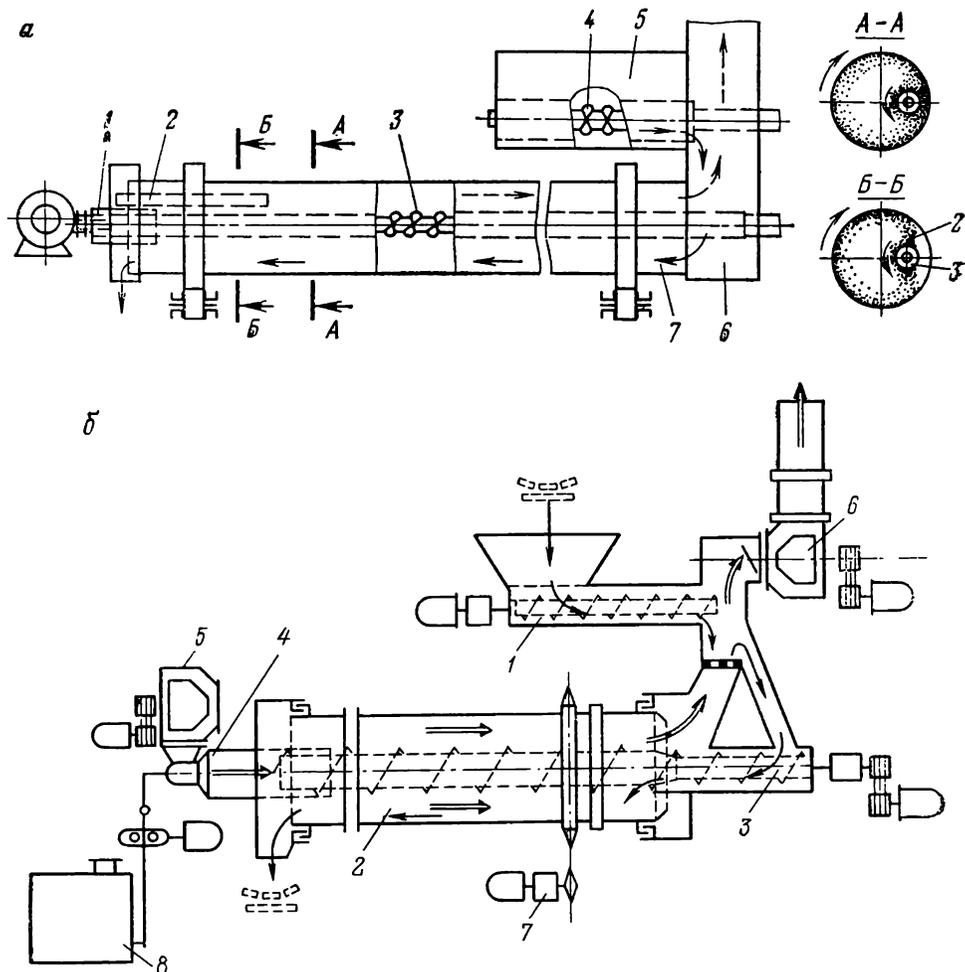


Рис. VII.1. Схема противоточной барабанной сушилки:

a — центробежной, фирма «Гюнтер-Унгер» (ФРГ); 1 — топка; 2 — нож; 3—4 — шнек; 5 — бункер; 6 — труба; 7 — барабан; 8 — УкрНИИУгледобывания; 1 — двойной шнековый питатель; 2 — сушильный барабан; 3 — шнек; 4 — топка; 5 — дутьевой вентилятор; 6 — вытяжной вентилятор; 7 — привод барабана; 8 — бак жидкого топлива

Принцип действия ее основан на принудительном раскрытии поверхности испарения материала, использовании действия центробежных сил для удержания слоя материала, прижатого к стенкам барабана, и противотоке сушильного агента и материала.

Сушилка состоит из горизонтального барабана, внутри которого эксцентрично с зазором 20 мм расположен подвижный скребок

(шнек). Барабан и шнек вращаются в противоположные стороны. Спиралью шнека срезается и перемещается часть слоя, превышающая зазор между спиралью и барабаном. Перемещение материала по барабану осуществляется путем скатывания его по наклонной поверхности утолщенного слоя материала. При этом происходит частичная грануляция.

Техническая характеристика противоточной барабанной сушилки

Производительность, т/ч:	
по исходному продукту	До 20
по испаренной влаге	До 1,8
Влажность продукта, %:	
начальная	20—40
после сушки	5—15
Размеры сушильного барабана, м:	
длина	6,0
диаметр	1,22

На ЦОФ «Ткибульская» работает сушильная установка УкрНИИУглеобогащения, в которой сушат шламы из наружных отстойников. Она имеет следующие технологические показатели: производительность по исходному шламу 6—10 т/ч при влажности исходного от 28 до 40% и сухого 12—16%; производительность по испаренной влаге 1,3—1,7 т/ч; влагонапряжение объема сушилки 200—240 кг/(м³·ч); температуру сушильного агента на входе в барабан 850—1100°С, на выбросе в атмосферу 65—90°С.

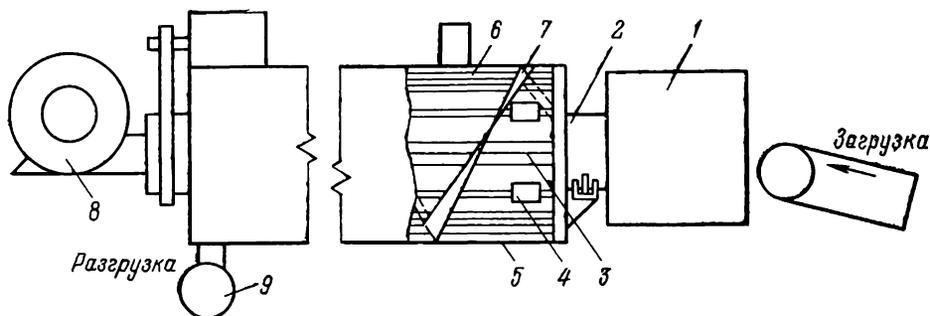


Рис. VII.2. Схема противоточной барабанной сушилки фирмы «Гюнтер-Унгер» (ФРГ)

Для интенсификации процесса сушки в последнее время стали применять вместо подвижного скребка (шнека) неподвижные скребки в виде отдельных лемехов, устанавливаемых в два ряда, а также радиальные лопатки на разгрузочной части барабана.

Указанные конструктивные изменения позволили увеличить влагонапряжение объема сушилки в 2 раза.

Фирма «Гюнтер-Унгер» (ФРГ) разработала новую противоточную комбинированную барабанную сушилку, схема которой показана на рис. VII.2.

Получаемые в толке дымовые газы направляются в сушильный барабан 5 с помощью вентилятора 8. В сушильном барабане газы проходят по нагревательной трубе 3 и через продолжение трубы 2

входят в зону предварительной сушки 1, которая оборудована специальными лопатками для подъема и сброса материала; она вращается вместе с барабаном. Из зоны предварительной сушки газы выходят в атмосферу через дымовую трубу. Исходный материал поступает сначала в зону предварительной сушки, где он подсушивается дымовыми газами до влажности 10—12%, при которой не происходит пылеобразование. Затем подсушенный материал направляется в продолжение трубы 3 и через ее кольцевые отверстия 4 ссыпается во внутреннюю полость сушильного барабана, оборудованного уголками 6 для пересыпания материала и ленточным шнеком 7 для транспортирования высушенного материала к разгрузочному устройству 9 сушилки. В кольцевом пространстве между стенками сушильного барабана и трубы осуществляется основная фаза процесса сушки непрямым способом, т. е. путем постоянного контакта материала с вращающейся горячей нагревательной трубой.

Длина участка предварительной сушки в сушилке составляет 1500 мм, диаметр — 1420 мм. Нагревательная труба имеет диаметр 1000 мм, длину — 6600 мм. Производительность сушилки 9,3 т/ч по сухому материалу и 1,2 т/ч по испаренной влаге при сушке коксика влажностью 15%, зольностью 9—12%, крупностью менее 6 мм.

Материал сушился до влажности 1,5% с одновременным нагревом его до температуры 95—100°C; удельный расход тепла — 3478 кДж/кг испаренной влаги и расход мазута — 83 кг/кг испаренной влаги.

§ 2. ШНЕКОВЫЕ СУШИЛКИ

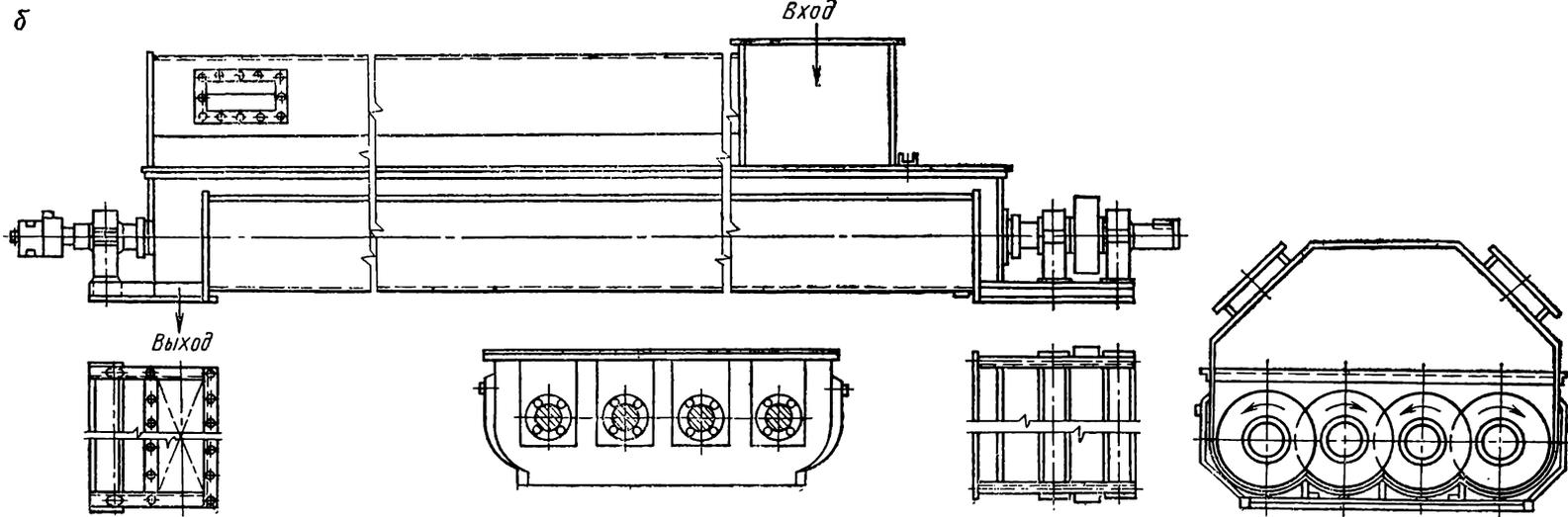
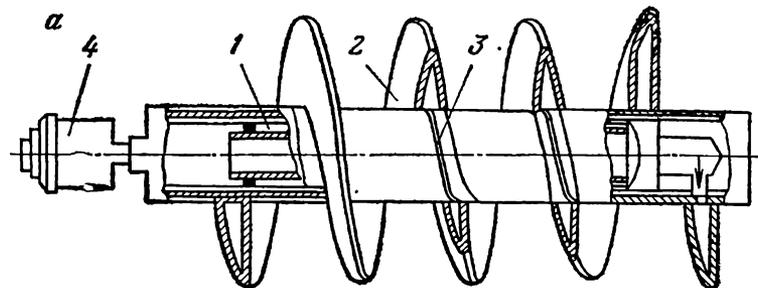
Для сушки минерального сырья нашли широкое применение различные типы шнековых сушилок. Особый интерес они представляют для сушки высоковлажных мелкозернистых материалов.

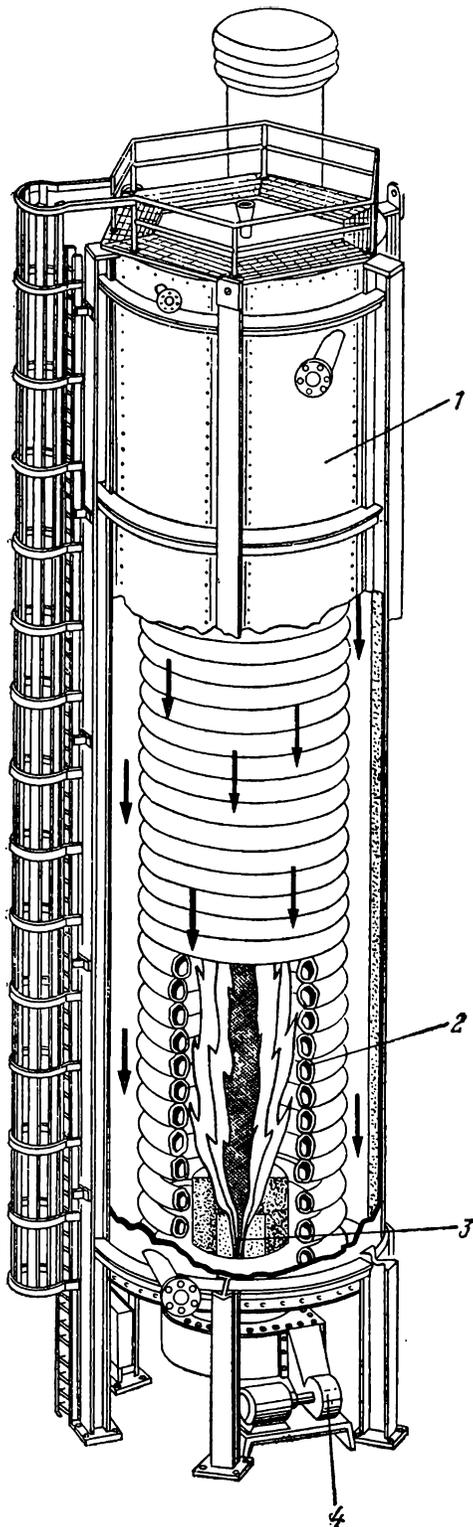
В зарубежной практике нашли применение шнековые сушилки типа «Холо-Флайт».

Шнековая сушилка фирмы «Холо-Флайт» (рис. VII.3,а) работает по принципу контактного теплообмена между сушимым материалом и теплоносителем через разделяющую их поверхность. В качестве разделяющей поверхности используются пустотелые вал и спирали шнека, через которые проходит теплоноситель (см. рис. VII.3,б). В зависимости от производительности сушильный аппарат оборудуется 1, 2 и 4 шнеками диаметром 400—600 мм, с внутренней проточной полостью спирали шириной 38 мм, со стенками толщиной 8 мм и длиной от 3 до 8 м. Шнеки размещаются в лотке (желобе). Температурное расширение шнеков компенсируется креплением пустотелых спиралей шнеков не к валу шнека, а к металлической ленте толщиной 8—10 мм, шириной, равной шагу винта, которая намотана на вал с зазором между витками около 5—6 мм и закреплена на концах вала шнека. Шнеки изготовляются из жаропрочной стали. Каждая пара шнеков имеет индивидуальный гидропривод. Вращение шнеков осуществляется

Рис. VII.3. Конструкция сушильного аппарата фирмы «Холо-Флайт»:

1 — шнек; 2 — компенсационное устройство; 3 — полость для прохода теплоносителя; 4 — соединительная головка





через зубчатую передачу. Вал каждого шнека опирается на два сферических подшипника. Один конец вала со стороны, противоположной гидроприводу, входит в сальниковое устройство, представляющее собой металлический стакан, в котором размещаются графитная втулка и кольцо. Втулка с одной стороны прижимается пружиной, с другой — опирается на ниппель, жестко соединенный с вращающимся валом шнека. К сальниковому устройству на болтах крепится гидравлическая распределительная головка (см. рис. VII.2,а), через которую осуществляется подвод и отвод теплоносителя.

Отдельные образцы этих сушилок выполняются с обогреваемыми лотками. Диапазон изменения частоты вращения шнеков составляет 3—10 об/мин.

Для повышения передачи тепла к стенкам шнека в сушилке в качестве теплоносителя используется, как правило, масло терминол-66, характеристика которого следующая: температуры застывания 40, вспышки 140, кипения 295°C, теплоемкость 2,72 кДж/(кг·°C); плотность при 50°C 935 кг/м³. Нагрев теплоносителя осуществляется в нагревателях различных типов, один из которых показан на рис. VII.4. Он представляет собой вертикальный котел со спиральными радиационными

Рис. VII.4. Схема нагревателя масла для сушилки фирмы «Холо-Флайт»: 1 — корпус; 2 — нагревательные трубы; 3 — форсунка; 4 — вентилятор

трубчатыми поверхностями нагрева, к которым поступает тепло, получаемое от сжигания жидкого топлива. В нижней части нагревателя размещена форсунка в комплекте с компрессором и вентилятором. Температура газов на входе в нагреватель свыше 1100°C , на выходе — 350°C , к. п. д. нагревателя 80%. Скорость масла в трубах нагревателя 2,0—2,5 м/с, давление масла 1,0—1,3 МПа.

Дымовые газы из нагревателя выбрасываются в атмосферу за счет самотяги дымовой трубы.

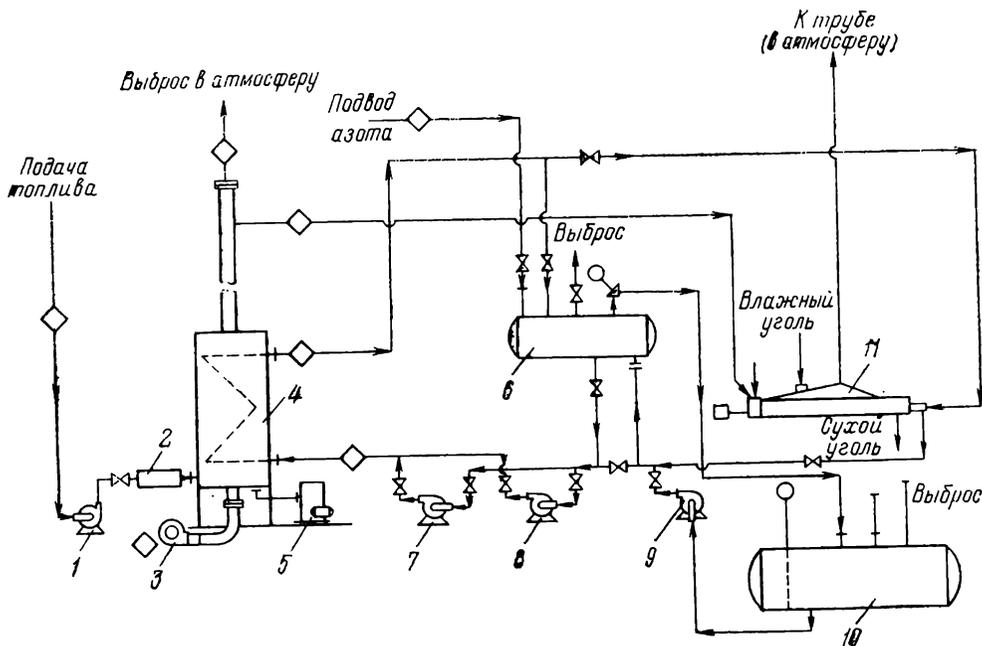


Рис. VII.5. Принципиальная технологическая схема цепи аппаратов сушильной установки фирмы «Холо-Флайт»:

1 — топливный насос; 2 — горелка; 3 — воздухоудувка; 4 — нагреватель; 5 — компрессор воздуха; 6 — расширительный резервуар; 7, 8 — циркуляционные насосы (один резервный); 9 — подпиточный насос; 10 — резервуар хранения теплоносителя; 11 — сушилка «Холо-Флайт»

Схема циркуляции теплоносителя в сушилке фирмы «Холо-Флайт» следующая. Нагретый теплоноситель с температурой 340°C подается во входную головку сушилки, далее через сальниковое устройство он проходит по полуму валу шнека к его противоположному торцу и оттуда поступает в полые спирали шнека, из которых теплоноситель с температурой 300°C через кольцевой зазор и сальниковое устройство поступает в распределительную головку.

Таким образом, движение материала и теплоносителя по спирали шнека происходит по противоточной схеме, что позволяет осуществлять глубокую сушку материала.

На рис. VII.5 показана принципиальная технологическая схема цепи аппаратов сушильной установки фирмы «Холо-Флайт», которая состоит из резервуара для хранения теплоносителя и расширительного резервуара, циркуляционных насосов, нагревателя

теплоносителя, топливного насоса, компрессора для распыла жидкого топлива, воздуходувки для подачи воздуха, необходимого для горения топлива, сушильного аппарата «Холо-Флайт», баллона с азотом и подпиточного насоса.

Перед запуском сушильной установки осуществляется наполнение всей системы маслом, за исключением аппаратов «Холо-Флайт». Масло подпиточным насосом из резервуара хранилища теплоносителя подается в расширительный резервуар, затем включается в работу один циркуляционный насос (один насос резервный) и соединительные трубопроводы и нагреватель масла заполняются теплоносителем. Задвижка на линии, соединяющей нагреватель с аппаратом «Холо-Флайт», закрыта.

Одновременно с наполнением маслом расширительного резервуара до определенного уровня в него из баллона подается азот под давлением 0,15 МПа над поверхностью теплоносителя, что позволяет использовать для технических операций теплоноситель с температурой выше температуры его кипения при атмосферном давлении (так, для масла терминол-66 $t_{\text{кип}}=295^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{экспл}}=340^{\circ}\text{C}$). Кроме того, инертная среда препятствует окислению и загоранию паров теплоносителя. После заполнения системы выключается подпиточный насос и производится запуск нагревателя. По мере циркуляции теплоносителя в замкнутом контуре происходит его разогрев до температуры 340°C . При достижении этой температуры открывается задвижка и теплоноситель подается в аппарат «Холо-Флайт».

Теплоноситель с температурой 300°C из аппарата вновь поступает в расширительный резервуар и далее циркуляционным насосом подается в нагреватель. Из резервуара-хранилища периодически подается подпиточным насосом теплоноситель в расширительный резервуар с целью восполнения потерь теплоносителя вследствие неплотностей в системе.

Для опорожнения системы от теплоносителя при разрыве швов предусмотрен предохранительный клапан с линией аварийного слива от расширительного резервуара к резервуару-хранилищу.

Для компенсации температурных расширений стационарного маслопровода насос соединен с последним гибким рукавом диаметром 50 мм.

Испарившаяся из угля влага удаляется из сушилки вследствие самотяги вытяжной трубы. Сушилка не имеет пылеулавливающего оборудования, тягодутьевых машин и уплотняющих устройств.

Производительность различных сушильных аппаратов в зависимости от числа шнеков составляет 5, 12,5 и 25 т/ч по исходному материалу.

Опыт работы сушилки «Холо-Флайт» на углеобогатительной фабрике «Рентон» (США) показал, что при загрузке угля в одну точку производительность ее снижается, так как при сушке угольного флотоконцентрата значительно уменьшается заполнение сушилки и тем самым уменьшается поверхность контакта материала с горячей поверхностью шнеков. В результате этого была преду-

смотрена вторая точка загрузки сушилки углем в ее средней части.

При загрузке в двух точках производительность четырехшнековой сушилки длиной 6,5 м достигла 15—18 т/ч. При этом влажность флотоконцентрата снизилась с 24—25 до 4—6% и уголь нагревался до температуры 95—98°C. Время пребывания материала в сушилке составило 9 мин при частоте вращения шнеков 5,6 об/мин.

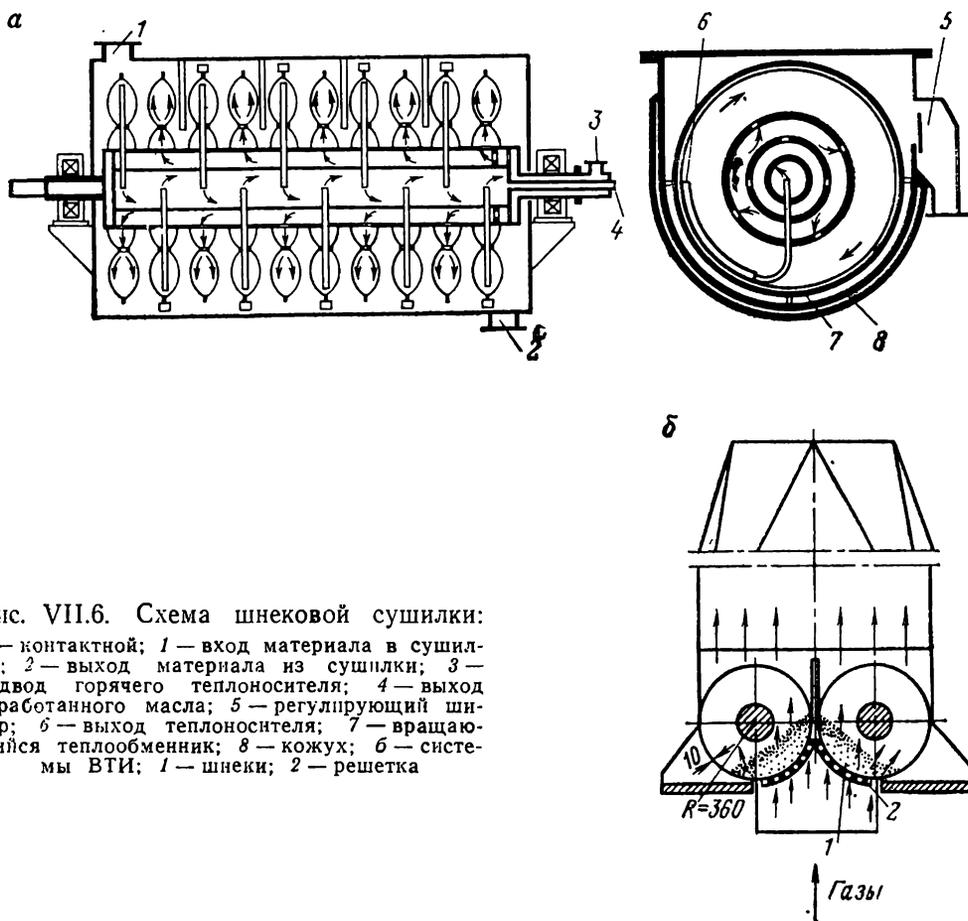


Рис. VII.6. Схема шнековой сушилки: а — контактной; 1 — вход материала в сушилку; 2 — выход материала из сушилки; 3 — подвод горячего теплоносителя; 4 — выход отработанного масла; 5 — регулирующий штифт; 6 — выход теплоносителя; 7 — вращающийся теплообменник; 8 — кожух; б — системы ВТИ; 1 — шнеки; 2 — решетка

Сушильная установка «Холо-Флайт» характеризуется следующими удельными показателями при сушке флотационных концентратов: влагосъем теплообменной поверхности 37,5 кг/(м²·ч); удельный расход тепла, отнесенный к 1 кг испаренной влаги (с учетом потерь тепла отходящих газов из нагревателя), 5531 кДж; удельный расход тепла, отнесенный к 1 кг испаренной влаги (без учета потерь с отходящими газами), 3184 кДж; объем теплоносителя, отнесенный к 1 т испаренной влаги, 18 м³; потребляемая электрическая мощность, отнесенная к 1 т испаренной влаги, 16,1 кВт.

Одной из разновидностей шнековых сушилок является аппарат (рис. VII.6), разработанный фирмой «Бавини Процесс Эквипмент» (США), для сушки тонкозернистых материалов. В сушилке для нагрева вращающихся полых дисков предусмотрена возможность использования в качестве теплоносителя водяного пара или горячего масла.

Регулируемые транспортирующие лопасти выполнены в двух вариантах: с поверхностью в форме эллипсоидов при применении пара и нагревательной жидкости при высоком давлении; с плоской поверхностью при использовании теплонагревателя низкого давления (пар, нефть, масло и др.).

Сушилка длиной 9,75 м, диаметром 2,44 м может высушить уголь крупностью 0—3 мм от начальной влажности 25% до его абсолютно сухого состояния при производительности 50 т/ч.

Для подсушки угля, сланца и других материалов ВТИ разработал шнековую сушилку (см. рис. VII.6). Эта сушилка выполняет одновременно функции сушки и питания. Она достаточно хорошо комплектуется с шаровыми барабанными и молотковыми мельницами и с барабанными сушилками. Шнековая питатель-сушилка с тремя шнеками диаметром 720 мм, длиной 5 м имеет производительность 250 т/ч при снижении влажности угля с 19,4 до 18%; влагонапряжение рабочего объема сушилки 2100 кг/(м³·ч). Барабанные сушилки диаметром 3,5 м, длиной 22 м с предварительной подсушкой угля в шнековых питателях-сушилках эксплуатируются на Кураховской ГРЭС.

§ 3. ВИХРЕВЫЕ СУШИЛКИ

Для сушки угля, титано-циркониевых руд и других материалов нашли применение вихревые сушилки. На рис. VII.7,*a* показана вихревая сушилка производительностью 4 т/ч для сушки титано-циркониевых концентратов.

Обезвоженный концентрат шнековым питателем 8 и цепным рыхлителем 4 подается в разгонный канал 3 подхватывается поступающим из топочного устройства 2 высокотемпературным потоком теплоносителя и тангенциально вводится в нижнюю часть камеры 1. В образующемся вихревом потоке благодаря развитой поверхности твердой фазы и наличию высоких относительных скоростей материал подвергается интенсивной сушке. В верхней части поток попадает в оборудованную неподвижным направляющим аппаратом 7 осадительную камеру 6, где происходит отделение основной массы твердых частиц от газовой среды. Сухой материал разгружается через патрубок 5, а дымовые газы, проходя дополнительную очистку в мокрых скрубберах, дымососом выбрасываются в атмосферу. Установка оборудована дутьевым вентилятором БК-6 с электродвигателем мощностью 14 кВт, имеющим частоту вращения 3000 об/мин. В качестве топочного устройства используется камера сгорания авиационного турбореактивного двигателя, отработавшего установленный срок. Обладая хорошими аэродина-

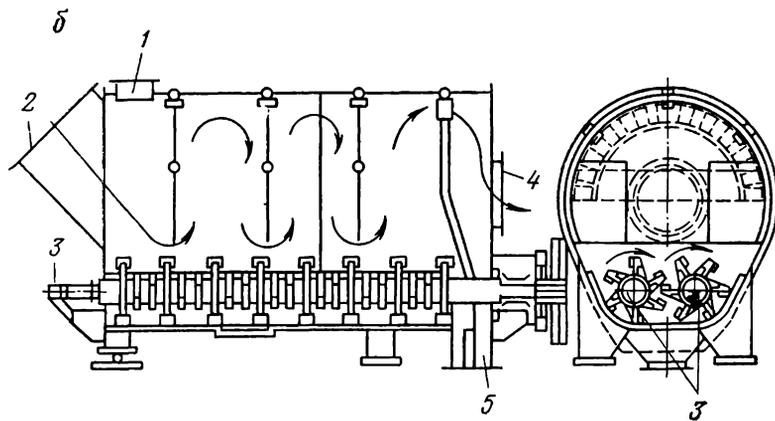
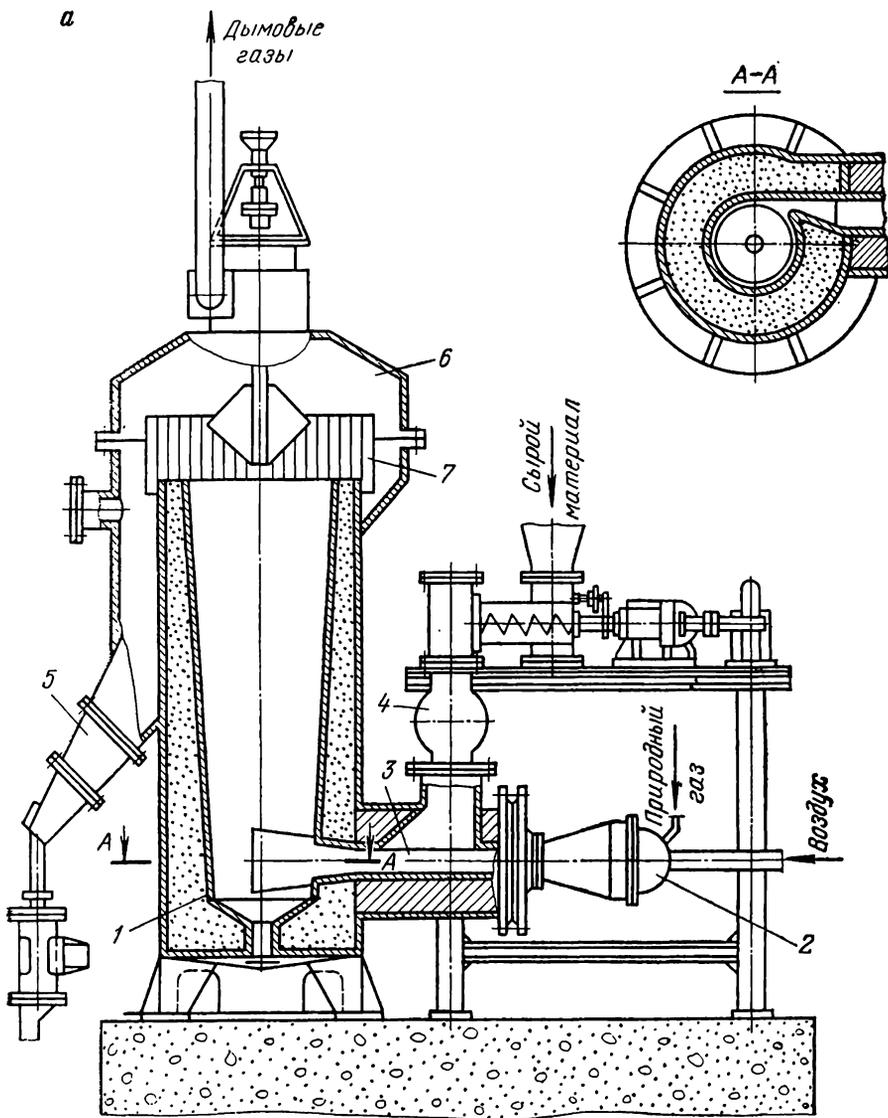


Рис. VII.7. Схема сушилки:

a — вихревой; *б* — валково-вихревой фирмы «Хацемаг» (ФРГ); 1 — окно для подачи влажного угля; 2 — входной патрубок для горячего газа; 3 — транспортные смесительные шнеки; 4 — отвод отработанных газов; 5 — выход высушенного угля

мическими качествами, она позволяет создать высокие температуры теплоносителя в центре газового потока. Температура непосредственно в пристеночной области разгонного канала остается довольно низкой (до 600°C), что создает благоприятные условия для работы футеровки. Камера сгорания работает с тепловым напряжением объема топочного устройства до $60 \cdot 10^3$ МДж/(м³·ч).

В ИГИ разработана сушильная вихревая камера, в которой осуществляется сушка и нагрев угля до 450°C. Камера представляет собой горизонтальный цилиндр диаметром 0,2 м, длиной 1,24 м с тангенциальными соплами для подвода горячих газов (длина 265 мм, ширина 5 мм), расположенными в три ряда. Сушилка имеет производительность около 1—1,2 т/ч при снижении влажности бурого угля (класс 0—3 мм) с 30 до 11% и температуры газов на входе в сушилку 500°C.

На Горнозаводском и Коркинском цементных заводах нашли применение валково-вихревые сушилки фирмы «Хацемаг» (ФРГ) диаметром 2,8 м, длиной 6 м, в корпусе которых размещены вращающиеся в противоположные стороны валы с прикрепленными к ним лопатками (см. рис. VII.7,б). При вращении валов материал многократно подбрасывается лопатками, создавая вихревое взвешенное состояние материала в сушилке. Производительность этих сушилок при сушке шлаков составляет 24—28 т/ч при снижении влажности сушимого материала с 14—12 до 2—3%. Влагонапряжение объема сушилки 45—50 кг/(м²·ч).

Валково-вихревые сушилки маломощные, подвижные узлы ее подвергаются значительному абразивному изнашиванию. Вследствие истирания сухих шлаков при их транспортировании образуется большое количество пыли. На эксплуатацию и ремонт сушилок требуются большие затраты. Поэтому эти сушилки были демонтированы на Липецком, Николаевском и других цементных заводах.

§ 4. РАСПЫЛИТЕЛЬНЫЕ СУШИЛКИ

Распылительные сушилки находят применение в зарубежной практике для сушки большого количества различных рудных флотоконцентратов малотоннажного производства. Они позволяют совмещать процессы фильтрации и сушки, а также доводить высушенный продукт до влажности менее 0,5%. Долгое время распылительные сушилки не находили широкого применения для сушки металлургического флотоконцентрата из-за его высокой абразивности. После создания центробежного распылителя из износостойчивых материалов этот процесс успешно применен на медно-молибденовой обогатительной фабрике «Твин Бьюттс» (США), никелевой «Камболда» (Австралия) и др. Распылительная сушилка с вращающимся диском для сушки концентрата представляет собой вертикальную цилиндрикоконическую камеру (рис. VII.8), в верхней части которой находится центробежный распылитель, выполненный из нержавеющей стали. Распылитель вращается с частотой 9000 об/мин. Плотная концентратная пульпа распы-

ляется по всему сечению сушильной камеры, создавая большую поверхность испарения. Сгущенные концентраты, содержащие 60—65% твердого, минуя фильтрацию, сушатся до содержания 2,5—3,5% влаги или до полного ее удаления.

Производительность сушилки 70 т/ч по пульпе, что составляет 45 т по твердому при содержании 60% твердого.

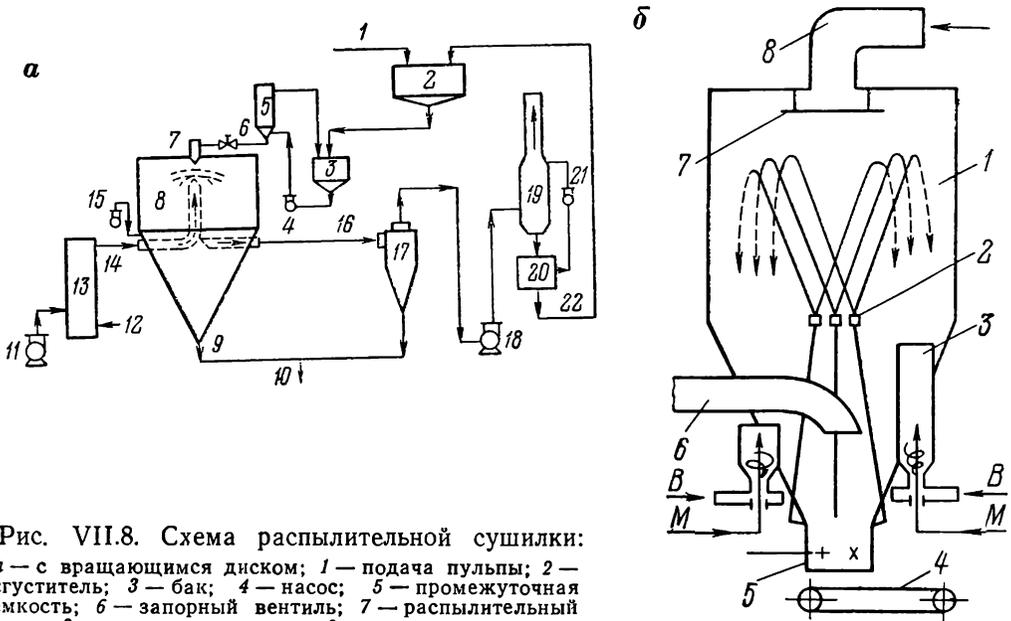


Рис. VII.8. Схема распылительной сушилки:

а — с вращающимся диском; 1 — подача пульпы; 2 — сгуститель; 3 — бак; 4 — насос; 5 — промежуточная емкость; 6 — запорный вентиль; 7 — распылительный диск; 8 — сушильная камера; 9 — разгрузка материала; 10 — подача сухого материала; 11 — вентилятор; 12 — подача топлива; 13 — калорифер; 14 — подача сушильного агента; 15 — насос для смыва; 16 — газоход запыленного газа; 17 — циклон; 18 — дымосос; 19 — мокрый скруббер; 20 — бак для шлама; 21 — насос; 22 — подача шлама в сгуститель; б — башенной для получения керамического пресс-порошка; 1 — сушильная камера; 2 — центробежные механические форсунки; 3 — топка; 4 — ленточный питатель; 5 — дробилка; 6 — газоход отбора отработанного теплоносителя; 7 — газораспределительное устройство; 8 — газоход подачи газов из зоны охлаждения туннельной печи

Распыленные частицы пульпы движутся в одном направлении с потоком горячего воздуха, перемещающегося в сушильной камере, как в циклоне. Это дает эффективное перемешивание распыленного материала с нагретой воздушной средой и интенсивную сушку. Форма сушильной камеры обеспечивает свободное падение и удобную разгрузку сухого продукта.

Тонкие частицы концентрата, увлекаемые отходящим потоком охлажденного воздуха, улавливаются в циклоне в мокром скруббере, электрофильтре или в рукавных фильтрах.

Воздух, поступающий в сушилку, предварительно нагревается в воздухонагревателе, в качестве топлива можно использовать природный газ или мазут, а также отходящее тепло металлургических агрегатов, теплостанций, дизельных установок и т. п.

Температура воздуха, поступающего в сушилку, 760°C, уходящего — 100—110°C. Время воздействия горячего воздуха на частицы концентрата столь незначительно, что они не успевают нагреться и претерпеть какие-либо физические и химические изменения.

На Обольском заводе керамических изделий были проведены испытания башенной распылительной сушилки диаметром 1,6 м, высотой 27 м (см. рис. VII.8) при сушке шликера влажностью 35—40%, предварительно прошедшего тщательную очистку. В сушилке система распыления шликера состоит из шести центробежных механических форсунок с соплом диаметром 9 мм, установленных в нижней части сушильной камеры на расстоянии 9,3 м от газораспределительного устройства. Шликер подается к форсункам под давлением 2—2,5 МПа. Диспергированный в камере шликер высушивается потоком дымовых газов, получаемых от сжигания мазута в трех вертикальных камерных потоках. Отработанные газы выходят из сушилки через запорное устройство и после очистки в системе циклонов выбрасываются в атмосферу.

Технологические показатели распылительной сушилки

Производительность сушилки, т/ч:	
по исходному продукту	20—25
по испаренной влаге	6—8
Влажность шликера, %:	
начальная	35—38
конечная	8—10
Температура газов, °С:	
на входе в сушилку	800—900
на выходе из сушилки	90—105
Крупность порошка, мм	0—2 мм
Удельный расход тепла, кДж/кг влаги	3603—3876

§ 5. ВИБРАЦИОННЫЕ СУШИЛКИ

Для сушки таких видов минерального сырья, как уголь, поваренная соль, песок и другие материалы, нашли применение различные конструкции вибрационных сушилок (виброкипящего слоя, пневмовибрационные и др.).

На рис. VII.9,а показан общий вид сушилки виброкипящего слоя системы «Джефри», разработанной фирмой «Холи Коул» (США), для сушки угольных шламов из наружных отстойников. Она состоит из корпуса шириной 1,2 м, длиной 10,5 м, размещенного на наклонных гибких стальных пластинах, и эксцентрикового привода. В ней имеются две зоны для сушки и охлаждения материала. В зону сушки подается газозвдушенная смесь с температурой от 120 до 290°С, в зону охлаждения — наружный воздух. Зона охлаждения служит для дополнительного снижения влажности материала. При этом температура материала снижается, она приблизительно на 10°С выше температуры окружающего воздуха. Сушилка состоит из верхней и нижней камер, разделенных между собой перфорированной решеткой с отверстиями диаметром 0,2 мм. Нижняя камера, разделена на пять секций для горячей газозвдушной смеси и наружного воздуха, которые поступают в сушилку через боковые отверстия. Удельный расход газозвдушной смеси на 1 м² площади решетки равен 2800 м³/(м²·ч), скорость газозвдушной смеси в сечении площади решетки 10 м/с, охлаждающего воздуха — 5—6 м/с.

В сушилке создается виброкипящий слой угля высотой 100 мм. В сушилку поступает шлам влажностью 20% после предварительного обезвоживания в высоких конических штабелях, расположенных около наружных отстойников, и сушится до влажности 7,5%. При влажности исходного продукта более 24% наблюдается на-

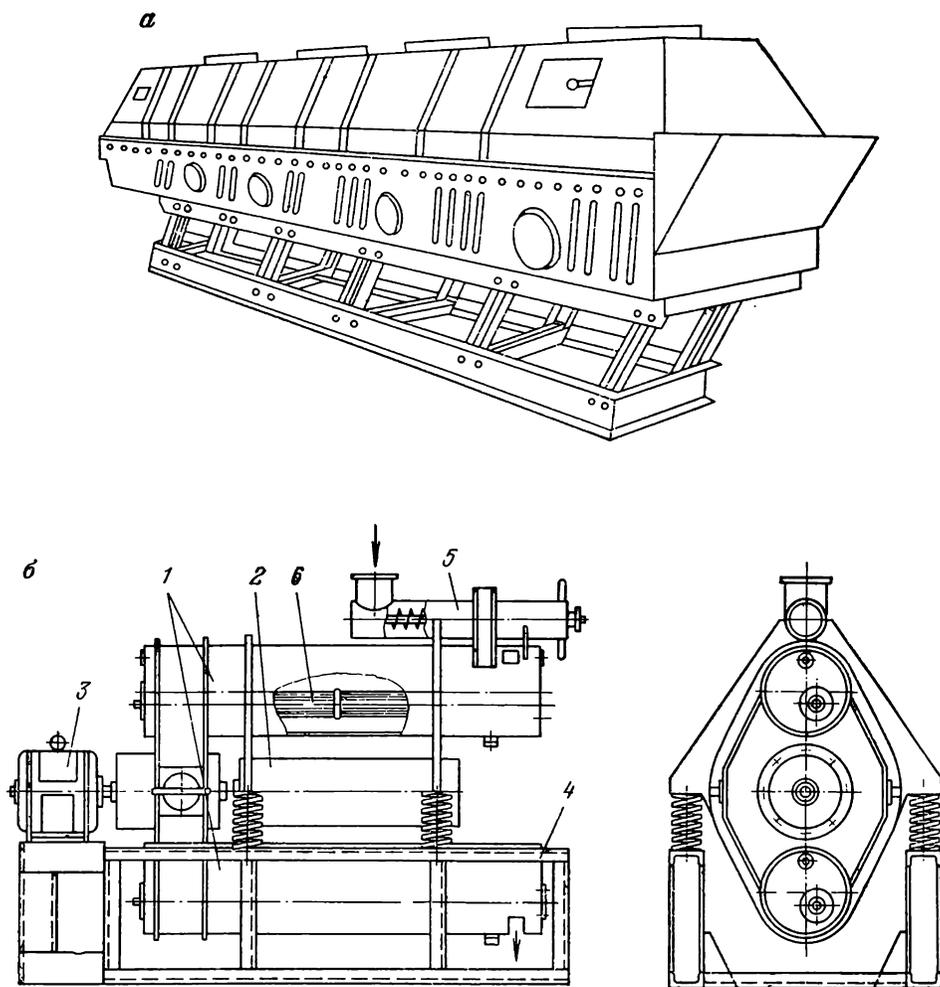


Рис. VII.9. Общий вид сушилки виброкипящего слоя системы «Джефри» (США) и схема горизонтальной двухкамерной вибросушилки с кондуктивным методом сушки

липание шлама на стенки сушилки. Производительность сушилки 23 т/ч по высушенному шламу. Отработанные газоздушная смесь и воздух выходят из верхней сушильной камеры через пять выпускных патрубков диаметром 760 мм каждый, подключенные к сборной горизонтальной трубе, отводящей отработанный агент в систему пылеулавливания, которая состоит из четырех циклонов диаметром 1200 мм и мокрого скруббера. Такая система пылеулавливания обеспечивает санитарные нормы очистки газов. Тяга

газов осуществляется вентилятором с электродвигателем мощностью 480 кВт. Сушилка обеспечивается горячими газами, которые образуются в топке, работающей под давлением на газообразном или жидком топливе.

На рис. VII.8,б показана горизонтальная двухкамерная вибросушилка, которая предназначена для сушки песка. Она разработана ИФХ АН СССР в содружестве с СКТБ Главмоспромстройматериалов.

Вибросушилка состоит из двух горизонтальных цилиндрических сушильных камер 1, расположенных одна под другой, которые двумя поперечными ребрами жестко связаны с вибратором дебалансного типа 2, приводимым во вращение от электродвигателя 3 через шланговую муфту. Поперечные ребра через четыре цилиндрические пружины опираются на раму 4, служащую основанием сушильной установки. Песок из бункера вибропланетарным шнековым питателем 5 по течке подается в верхнюю сушильную камеру, затем в противоположной стороне камеры материал пересыпается в нижнюю. Воздух поступает в сушилку через ниппель в торце нижней сушильной камеры. В вибросушилке передача тепла к материалу осуществляется методом конвективного подвода тепла от введенных в слой трубчатых электронагревателей 6 мощностью 1 кВт каждый.

Техническая характеристика вибросушилки

Производительность по сухому песку, т/ч . . .	0,5
Влагонапряжение объема сушилки, кг/(м ³ ·ч)	150
Влажность песка, %:	
начальная	5
конечная	0,1
Количество продуваемого воздуха, м ³ /ч . . .	65
Установочная мощность электродвигателя, кВт	7
Частота вибрации, Гц	2,5
Амплитуда колебаний, мм	3
Внутренний диаметр сушильных камер, мм . .	309
Длина сушильной камеры, мм	1300
Размеры сушилки, мм:	
длина	2100
ширина	1020
высота	1500

Одной из последних моделей является горизонтальная вибрационная сушилка фирмы «Escher Wyss» (ФРГ), принципиальная схема которой аналогична сушилке «Джефри» (см. рис. VII.8,а). Эта сушилка производительностью 5 т/ч по сухой соли крупностью 0,05 мм с начальной влажностью 3,5% производит ее сушку до влажности 0,04%. При сушке соли крупностью до 5 мм и производительности установки 1,5 т/ч влажность материала снижается с 15 до 0,5%. Сушка осуществляется горячими газами или воздухом, продуваемым через тонкий (1—2,5 см) слой материала. Время пребывания материала в сушилке составляет от 2 до 5 мин. Вибросушилка соединяется с неподвижным калорифером рукавами из термостойких материалов, выдерживающих температуру до 500°C и хорошо переносящих вибрационные колебания.

Глава VIII

ТОПКИ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

На газовых сушильных установках, производящих сушку минерального сырья, в качестве теплоносителя, как правило, используются топочные газы, которые получают в специальных топках при сжигании твердого, жидкого и газообразного топлива.

В качестве топочных устройств на сушильных установках применяются цепные решетки прямого хода, шурующиеся планки систем Васильева и Татищева, цепные решетки обратного хода с забрасывателями, пылеугольные топки с молотковыми и среднеходными мельницами, а также топки на жидком и газообразном топливе.

В топках сушильных установок организация горения твердого топлива осуществляется по различным схемам.

Слоевое сжигание топлива производится в основном при поперечной схеме. Зажигание топлива при поперечной схеме происходит сверху за счет лучистой теплоты топочной камеры; оно отличается малой интенсивностью, так как топливо проходит последовательно все стадии процесса горения. Поэтому сжигание низко-реакционных и высоковлажных топлив с повышенным процентом мелочи удлиняет зону подготовки топлива и выжига шлака, снижает форсировку зеркала горения и требует ручного вмешательства для выравнивания слоя. Сжигание углей с легкоплавкой золой приводит к ошлакованию решетки и стенок топки.

По поперечной схеме работают слоевые топки с цепными решетками прямого хода и топки с шурующимися планками.

Факельно-слоевой метод сжигания топлива осуществляется в топках с цепными решетками обратного хода и пневмомеханическими забрасывателями и в топках с шурующимися планками с пневматическим забросом топлива.

Характерными особенностями факельно-слоевого метода сжигания являются смешанная схема (противоточно-поперечная) и комбинированный процесс сжигания топлива (горение в слое и во взвешенном состоянии). Крупные частицы сгорают на решетке, а мелкие отсеиваются при забросе и горят в топочном объеме. В таких топках процесс горения топлива происходит в сравнительно тонком слое, что создает хорошие условия зажигания, свойственные противоточной схеме (нижнее зажигание), предоставляет возможность сжигания самых разнообразных углей с высокими тепловыми нагрузками, включая сильно спекающиеся угли и угли с значительной зольностью, легкоплавкой золой и высоко-влажные.

По факельному методу сжигания топлива работают камерные топки.

Коэффициент полезного действия топки определяется по формуле

$$\eta_{\text{т}}=100-(q_3+q_4+q_5+q_6), \%, \quad (\text{VIII.1})$$

где q_3 — потери тепла с химическим недожогом, %; q_4 — потери тепла с механическим недожогом, %;

$$q_4 = q_{\text{шл}}^4 + q_{\text{ун}}^4 + q_{\text{пр}}^4, \% \quad (\text{VIII.2})$$

$q_{\text{шл}}^4$ — потери тепла со шлаком, %; $q_{\text{ун}}^4$ — потери тепла с уносом, %; $q_{\text{пр}}^4$ — потери тепла с провалом, %; q_3 и q_4 берут после наладки теплового режима сушильной установки, если наладка не проводилась, то q_3 и q_4 находят из балансовых испытаний; q_5 — потери тепла от наружного охлаждения,

$$q_5 = \frac{0,24 C t_{\text{кл}}}{\sqrt{W}}, \% \quad (\text{VIII.3})$$

C — теплоемкость воздуха при наружной температуре $t_{\text{кл}}$ топочной камеры; обычно принимают $C t_{\text{кл}} = 1050$ кДж/кг; W — количество испаренной влаги, т/ч; q_6 — потери с физическим теплом шлака.

При сжигании жидкого и газообразного топлива потери тепла от механической неполноты сгорания отсутствуют. Чем меньше потери тепла в топке, тем большая доля его полезно используется в сушилке.

Основными расчетными характеристиками топок являются: видимое тепловое напряжение зеркала горения θ/R (кДж/м²·ч); видимое теплонапряжение топочного объема θ/V_T (кДж/м³·ч).

§ 1. ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ТОПОК

При сушке угля наибольшее распространение получили топки слоевого сжигания, к которым относятся цепные решетки прямого хода типов БЦР (беспровальная), БЦР-М (беспровальная модернизированная) и ТЧ (чешуйчатая), которая показана на рис. VIII.1.

В топках с цепными решетками прямого хода сжигают каменные угли марок Г, Д, ОС, СС, К, Ж.

Топки этого типа весьма чувствительны к качеству топлива. Установлено, что с повышением зольности топлива снижается теплонапряжение зеркала горения. Это объясняется особенностью процесса горения на цепной решетке прямого хода с односторонним верхним зажиганием топлива. Чем больше зольность топлива, тем на большей части решетки приходится выжигать шлак.

Цепные решетки прямого хода неудовлетворительно работают на антрацитах крупностью менее 6 мм. Опыт эксплуатации показал, что при работе на антраците цепные решетки быстро выходят из строя вследствие чрезмерного прогорания колосников. Это вызывает значительные дополнительные затраты на ремонт, изготовление и замену колосников.

По имеющимся эксплуатационным данным к. п. д. топок с цепными решетками прямого хода составляет в среднем 50—70%. Так, по данным б. треста «Энергоуголь» и ИОТТ, потери с химиче-

ским недожогом достигают 2,5—5,4%, потери тепла от механической неполноты сгорания — 15,3—27,4%.

Содержание горючих в шлаке колеблется от 11,9 до 47,4%, в провале — от 38,4 до 64,8%, в уносе — от 18,8 до 32%. Озоление концентрата вследствие уноса золы из топки — 0,2—0,25%.

Эти потери происходят в результате интенсивного спекания и шлакования топлива на решетке.

Увеличение теплонапряжения решетки резко снижает экономичность топки. Удовлетворительные результаты работы топки получаются при теплонапряжении решетки до 600—700 кДж/(м²·ч);

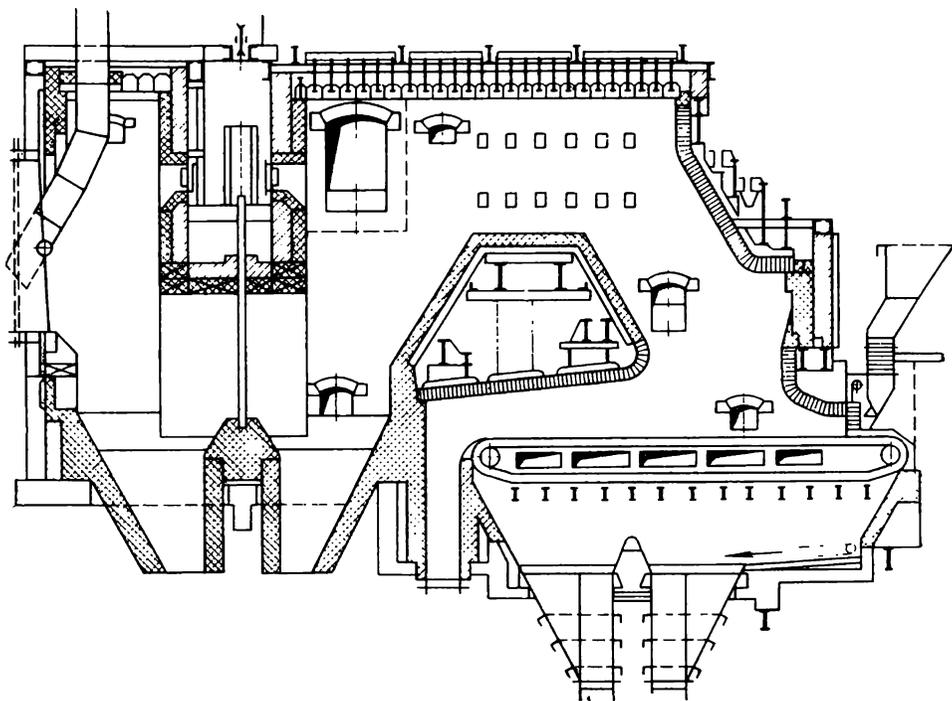


Рис. VIII.1. Топка с цепной решеткой прямого хода типа ТЧ

Хорошие результаты работы показала топка, оборудованная цепной решеткой и подвесным сводом с плавным подъемом его по направлению хода решетки. В топке сжигается промпродукт крупностью 8—10 мм, содержащий 28% класса 0—1 мм зольностью A^c до 41%.

Для снижения потерь с химическим недожогом и уносом и для уменьшения озоления концентрата в последнее время стали применять острое и отсекающее дутье. При этом под решетку подается 80% общего количества воздуха для топок, в которых используются угли марок Г, Ж, Д и 90% воздуха для топлив марок К, ОС и соответственно 20 и 10% на острое и отсекающее дутье.

Для создания турбулизации газового потока подача воздуха на острое дутье осуществляется с фронта топки под углом 30—40° вниз в направлении движения решетки между II и III зонами.

Подвод воздуха на отсекающее дутье осуществляется из короба, установленного на заднем своде под углом 30—35° вверх относительно горизонта. Воздух, необходимый на острое и отсекающее дутье, подается со скоростью на выходе из сопел 70—80 м/с.

Для сжигания слабоспекающихся каменных углей зольностью A^c до 25% с содержанием мелочи класса 0—6 мм менее 50% могут применяться топки с цепными решетками прямого хода типа ТЧ (табл. VIII.1).

Таблица VIII.1
Характеристика топок типа ТЧ

Тип топки	Размер решетки, мм		Активная площадь решетки, м ²	Масса, т
	ширина	длина		
ТЧ 2700×5600	2700	5600	15,5	26,4
ТЧ 2700×8000	2700	8000	19,5	31,4
ТЧ 3070×5600	3070	5600	17,5	29,0

На сушильных установках при сушке минерального сырья нашли применение цепные решетки обратного хода с ленточными и чешуйчатыми решетками с забрасывателями.

На рис. VIII.2 показана топка с чешуйчатой цепной решеткой обратного хода с забрасывателями типа ТЧЗ 4920×8000.

Благодаря пневмомеханическому забросу топлива эти топки могут работать на несортированных углях с содержанием до 60% мелочи 0—6 мм, зольностью до 35% и влажностью до 40%. Пневмомеханические ротационные забрасыватели позволяют осуществлять непрерывную подачу топлива малыми порциями на всю поверхность горящего слоя. При этом на заднюю часть решетки подается топливо, состоящее из более крупных частиц. При медленном движении колосникового полотна обеспечивается нижнее зажигание по всей длине слоя.

Горение топлива на основной части решетки происходит в тонком слое. Скорость движения решетки в зависимости от нагрузки, глубины топочной камеры и зольности топлива составляет 2—7 м/ч. Особенности процесса горения тонкого слоя в топках с забрасывателями и цепными решетками обратного хода, заключающиеся в относительно низких температурах слоя и в образовании на коротком участке рыхлой шлаковой подушки, обуславливают сравнительно легкий температурный режим работы колосниковой решетки. Условия горения газов в топке с пневмомеханическим забрасывателем и решеткой обратного хода более благоприятные, чем в топке с цепными решетками прямого хода. Благодаря относительно ровному составу газов под слоем, камеры этих топок выполняются открытыми без сводов. Эти топки являются наиболее высокопроизводительными и универсальными, теплонапряжение решетки составляет 1200—1400 кВт/м².

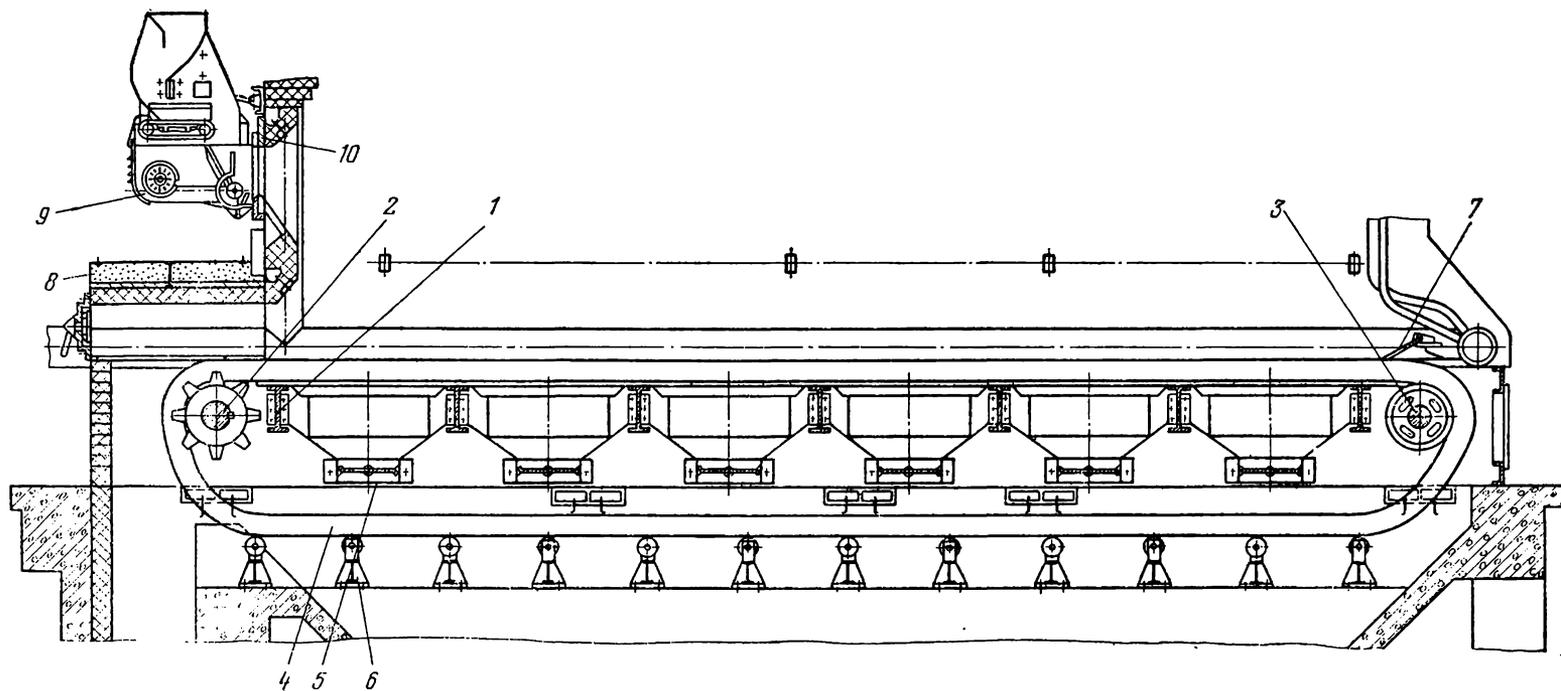


Рис. VIII.2. Продольный разрез топki ТЧЗ-4,92/8,0:

1 — подколосниковые балки; 2 — передний вал; 3 — задний вал; 4 — колосниковое полотно; 5 — дутьевые зоны; 6 — опорный рольганг; 7 — заднее уплотнение; 8 — предтопок; 9 — забрасыватель; 10 — стена топочной камеры.

Топки с цепной решеткой обратного хода при необходимости легко форсировать до теплонапряжений решетки $\frac{\theta}{R} = 1850 \div \div 2100$ кДж/(м²·ч) и более; к. п. д. топки достигает 80%.

При сжигании каменных углей, включая сильноспекающиеся, размером 0—30 мм, зольностью A^c до 35%, с содержанием мелочи 0—6 мм до 60% рекомендуется применять топки типа ТЧЗ с цепной решеткой обратного хода и пневмомеханическими забрасывателями (табл. VIII.2).

Топки с шурующей планкой применяются двух типов: систем Васильева и Татищева.

Т а б л и ц а VIII.2
Характеристика топок типа ТЧЗ

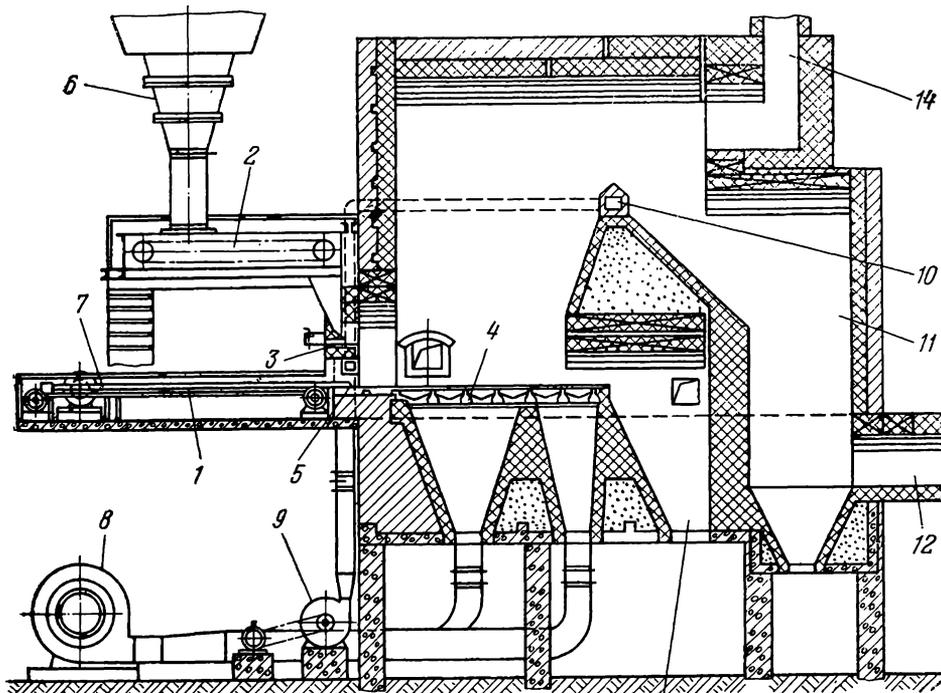
Тип топки	Размер решетки, мм		Активная площадь зеркала горения, м ²	Забрасыватель		Масса, т
	ширина	длина		ширина, мм	число	
ТЧЗ 2700×4000	2700	4000	9,1	600	2	21,4
ТЧЗ 2700×5600	2700	5600	13,4	600	2	25,7
ТЧЗ 2700×6500	2700	6500	15,3	600	2	27,7
ТЧЗ 2700×8000	2700	8000	19,3	600	2	33,5
ТЧЗ 4920×8000	4920	8000	39,0	600	4	—

У топок системы Васильева перемещение шурующей планки осуществляется при помощи двух складных штанг. Топочное устройство представляет собой неподвижную колосниковую решетку, по которой перемещается слой топлива при помощи трехгранной планки, совершающей периодически возвратно-поступательное движение вдоль решетки.

Шурующая планка производит также подачу топлива на решетку и сброс образовавшегося шлака. Цепи-штанги на топках системы Васильева не удовлетворяют условиям необходимой прочности и жесткости и быстро выходят из строя.

Более совершенной конструкцией является топка с шурующей планкой системы Татищева, которая имеет охлаждаемую водой планку и две передвигаемые трубчатые штанги, служащие одновременно для подвода и отвода воды (рис. VIII.3). Для повышения теплопроизводительности топки с шурующей планкой системы Татищева могут переводиться на факельно-слоевое сжигание с помощью применения пневматического заброса топлива в топку.

В этих топках отвеянные вследствие пневмозаброса мелкие частицы топлива сгорают во взвешенном состоянии в топке, а крупные частицы, подаваемые периодически шурующей планкой, сгорают слоем на неподвижной решетке. Благодаря усовершенствованию конструкции привода шурующей планки и применению пневмозаброса в этих топках можно сжигать спекающиеся угли. При работе таких топок на трубах-сушилках ЦОФ «Кальмиусская» теплопроизводительность при решетке площадью 7,2 м² до-



13

Рис. VIII.3. Топка с шурующей планкой системы Татищева, оборудованная устройством пневмозаброса:

1 — штанги шурующей планки; 2 — скребковый питатель; 3 — пневмосопло; 4 — колосники; 5 — шурующая планка; 6 — бункер топлива; 7 — штанги; 8 — вентилятор ВД-12; 9 — вентилятор ВВД-8; 10 — короб и сопло и отсекающего дутья; 11 — газоход; 12 — боров; 13 — зольник; 14 — растопочная труба

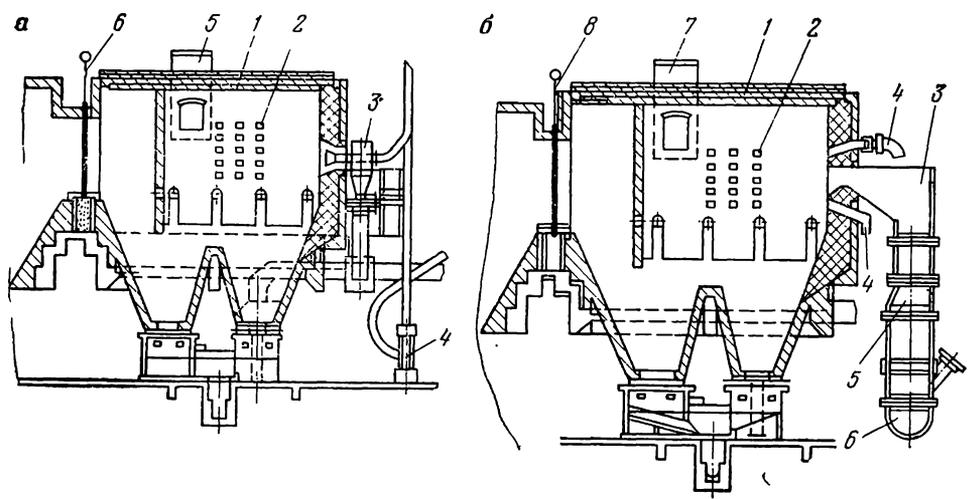


Рис. VIII.4. Пылеугольные топки:

а — с среднеходовыми мельницами; 1 — топка; 2 — фурмы вторичного дутья; 3 — пылеугольная горелка; 4 — вентилятор; 5 — растопочная труба; 6 — шибер; б — с молотковыми мельницами; 1 — топка; 2 — фурмы вторичного дутья; 3 — амбразура; 4 — фурма острого дутья; 5 — шахта; 6 — молотковая мельница; 7 — растопочная труба; 8 — шибер

стигает 11 тыс. кДж/ч тепловое напряжение решетки — до 1740 кДж/(м²·ч) к. п. д. топки составляет 72—82%.

В камерных топках сжигаются твердое, газообразное и жидкое топливо. Преобладающими среди камерных топок являются пылеугольные топки со среднеходными (рис. VIII.4,а) и молотковыми мельницами (рис. VIII.4,б).

Пылеугольные топки обладают крайней простотой и удобны в эксплуатации. Однако они требуют дефицитного растопочного топлива (газ, мазут). Кроме того, они эффективно работают только на малозольном топливе. Для питания этих топок используют обычно часть угольной мелочи, уловленной сухим способом в пылеулавливающих аппаратах сушильной установки.

В качестве топлива для пылеугольных топок могут быть применены угли с выходом летучих веществ более 25%, зольностью не более 15%, у которых коэффициент размолоспособности более 1,1 и температура начала деформации золы более 1150°C. Однако, несмотря на сжигание малозольного топлива, пылеугольные топки работают с низким к. п. д. (85%).

Испытания пылеугольных топок на сушильных установках, проведенные ИОТТ, показали, что основная часть потерь (9,1—13,2%) в пылеугольных топках вызвана химической неполнотой сгорания топлива, в то время как потери от химического недожога в подобных топках котельных установок не превышают 0,5—1%.

Снижение к. п. д. топки происходит также вследствие потерь тепла от механической неполноты сгорания топлива, составляющей 2,1—2,6%, что также выше обычных потерь в аналогичных топках котельных установок.

Теплонапряжение объема пылеугольной топки составляет 160—200 кДж/(м³·ч).

При нормальном избытке воздуха в пылеугольной топке ($\alpha = 1,5$), имеющей открытое исполнение без экранных поверхностей, температура в ней достигает 1250—1300°C, что вызывает плавление золы.

Для улучшения работы топок сушилок на ЦОФ «Донецкая» предусмотрено комбинированное сжигание угольной пыли и жидкого топлива.

Тип мельницы, глубина топок, количество и размещение горелок, форсунок, амбразур, а также скорости в них выбираются по данным нормативного метода «Тепловой расчет котельных агрегатов».

Система пылеприготовления для пылеугольных топок выполняется, как правило, по индивидуальной схеме с прямым вдуванием. Расчет и выбор оборудования для пылеприготовительной установки производится в соответствии с нормативным методом «Расчет и проектирование пылеприготовительных установок котельных агрегатов».

Для растопки топки, а также для зажигания и подсветки пылеугольного факела должно применяться газообразное или жидкое

топливо при расходе его до 10% от номинального количества потребляемого основного топлива.

Для уменьшения потерь тепла предусматривается устройство острого и отсекающего дутья. Пылеугольные топки могут работать с теплонапряжением объема топки 175—230 кДж/(м³·ч). Топки, в которых сжигается жидкое топливо, имеют более высокие показатели работы, чем пылеугольные.

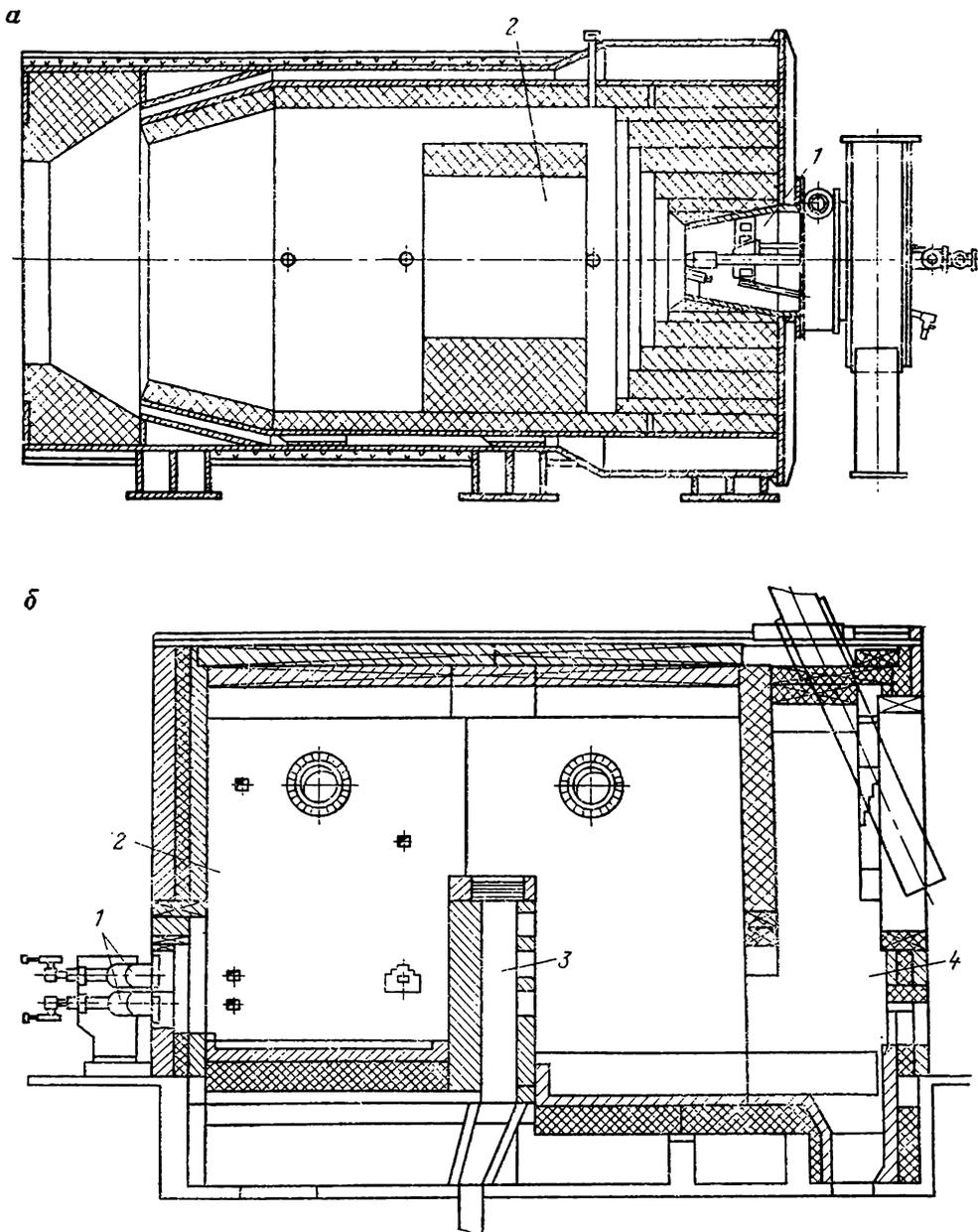


Рис. VIII.5. Топки для жидкого и газообразного топлива:

а — камерная, работающая на мазуте и природном газе (теплопроизводительность 25 Гкал/ч); 1 — газомазутная горелка; 2 — камера сгорания; б — для сжигания мазута; 1 — форсунки; 2 — камера сгорания; 3 — перегородка; 4 — камера смещения

Жидкое топливо и воздух подаются в топку через горелки. Воздух поступает в амбразуру горелки через завихритель, состоящий из улитки. В центре такой горелки расположена форсунка (распылитель) жидкого топлива.

При сжигании мазута особое значение имеет полнота смешения топлива с воздухом, от которой зависят потери тепла с химическим и механическим недожогом. Благодаря применению высокоэффективных горелок и хорошей организации смешения воздуха с топливом в мазутных топках происходит интенсивное расщепление «тяжелых» молекул горючих паров с образованием легковоспламеняющихся и быстро сгорающих газообразных продуктов, почти минуя стадию образования сажи. Потери тепла от механической неполноты сгорания незначительны — менее 1%. Для сжигания мазута принимаются теплонапряжения объема топочной камеры, равные 230—350 кДж/(м³·ч).

В качестве газообразного топлива на сушильных установках применяется природный газ. Он содержит очень мало минеральных примесей. Поэтому топки, предназначенные для его сжигания, не снабжены каким-либо устройством для вывода шлаков из топочной камеры.

Подготовка газообразного топлива к сжиганию заключается лишь в его смешении с воздухом, а сжигание газа складывается всего из двух стадий — подогрева и собственно горения. Образование горючей смеси происходит в топочной камере путем турбулентной диффузии.

Для этих топок также характерен высокий к. п. д. (96%). В сушилках кипящего слоя на ОФ «Должанская-Капитальная» проектом предусмотрено применение камерной топки (рис. VIII.5), работающей на природном газе; теплопроизводительность топки 29 тыс. кДж/ч.

Топка для сжигания мазута (рис. VIII.5,б) представляет собой прямоугольную камеру. Кожух изготовлен из листовой стали толщиной 10 мм. По фронту топки размещены две мазутные форсунки. Воздух для горения подается над форсунками. Воздух для разбавления газов вводится в смесительную камеру через каналы в верхней части топки, что позволяет одновременно охлаждать свод камеры. Изнутри камера футерована шамотным кирпичом. В этой же топке можно сжигать природный газ.

При использовании жидкого или газообразного топлива к. п. д. топки возрастает на 14—25% по сравнению с к. п. д. на твердом топливе. Полностью исключаются озоление сушеного продукта и затраты на шлакозолоудаление и представляется возможность автоматизировать работу топок сушильных установок. При этом стоимость ремонта топок значительно снижается, а удельный расход условного топлива на 1 т высушенного угля вследствие повышения к. п. д. топки заметно уменьшается.

В сушилках кипящего слоя фирм «Хейл энд Паттерсон» и «Линк-Белт» (США) эксплуатируются топки с вибрационной колосниковой решеткой в комплекте с забрасывателями

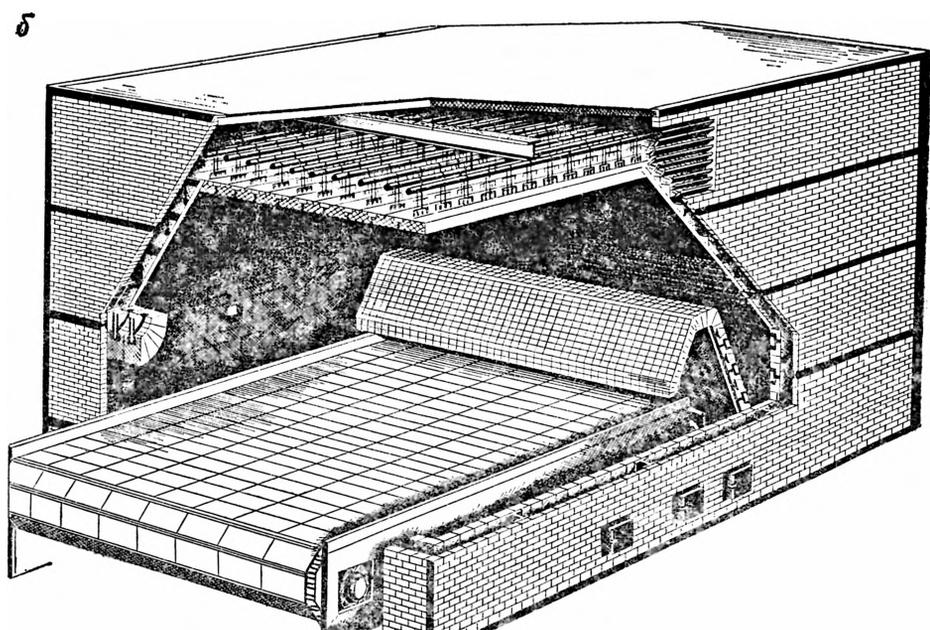
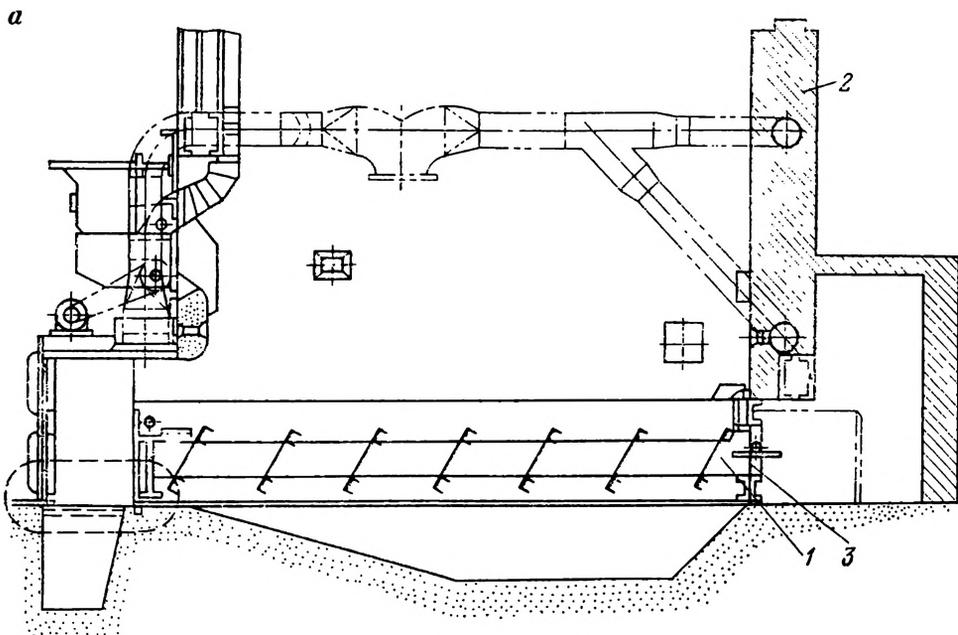


Рис. VIII.6. Топка с вибрационной колосниковой решеткой (*a*) сушилок кипящего слоя фирм «Хейл энд Паттерсон» и «Линк-Белт» (США) и топочная камера с воздухоохлаждаемыми стенками и сводом (*б*):

1 — вибрационная колосниковая решетка; 2 — топка; 3 — воздушный шибер

(рис. VIII.6,а). Сжигание топлива в этих топках происходит по факельно-слоевому методу.

Механическая часть топки с вибрационной колосниковой решеткой изготавливается фирмой «Детройт Стокер» (США). Основной частью топки является вибрационная колосниковая решетка.

Вибрационная колосниковая решетка содержит подвижную раму с колосниками из высокопрочного легированного чугуна. Колосники прижаты к подвижной раме швеллерами. Подвижная и неподвижная рамы соединены между собой посредством наклонных упругих пластин. Нижняя неподвижная рама установлена на фундаменте. С целью предотвращения провала частиц топлива колосниковое полотно окантовано с боков выступающими уплотнительными листами. Колосниковая решетка состоит из колосников различной ширины. Высота решетки — не более 640 мм, живое сечение колосниковой решетки — 5%. Вибрация передается верхней раме с колосниками и топливом через шатун от эксцентрикового вибратора, установленного у фронта топки. Решетка снабжена боковыми лабиринтными и задним замковым уплотнениями. Металлоемкость вибрационной колосниковой решетки в 2 раза меньше цепной.

Колосниковая решетка вместе со слоем горящего топлива подвергается вибрации, передаваемой от эксцентрикового вибратора через определенные промежутки времени (через 2 с и через 4 мин). Направление виброколебаний составляет с горизонталью угол 30° , благодаря чему топливо слоем высотой 75 мм плавно перемещается вперед к фронту топки. Амплитуда виброколебаний составляет 6—8 мм, частота вращения эксцентрика 300—400 об/мин. Скорость перемещения топлива и шлака на решетке регулируется изменением амплитуды колебаний вибратора. Коэффициент избытка организованной подачи воздуха под решетку составляет 1,93, на выходе из топки — 3. Для полного сгорания угольной мелочи и продуктов газификации подается вторичный воздух с напором 7110 Н/м^2 . Скорость газов над слоем топлива в топке равна $1,37 \text{ м/с}$, разрежение в топке над решеткой составляет 80 Н/м^2 .

В топках с вибрационной колосниковой решеткой и пневмомеханическим забросом можно сжигать топливо крупностью 0—30 мм с большим содержанием мелочи. Под вибрационную колосниковую решетку подается воздух с напором до 150 Н/м^2 , решетка не имеет дутьевых зон.

В табл. VIII.3 приведены основные технические показатели топков с вибрационными колосниковыми решетками, установленных на сушилках кипящего слоя фирм «Хейл энд Паттерсон» и «Линк-Белт» (США).

Теплонапряжение решетки в этих топках в 2—3 раза выше, чем в топках с цепными решетками прямого хода.

В зарубежной практике нашли применение топочные камеры с воздухоохлаждаемыми стенками, что исключает необходимость применения третичного воздуха, подаваемого вентилятором для

разбавления горячих дымовых газов до необходимой температуры (см. рис. VIII.6,б).

Топочная камера выполняется с подвесным сводом и двойными стенками, охлаждаемыми присасываемым воздухом. Воздух для разбавления топочных газов до температуры на выходе из топки 650°C присасывается через специальные воздушные каналы, расположенные в верхней части топки, в подсводном пространстве. Оттуда воздух поступает в полость между боковыми стенками топки, а далее — непосредственно в топочную камеру через лабиринтные щели, образуемые кирпичами внутренних боковых стен топки.

Габаритные размеры топочных камер, оборудованных вибрационными колосниковыми решетками, даны в табл. VIII.4.

Таблица VIII.3

Технические показатели топок с вибрационными колосниковыми решетками

Площадь колосниковой решетки, м ²	Размер решетки, мм		Теплопроизводительность топки, тыс. кВт	Видимое тепловое напряжение зеркала горения решетки, кВт/м ²	Число забрасывателей
	ширина	длина			
10,3	2435	4267	28,0	2400	2
11,7	2670	4380	32,5	2500	2
18,6	4940	3760	51,2	2400	4
21,8	5156	4267	61,0	2530	4

Таблица VIII.4

Технические показатели топочных камер с вибрационными решетками

Площадь вибрационной решетки, м ²	Размеры топочной камеры, м			Объем топочной камеры, м ³	Теплонапряжение объема, кВт/м ³
	ширина	длина	высота		
10,8	3,55	6,93	5,95	146	167
11,7	3,62	7,73	5,95	166	167
18,6	5,83	7,76	5,95	269	167
21,8	5,85	8,96	5,95	312	167

Топки кипящего слоя с наклонной цепной решеткой нашли применение в зарубежной практике при сушке антрацита и фосфатов. Теплопроизводительность этих топок составляет 4640—8700 кДж/ч при сжигании антрацита с теплотой сгорания 6500 кДж/кг.

На рис. VIII.7 показана топка кипящего слоя с наклонной колосниковой решеткой. Из бункера 1 уголь поступает в питатель 2, производительность которого можно регулировать. Из питателя уголь попадает в рукав для подачи топлива 3. Через сопло 4 в этот рукав поступает воздух, который, с одной стороны, уменьшает налипание топлива на стенки рукава, а с другой — изменяет направление подачи топлива в псевдооживленный слой. Крупные частицы топлива свободно падают на кипящий слой 5, а мелкие

частицы, взвешенные потоком газов, сгорают над кипящим слоем. Во время падения, и прежде всего при контакте с поверхностью кипящего слоя, топливо подсушивается и дегазируется. Таким образом, в кипящем слое сгорает преимущественно кокс. Решетка 6 цепная колосниковая, ее колосники изготовлены из стали. Наклон

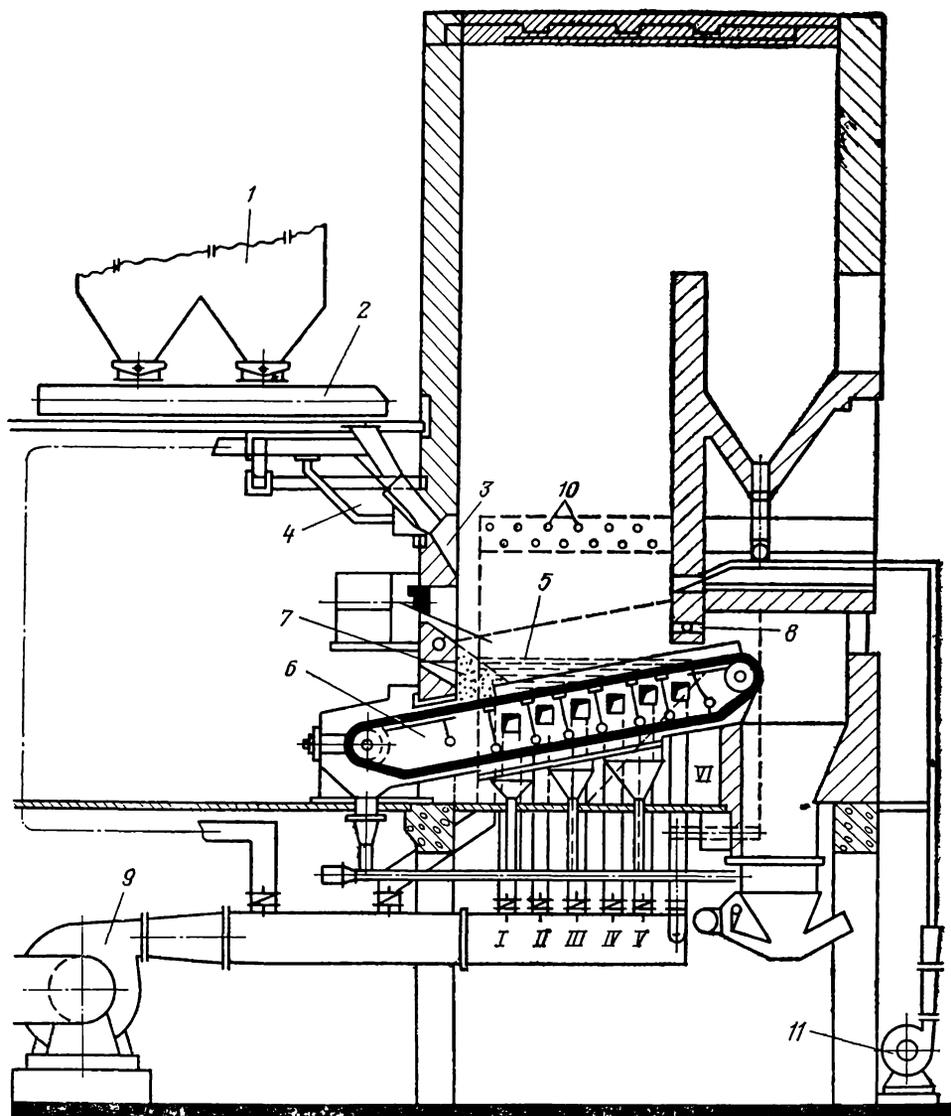


Рис. VIII.7. Топка кипящего слоя с наклонной цепной решеткой

решетки относительно горизонтали составляет угол $8-15^\circ$. Колосниковая решетка снабжена шестью дутьевыми зонами 7. Максимальная высота слоя находится над зоной I. Наибольшее давление воздуха также поддерживается в зоне I, которое составляет в зависимости от высоты слоя от 1800 до 3400 Н/м². Так как над следующими зонами высота кипящего слоя уменьшается, посте-

пенно понижается также давление воздуха в зонах для обеспечения одинаковой скорости фильтрации, достигая 250—500 Н/м² в двух последних зонах, находящихся вне кипящего слоя и служащих для выжигания шлака. Горение топлива происходит над первыми четырьмя зонами. Колосниковая решетка обеспечивает только распределение воздуха в кипящем слое и служит для удаления шлака. Уплотнение между поверхностью колосниковой решетки и передней стенкой топки создается сжатым воздухом. Над задней частью решетки расположено воздушное сопло 8, которое обдувает поверхность удаляемого шлака, что обеспечивает лучший его выжиг. Воздух, необходимый для псевдооживления слоя и поддержания необходимой температуры в слое, подается вентилятором 9.

Для полного сгорания горючих газов вентилятором 11 или вентилятором вторичного дутья подводится вторичное дутье через сопла 10. Коэффициент избытка воздуха в камере над слоем $\alpha = 1,2-1,3$. Скорость воздуха в камере дожигания менее 5 м/с; при более высоких скоростях значительно увеличивается унос топлива, который может достигнуть 60% от массы подаваемого топлива.

Унос из топки по гранулометрическому составу (класс 0—1 мм) и величине соответствует уносу из обычных слоевых топков. Влажность сжигаемого угля ограничивается только возможностью транспортирования топлива в кипящий слой, которая не должна превышать 8—10%.

Колосниковая решетка имеет практически ту же длину, что и цепная колосниковая решетка, ее ширина равна примерно 1/10 ширины колосниковой решетки. Топки легко поддаются комплексной автоматизации и могут работать в диапазоне 30—100% от номинальной мощности. Важным признаком сжигания топлива в топках кипящего слоя является газификационный характер процесса.

Коэффициент избытка воздуха в слое меньше единицы, поэтому температура горящего слоя меньше температуры жидкоплавкого состояния золы. Дожигание мелочи, продуктов газификации и уловленного уноса, возвращаемого в топку, осуществляется в объеме над слоем, в который подается вторичный воздух 10.

Для удаления золы используется свойство смачиваемости коксовых частиц расплавленными частицами золы. В топках, в которых зола удаляется в виде шлака, поддерживается температурный уровень, превышающий начало деформации золы, но не доводящий ее до жидкоплавкого состояния. Оптимальным температурным уровнем для слоя считается температура 1100—1150°С. При этом более или менее расплавленные частицы золы агломерируют при соприкосновении друг с другом и при достижении размеров, превышающих размеры частиц, поддерживаемых во взвешенном состоянии, агломераты выпадают на полотно движущейся решетки.

В топках кипящего слоя с наклонной колосниковой решеткой эффективно сгорают антрацитовые штыбы, сжигание которых на

обычных цепных решетках весьма затруднено. Хотя эти топки хорошо зарекомендовали себя преимущественно при сжигании антрацитов марки АШ и каменных углей марки Т, их можно использовать также для сжигания различных видов твердых топлив с частицами размером 0—20 мм независимо от зольности.

При содержании в топливе 75% частиц размером 0—0,5 мм и 25% частиц размером 0,5—1 мм регулирование кипящего слоя затруднено. Допускается содержание в топливе не более 30% частиц менее 0,5 мм и до 40% частиц менее 1 мм. Оптимальной крупностью антрацита является класс 0—6 мм, каменного угля — класс 0—10, 0—15 и 0—20 мм.

Теплонапряжение объема топki составляет 150—240 кВт/м³.

Техническая характеристика топki кипящего слоя

Теплонапряжение колосниковой решетки, кВт/м ² . . .	14—18·10 ⁶
Максимальная высота псевдооживленного слоя, мм . . .	500—800
Нижний предел теплопроизводительности топki, % . . .	30
Температура воздуха, подаваемого в топку, °С	10—150
Давление воздуха, подаваемого под колосниковую решетку, Н/м ²	1800—3400
Коэффициент избытка воздуха в топке над слоем	1,2—1,3
Концентрация золы в продуктах сгорания, г/м ³	20—80
Максимальная скорость колосниковой решетки, м/ч	60—140
Диапазон регулирования скорости решетки	1—6

§ 2. ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ТОПОК

Растопочные трубы применяют для розжига топki и аварийного выброса газов из нее во время остановки сушилки. Размеры растопочных труб определяются объемом пропускаемых газов. Площадь сечения растопочной трубы определяется по формуле

$$F_{p.тр} = \frac{KBV(t_T + 273)}{3600 \cdot 273v_T}, \text{ м}^2, \quad (\text{VIII.4})$$

где K — коэффициент, характеризующий пропускную способность растопочной трубы; $K=0,4 \div 0,5$; B — расход топлива, кг/ч; $V = \alpha V_0$ — объем воздуха, расходуемого на сжигание топлива, м³/кг; V_0 — теоретический расход воздуха на сжигание 1 кг топлива, м³/кг; α — коэффициент избытка воздуха на выходе из топki; t_T — температура в трубе, К; v_T — скорость газов, принимаемая 5—10 м/с.

Диаметр растопочной трубы рассчитывается по формуле

$$D_{p.тр} = \sqrt{1,27F_{p.тр}}, \text{ м}. \quad (\text{VIII.5})$$

Высота растопочной трубы зависит от теплопроизводительности топki. При теплопроизводительности топki до 15 и 40 тыс. кВт высота трубы равна соответственно 30 и 45 м.

Шибер и клапан являются неотъемлемой частью растопочной трубы. Конструкция и материал шибера выбираются в зависимости от максимальной температуры дымовых газов, которые проходят через него.

На топках сушильных установок нашли применение клапаны различной конструкции, которые в большинстве случаев деформи-

ругются, перекашиваются в направляющих и заклиниваются. Опыт показывает, что большая надежность работы клапанов достигается в том случае, если они размещаются на некотором расстоянии от топки и не воспринимают прямого лучеиспускания из топок.

На барабанных сушилках ЦОФ «Калининская» и «Кадиевская» применяют клапаны, набранные из отдельных пластин с шарнирными соединениями между собой (рис. VIII.8). Клапан такой конструкции не деформируется; он создает хорошие условия постоянного прогрева растопочной трубы и очень удобен в обслуживании.

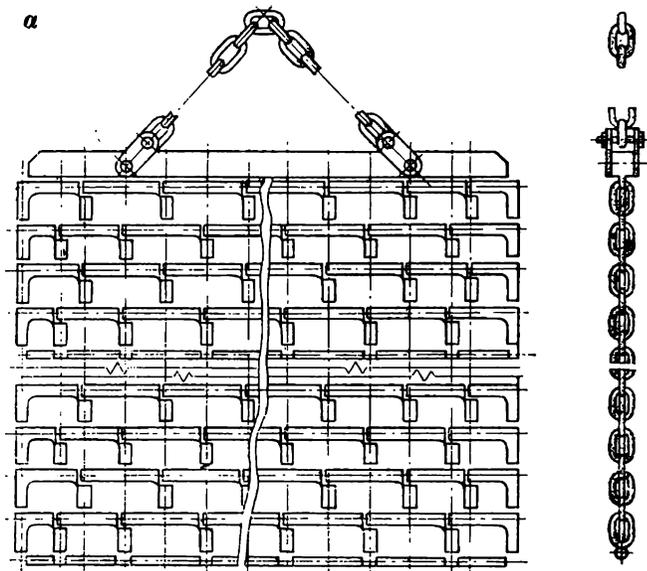
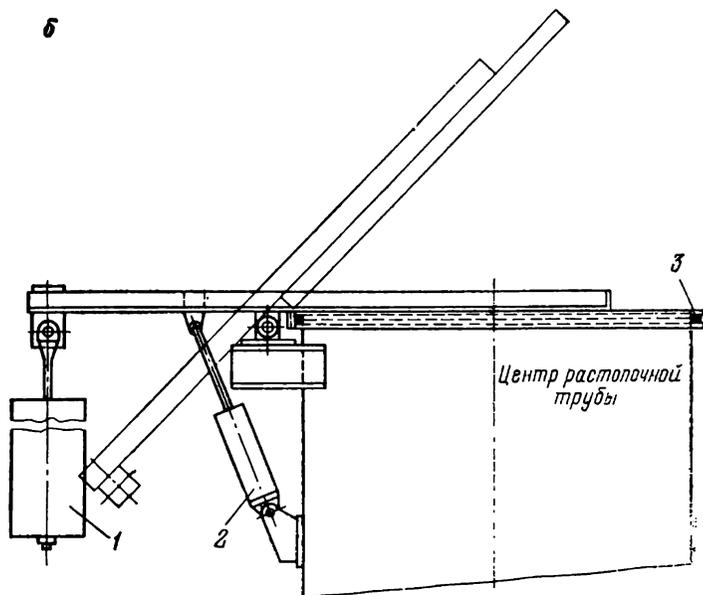


Рис. VIII.8. Клапаны с шарнирными соединениями пластин (а) и растопочной трубы сушилки кипящего слоя с пылеугольной топкой (б):

1 — противовес; 2 — цилиндр пневмопривода; 3 — асбестовое уплотнение



В сушилках кипящего слоя с пылеугольными топками растопочные трубы устанавливаются с боковой стороны топки. Они служат как растопочные трубы и как предохранительные клапаны. Клапаны устанавливаются сверху растопочной трубы в виде заслонки (см. рис. VIII.8).

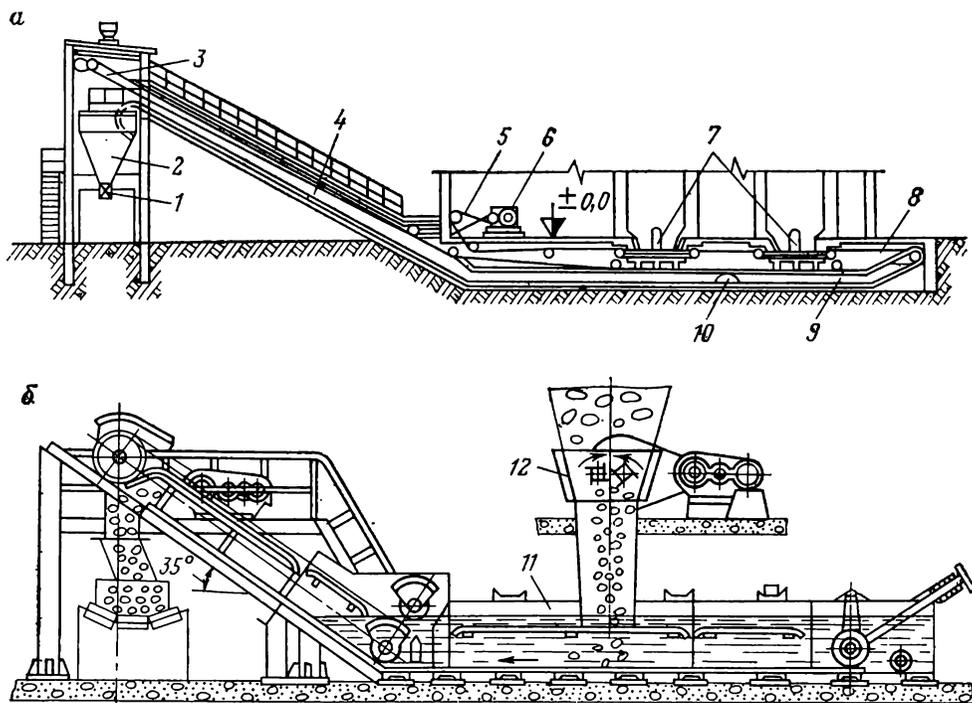


Рис. VIII.9. Схема скреперной установки (а) и агрегат для гашения, транспортирования шлака и золы типа АГТШ (б):

1 — челюстной затвор; 2 — бункер; 3, 5, 8 — трос; 4 — наклонная эстакада; 6 — лебедка; 7 — бункера топки; 9 — скреперный канал; 10 — ковш; 11 — скреповый конвейер; 12 — шлакоприемник

На топках барабанных сушилок ЦОФ «Сибирь» применен щелевой отвод газов из топки, который позволяет значительно улучшать тягу газов в растопочную трубу. В своде образуется щель размером около 1 м на всю ширину топки. Клапан устанавливается в зоне, исключаящей нагрев клапана лучеиспусканием горящего слоя топлива.

Топки сушильных установок, работающие на твердом топливе, имеют устройства шлакозолоудаления для уборки и транспортирования шлака. Обычно на топках сушильных установок применяется механическое шлакозолоудаление. Механизация шлакозолоудаления осуществляется применением скреперных установок (см. рис. VIII.9). Системы скреперного шлакоудаления при помощи скреперных конвейеров отличаются простотой конструкции и обслуживания. Эти системы предусматривают устройство под топками сушильных установок канала, выложенного стальными листами и заполненного водой. Шлак и зола спускаются в канал, по дну которого перемещаются ковш-скрепер или скреповый кон-

вейер. В настоящее время находит широкое применение агрегат АГТШ конструкции Гипромашуглеобогащения (см. рис. VIII.9) для гашения, транспортирования шлака и золы.

Агрегат состоит из горизонтально-наклонного скребкового конвейера и шлакоприемников. Горячий шлак и зола из пода топки поступают в шлакоприемник, где они измельчаются, и, проходя через направляющий соединительный рукав, попадают на конвейер, горизонтальная часть которого наполнена водой. В этой части конвейера шлак и зола гасятся и охлажденные до температуры 60°C скребковой цепью конвейера транспортируются к разгрузочной течке.

Благодаря относительно небольшой скорости движения скребковой цепи шлак и зола, проходя по наклонной части конвейера, обезвоживаются и через разгрузочную течку направляются на ленточный конвейер и транспортируются к месту назначения.

С целью улучшения санитарно-гигиенических условий в месте установки агрегата направляющий рукав погружен своим концом в воду. Образующий при этом гидравлический затвор предохраняет помещение от пара, выделяемого при гашении шлака и золы. Управление агрегатом АГТШ производится как с места установки, так и с диспетчерского пульта.

Топочные камеры сушильных установок выполняются из мелкоштучного шамотного кирпича.

Шамотный кирпич и изделия изготавливаются из обожженной огнеупорной глины, размолотой в порошок, шамота с добавкой сырой глины посредством формовки, сушки и обжига. Химический состав шамотного кирпича следующий, %:

Окись алюминия Al_2O_3	Не менее 30
» кремния SiO_2	» 60
» железа Fe_2O_3	» 2
Щелочь	Небольшое количество

В настоящее время топки сушильных агрегатов углеобогажительных фабрик выполняются, как правило, из шамотного кирпича классов А и Б. В процессе эксплуатации шамотная футеровка разрушается под действием высоких температур и расплавленных топочных шлаков. Увеличить срок службы топок сушильных установок возможно применением новых видов эффективных огнеупорных материалов — огнеупорных бетонов.

Бетоны на фосфорных связках и корундовых заполнителях могут применяться при температуре до 1800°C.

КузНИИШахтострой провел исследования по применению жаростойких бетонов различных композиций в реальных условиях эксплуатации топок сушильных установок. В частности, огнеупорные блоки были вмонтированы в футеровку топки трубы-сушилки на ЦОФ «Абашевская». Блоки эксплуатируются в боковых стенах топки в зоне топочного пространства при действии топочных газов с максимальной температурой 1320—1550°C. Применение огнеупорной футеровки топки, выполненной на фосфатной связке, значительно увеличило срок службы топочных камер.

Глава IX

ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЕ

Надежность и эффективность работы сушилок в значительной мере определяется правильностью выбора и эксплуатации пылеулавливающего оборудования.

Сушильные установки выбрасывают в воздушный бассейн отработанные дымовые газы с относительно высокой остаточной запыленностью и содержанием продуктов сгорания топлива.

Предельно допустимый выброс (ПДВ) вредных веществ после газоочистных аппаратов сушильных установок регламентируется едиными для всех промышленных предприятий санитарными нормами СН 369—74.

Загрязнение воздушного бассейна вредными веществами вызывает серьезные нарушения экологической системы и наносит большой ущерб народному хозяйству. В ряде производств вместе с отходящими газами сушильных установок в атмосферу выбрасывается большое количество ценных веществ.

Таким образом, важная социальная проблема защиты воздушного бассейна от загрязнения вредными веществами неразрывно связана с проблемой утилизации и возврата в производство продуктов и сырья.

На сушильных установках при сушке минерального сырья нашли широкое применение различные типы циклонов.

Наибольшее распространение получили разработанные НИИОГазом циклоны типа ЦН (рис. IX.1), предназначенные для очистки газа от грубой пыли. Эффективность очистки газов в этих циклонах составляет 85—95%. Они выпускаются во взрывобезо-

пасном исполнении диаметром до 5000 мм (табл. IX.1). При очистке больших количеств газа используют несколько (до восьми) циклонов. Допускаемая запыленность газа 400 г/м³. Гидравлическое сопротивление циклонов 400—1000 Н/м².

Циклоны СКЦН-34 (рис. IX.2) повышенной эффективности изготовляются с цилиндрической частью диаметром от 600 до 3600 мм

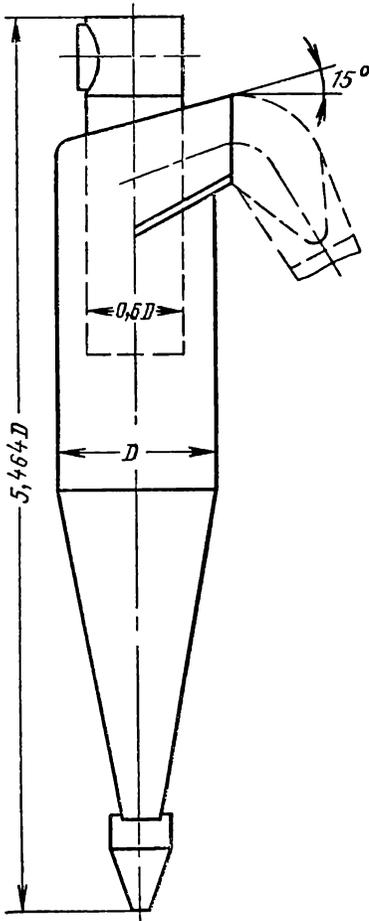


Рис. IX.1. Циклон
НИИОГаз

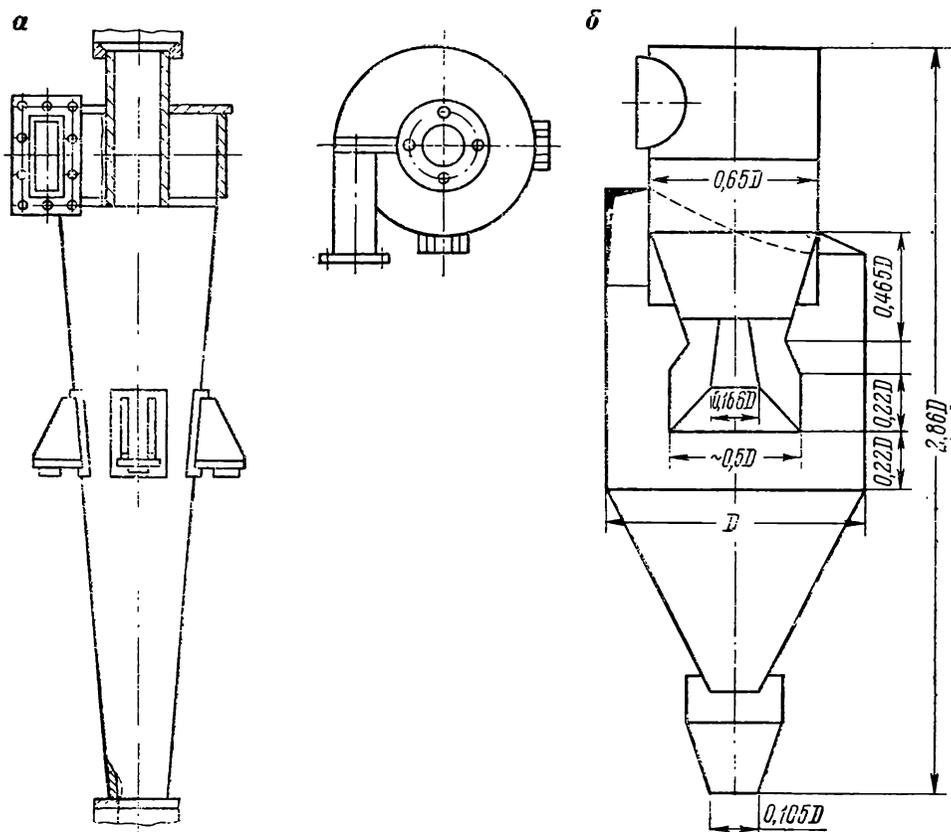


Рис IX.2. Циклоны СКЦН-34 (а) и ЦП-1 (б)

Таблица IX.1

Технические характеристики циклонов ЦН-15 во взрывобезопасном исполнении

Диаметр, мм	Производительность, тыс/м ³	Общая длина, мм	Масса, т	Диаметр, мм	Производительность, тыс/м ³	Общая длина, мм	Масса, т
1120	11—13	7058	1,62	2800	70—82	16 807	11,10
1250	13—17	7802	1,98	3000	82—90	17 925	12,60
1400	17—20	8753	2,54	3150	90—100	18 843	15,40
1600	20—24	9073	3,25	3350	100—120	20 082	20,00
1800	24—28	11 095	4,09	3750	120—140	22 397	26,80
2000	28—32	12 020	5,36	4250	140—180	25 213	34,80
2240	38—51	13 475	6,60	4500	180—200	26 660	38,70
2360	51—61	14 151	7,30	5000	200—230	29 455	47,30
2650	61—70	15 890	7,99				

с левым и правым вращением газового потока. Эти циклоны имеют соотношение диаметра выхлопной трубы и циклона, равное 0,34. Повышение эффективности циклонов достигается увеличением гидравлических потерь в результате сужения сечений входного и выходного отверстий.

Циклоны СКЦН-34 работают при допустимой запыленности газа 1000 г/м³ и с коэффициентом гидравлического сопротивления 1150.

Кузнецким заводом полимерного машиностроения выпускаются циклоны СКЦН-34 следующих типоразмеров:

Диаметр, мм	Длина циклона с бункером пыли, мм	Диаметр, мм	Длина циклона с бункером пыли, мм
600	2415	2200	8580
900	3240	3600	13120
1470	5560		

Циклоны СКЦН-34 имеют для обогрева стенок паровую рубашку, рассчитанную на давление 0,5 МПа. Внутренние стенки циклона и бункера пыли выполнены из нержавеющей стали Х18Н10Т.

Характеристика циклонов ЦП-1 конструкции ЦКТИ (см. рис. IX.2) приведены в табл. IX.2.

Таблица IX.2

Характеристики циклонов ЦП-1

D, мм	H, мм	A, мм	Производительность, тыс. м ³ /ч
1150	3290	300	5—7,5
1450	4150	300	10
1750	5000	300	15
2100	6000	300	20
2400	6860	300	25
2750	7860	300	30
3150	9000	330	40
3600	10 300	378	50—60
4000	11 400	420	70—80

Диаметры циклонов НИИОГаз и ЦП-1 определяются по формуле

$$D = \sqrt{\frac{V_{\Gamma}}{2830v_{\Gamma}}}, \text{ м,} \quad (\text{IX.1})$$

где V_{Γ} — объем газов, м³/ч; v_{Γ} — скорость газа, отнесенная к сечению наружного цилиндра, м/с.

На рис. IX.3 показан циклон Гипродревпрома, имеющий своеобразную конструкцию выходной трубы в виде жалюзи.

Циклоны Гипродревпрома серии Ц имеют аэродинамическое сопротивление 1400—1800 Н/м², что несколько выше, чем у циклонов ЦН-15 (1200 Н/м²). Циклон Гипродревпрома серии Ц диаметром 1150 мм имеет среднюю эффективность 99% против 87,4%

у циклона ЦН-15 диаметром 800 мм при улавливании пыли калийной соли следующего гранулометрического состава:

Класс, мм	Выход, %
1—3	0,55
0,7—1	1,26
0,45—0,70	7,38
0,25—0,45	35,2
0,16—0,25	31,12
0,063—0,16	23,15
—0,063	1,35

На эффективность работы циклонов значительно влияет входная запыленность газов. На рис. IX.4 показана зависимость эффек-

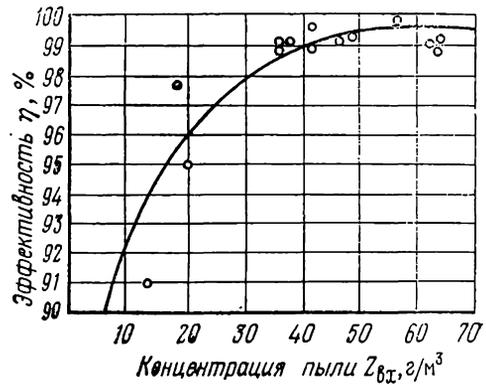
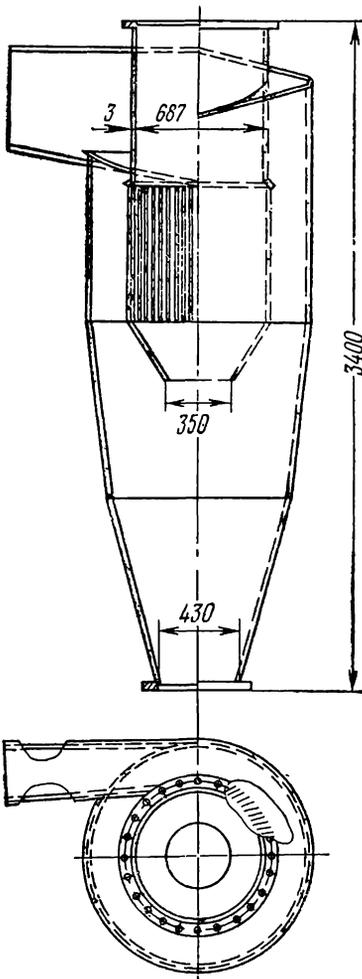


Рис. IX.4. Зависимость эффективности циклонов от входной запыленности газов

Рис. IX.3. Циклон Гипродревпрома серии Ц

тивности циклона Гипродревпрома серии Ц от входной запыленности газов при сушке калийной соли. Эффективность циклона в значительной степени зависит от концентрации пыли в газах до 40 г/м^2 (см. рис. IX.4).

В зарубежной практике на сушильных установках нашли применение различные типы циклонов; некоторые из них показаны на

рис. IX.5. Технические характеристики этих циклонов приведены в табл. IX.3.

На сушильных установках для сухой очистки газа от пыли с частицами размером более 5—10 мкм применяются батарейные циклоны, состоящие из большого числа параллельно работающих циклонных элементов малого диаметра, смонтированных в общем корпусе. Наиболее распространены циклонные элементы диамет-

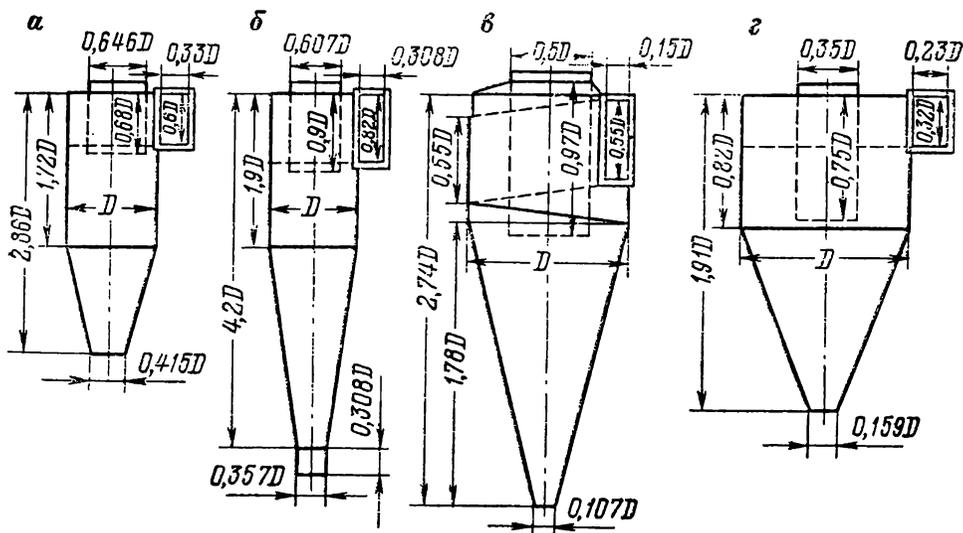


Рис. IX.5. Зарубежные циклоны:

а — «Флекс-Клин» (США); б — «Центрикол» (США); в — «Мак-Нелли» (США); г — Ведаг» (ФРГ)

Таблица IX.3

Технические характеристики зарубежных циклонов

Тип циклона	Коэффициент сопротивления	Условная скорость газов в поперечном сечении циклона, м/с
• Флекс-Клин* (США)	54	5,7
• Центрикол* (США)	40	6,95
• Мак-Нелли* (США)	402	2,02
• Ведаг* (ФРГ)	—	1,79

ром 150 и 250 мм. В циклонном элементе вращение газа обеспечивается не тангенциальным вводом его, как в циклонах типа ЦН, а с помощью специального направляющего аппарата-завихрителя типа розетки или с помощью улиточного входа. Допускаемая запыленность газа 50—100 г/м³, гидравлическое сопротивление батарейного циклона 500—1000 Н/м².

В настоящее время Кушинский машиностроительный завод выпускает батарейные циклоны БЦ-2 (рис. IX.6), которые в зависимости от типоразмера аппарата имеют от 20 до 56 цельнолитых циклонных элементов с цилиндрической частью, имеющей внутрен-

ний диаметр 254 мм, снабженных профилированными направляющими аппаратами типа розетки с углом наклона 25°. Каждый аппарат разделен на две параллельно работающие секции.

Техническая характеристика батарейных циклонов БЦ-2

Производительность, тыс. м ³ /ч . . . . .	.15—50
Допустимая запыленность, г/м ³	— До 75
Температура очищаемого газа, °С	— До 400
Коэффициент гидравлического сопротивления	— 65

В зарубежной практике в сушилках кипящего слоя нашли применение батарейные циклоны с циклонными элементами диаметром 400, 600 и 900 мм с закручивающим устройством типа розетки (рис. IX.6,б). Скорость газов в циклонных элементах составляет 2,8 м/с, гидравлическое сопротивление аппарата — 1800 Н/м².

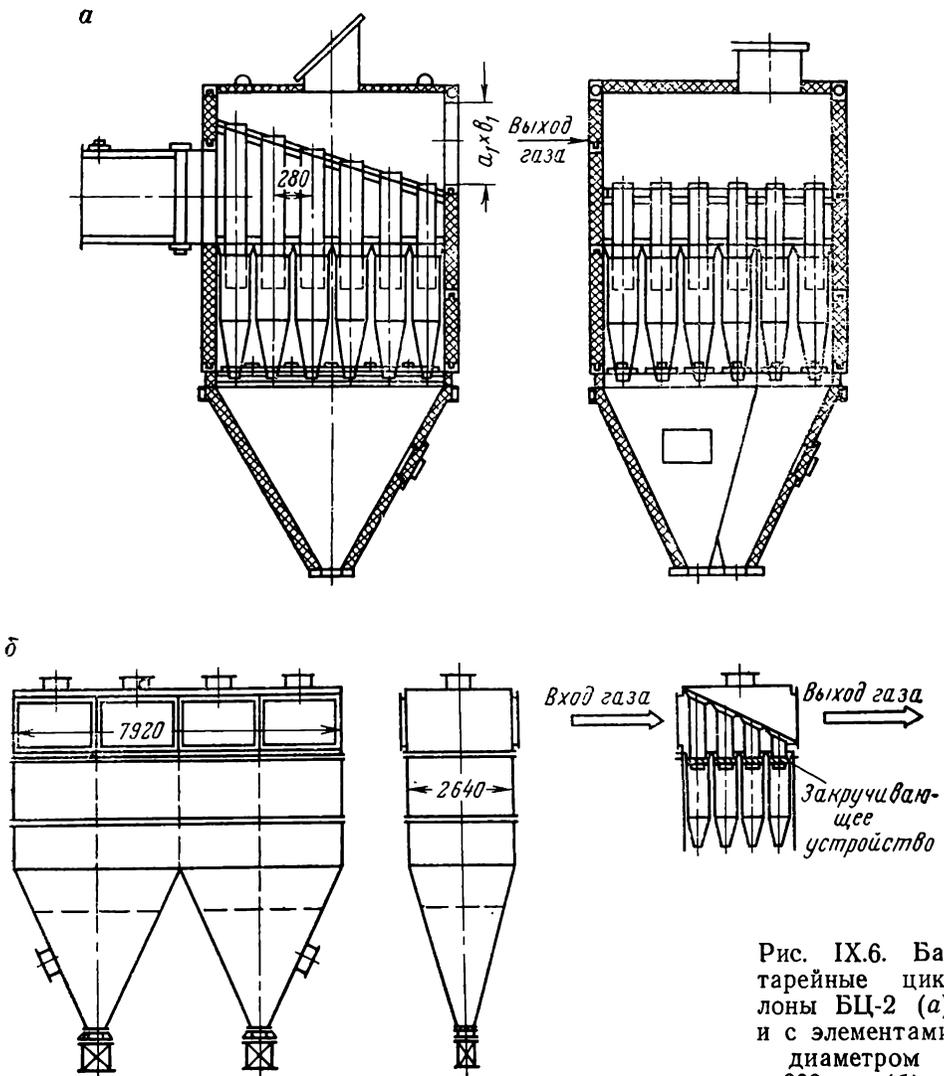


Рис. IX.6. Батарейные циклоны БЦ-2 (а) и с элементами диаметром 600 мм (б)

Эффективность улавливания пыли в аппарате с циклонными элементами диаметром 600 мм приведена ниже:

Размер частиц пыли, мкм	Фракционный к. п. д. аппарата, %
Более 20	100
15—20	98
10—15	81
6—10	73

ЦКТИ разработал и внедрил в системе пылеприготовления на Иркутской ТЭЦ-6 батарейный циклон с цилиндрическим корпусом производительностью 45—50 тыс. м³/ч. Он состоит из 13 циклон-

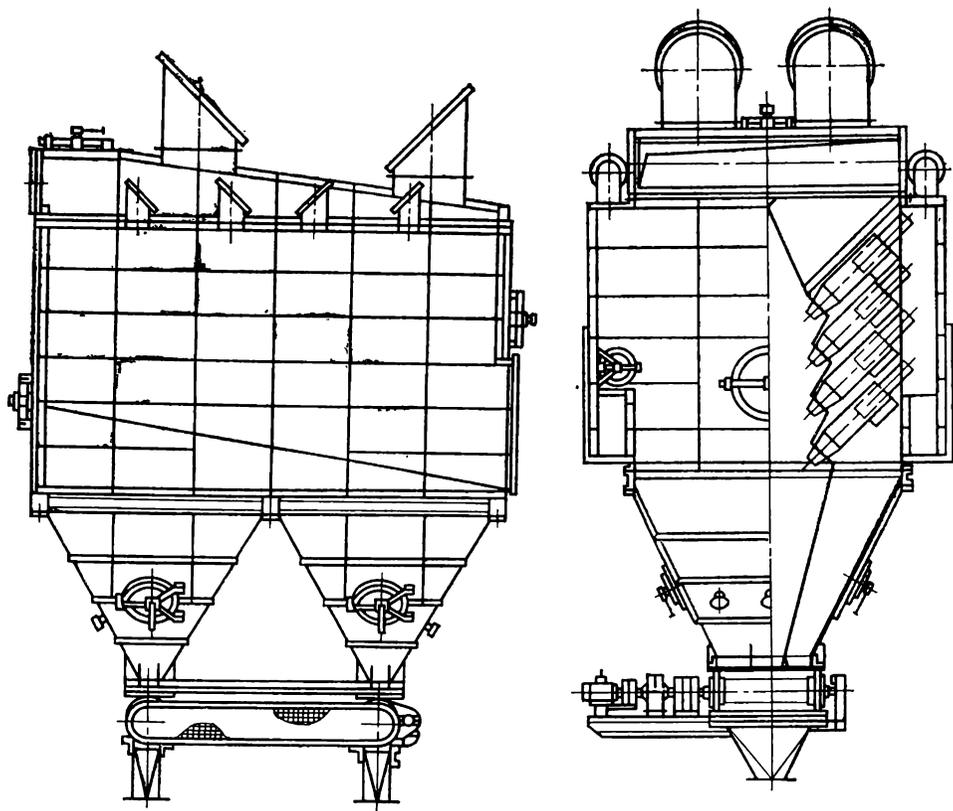


Рис. IX.7. Батарейный пылеуловитель типа ПБЦ

ных элементов диаметром 512 мм, выполненных из стандартных труб. Корпус изготовлен из трубы диаметром 530 мм, выхлопная труба имеет диаметр 273 мм, высота цилиндрической части — 1200 мм, длина конусной части элемента — 665 мм, диаметр пылевыпускного отверстия — 246 мм. Завихритель лопаточного типа с лопатками постоянной высоты — 175 мм (от центральной втулки до наружной обечайки). Условная скорость газов в циклонных элементах 4,6 м/с, сопротивление аппарата — 1250—1500 Н/м².

Эффективность очистки газов примерно такая же, как у батарейного пылеуловителя типа БЦУ, разработанного б. трестом «Энергоуголь». Аппарат типа БЦУ состоит из циклонов диаметром 254 мм с улиточным входом и углом охвата корпуса 180°. Его высота 265 мм, ширина 53 мм. Общая высота циклона 890 мм, глубина погружения выхлопной трубы диаметром 127 мм составляет 330 мм.

На рис. IX.7 показан батарейный пылеуловитель типа ПБЦ, разработанный ИОТТ и Гипромашуглеобогащением.

Таблица IX.4
Технические характеристики пылеуловителей типа ПБЦ

Основные параметры	ПБЦ-50	ПБЦ-100
Производительность по поступающим газам, тыс. м ³ /ч	50—60	100—120
Аэродинамическое сопротивление, Н/м ²	1300—1500	1300—1500
Эффективность пылеулавливания, %	95,5—99,8	95,5—99,8
Установленная мощность электродвигателя, кВт	1,1	1,1
Масса, т	12,5	21

Таблица IX.5
Характеристики пылеуловителей типа ПБЦ различных типоразмеров

Типоразмер	Число циклонных элементов	Производительность, тыс. м ³ /ч	Масса, т
ПБЦ-15	24	12—15	4,0
ПБЦ-25	36	25—30	5,0
ПБЦ-35	48	35—40	6,1
ПБЦ-50	96	50—60	12,5
ПБЦ-100	192	100—120	21,0

Аппарат типа ПБЦ представляет собой батарею циклонов диаметром 250 мм, состоящую из циклонных элементов с полуулиточным вводом газа, плоской крышки и камер раздачи и отвода газа специальной конструкции.

Степень улавливания пыли в батарейном циклоне типа ПБЦ составляет 97,14—98,9%. При стабильной работе сушильной установки с газами, имеющими температуру перед дымососом 80—90°С эффективность улавливания пыли находится в пределах 98,7—98,9%. Аэродинамическое сопротивление пылеуловителя составляет 1450—1500 Н/м².

В табл. IX.4 приведены технические характеристики аппаратов ПБЦ-50 и ПБЦ-100.

Машиностроительный завод № 2 им. Пархоменко объединения «Каргомаш» и Кызыл-Кийские ЦЭММ объединения «Средазуголь» выпускают аппараты типа ПБЦ различных типоразмеров (табл. IX.5).

В качестве аппаратов окончательной очистки газов на сушильных установках нашли применение центробежные скрубберы ЦС-ВТИ диаметром 1000—1300 мм, аппараты МП-ВТИ с четырехрядной прутковой решеткой диаметром 2400—3000 мм.

Эти аппараты отличаются низкой эффективностью очистки газов, которые вызвали необходимость изыскания и разработки новых высокоэффективных мокрых пылеуловителей.

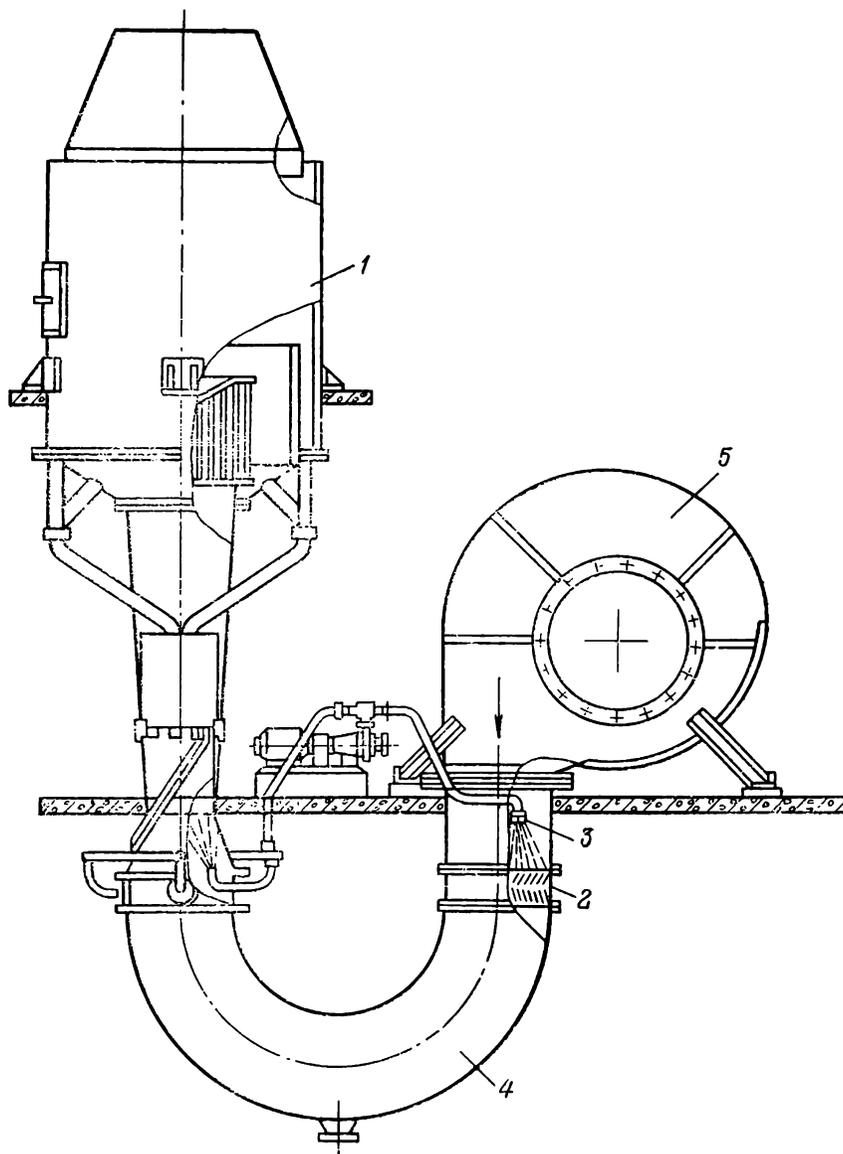


Рис. IX.8. Мокрый пылеуловитель типа МПР:
1 — сепаратор; 2 — решетка; 3 — форсунка; 4 — колено; 5 — дымосос

ИОТТ и Гипромашуглеобогащением созданы высокоэффективные аппараты мокрого пылеулавливания МПР-75 и МПР-100, предназначенные для окончательной очистки запыленных газов перед выбросом их в атмосферу на сушильных установках углеобогатительных фабрик.

Принцип действия аппаратов основан на методе, позволяющем одновременно увеличивать относительную скорость, а также поверхность фазового контакта жидкости и пыли при незначительном повышении гидравлического сопротивления и снижении расхода воды на орошение обеспыливаемого газа.

Аппараты МПР-75 и МПР-100 (рис. IX.8) состоят из орошаемой коллекторной решетки, установленной в комплексе с газоходом типа трубы Вентури, и шламоотделителя с закручивающим устройством типа неподвижного колеса вентилятора. Запыленный газ подается в аппарат через U-образный переходный газоход, в котором установлены две форсунки центробежного действия для подачи чистой жидкости на орошение коллекторной решетки и пылегазового потока. При прохождении газа через коллекторную решетку пылевые частицы вследствие действия инерционных сил осаждаются на ее смоченных поверхностях, а также на многочисленных каплях воды, образующихся в результате вторичной диспергации орошающей жидкости газом в этой зоне. Смоченная в зоне решетки и скоагулированная пыль частично вместе с водой удаляется через гидрозатвор, а остальная ее часть выносится в трубу Вентури, при прохождении которой пылегазовый поток интенсивно перемешивается с водой, в результате чего происходит дополнительное улавливание и коагуляция частиц. Смоченная пыль окончательно выделяется из газового потока в шламоотделителе с помощью закручивающего устройства и отводится из аппарата в бак в виде пульпы через шламоотводящие патрубки. Часть зашламованной воды из бака удаляется, а часть (до 30% основного расхода воды на орошение) подается в смесительную камеру бака и затем по трубопроводам — в конфузор трубы Вентури. Технические характеристики аппаратов типа МПР приведены в табл. IX.6.

Эффективность очистки (к. п. д. пылеуловителя) аппаратов типа МПР рассчитывается с учетом брызгоуноса и осветления орошающей воды по следующей зависимости:

$$\eta = \frac{\eta' \left[1 - \frac{a(1 - \eta_{к.у})}{q_b} \right]}{1 + \frac{a(1 - \eta_{а.с})(1 - \eta_{к.у})(1 - e^{-P})}{VP}}, \quad (IX.2)$$

где η' — степень очистки газа в отсутствие брызгоуноса, доли единицы; a — брызгоунос, т. е. количество орошающей воды, выносимой из аппарата в виде брызг, кг/м³; $\eta_{к.у}$ — эффективность каплеулавливающих устройств мокрого пылеуловителя, доли единицы; q_b — расход орошающей жидкости, кг/м³; $\eta_{а.с}$ — степень осветления орошающей воды в системе, доли единицы; $P = \frac{Q}{W}$ — степень

разбавления орошающей воды; Q — количество свежей воды, кг/ч; W — объем орошающей воды, кг/ч; T — длительность работы системы мокрой газоочистки без полной замены орошающей воды свежей, ч; V — удельный объем свежей воды в контуре рециркуляции, кг/(м³·ч).

Т а б л и ц а IX.6

Технические характеристики аппаратов МПР-75 и МПР-100

Наименование показателей	МПР-75	МПР-100
Производительность по газу при температуре 80°С, тыс. м ³ /ч	73,0—92,5	100,0—125,0
Эффективность пылеулавливания, %	97,08—99,92	97—99*
Аэродинамическое сопротивление, Н/м ²	1400—2100	1500—2200
Установленная мощность электродвигателя на- сосной установки, кВт	3	3
Габаритные размеры, мм:		
длина	2900	6400
ширина	2900	3230
высота	8180	11 030
Масса, кг	3570	6520
Изготовитель	Завод угольного машиностроения им. Пархоменко (г. Караганда)	

* Эффективность пылеулавливания показана при улавливании угольной пыли, содержащей до 80% частиц 10 мкм и запыленностью от 0,5 до 10 г/м³.

На зарубежных сушилках кипящего слоя в качестве окончательной очистки газов применяются мокрые скрубберы с трубами Вентури различных модификаций. На рис. IX.9 показан мокрый скруббер с горизонтальным расположением трубы Вентури типа «Кинпактор». Насыщенный водой поток газов вводится тангенциально в скруббер-шламоотделитель, в котором брызги под действием центробежной силы отделяются от газа, а очищенный газ выводится из аппарата через верхнее отверстие.

Аппарат рассчитан на пропуск газов в количестве 360 тыс. м³/ч, гидравлическое сопротивление 7000—8000 Н/м², скорость газов в горловине трубы Вентури 1—90 м/с, в каплеуловителе 2—3,5 м/с, на выходе газов из каплеуловителя 20 м/с, к. п. д. пылеуловителя 98%.

Фракционный к. п. д. аппарата (%) следующий [2]:

Более 1 мкм	100
0,5—1 "	60
0,4—0,5 "	50

Расход воды 1000—1300 г на 1 м³ газов.

Объем рециркуляционного бака мокрого скруббера рассчитывают, исходя из подачи воды в аппарат в течение 10—15 мин.

Мокрые пылеуловители изготавливают из нержавеющей стали Х17Н14М2 толщиной 3 мм.

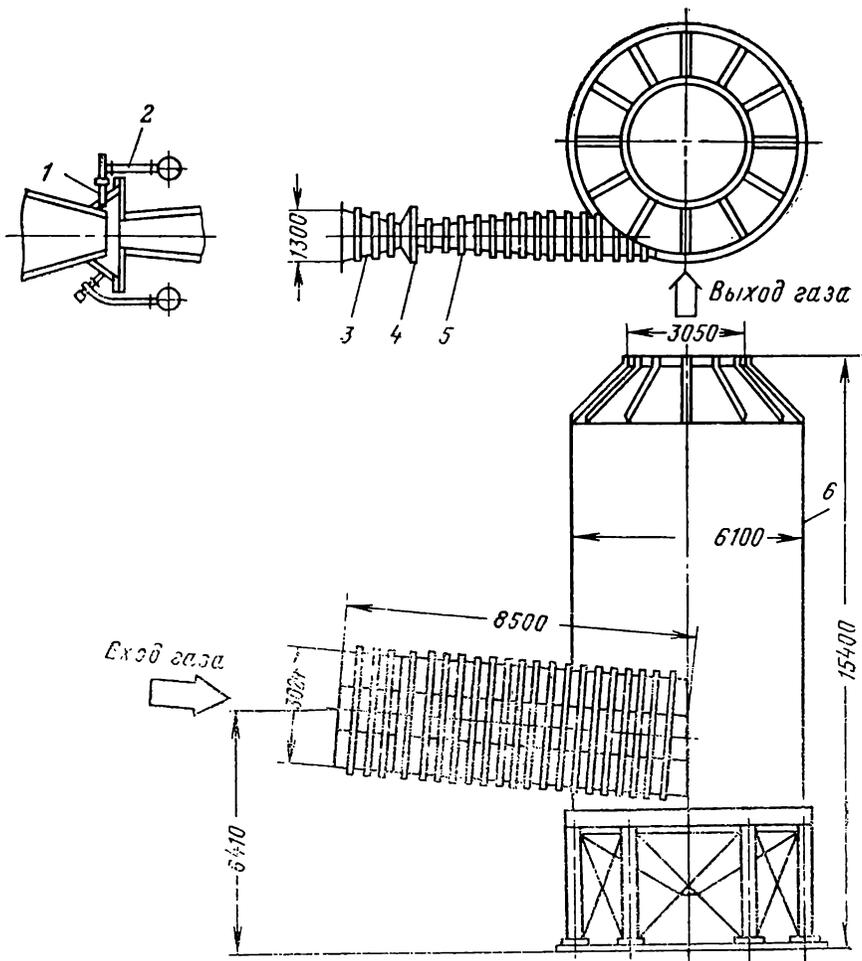


Рис. IX.9. Мокрый пылеуловитель с трубой Вентури типа «Кинпактор»:
 1 — сопло; 2 — резиновый шланг; 3 — конфузор; 4 — секция горловины; 5 — диффузор;
 6 — циклонный сепаратор

На рис. IX.10 показан общий вид мокрого пылеуловителя с трубой Вентури фирмы «Дакон» и схема контактного устройства. Аппарат имеет производительность 180—240 тыс. м³/ч, гидравлическое сопротивление — 3500—4000 Н/м², к. п. д. — 99,6%. Скорость газов в горловине трубы Вентури 80 м/с, на соединительном участке (в переходном патрубке) между трубой Вентури и каплеуловителем 10 м/с, в каплеуловителе 4 м/с.

На рис. IX.11 показан также общий вид мокрого скруббера с вертикальным расположением трубы с орошаемым водой диском «Флек-Клин». Аппарат состоит из двух основных частей: контактного устройства 1 в виде горловины трубы Вентури; поливаемого диска 2 с устройством для регулирования скорости газового потока в зазоре горловины 3 и каплеуловителя 4.

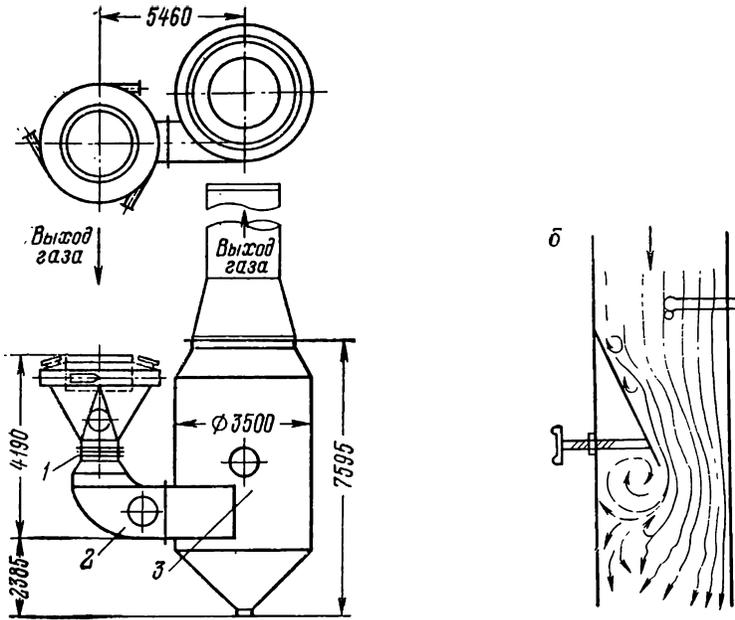


Рис. IX.10. Общий вид мокрого пылеуловителя с вертикально расположенной трубой Вентури фирмы «Дакон» (США) (а) и схема контактного устройства для частиц пыли и жидкости (б):

1 — труба Вентури; 2 — переходный патрубкок; 3 — каплеуловитель

Расход воды 1000—1500 г/м³ газа, гидравлическое сопротивление — 6000—8500 Н/м².

Мокрый пылеуловитель типа «Центрифилд» представляет собой цилиндрический скруббер, в нижней части которого размещены два ряда плосколопастных жалюзийных решеток и турбинка для раскручивания шламового потока типа неподвижного колеса вентилятора (рис. IX.12).

Техническая характеристика мокрого пылеуловителя «Центрифилд»

Производительность по очищенным газам, тыс. м ³ /ч	236
Запыленность газов, г/м ³ :	
на входе в скруббер	До 23
на выходе из скруббера	0,046
Гидравлическое сопротивление скруббера, Н/м ² .	До 4560
К. п. д. скруббера, %	99,8
Расход воды, м ³ /ч	232

На сушильных установках ряда производств для окончательной очистки газов нашли применение электрофильтры. Например, на углебрикетных фабриках паровые трубчатые сушилки для сушки бурого угля оборудованы электрофильтрами. Установка электрофильтров состоит из двух частей: электрофильтроосадительной камеры и преобразовательной подстанции с соответствующей аппаратурой (рис. IX.13,а). В электрофильтре смонтированы осадительные и коронирующие электроды. Осадительные электроды присоединяются к положительному полюсу выпрямителя и заземляются, а коронирующие изолируются от земли, к ним подсоединяется провод от отрицательного полюса выпрямителя.

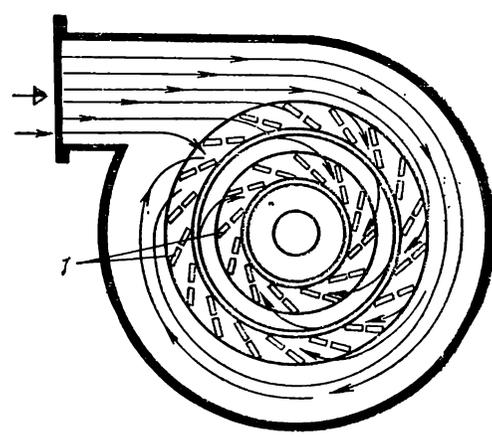
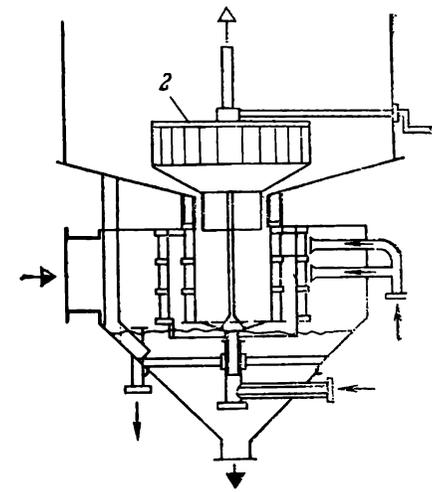
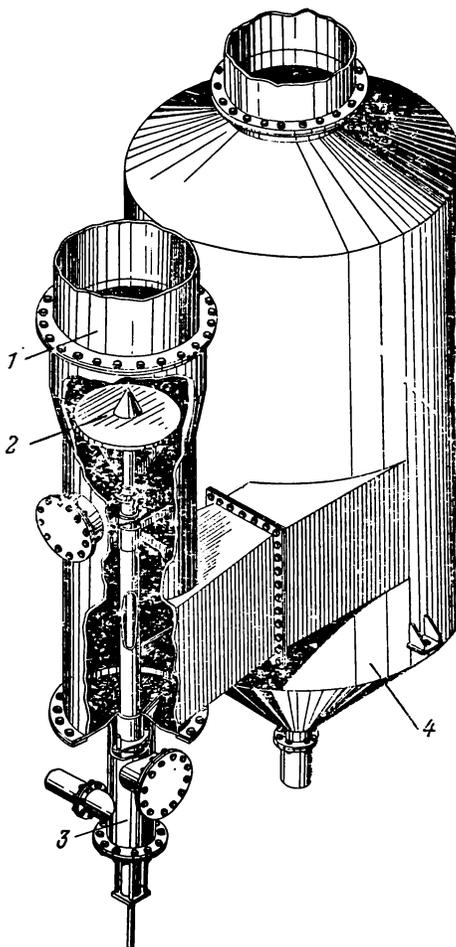


Рис. IX.11. Мокрый пылеуловитель с орошаемым водой диском фирмы «Флекс-Клин» (США)

Рис. IX.12 Принципиальная схема плосколопастных жалюзийных решеток (1) и турбинки (2)

Технико-экономические показатели работы электрофильтров типа УВП при улавливании угольной пыли из газов, отходящих от паровых трубчатых сушилок, приведены ниже.

Запыленность газов, г/м ³ :	
поступающих при нормальных условиях	15—30
конечная	0,36—0,53
Температура газов, °С	100—120
Скорость движения газов в электрофильтре, м/с	0,8—1
Гидравлическое сопротивление установки, Н/м ²	50—80
Степень очистки газов, %	94—98
Расход электроэнергии на очистку 1000 м ³ газов в час, кВт·ч:	
на работу электрофильтров	0,2
на преодоление гидравлического сопротивления	0,034
Стоимость:	
установки, рассчитанной на очистку 1000 м ³ газов в час, руб	1250
очистки (без учета стоимости улавливаемой продукции) 1000 м ³ газов в час, коп.	4,5

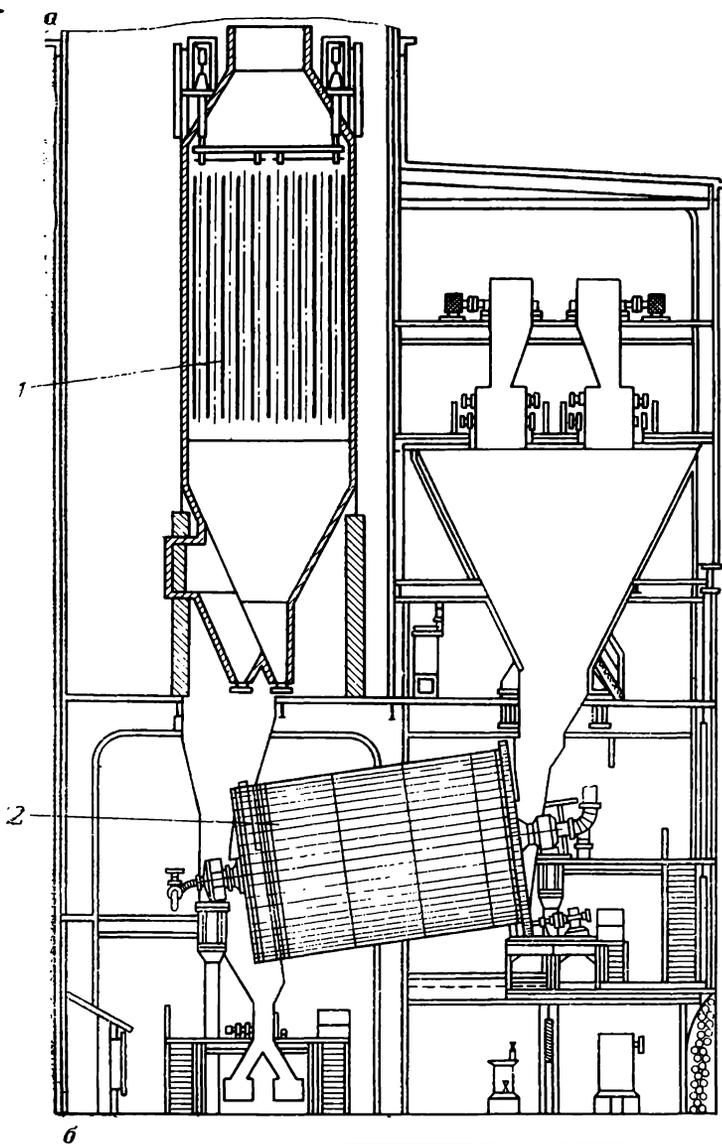
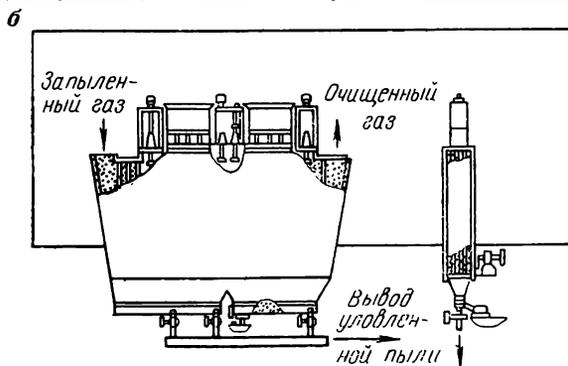


Рис. IX.13. Электрофильтры вертикальные типа УВП и горизонтальные ГОЭ 4,5×2:

1 — электрофильтр;
2 — паровая трубчатая сушилка



Семибратовским филиалом НИИОГаза совместно с ИОТТ разработан опытно-промышленный образец горизонтального электрофильтра ГОЭ 4,5×2 для санитарной очистки газов от пыли сухим способом (рис. IX.13,б).

Характеристика электрофильтра ГОЭ 4,5×2

Производительность по газу, тыс. м ³ /ч	10—20
Площадь активного сечения, м ²	4,5
Число осадительных электродов	6
Активная длина коронирующих электродов одного поля, м	155
Расстояние между коронирующими электродами, мм	275—400
Расстояние между элементами в ряду коронирующего электрода, мм	180
Скорость газов в активном сечении, м/с	0,65—1,22

Испытания электрофильтра ГОЭ 4,5×2 на трубе-сушилке ГОФ «Саранская» при сушке промпродукта показали, что эффективность улавливания угольной пыли 94—99% при максимальной запыленности газов на входе в электрофильтр 3,8—8,8 г/м³, гидравлическое сопротивление аппарата 100 Н/м², влажность улавливаемой пыли 3—4%.

Применение электрофильтра на углеобогатительных фабриках оправдано не только возможностью обеспечения с их помощью санитарных норм по запыленности выбрасываемых в атмосферу газов и получения уловленной пыли в сухом виде, но и возможностью одновременного сокращения числа ступеней пылеулавливания и уменьшения расхода электроэнергии вследствие снижения гидравлического сопротивления системы пылеулавливания.

Применение электрофильтров экономически оправдано для высокопроизводительных сушильных установок как реконструированных, так и вновь построенных обогатительных фабрик: упрощается схема пылеулавливания, одновременно устраняется необходимость в системе отвода и регенерации шламовых вод из мокрых пылеуловителей.

На Магнитогорском цементном заводе проведены исследования по повышению эффективности работы электрофильтров Ц-7,5 цементных мельниц путем применения акустической коагуляции тонкодисперсной фазы. Коагуляция осуществлялась в акустическом поле с интенсивностью свыше 145 дБ. При озвучивании пылегазового потока в течение 1,5—2 с, имеющего скорость не более 2 м/с, средневзвешенный радиус частиц увеличивался в 3,6 раза, максимальный — в 8 раз. Коагуляционная установка может быть размещена в зоне осаждения электрофильтра; она обеспечивает время озвучивания пылегазового потока в течение 2,5—3 с при скорости: не более 1,4 м/с.

В настоящее время разработаны универсальные горизонтальные УГ и вертикальные УВ электрофильтры производительностью от 30 тыс. до 1 млн·м³/ч, а также новые электрофильтры типа УВВ, работающие во взрывоопасных средах.

На барабанных сушилках ряда асфальтобетонных заводов нашли применение дымососы-пылеуловители, которые работают следующим образом. Под действием центробежной силы, создаваемой рабочим колесом дымососа, частицы пыли отделяются от газового потока и концентрируются в пристенной зоне. Через отверстие в корпусе дымососа они отводятся в выносной циклон вследствие перепада давления, создаваемого дополнительной крыльчаткой. Оптимальный отсос газа через выносной циклон составляет 15—20%. После циклона газовый поток снова возвращается в улитку через крыльчатку, которая дополнительно закручивает поток в корпусе входной коробки и повышает эффективность дымососа-пылеуловителя.

Коэффициент очистки газов в дымососе-пылеуловителе может быть определен по формуле:

$$\eta = \frac{\eta_{ц}\eta_{ул}}{1 - \eta_{ул}(1 - \eta_{ц})},$$

где $\eta_{ц}$ и $\eta_{ул}$ — коэффициенты очистки газа в циклоне и в улитке.

Достоинства дымососов-пылеуловителей: малые аэродинамические потери, постоянство очистки газов, незначительная металлоемкость и малые капитальные затраты.

На сушильных установках при сушке минерального сырья применяются двух- и трехступенчатые системы пылеулавливания.

На трубах-сушилках при сушке угля в качестве разгрузочных аппаратов нашли применение: одиночные крупногабаритные циклоны конструкции НИИОГаза ЦН-15 диаметром 2200—3000 мм; конструкции ЦКТИ диаметром 3150 мм и конструкции завода угольного машиностроения им. Пархоменко (г. Караганда) диаметром 2200—3600 мм.

Анализ работы разгрузочных циклонов показал, что запыленность газов на выходе из циклонов составляет 5—60 г/м³, в среднем — 40 г/м³.

Для повышения эффективности осаждения угля в разгрузочных циклонах труб-сушилок при очистке газов объемом более 100 тыс. м³/ч целесообразно применять параллельную установку нескольких циклонов меньшего диаметра.

Для устранения забивания углем верхнего колена трубы-сушилки, а также для уменьшения сопротивления тракта ИОТТ разработана новая конструкция разгрузочного циклона (рис. IX.14,а). При применении этого циклона труба-сушилка выполняется без верхнего колена, уменьшается сопротивление тракта и устраняются возможные залежи угля во входных патрубках циклона.

Основные параметры разгрузочных циклонов ИОТТ следующие:

Производительность по газу, тыс. м ³ /ч	50—75	75—100	100—140
Высота H , мм	9000	12000	15000
Диаметр D , мм	2350	2700	3000
Аэродинамическое сопротивление, Н/м ²	900	1000	1100
Эффективность улавливания, %	98,5	98,5	98,0

Для устранения недостатков, присущих циклонам, на трубах-сушилках применяются гравитационные сепараторы (рис. IX.14,б), которые проще циклонов, обладают меньшим сопротивлением и износом, менее сложны в эксплуатации и удобнее в компоновке пылеулавливающего оборудования.

При применении гравитационных сепараторов на трубах-сушилках в качестве первой ступени пылеулавливания унос пыли возрастает в 4,5—5 раз по сравнению с разгрузочными циклонами.

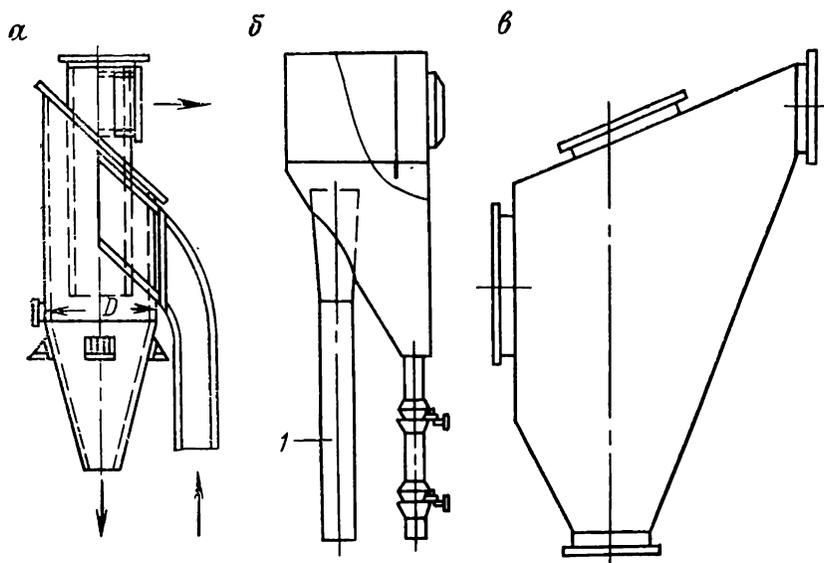


Рис. IX.14. Разгрузочные аппараты сушилок

Поэтому гравитационные сепараторы можно применять только при сушке углей с содержанием класса 0—1 мм менее 25—30% и при использовании в качестве второй ступени пылеулавливания высокоэффективных батарейных циклонов.

В табл. IX.7 приведены характеристики разгрузочных аппаратов труб-сушилок.

В барабанных сушилках в качестве разгрузочных аппаратов применяют гравитационные разгрузочные камеры квадратной, прямоугольной и круглой формы. С целью повышения эффективности осаждения угольной пыли и снижения вихревых потоков целесообразно выполнять разгрузочные камеры прямоугольного сечения с плавным сужением их верхней части (рис. IX.14,в). В этих камерах принята условная скорость в поперечном сечении, равная 2—3 м/с. Для предотвращения зависания угля нижнюю часть камеры изготавливают круглой формы из нержавеющей стали.

Средняя концентрация взвешенных частиц в газах, поступающих в систему пылеулавливания из сушилок (после разгрузочных камер), колеблется от 5 до 60 г/м³.

Эффективность работы разгрузочных аппаратов в значительной степени зависит от влажности сухого материала. Зависимость

эффективности очистки газов от влажности угля может быть определена по формуле

$$\eta_1 = \eta'_1 \left(\frac{W_2}{W_{\text{гигр}}^{\text{max}}} \right)^{-n}, \quad (\text{IX.3})$$

где η'_1 — общий к. п. д. аппарата при $W_2 \leq W_{\text{гигр}}^{\text{max}}$; W_2 — влажность сухого материала, ‰; $W_{\text{гигр}}^{\text{max}}$ — максимальная гигроскопическая влажность материала, ‰; n — показатель степени, составляющий для

Т а б л и ц а IX.7

Технические характеристики разгрузочных аппаратов труб-сушилок

Тип разгрузочного устройства	Производительность по газу, тыс. м ³ /ч	Эффективность улавливания, %	Сопrotивление аппарата, Н/м ²
Циклоны НИИОГаз (диаметр 2,7—3,6 м)	75—150	96—98,5	950*
Циклоны ИОТТ сдвоенные (диаметр 2,2—2,7 м)	100—140	97—98,6	800
Гравитационные сепараторы (диаметром 4,0—5,2 м)	100—250	90—95,5	450

* Сопrotивление циклона НИИОГаз дано с учетом сопротивлений колена трубы-сушилки.

гравитационного сепаратора и циклона трубы-сушилки соответственно 0,012 и 0,025, для разгрузочной камеры барабанной сушилки — 0,016.

$$\text{При } W_2 \leq W_{\text{гигр}}^{\text{max}} \text{ отношение } \frac{W_2}{W_{\text{гигр}}^{\text{max}}} = 1.$$

КузНИИУглеобогачение установил зависимость уноса угольной пыли из разгрузочных циклонов труб-сушилок от влажности высушенного угля:

$$z = 54,3e^{-0,33W_2}, \text{ г/м}^3. \quad (\text{IX.4})$$

Запыленность газов на выходе из разгрузочной камеры барабанной сушилки в зависимости от влажности высушенного угля может быть определена по формуле, предложенной КузНИИУглеобогачением,

$$z = A + BW_2 + CW_2^2, \quad (\text{IX.5})$$

где $A=28,86$; $B=5,52$; $C=0,32$.

На Тоотсиском торфобрикетном комбинате проводились испытания циклона на пневмопароводяной сушилке при сушке торфа переходного типа со степенью разложения 25—30%, насыпной плотностью 250 кг/м³ и начальной влажностью 41—54% при производительности сушилки от 7,32 до 13,51 т/ч. Зависимость влияния влажности торфа и уноса пыли из циклонов водяных корпу-

сов пневмопароводяной сушильной установки представляется в виде уравнения

$$\lg z = 4,33 - 0,037W_2, \text{ г/м}^3. \quad (\text{IX.6})$$

Эффективность первой ступени очистки газов на трубах-сушилках определяется по формуле, предложенной КузНИИУглеобогащением,

$$\eta_{\text{факт}} = \left[1 - z \left(1 - \frac{\eta_{\text{ист}}}{100} \right) \right] 100, \quad (\text{IX.7})$$

$$z = P \ln \frac{W_{\text{max}}^{(p)} - W_p}{W^{(c)} - W_p}, \quad (\text{IX.8})$$

где z — часть дезагрегированного материала, доли единицы; P — коэффициент, равный 0,45; $W_{\text{max}}^{(p)}$ — максимально возможная влажность высушенного угля, %; $W^{(c)}$ — влажность высушенного угля, %; W_p — равновесная влажность сухого материала, %;

$$W_{\text{max}}^{(p)} = \frac{W_{\text{max}}^{(p)}}{100 - W_{\text{max}}^{(p)}}; \quad W_p = \frac{W_p}{100 - W_p}; \quad W^{(c)} = \frac{W}{100 - W^{(c)}}.$$

Для технологической очистки газов на барабанных сушилках диаметром 2,8 м применяют одиночные циклоны диаметром 3 — 3,2 м, а на барабанных сушилках диаметром 3,5 м — группы циклонов НИИОГаз диаметром 0,8 и 1,2 м. Как правило, группа циклонов диаметром 1,2 м располагается с боковых сторон разгрузочной камеры. При таком расположении циклонов происходит неравномерное распределение по ним пыли в пределах 0,45—0,85. Лучшие показатели работы циклонов достигаются при расположении их группой отдельно от разгрузочной камеры. В зависимости от влажности сухого угля средняя запыленность газов на входе в циклоны колеблется в широких пределах — от 1 до 95 г/м³, при этом эффективность работы циклонов изменяется в пределах 65—85%.

Применяемые сушилки кипящего слоя в США оборудуются двухступенчатой системой пылеулавливания, состоящей из циклонов и мокрых скрубберов с трубами Вентури. В качестве первой ступени пылеулавливания, как правило, используются одиночные циклоны диаметром 2,2—5,4 м.

Из сушильной камеры в циклоны поступают отработанные газы, содержащие сравнительно большое количество мелких угольных частиц крупностью до 1 мм. В среднем запыленность газов на входе в циклоны составляет 300—400 г/м³, а на выходе из них — 20—25 г/м³. В циклонах оседают все частицы крупностью более 10 мкм. Средний к. п. д. циклонов — 92%, гидравлическое сопротивление — 1300—2000 Н/м².

Основные факторы, влияющие на эффективность систем пылеулавливания являются гранулометрический состав и глубина сушки материала, его физико-химические и адгезионные свойства,

Таблица IX.8
Фракционные к. п. д. разгрузочных аппаратов труб-сушилок, %

Разгрузочный аппарат	Фракции, мкм										Гидравлическое сопротивление, Н/м²
	0—5	5—15	15—30	30—60	60—120	120—250	250—500	500—1000	1000—2000	2000—4000	
Циклон диаметром: 3000 мм	4,6	12,8	24	50	77	90	96,0	98,1	99,6	100	700
2350 мм	74,0	84,6	91,3	97,3	100	—	—	—	—	—	800
Гравитационный сепаратор	3,1	7,7	14,7	27,7	57,4	82,7	90,5	95,1	98,5	100	450

Примечание. Для определения общего к. п. д. разгрузочных циклонов диаметром $2350 < D < 3000$ мм, работающих в тех же условиях (концентрация и характеристика пыли), используются следующие зависимости:

$$\eta = 100 - \left[\frac{100 - \eta_0}{\sqrt{\frac{D}{D_0}}} \right], \% ; \quad \eta = \left[100 - \sqrt{\frac{D_0}{D}} (110 - \eta_0) \right], \%$$

где η_0 и D_0 — соответственно к. п. д. и диаметр циклонов 2350 или 3000 мм;
 η и D — к. п. д. и диаметр рассчитываемого циклона.

Таблица IX.9
Фракционные к. п. д. разгрузочных камер барабанных сушилок при $v_{ц} = 2$ м/с, %

Влажность сухого материала	Фракции, мкм										Гидравлическое сопротивление, Н/м²
	0—5	5—15	15—30	30—60	60—120	120—250	250—500	500—1000	1000—2000	2000	
$W_2 = 6\%$	8	38	63,2	80,6	86,8	93,3	98,4	99	99,9	100	150—200
$W_2 = 7\%$	15	45,2	67	82,7	89	94,5	98,9	99,8	100	100	
$W_2 = 8\%$	22,2	51,6	69,3	84,1	90,8	96	99	99,9	100	100	
$W_2 = 8,5\%$	25	53,5	70,5	85	91,5	96,3	99,2	100	100	100	
$W_2 = 9\%$	29,5	58,2	72,5	86	93,2	97,6	99,8	100	100	100	
$W_2 = 10,5\%$	40	69	77	89,5	97	99,5	100	100	100	100	

а также параметры сушильного агента и аппаратов пылеулавливания.

Исходными данными для расчета пылеулавливающих систем сушильных установок являются: гранулометрический состав материала, поступающего на сушку, с указанием содержания микронных фракций ($\Delta R_{исх}$) в классе 0—1 мм, %; максимальная гигроскопическая влажность $W_{гигр}^{max}$ сушимого материала и влажность сухого материала W_2 , %; производительность сушильной установки по сухому продукту $G_{сух}$, кг/ч; требуемая степень очистки газов от пыли (выброс пыли M в атмосферу, см. нормы СН 369—74), кг/ч; фракционные к. п. д. пылеулавливающих аппаратов $\eta_{фр}$ (табл. IX.8—IX.11), %.

Таблица IX.10

Фракционные к. п. д. пылеуловителей технологической очистки газов, %

Пылеуловитель	Фракции, мкм						Скорость газа в элементах, м/с	Гидравлическое сопротивление, Н/м ²	
	0—5	5—10	10—20	20—30	30—40	40—60			60—100
БПР	42	60,2	77,1	88,8	95	98,2	100	4,3	850
ПБЦ	67,8	90	96,5	98,6	99,2	99,5	99,9	4,3	1500
Циклоны НИИОГаз	Принимать по данным руководящих указаний по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации циклонов НИИОГаз, 1971 г. (Ярославль)								

Расчет производится следующим образом.

1. По выбросу пыли в атмосферу M , при котором обеспечивается ее приземная концентрация согласно требованиям санитарных норм СН 369—74, и производительности сушилки по сухому продукту:

$$G_{сух} = G_{исх} - W, \quad (IX.9)$$

где $G_{сух}$ — количество высушенного материала, т/ч; $G_{исх}$ — количество материала, поступающего в сушилку, т/ч; W — количество испаренной влаги, т/ч. Необходимая степень очистки газов всей системы пылеулавливания определяется по формуле

$$\eta_{сист} = \frac{G_{сух} - M}{G_{сух}} 100, \quad \% \quad (IX.10)$$

2. По гранулометрическому составу материала, поступающего на сушку, и фракционным к. п. д. $\eta_{фр}$ аппарата, выбранного для установки в качестве разгрузочного устройства, рассчитывается эффективность его работы и количественный унос пыли в среднюю ступень очистки газов:

$$\eta_I = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\Delta R_{исх} \eta'_{фр i}}{100}, \quad \% \quad (IX.11)$$

Т а б л и ц а IX.11
Фракционные к. п. д. пылеуловителей санитарной очистки газов, %

Пылеуловитель	Фракции, мкм									Гидравлическое сопротивление, Н/м ²
	0—5	5—10	10—20	20—30	30—40	40—60	60—80	80—100	100—200	
МПР	85,85	97,00	98,75	99,50	99,73	99,85	100	—	—	1500
МП-ВТИ для прутковой решетки:										
$S=2,5d$, $d=12$ мм	63,5	77,5	85,4	91,0	93,6	96,0	97,0	98,0	100	500
$S=2d$, $d=12$ мм	65,5	77,5	85,0	90,0	93,0	95,2	97,8	100	—	600
Скрубберов при скорости в плане, м/с										
3,5	32	55	70,5	81,5	86,6	90	92,8	95,2	100	300
4	47,5	65	76	84,3	88,3	91,4	94	96	100	300
4,2	52,5	65,4	79,2	86,4	89,4	91,2	94,4	96,3	100	300
4,5	60,5	74,5	82	87,4	90,7	92,5	95	96,9	100	400
4,8	66,5	78	84,4	89,1	91,2	93,2	95,7	97,4	100	400
МС-ВТИ	Принимаются по данным скрубберов МП-ВТИ при высоте аппарата $H=4D$, где D — диаметр скруббера.									650—800

унос из I ступени

$$G'_{\text{ун}} = G_{\text{сух}} (100 - \eta_{\text{I}}), \text{ кг/ч}, \quad (\text{IX.12})$$

где ΔR_i и $\eta_{\text{фр}i}$ — содержание и улавливание каждой фракции, %.

На основании этих же данных определяется дисперсный состав пыли, выносимой из разгрузочного устройства:

$$\Delta R_{i\text{ун}} = \Delta R_{i\text{исх}} \frac{100 - \eta'_{\text{фр}i}}{100 - \eta_{\text{I}}}, \text{ \%}, \quad (\text{IX.13})$$

где $\Delta R_{i\text{ун}}$ — содержание данной фракции в уносе из разгрузочного устройства, %; $\Delta R_{i\text{исх}}$ — содержание данной фракции в материале, поступающем на сушку, %.

3. По дисперсности пыли, выносимой из разгрузочного устройства, и фракционным к. п. д. $\eta''_{\text{фр}}$ аппарата, выбранного для II ступени очистки, рассчитывается эффективность его работы и количественный унос пыли в пылеуловитель санитарной очистки газов:

$$\eta_{\text{II}} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\Delta R'_{i\text{ун}} \eta''_{\text{фр}i}}{100}, \text{ \%}; \quad (\text{IX.14})$$

унос из II ступени

$$G''_{\text{ун}} = G'_{\text{ун}} (100 - \eta_{\text{II}}), \text{ кг/ч}. \quad (\text{IX.15})$$

На основании этих же данных определяется дисперсный состав пыли, поступающей в пылеуловитель санитарной очистки газов:

$$\Delta R''_{i\text{ун}} = \Delta R'_{i\text{ун}} \frac{100 - \eta''_{\text{фр}i}}{100 - \eta_{\text{II}}}, \text{ \%}. \quad (\text{IX.16})$$

4. По дисперсности угольной пыли, поступающей в пылеуловитель, и фракционным к. п. д. $\eta'''_{\text{фр}}$ аппарата, окончательной санитарной очистки газов рассчитывается эффективность его работы и выброс пыли в атмосферу:

$$\eta_{\text{III}} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\Delta R''_{i\text{ун}} \eta'''_{\text{фр}i}}{100}, \text{ \%}; \quad (\text{IX.17})$$

унос в атмосферу

$$G'''_{\text{ун}} = M = G'''_{\text{ун}} (100 - \eta_{\text{III}}), \text{ кг/ч}. \quad (\text{IX.18})$$

5. Полученные к. п. д. аппаратов пылеулавливания, выраженные в долях единицы, определяют общий к. п. д. всей системы в целом:

$$\eta_{\text{сист}} = 1 - (1 - \eta_{\text{I}}) (1 - \eta_{\text{II}}) (1 - \eta_{\text{III}}). \quad (\text{IX.19})$$

Этот показатель сравнивается с показателем, вычисленным по формуле (IX.10); он должен ему соответствовать.

В случае их несоответствия по формуле

$$\eta_{\text{сист}} = 1 - (1 - \eta_{\text{I}}) (1 - \eta_{\text{II}}) (1 - \eta_{\text{III}}) \quad (\text{IX.20})$$

определяются эффективности пылеулавливания η_{II} и η_{III} , обеспечивающие требования санитарных норм СН 369—74 при данном комплексе сушильно-пылеулавливающего устройства.

Глава X

ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

§ 1. ВЕНТИЛЯТОРЫ (ДЫМОСОСЫ)

Надежность и эффективность работы сушилок в значительной степени зависят от применяемых тягодутьевых машин для тяги газов (дымососы) и подачи воздуха в топки (вентиляторы). Центробежные тягодутьевые машины можно разделить на три типа: низкого давления (менее 1000 Н/м²) среднего (менее 3000 Н/м²) и высокого (более 3000 Н/м²).

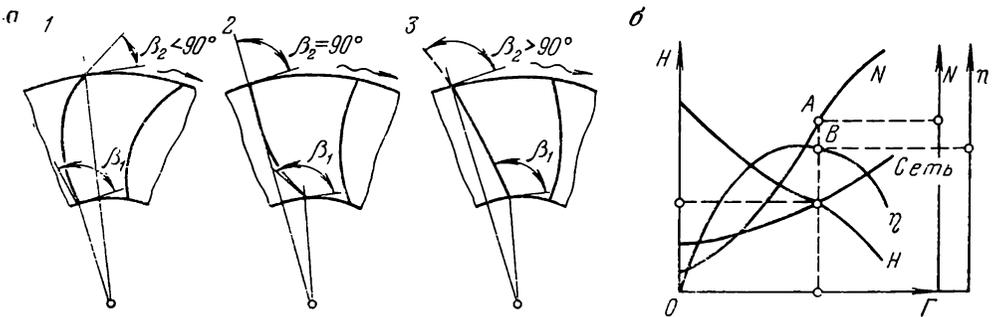


Рис. X.1. Очертание лопаток рабочих колес вентиляторов и наложение характеристики сети на напорную характеристику вентилятора

Аэродинамические особенности центробежных вентиляторов определяются в основном формой лопаток. Схема установки лопаток рабочего колеса вентилятора показана на рис. X.1, а, на котором показаны углы входа β_1 и выхода β_2 лопаток, если $\beta_2 < 90^\circ$ лопатки загнуты вперед, $\beta_2 = 90^\circ$ — радиальные и $\beta_2 > 90^\circ$ — загнуты назад.

В настоящее время вентиляторы чаще выполняют с лопатками, загнутыми назад. Для обеспечения безударного входа воздуха с целью увеличения к. п. д. вентилятора лопатки выполняют с углом входа $\beta_2 > 90^\circ$, т. е. они отогнуты в направлении, обратном направлению вращения. Воздушный поток, сбегаящий с лопаточного колеса, собирается в кожухе, в котором обычно понижается его скорость и динамическое давление соответственно преобразуется в статическое. Как правило, у вентиляторов кожух имеет спиральную форму в виде архимедовой спирали.

Расчетную производительность вентилятора (дымососа) можно определить по формуле

$$G_{\text{расч}} = \beta_1 V \frac{0,1}{P}, \text{ м}^3/\text{ч.} \quad (\text{X.1})$$

где β_1 — запас производительности, равный 1,1; V — расход газов, м³/ч; P — барометрическое давление, МПа.

Расчетный (полный) напор вентилятора (дымососа) подсчитывается по формуле

$$H_{\text{п}}^{\text{расч}} = \beta_2 \Sigma H, \text{ Н/м}^2, \quad (\text{X.2})$$

где β_2 — запас по напору, равный 1,2; ΣH — необходимый напор, Н/м^2 .

Мощность электродвигателя дымососа можно определить по формуле

$$N = \frac{G_{\text{расч}} H_{\text{п}}^{\text{расч}}}{3600 \eta_{\text{м}} \cdot 10^3}, \quad (\text{X.3})$$

где $G_{\text{расч}}$ — часовая производительность дымососа, $\text{м}^3/\text{ч}$; $H_{\text{п}}^{\text{расч}}$ — полный напор дымососа, Н/м^2 ; $\eta_{\text{м}}$ — к. п. д. дымососа.

При изменении температуры сушильного агента t_1 на t_2 при выходе в дымосос напор и мощность вентилятора можно определить по формулам:

$$H_2 = H_1 \frac{T_1}{T_2}, \quad (\text{X.4})$$

$$N_2 = N_1 \frac{T_1}{T_2},$$

где

$$T_1 = t_1 + 273, \text{ К} \text{ и } T_2 = t_2 + 273, \text{ К}.$$

Пересчет мощности в зависимости от давления H , плотности газов $\rho_{\text{г}}$ и частоты вращения рабочего колеса вентилятора можно выполнить по формуле

$$\frac{N}{N_0} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^2 = \left(\frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{г}0}} \right) = \left(\frac{n}{n_0} \right)^2. \quad (\text{X.5})$$

Производительность и напор вентилятора изменяются в зависимости от частоты вращения рабочего колеса:

$$\frac{V_{\text{г}}}{V_{\text{г}0}} = \left(\frac{n}{n_0} \right); \quad \frac{H}{H_0} = \left(\frac{n}{n_0} \right)^2. \quad (\text{X.6})$$

При одновременном изменении плотности газов $\rho_{\text{г}}$, частоты вращения n и диаметра D рабочего колеса вентилятора формулы пересчета характеристик можно представить в следующем виде:

$$\frac{V_{\text{г}}}{V_{\text{г}0}} = \left(\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{г}0}} \right) \left(\frac{n}{n_0} \right) \left(\frac{D}{D_0} \right)^3; \quad (\text{X.7})$$

$$\frac{H}{H_0} = \left(\frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{г}0}} \right) \left(\frac{n}{n_0} \right)^2 \left(\frac{D}{D_0} \right)^2; \quad (\text{X.8})$$

$$\frac{N}{N_0} = \left(\frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{г}0}} \right) \left(\frac{n}{n_0} \right)^3 \left(\frac{D}{D_0} \right)^5. \quad (\text{X.9})$$

Запыленность газов при небольших количествах практически не влияет на напор вентилятора. Однако мощность при этом увеличивается. При одной и той же производительности дополнительное увеличение мощности можно определить по формуле

$$N=N_0(1+\mu), \quad (\text{X.10})$$

где μ — массовая концентрация материала в газовом потоке, кг/кг.

Производительность и напор вентилятора (дымососа) определяются в зависимости от характеристики сети, в которой работает тягодутьевая машина.

Полное гидравлическое сопротивление сушильного агрегата определяется по формуле

$$H=\Sigma h_{\text{тр}}+\Sigma h_{\text{м}}+h_{\text{с}}+h_{\text{г}}+h_{\text{т}}, \text{ Н/м}^2, \quad (\text{X.11})$$

где $\Sigma h_{\text{тр}}$ — сопротивления трения газопроводов или воздухопроводов; $\Sigma h_{\text{м}}$ — местные сопротивления газопроводов или воздухопроводов; $h_{\text{с}}$ — сопротивление сушилки; $h_{\text{г}}$ — сопротивление топочного устройства; $h_{\text{д}}$ — сопротивление пылеулавливающих устройств.

Сопротивление трения рассчитывается:

для незапыленного потока

$$h_{\text{г}}=\lambda \frac{lv^2}{2d_{\text{э}}} \rho_{\text{г}}, \text{ Н/м}^2; \quad (\text{X.12})$$

для запыленного потока

$$h_{\text{г}}=\lambda (1+\mu) \frac{l}{2d_{\text{э}}} v^2 \rho_{\text{г}}, \text{ Н/м}^2, \quad (\text{X.13})$$

где λ — коэффициент сопротивления трения; l — длина газопровода, м; $d_{\text{э}}$ — эквивалентный (гидравлический) диаметр, м; v — скорость, газа, м/с; $\rho_{\text{г}}$ — плотность газа, кг/м³; μ — концентрация пыли, кг/кг.

Местные сопротивления определяются:

для незапыленного потока

$$h_{\text{м}}=\xi \frac{v^2}{2} \rho_{\text{г}}, \text{ Н/м}^2, \quad (\text{X.14})$$

для запыленного потока

$$h_{\text{м}}=\xi \frac{v^2}{2} \rho_{\text{г}} (1+0,8\mu), \text{ Н/м}^2, \quad (\text{X.15})$$

где ξ — коэффициент местного сопротивления, принимаемый по табличным данным.

Необходимая производительность вентилятора (дымососа) определяется из теплового расчета сушилки, а напор — по гидравлическому сопротивлению сушильного тракта с поправками на создание динамического напора при выходе газа из установки и на самотягу системы:

$$H=h+h_{\text{д}}\pm h_{\text{с.т}}, \text{ Н/м}^2, \quad (\text{X.16})$$

где h — сопротивление сушильного тракта, $\text{H}/\text{м}^2$; h_d — динамический напор на выходе газа из установки,

$$h_d = \frac{v_g^2}{2} \rho_g, \text{H}/\text{м}^2; \quad (\text{X.17})$$

$h_{c.т}$ — самотяга сушильного тракта,

$$h_{c.т} = \pm L (\rho_v - \rho_g) 10, \text{H}/\text{м}^2, \quad (\text{X.18})$$

где L — длина участка, м.

В формуле (X.18) знак «минус» соответствует восходящему потоку газа, а «плюс» — нисходящему.

Гидравлическое сопротивление прямолинейного участка трубы-сушилки определяется по формуле

$$\Delta P = \rho_g v_g \mu_p v_{m2} - v_{m1} + \lambda_{тр} \frac{L_{тр} \rho_g v_g^2}{2 D_{тр}} (1 + K \mu_p) \pm 10 \rho_g v_g \mu_p \tau, \quad (\text{X.19})$$

где ρ_g и v_g — плотность и скорость газа; μ_p — массовая концентрация материала; v_{m1} и v_{m2} — скорости движения материала в начале и конце трубы (по направлению движения газа); $L_{тр}$ и $D_{тр}$ — длина и диаметр трубы; $\lambda_{тр}$ — коэффициент трения газа при движении его в трубе; K — коэффициент Гостерштадта ($K=0,3$); τ — длительность пребывания материала в трубе.

Первый член в правой части уравнения (X.19) соответствует потере давления на разгон частиц материала; второй член — на трение и третий член — на поддержание материала во взвешенном состоянии.

Характеристика сети представляет собой график зависимости потери давления в данной сети от расхода через нее и выражается формулой

$$H = m v^2, \quad (\text{X.20})$$

где m — коэффициент, зависящий от вида сети.

Если на напорную характеристику вентилятора (дымососа) наложить характеристику сети, то точка пересечения этих двух кривых (рабочая точка) определит напор и производительность данного вентилятора (дымососа) в данной сети (рис. X.1,б). Рабочей точке соответствует условие, при котором производительность вентилятора равна расходу газов через сушильный тракт, а давление, развиваемое вентилятором, — его потере в сети. При известной производительности и полной характеристике вентилятора можно определить его мощность и к. п. д.

Для расчета сети весьма важно знать присосы воздуха в сушильный тракт, так как они увеличивают производительность и мощность дымососа:

$$V_g = V_{g0} + \Delta V;$$

$$N = N_0 + \Delta N. \quad (\text{X.21})$$

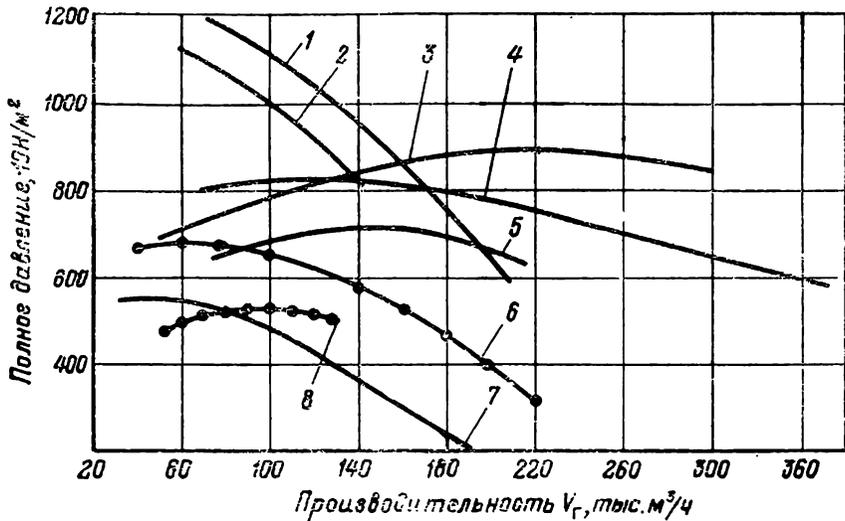


Рис. X.2. Напорная характеристика дымососов (при $t=100^{\circ}\text{C}$), применяемых на трубах-сушилках:

1 — ДС-17; 2 — ВМ-18А (1480 об/мин); 3 — ГД-20-500у (985 об/мин); 4 — ВМ-160/850у (980 об/мин); 5 — Д-18 (970 об/мин); 6 — ДН-21 (980 об/мин); 7 — ДН-19 (980 об/мин); 8 — Д-15,5 (970 об/мин)

Коэффициенты присоса $L_{\text{пр}}$ воздуха в трубах-сушилках и барабанных сушилках, по данным автора, следующие:

Трубы-сушилки

Узел провала	0,06—0,12
Узел питания	0,05—0,07
Пылеулавливание:	
I ступень	0,08—0,10
II ступень	0,05—0,06

Барабанные сушилки

Загрузочная течка:	
открытая	0,08
герметизированная	0,04
Уплотнения сушильного барабана:	
со стороны разгрузочной части:	
секторные	0,05
манжетные	0,03
со стороны загрузочной части:	
секторные	0,06
манжетные	0,04
Разгрузочная камера с устройствами на выгрузке:	
скребково-барабанные питатели	0,05
разгрузочная течка	0,12
пылеулавливающие устройства	0,03

На сушильных установках при сушке минерального сырья нашли применение различные типы тягодутьевых машин.

На углеобогатительных фабриках сушка угля производится: на трубах-сушилках — используются дымососы, напорная характеристика которых показана на рис. X.2;

на барабанных сушилках диаметром 2,8 м — используются дымососы Д-18 с частотой вращения 730 об/мин, а также дымососы ДН-19 и ДН-21 с частотой вращения 980 об/мин;

на барабанных сушилках диаметром 3,5 м — применяются дымососы типа Д 20×2 и Д 21×2 с частотой вращения 585 об/мин.

Для труб-сушилок диаметром 1100 мм могут быть применены дымососы ГД-20-500у и мельничные вентиляторы ВМ-160/850у с частотой вращения 980 об/мин, а также мельничные вентиляторы ВМ-18А или ВМ-20А с частотой вращения 1500 об/мин.

Подбор диаметра колеса дымососа для сушилок кипящего слоя осуществляется по моменту инерции. Момент инерции колеса должен быть достаточным, чтобы осуществить удаление всего материала с решетки и запыленного потока газа в случае аварийной остановки (отключения) электродвигателя дымососа.

§ 2. БУНКЕРА, ПИТАТЕЛИ И ЗАТВОРЫ

Для обеспечения стабильной и надежной работы сушильных агрегатов аккумулирующие бункера сырого угля устанавливаются непосредственно перед сушильными аппаратами. Как правило, на каждый сушильный аппарат предусматривается один бункер вместимостью не менее часовой производительности сушильного агрегата.

Таблица X.1

Технические характеристики двухдисковых питателей

Наименование показателей	П2ДШ-250	П2ДШ-310
Производительность, т/ч	30—100	40—150
Крупность исходного материала, мм	0—13,0	0—13,0
Влажность исходного материала, %	20—25	20—25
Диаметр диска нижнего, мм	2500	3100
Частота вращения диска, об/мин	2—5	2—4
Мощность электродвигателя привода, кВт	0,6	0,6
Частота вращения, об/мин	1500	1500
Масса, кг	10 625	—
Изготовитель	Днепропетровский завод горношахтного оборудования	

При сушке углей с содержанием 65% и более мелочи менее 1 мм устанавливаются бункера цилиндрической формы или в форме обратного конуса. В остальных случаях применяются бункера со стенками, имеющими наклон не менее 65%, и с плавно закругленными углами между ними.

Под бункерами сырого угля устанавливаются скребковые, пластинчатые и ленточные питатели. При сушке флотоконцентратов и шламов находят применение двухдисковые питатели (табл. X.1)

Для загрузки сушильных барабанов применяются скребковые питатели ПСБ-28 и ПСБ-35.

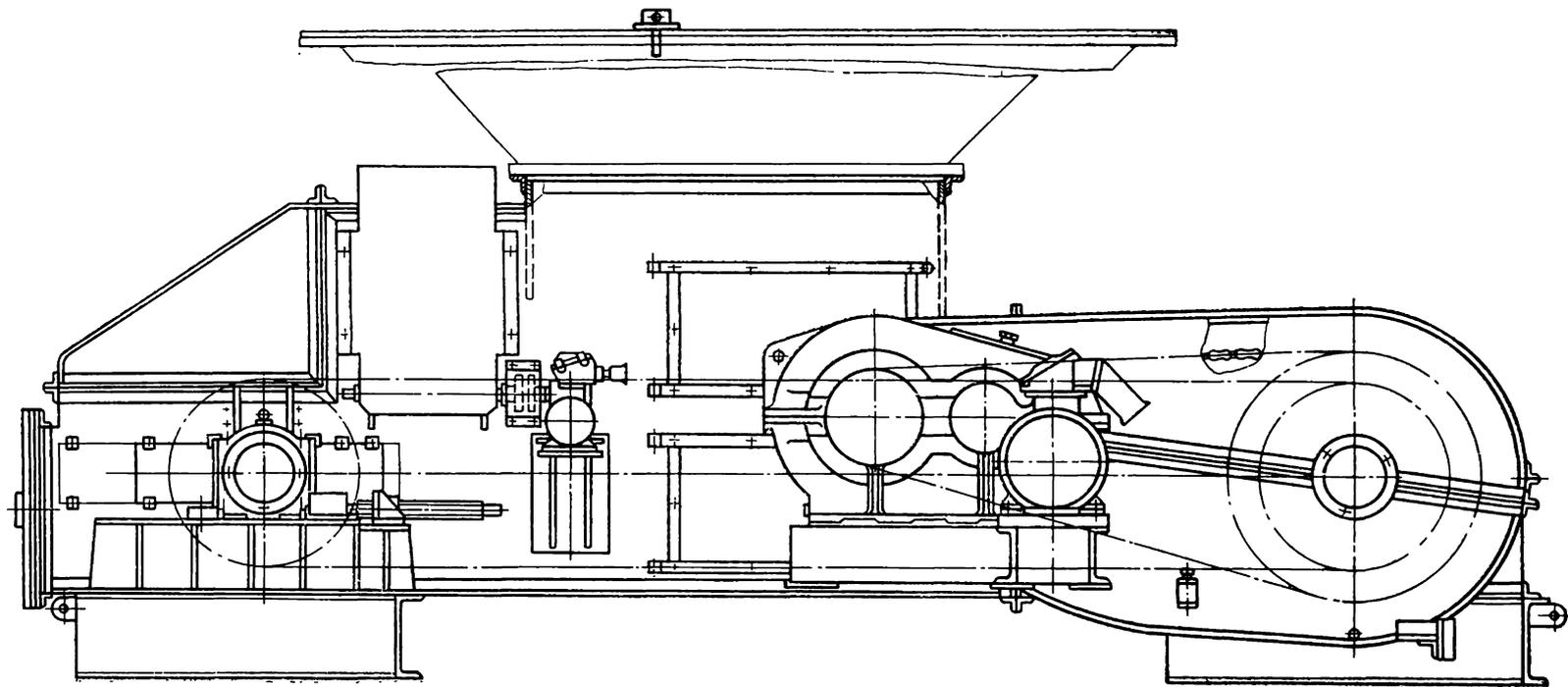


Рис. X.3. Скребокый пигатель типа ПСБ

Скребковый питатель типа ПСБ состоит из скребковой цепи, приводного вала, натяжного вала, секторного затвора, корпуса, привода питателя, привода секторного затвора, опорных рам (рис. X.3).

Скребковая цепь состоит из двух ветвей вильчатой цепи, соединенных между собой скребками. Исходный материал из бун-

Т а б л и ц а X.2
Технические характеристики питателей типа ПСБ

Наименование показателей	ПСБ-28	ПСБ-35
Производительность, т/ч	40—120	100—300
Ширина желоба, мм	1000	1000
Длина питателя, м	5,5	3,5
Тип цепи	Вильчатая	
Скорость движения цепи, м/с			0,1	0,25
Шаг, мм:		
цепи	160	160
скребков	480	480
Высота скребков, мм	90	90
Электродвигатель:		
тип	BAO-61-6	BAO-71-4
мощность, кВт	10	22
Частота вращения, об/мин	970	1460
Изготовитель	Завод угольного машиностроения им. Пархоменко (г. Караганда)	

Т а б л и ц а X.3
Технические характеристики скребково-барабанных питателей

Наименование показателей	СБП-100	СБП-300
Производительность, т/ч	100	300
Высота скребка, мм	80	100
Частота вращения ротора, об/мин	23	28
Тип редуктора	PM-650,	PM-750Б,
Электродвигатель:	$i=31,5$	$i=48,57$
тип	BAO-62-8	BAO-71-4
мощность, кВт	10	22
Частота вращения об/мин	730	1460
Масса питателя, кг:		
с приводом	2130	3980
без привода	780	1934
Габаритные размеры, мм:		
длина	2700	3000
ширина	1450	1963
высота	930	1530
Изготовитель	Карпинский рудоремонтный завод производственного объединения «Важрушевуголь»	

кера поступает на верхнее днище и скребками верхней ветви транспортируется в направлении секторного затвора. В зависимости от положения секторного затвора, устанавливаемого с помощью привода, можно регулировать производительность питателя. Далее исходный материал через люк, попадая на нижнее днище

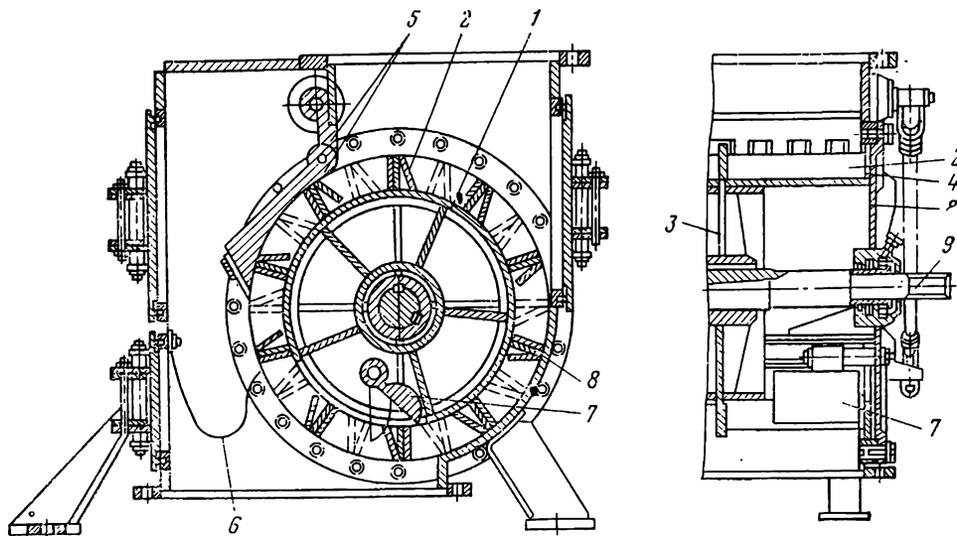


Рис. X.4. Скребково-барабанный питатель типа ПСБ:

1 — стол; 2 — скребки; 3 — диски; 4 — кольца; 5 — отжимное устройство; 6 — воздухопроницаемый фартук; 7 — било; 8 — корпус; 9 — вал

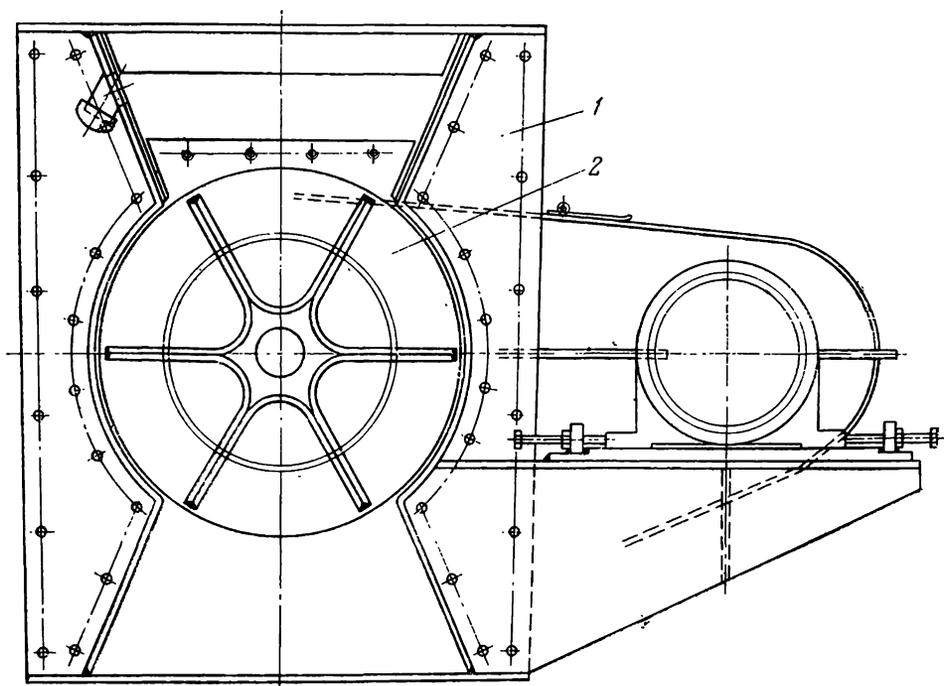


Рис X.5. Шлюзовой затвор:

1 — корпус; 2 — ротор

ще, перемещается к разгрузочному отверстию и самотеком по желобу направляется в сушильный барабан. Такая конструкция питателя обеспечивает полную герметизацию узла загрузки сушильных барабанов.

В табл. X.2 приведены технические характеристики скребковых питателей типа ПСБ.

Разработаны конструкции скребково-барабанного питателя (рис. X.4).

Скребково-барабанный питатель производительностью 100 и 300 т/ч (табл. X.3) оборудован скребками, установленными в виде беличьего колеса между диском и кольцами. Для равномерной разгрузки материала скребки на половинах ротора сдвинуты относительно друг друга. Выгрузка крупных кусков угля обеспечивается отжимаемым устройством с приспособлением для регулирования усилия натяжения. Воздухонепроницаемый фартук предохраняет питатель от попадания пыли при пересушке угля. Для очистки скребков смонтировано било. Скребково-барабанные питатели применяются на разгрузке сухого угля и сушильных аппаратов и из I ступени пылеулавливания.

На разгрузке пылевых циклонов, батарейных циклонов и других аппаратов сухого пылеулавливания широко используются шлюзовые затворы различных конструкций. На рис. X.5 показан шлюзовой затвор, характеристика которого приведена ниже:

Производительность, т/ч . . . .	. 100—140
Частота вращения ротора, об/мин	. 25
Мощность электродвигателя, кВт	. 3,7

Кроме шлюзовых затворов применяются мигалки с конусным или плоским клапаном, двойные пылевые затворы с электроприводом, шнековые конвейеры и др.

КОНТРОЛЬ, РЕГУЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ
СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

В настоящее время теплотехнический контроль сушилок является неотъемлемой частью комплекса этих установок, позволяющий судить о ходе теплового процесса, производить его регулировку и предупреждать неполадки в работе.

Контроль за работой сушилок осуществляется с помощью измерительных устройств, регистрирующих и записывающих измерительные параметры.

Сушильные установки оснащаются пультами местного, дистанционного и автоматического управления.

Для обеспечения безопасности эксплуатации сушильные установки должны оснащаться контрольно-измерительной аппаратурой для контроля следующих параметров:

1) температуры газов:

в топке на выходе из камеры горения (в зоне, исключаяющей прямое воздействие лучистого тепла);

на входе в сушилку;

в разгрузочной камере барабанной сушилки;

перед дымососом;

2) температуры газов на входе в сушилку и перед дымососом (регистрируется самопишущими приборами);

3) разрежения, измеряемого тягомерами;

в верхней части камеры горения топки;

на входе в сушилку;

в разгрузочной камере (за циклоном);

перед дымососом;

4) содержания кислорода в газовой смеси перед дымососом и после него (определяемого газоанализаторами с самопишущими приборами);

5) давления, измеряемого напоромерами;

дутьевых вентиляторов;

перед мельницей пылеугольной топки;

в коробках вторичного дутья пылеугольных топок.

Амперметрами измеряются нагрузки на электродвигатели барабанной сушилки, дымососа, мельницы, манометрами или другими контрольно-измерительными приборами, размещенными непосредственно в месте работы обслуживающего персонала, — давление в системе подачи пара и воды в сушилку.

При применении топок, работающих на пылеугольном, жидком и газообразном топливе устанавливаются дополнительные контрольно-измерительные приборы в соответствии с «Правилами взрывобезопасности установок для приготовления и сжигания топлива в пылевидном состоянии» и «Техническими требованиями по

взрывобезопасности котельных установок, работающих на мазуте или природном газе».

Сушильная установка должна иметь дистанционное управление направляющими аппаратами дымососов и дутьевых вентиляторов с указателями степени их открытия, а также сигнализацию, размещенную на щите управления машиниста сушильной установки.

Световая и звуковая сигнализации действуют в случае: превышения содержания кислорода в дымовых газах после или перед дымососом выше предельных норм;

достижения критической температуры перед дымососом.

Световая сигнализация действует в случае:

падения давления пара и воды ниже норм, указанных в режимной карте;

забивки разгрузочной камеры (циклона);

забивки сухого пылеуловителя;

снижения уровня исходного угля в бункерах ниже заданного.

Сушильная установка должна иметь блокировочное устройство, препятствующее включению электродвигателей дымососов и сушильного барабана при отсутствии защитного пара или воды.

Теплотехнический и аэродинамический контроль сушилок является неотъемлемой частью комплекса этих установок, позволяющей судить о ходе процесса сушки и предупреждать неполадки в работе сушилки.

Наиболее важно контролировать и регулировать температуру газов в сушильном тракте.

Сушилки должны работать на постоянном режиме, т. е. количество тепла, поступающего из топки в сушилку, при данной температуре соответствует общему количеству тепла, расходуемого на испарение влаги, нагревание сухого материала, потерям тепла в окружающую среду.

Автоматизация сушильного агрегата включает систему:

автоматического контроля основных технологических параметров и состояния оборудования;

автоматического регулирования процессов сушки и горения;

автоматической защиты и блокировок, обеспечивающих предупреждение аварийных ситуаций и нарушений технологического процесса.

Система автоматического регулирования сушильного агрегата должна обеспечивать:

автоматическое поддержание заданной влажности или температуры высушенного продукта при ведении процесса сушки в оптимальном режиме с учетом ограничения по температуре и газовому составу сушильного агента;

заданный закон регулирования температуры горячих газов, поступающих в сушилку при оптимальном режиме горения, исключаящем недожог топлива, с учетом ограничения по газодутьевому режиму;

автоматическое регулирование газодутьевого режима агрегата для стабилизации процесса сушки и исключения попадания топочных газов в помещение сушильного цеха.

В трубах-сушилках и других динамических сушильных аппаратах (с подобными величинами транспортного и емкостного запаздывания) регулирование (стабилизация) влажности сухого материала может производиться по косвенным параметрам. В качестве косвенных рекомендуются параметры регулирования сушильного агента.

Для сушилок с малоинерционными топками (пылеугольных, факельнослоевых, с жидким и газообразным топливом) может быть рекомендован способ регулирования процесса сушки путем изменения расхода топлива при стабильной нагрузке сушилки по сырому материалу.

При использовании инерционных слоевых топок стабилизацию влажности сухого материала рекомендуется достигать регулированием количества подачи влажного материала в сушилку.

На рис. XI.1 и XI.2 показаны принципиальные схемы автоматизации и трубы-сушилки барабанной сушилки при сушке угля.

На трубах-сушилках ЦОФ «Зиминка» используется система контроля автоматической подачи защитного пара в сушильный тракт.

Для контроля за поступлением защитного пара в тракт сушильной установки в паропроводе установлена термореле, которая выдает на электронный самопишущий прибор КСП-2 сигнал о температуре защитного пара.

При достижении температуры и давления поступающего в тракт защитного пара заданных значений замыкаются контакты на электронном приборе КСП-2 и выдается сигнал оператору «Пар в сушильную установку поступает». Одновременно включается в работу реле времени ВС-10-34 для контроля и обеспечения заданного времени поступления защитного пара в тракт сушильной установки.

Все включения сушильной установки в работу фиксируются на диаграмме электронного потенциометра КСП-2.

При остановке сушилки защитный пар подается одновременно с прекращением подачи в тракт сырого угля и его подача прекращается после полной остановки сушилки.

Время заполнения тракта сушилки защитным паром определяется индивидуально в зависимости от местных условий для каждой сушилки.

Для контроля работы сушилки кипящего слоя предусматриваются следующие приборы:

шеститочечный потенциометр с самопишущим устройством, который записывает температуру газов:

под газораспределительной решеткой;

над газораспределительной решеткой, в зоне кипения сушеного материала

перед дымососом;

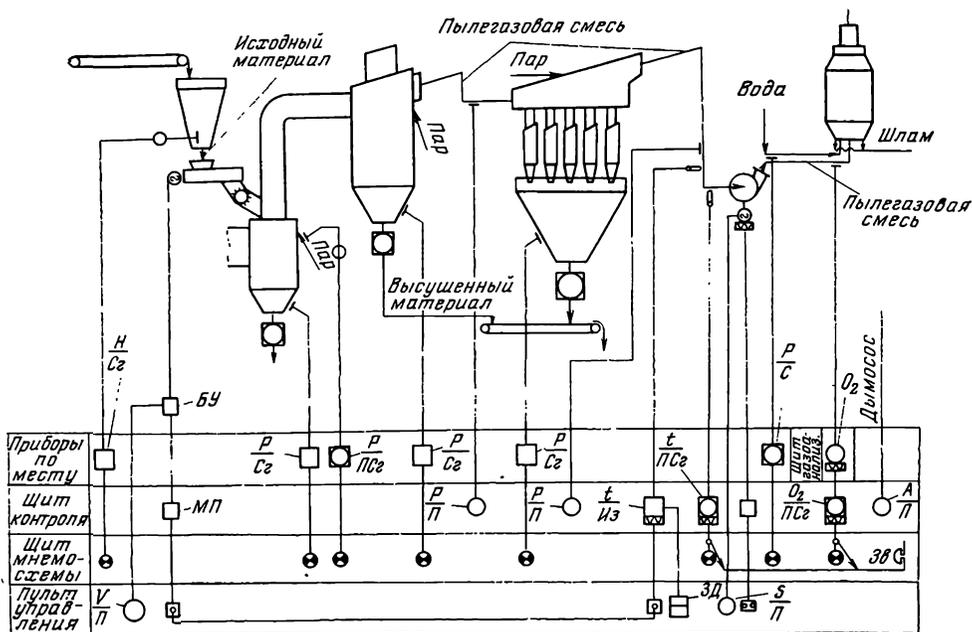


Рис. XI.1. Схема автоматизации трубы-сушилки:

S/P — положение регулирующего органа; $БУ$ — блок управления; $МП$ — магнитный пускатель; V — вольтметр; H — уровень; $Из$ — регулятор изодромный; $ЗД$ — задатчик; P — давление, разрежение; $П$ — показывающий прибор; Cg — сигнализирующий прибор; t — температура; A — амперметр; $Зв$ — звонок

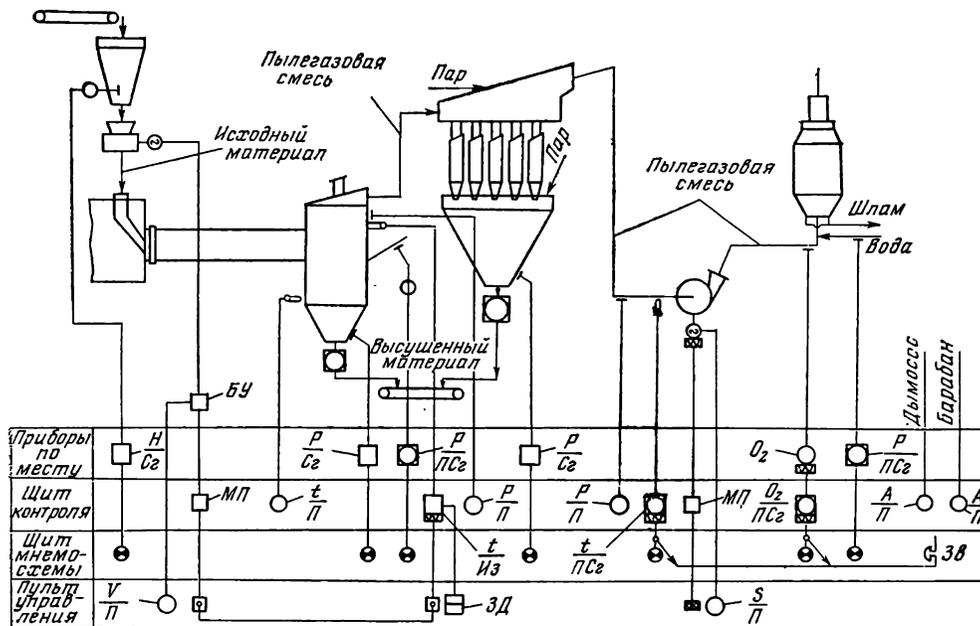


Рис. XI.2. Схема автоматизации барабанной сушилки:

S/P — положение регулирующего органа; $БУ$ — блок управления; $МП$ — магнитный пускатель; V — вольтметр; H — уровень; $Из$ — регулятор изодромный; $ЗД$ — задатчик; P — давление, разрежение; $П$ — показывающий прибор; Cg — сигнализирующий прибор; t — температура; A — амперметр; $Зв$ — звонок

перед углеразмольной мельницей (при применении пылеугольной топки);

указатель уровня материала в аккумулирующем бункере сырого материала — 1 (полное заполнение); 3/4; 1/2 и 1/4;

указатель открытия заслонки дутьевого вентилятора — 1 (полное открытие); 3/4; 1/2 и 1/4;

амперметры:

углеразмольных мельниц;

дымососа;

сигнальные лампочки красного, желтого и белого цветов, которые включаются в следующих случаях:

красная — при 100%-ном заполнении бункера сырого материала; желтая — при 80%-ном заполнении и белая — при снижении уровня материала в бункере на 10—15% ниже нижнего предела.

Датчики температуры обеспечивают строго установленный температурный режим сушки, несмотря на изменения во время работы таких показателей, как количество и начальная влажность материала, подвергаемого сушке.

Система контроля и управления сушилкой кипящего слоя включает:

пульт управления сушилкой, который размещается в помещении диспетчера фабрики (предприятия);

вспомогательный пульт управления, который предназначен для местного управления работой сушилки;

пульт управления впрыском воды в сушильную камеру, который обеспечивает автоматическое управление механизмами водяных задвижек и воздушных клапанов. Эта система управляется с вспомогательного пульта;

местные контрольные приборы и элементы управления: терморелы, концевые выключатели, исполнительные механизмы автоматических задвижек и шиберов;

реле времени, обеспечивающее автоматическое удаление золы с решетки и выгрузку ее из топки.

Ниже рассмотрены системы регулирования работой сушилки кипящего слоя, оснащенной слоевой топкой.

1. Пульт управления сушилкой снабжен системой для ее запуска и остановки. Эта система полностью оснащена кнопками запуска и остановки, амперметрами и лампочками.

2. На пульт управления сушилкой и вспомогательный пульт управления выведены показания датчиков разрежения (давления). Импульсные линии от штуцеров (датчиков), размещенных по сушильному тракту, соединяются с тягомерами, размещенными на указанных пультах. Эти приборы непрерывно измеряют разрежение: в топке; под газораспределительной решеткой; в слое кипящего материала; в сушильной камере (над слоем); давление перед скруббером.

3. Система контроля за температурой газа после дымососа является основой схемы управления процессом сушки с целью обеспечения наиболее эффективной работы сушильной установки.

Поддерживание и регулирование заранее заданной и установленной на датчике (управляющем звене) температуры отходящих газов осуществляется посредством воздействия сигнала этого датчика на управляющий механизм клапана присадки холодного воздуха.

Если температура превышает установленное на датчике значение, клапан раскрывается и присасывается большее количество воздуха для смешения с топочными газами, при этом температура газов перед дымососом принимает установленное для нее значение. При снижении температуры отходящих газов ниже заданной клапан присадки воздуха закрывается.

4. Система регулировки температуры в слоевой топке.

В соответствии с установленной температурой газов перед дымососом осуществляется также регулирование температуры в топке. Температура измеряется в газоходе между топкой и сушилкой. Эта температура поддерживается близко к значению температуры, установленной на самопишущем датчике, посредством автоматического регулирования расходов дутьевого воздуха и топлива. В случае уменьшения температуры датчик подает сигнал на соответствующие исполнительные механизмы для увеличения степени открытия направляющего аппарата дутьевого вентилятора и увеличения подачи топлива в топку. При увеличении температуры выше заданной датчик осуществляет противоположные операции.

5. Управление работой направляющего аппарата дымососа осуществляется с пульта управления по заданному значению температуры отходящих газов.

6. Температура в сушильной камере измеряется приблизительно в том месте, где подается исходный материал. Обеспечивается контроль за превышением верхнего установленного значения температуры. Если наблюдается превышение температуры, то датчик автоматически воздействует на клапан присадки воздуха с целью разбавления топочных газов большим количеством холодного воздуха.

7. В системе аварийного впрыска воды имеются терморпары контроля превышения температуры, вызванного наличием очага горения в сушильной камере или в бункерах под циклонами. Система впрыска включается при достижении температуры 300°C зимой и 275°C летом, при этом зажигается сигнальная лампочка, указывающая на подачу воды в форсунки. В случае отключения электроэнергии предусмотрено ручное управление системой впрыска воды.

8. Автоматически управляется система подачи исходного материала в сушилку. Наибольший интерес представляет система, разработанная фирмой «Хейл энд Паттерсон» (США). Она включает бункер исходного материала, который монтируется на специально спроектированных пружинах, что позволяет ему совершать перемещение вверх и вниз соразмерно с количеством исходного материала, находящегося в нем (рис. XI.3).

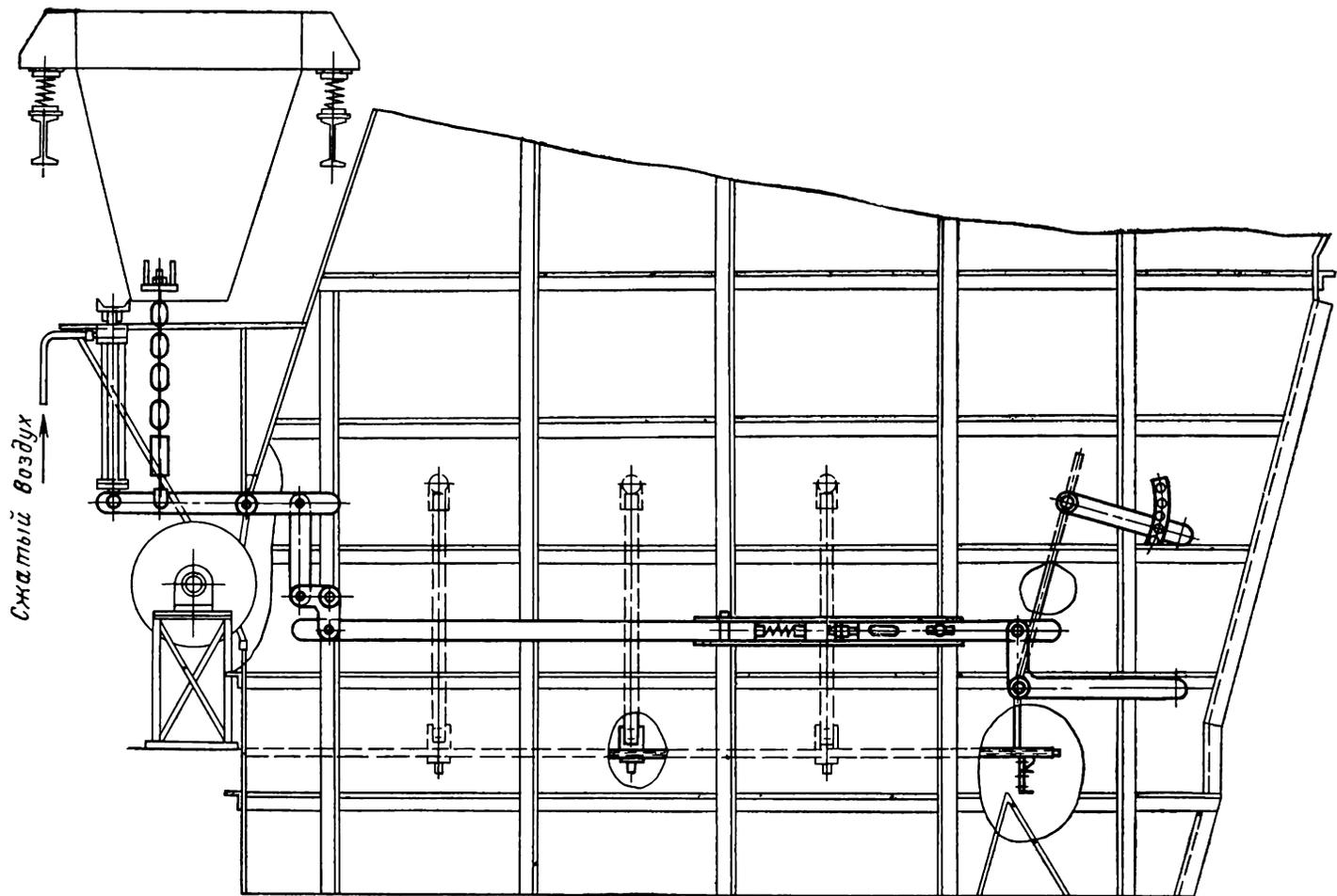


Рис. XI.3. Рычажная система регулирования работы сушилки кипящего слоя фирмы «Хейл энд Паттерсон» (США)

Вертикальное перемещение бункера передается шиберу через механические тяги (рычаги). Шибер расположен поверх валкового питателя. Если бункер полностью заполнен материалом, шибер находится в нижнем положении и количество поступающего материала в камеру максимальное. По мере опорожнения бункера шибер движется вверх, тем самым уменьшая площадь прохода и подачу влажного материала в сушильную камеру.

Сигнализатор нижнего уровня материала в бункере указывает на отсутствие в нем материала. Сигнализатор верхнего уровня автоматически выключает конвейер питания в момент полного заполнения бункера материалом.

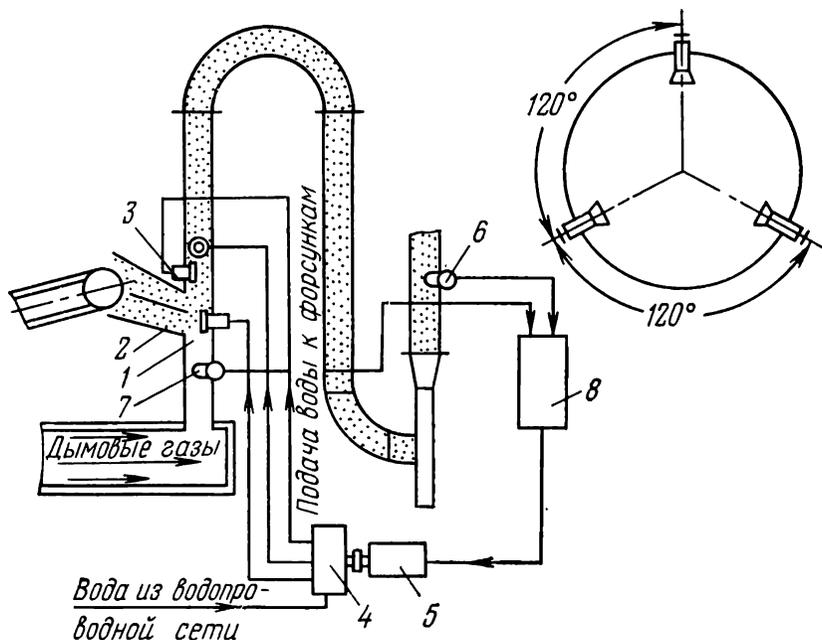


Рис. XI.4. Схема регулирования температуры путем впрыска воды:

1 — сушильный тракт; 2 — подача сырья; 3 — форсунки; 4 — регулирующий кран; 5 — исполнительный механизм; 6 — термопара; 7 — скоростная термопара; 8 — электронный регулирующий прибор

Белгипроторфом разработана и совместно с Березинским торфобрикетным заводом смонтирована система автоматического управления процессом сушки в пневмопароводяной сушилке [13].

Автоматическое управление состоит из автономных систем поддержания уровня торфа в бункере установки стабилизации загрузки и системы регулирования температурного режима сушки.

Установка стабилизации загрузки сушилки представляет собой бункер с загрузочным скребковым конвейером и двумя винтовыми конвейерами для подачи сырья в сушильные корпуса. Применение такой установки устраняет неравномерность загрузки сушилки.

Система автоматического управления процессом сушки скомпонована из серийно выпускаемой аппаратуры. Для регулирования

температуры использован регулятор РПИБ-2С. Датчиком температуры является малоинерционный термометр сопротивления ТСП-290. Контроль уровня торфа в бункере осуществляется применением реле контроля сопротивления ИКС-2Н с усовершенствованными датчиками. Блок избирательности изготовлен из элементов типа «Логика».

Московским филиалом ВНИИТП разработан и внедрен на ряде торфобрикетных заводов с пневмогазовой сушкой автоматически действующий регулятор температуры, обеспечивающий постоянство верхнего предела температуры в сушильном тракте путем периодического ввода в тракт воды при повышении температуры в нем выше заданной.

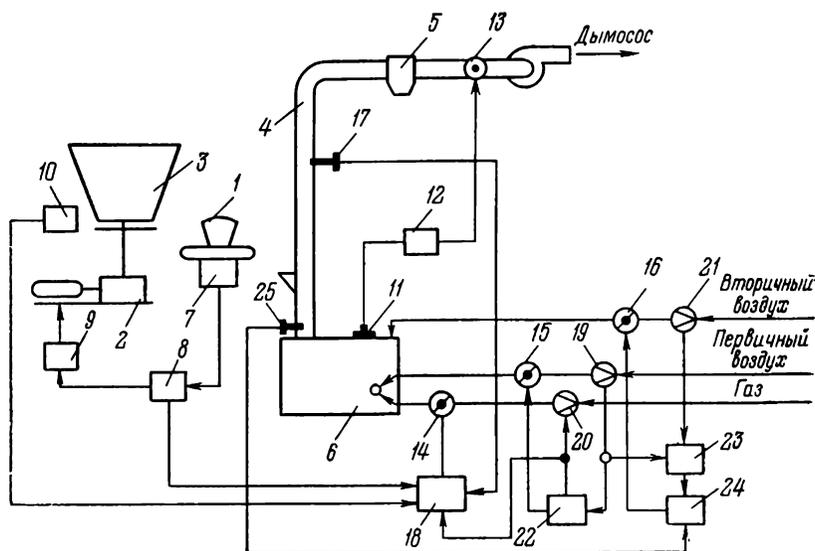


Рис. XI.5. Блок-схема системы автоматического управления трубой-сушилкой:

1 — весоизмеритель; 2 — тарельчатый питатель с регулируемым электроприводом; 3 — бункер сырой шихты; 4 — труба-сушилка; 5 — двухэлементный циклон; 6 — топка; 7 — датчик весоизмерителя; 8 — размножитель сигналов; 9 — регулятор расхода материала; 10 — датчик влажности; 11 — устройство отбора давления; 12 — регулятор разрежения; 13—16 — регулирующие органы; 17 — термопара; 18 — устройство управления тепловым режимом; 19—21 — измерительные диафрагмы; 22 — регулятор соотношения топливо — воздух; 23 — сумматор; 24 — регулятор аэродинамического режима; 25 — термопара на выходе газов из топки.

Автоматический регулятор выполнен по схеме, показанной на рис. XI.4. Он имеет два температурных датчика ТХК-284 и ТПС, регулирующий прибор РПИБ-Т, исполнительный механизм, регулирующий кран и три форсунки для ввода воды в тракт.

Эта схема была внедрена на Крипецком торфобрикетном заводе, она позволила поддерживать влажность высушенного торфа в пределах $\pm 1,5\%$, а также увеличить производительность сушилки на 10%.

Система автоматического управления процессом сушки в трубах-сушилках находится в эксплуатации на медеплавильном заводе Алмалыкского горно-металлургического комбината, где производится сушка сульфидной шихты.

Основными узлами технической схемы являются труба-сушилка (рис. XI.5), выносная топка, система пылеулавливания, система загрузки шахты, состоящая из бункера сырой шихты, тарельчатого питателя с регулируемым электроприводом ленточного весоизмерителя, шихтопровода со штыревым забрасывателем, газопровода, воздухопроводов первичного воздуха и вторичного воздуха, дымососа.

Система автоматического управления состоит из системы сбора и переработки информации, автономных систем автоматического регулирования отдельных параметров и комбинированной системы автоматического регулирования температуры на выходе из трубы-сушилки.

Система комплексной автоматизации процесса сушки шихты в трубах-сушилках включает несколько САР, управляющих взаимосвязанными параметрами, которые характеризуют производительность процесса сушки, распределение температур в рабочем пространстве, условия образования теплоносителя и аэродинамический режим сушки. Значение отдельных параметров процесса стабилизируется или изменяется в соответствии с изменением условий работы труб-сушилок. Соответствующая стабилизация аэродинамического режима достигается вследствие того, что общее количество воздуха в трубе-сушилке стабилизируется путем расхода вторичного воздуха и т. д.

ВЫБОР ТИПА СУШИЛКИ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Выбор типа сушилки должен решаться в каждом конкретном случае на основе технико-экономического расчета с учетом технологических свойств материала.

При выборе типа сушилки необходимо учитывать расход тепла, электроэнергии, металла и стоимость всей установки, отнесенные к 1 т испаренной влаги.

Кроме того, необходимо принимать во внимание единичную мощность сушилки, предельную крупность сушимого материала и желаемую равномерность сушки, а также возможную скорость сушки, безопасность работы сушилки, пылеобразование, механическую и эксплуатационную надежность.

В основе выбора вариантов способа сушки и типа сушилки лежат два условия: максимальная интенсивность процесса сушки и минимальная себестоимость операции сушки в производстве. Первое условие определяется на основе исходных характеристик материала и технологических требований производства; второе — технико-экономическим расчетом и сравнением вариантов. Решающими факторами окончательного выбора типа аппарата являются технико-экономический эффект и степень технологической и механической надежности сушильного аппарата и сушильной установки в целом на конкретном производстве при сушке определенного вида продукта.

На основании опыта работы сушилок кипящего слоя на Днепродзержинском и Макеевском КХЗ Гипрококсом и Укрэнергочерметом были проведены сравнительные расчеты стоимости строительства и расхода на эксплуатацию сушилок кипящего слоя. Для сравнения были приняты сушилки производительностью 100 и 200 т/ч (табл. XII.1). За 100% приняты расходы на сушку продуктов в барабанных сушилках. Расчеты показали, что стоимость сушки в кипящем слое на 9% ниже, чем в барабанных сушилках.

В табл. XII.2 и XII.3 приведены сравнительные технико-экономические показатели, полученные Гипрошахтом для различных типов сушильных установок при сушке обогащенного угля класса 0—6 мм (260 т/ч) с начальной влажностью 17,4% до конечной влажности 6% (количество испаренной влаги 29 т/ч).

Наиболее низкие удельные капитальные затраты на 1 т испаренной влаги во всех вариантах сушильных отделений были получены при применении труб-сушилок. Имеется вполне четкая тенденция снижения этих затрат с увеличением единичной мощности сушильного агрегата. Аналогичные данные получены по эксплуатационным расходам.

Т а б л и ц а XII.1
Сравнительные технико-экономические расчеты сушилок, %

Расходы	Производительность сушилок			
	200 т/ч		100 т/ч	
	баранных	кипящего слоя	баранных	кипящего слоя
Капитальные	66	57,5	72,5	64,5
Эксплуатационные	34	34	27,5	26,8
Всего	100	91,5	100	91,3

Т а б л и ц а XII.2
Капитальные затраты, тыс. руб.

Статьи затрат	Трубы-сушилки $D_{тр} = 1250 \text{ мм}$	Кипящий слой, $F_p = 8 \text{ м}^2$	Баранные сушилки	
			$D_6 = 2,8 \text{ м},$ $L_6 = 14 \text{ м}$	$D_6 = 3,5 \text{ м},$ $L_6 = 22 \text{ м}$
Строительные работы	738,9	898,7	1077,3	1110,4
Оборудование и монтаж	467,7	529,1	724,4	766,1
Прочие затраты	181,0	214,2	270,3	281,5
Всего	1387,6	1642	2072	2158
Строительный объем сушильного отделения, м^3	30 000	37 600	47 700	50 000
Масса оборудования, т	450	500	830	900
Металлоемкость, т/1000 т высушенного материала	0,45	0,5	0,83	0,9

Т а б л и ц а XII.3
Эксплуатационные затраты, тыс. руб.
(на 1200 тыс. т сухого угля)

Статьи затрат	Трубы-сушилки $D_{тр} = 1250 \text{ мм}$	Кипящий слой $F_p = 8 \text{ м}^2$	Баранные сушилки	
			$D_6 = 2,8 \text{ м},$ $L_6 = 14 \text{ м}$	$D_6 = 3,5 \text{ м},$ $L_6 = 22 \text{ м}$
Материалы	21,3	24,8	32,8	34,6
Топливо	413,6	428,4	443,9	434,2
Электроэнергия	69,6	73,8	80	59,6
Зарплата	15,6	15,6	15,6	15,6
Начисления на зарплату	1,6	1,6	1,6	1,6
Амортизация	105,4	122,3	160,0	168,1
Прочие	0,8	0,8	0,8	0,8
Итого	617,9	667,3	734,7	714,5
Удельный расход тепла, ккал/кг	838	922	934	931
Расход мазута, кг/т высушенного угля	13,2	13,7	14,0	13,8
Расход электроэнергии, кВт·ч/т высушенного угля	4,16	5,16	5,58	4,16

Все варианты сушилок рассмотрены при сушке угля до конечной влажности 6%. При такой глубине сушки угля более перспективна труба-сушилка, так как она по своему принципу работы является скоростной и высокоэффективной сушилкой, которая легко поддается авторегулированию.

Газовые барабанные сушилки по условиям безопасности не нашли применения для сушки наиболее взрывоопасных материалов, например торфа, бурого угля и сланцев.

При выборе типа сушилки возникают значительные трудности при сушке каменных углей до влажности более 8%. При такой влажности они не обладают достаточно хорошими сыпучими свойствами и подвержены агрегированию (слипанию частиц). В этом случае по условиям надежности работы и уменьшению выбросов пыли в атмосферу наиболее приемлемыми являются барабанные сушилки.

Таблица XII.4
Затраты на сушку, коп/т

Тип сушилки	Рядовой уголь	Выпущенная продукция	Концентрат	Сырой уголь	Сухой уголь
Труба-сушилка	16,75	20,34	26,89	29,81	32,950
Барабанная сушилка	23,024	27,768	34,503	38,419	44,656

В табл. XII.4 приведены затраты на сушку угля в трубах-сушилках диаметром 1100 мм и в барабанных сушилках диаметром 3,5 м.

Процесс сушки угля в трубе-сушилке более экономичен, чем в барабанной. Для сушки обогащенных антрацитов класса 0—6 мм и других подобных продуктов, относящихся к абразивным, невзрывоопасным и трудновоспламеняемым материалам, целесообразно принять наиболее скоростные и экономичные способы сушки. На современном этапе развития техники сушки наиболее перспективным направлением является переход на интенсивные процессы сушки с высокими термоаэродинамическими параметрами теплоносителя, которые можно реализовать только при сушке во взвешенном состоянии, где скорость сушки чрезвычайно высокая.

При применении на сушильных установках жидкого и газообразного топлива раскрываются большие возможности сушки указанных материалов во взвешенном состоянии при температуре газов на входе в сушилку до 1400°C. Расчеты Днепрогипрошахта и ИОТТ показали, что при переходе с начальной температуры газов 700°C на 1400°C производительность сушилки (при том же объеме газов) увеличивается почти в 2 раза и во столько же раз сокращается рабочая камера сушилки.

В табл. XII.5 приведены сравнительные показатели сушильного отделения с трубами-сушилками диаметром 1250 мм, с сушилками кипящего слоя (площадь газораспределительной решетки 8 м²) и с барабанными сушилками диаметром 2,8 и 3,5 м и длиной соответственно 14 и 22 м при сушке антрацита класса 0—6 мм. Наиболее экономичным является вариант сушильного отделения с трубами-сушилками.

Несмотря на то, что сушки кипящего слоя, выпускаемые различными фирмами США, работают на пониженных начальных температурах газов (400—600°С) и тем самым значительно уступают по тепловой экономичности трубам-сушилкам, они находят все большее применение, что обусловлено возможностью создавать компактные, большой единичной мощности сушильные установки (500—700 т/ч). На таких установках удельные расходы тепла и электроэнергии значительно снижаются; они становятся ниже, чем на малопроизводительных трубах-сушилках (50—60 т/ч), если их сравнивать с сушилками кипящего слоя производительностью 500—700 т/ч.

В торфобрикетном производстве рассматриваются два конкурирующих типа сушки: пневмогазовая и паровая трубчатая. Ниже приведены основные технико-экономические показатели паровых трубчатых и пневмогазовых сушилок с учетом опыта работы на Ореховском и Космынинском брикетных заводах.

	Пневмогазовая сушилка	Паровая трубчатая сушилка
Расход:		
электроэнергии, кВт·ч/т испаренной влаги	27	8—10
тепла топлива, ккал/кг	900—1000	1180
воздуха, кг/кг испаренной влаги	4,5	6,8
Металлоемкость (без пылеосадительной системы), т/т испаренной влаги	2	Более 20
Влагоразность между крупными и мелкими частицами высушенного торфа, %	Не более 2	Более 10

Пневмогазовая сушилка является более эффективной. Паровые трубчатые сушки выгодно использовать только при наличии отработанного пара турбин [26]. Строительство паровых трубчатых сушилок со своей котельной невыгодно с точки зрения как тепловой эффективности, так и экономичности всего торфобрикетного завода. В этом случае более выгодно применять пневмогазовые сушки, при работе которых экономия только по расходу топлива (без учета первоначальных затрат, которые для них на 50% ниже) составляет более 20% по сравнению с расходом топлива в паровых сушилках.

К существенным преимуществам пневмогазовых сушилок относятся возможность изготовления их основных узлов в мастерских предприятий, простота ремонта и эксплуатации и возможность автоматизации процесса сушки.

В табл. XII.6 приведены расчетные показатели сушки в различных типах сушилок.

Т а б л и ц а XII.5
Сравнительные показатели сушильных установок

Наименование показателей	Трубы-сушилки $D_{тр}=125$ м	Сушилки кипящего слоя $F_p=8$ м ²	Барабанные сушилки	
			$D_6=2,8$ м, $L_6=14$ м	$D_6=3,5$ м, $L_6=22$ м
Производительность, т/ч:				
по поступающему углю	259	259	259	259
по испаренной влаге	29	29	29	29
Число сушильных установок	3	3	4	2
В том числе:				
рабочих	2	2	3	1
резервных	1	1	1	1
Единичная производительность сушильной установки, т/ч:				
по поступающему углю	129,5	129,5	86,4	259
по испаренной влаге	14,5	14,5	9,7	29
Температура сушильного агента, °С:				
на входе в сушильный аппарат	950	750	700	850
на выходе из сушильного аппарата	105	80	90	90
Численность рабочих	12	12	12	12
Строительный объем, тыс. м ³	30	37,6	47,7	50
Капитальные затраты, тыс. руб.	1387,6	1642,0	2072,0	2158
Разница в капитальных затратах, тыс. руб.	—	+254,4	+684,4	+770,4
Удельные капитальные затраты на 1 т испаренной влаги, руб.	9,25	10,95	13,78	14,35
Соотношение капитальных затрат, %	100	118	149	155
Металлоемкость на 1000 т высушенного угля, т	0,45	0,5	0,83	0,9
Эксплуатационные расходы на 1 т испаренной влаги, руб.	4,12	4,44	4,89	4,76
Стоимость сушки на 1 т товарного материала, руб.	0,51	0,55	0,61	0,59
Соотношение приведенных затрат, %	100	110	125	124

Пр и м е ч а н и е. Приведенные технико-экономические показатели получены Гипрошахтом.

Наименьшие приведенные затраты имеют трубы-сушилки и сушилки кипящего слоя.

Годовые эксплуатационные расходы на сушильную установку состоят из следующих основных элементов:

стоимости расходуемых в процессе эксплуатации топлива P_T , электроэнергии $P_Э$, материалов P_M ;

амортизационных отчислений P_A от капитальных затрат на сооружение сушильной установки, используемых для погашения начальной стоимости оборудования и сооружений за определенное число лет работы в связи с их естественным и техническим износом; часть амортизационных отчислений расходуется на производство капитальных ремонтов;

Т а б л и ц а XII.6
Показатели сушилок

Наименование показателей	Барabanная сушилка, $D_6=3,5$ м, $L_6=22$ м	Труба-сушилка, $D_{тр}=1,5$ м	Сушилка кипящего слоя $F_p=20,5$ м ²
Количество испаренной влаги, т/ч	24,5	30,7	61,3
Себестоимость сушки, коп/т рядового угля			
Зарплата, коп/т рядового угля	0,31	0,31	0,12
Начисления на зарплату, коп/т рядового угля	0,03	0,03	0,01
Топливо	9,0	9,0	9,0
Плата за установленную мощность, коп/т рядового угля	0,002	0,0005	0,0015
Стоимость, коп/т рядового угля:			
электроэнергии	0,24	0,21	0,19
автоматизации оборудования	2,3	1,02	2,04
Амортизация сооружений, коп/т рядового угля	0,72	0,53	0,24
Себестоимость сушки, коп/т испаренной влаги	12,6	11,1	11,6
Приведенные затраты, коп/т рядового угля	31,41	22,32	22,82

Примечание. Расчеты выполнены Сибгипрошахтом.

заработной платы $P_З$ персонала, обслуживающего сушильную установку вместе с начислениями;

прочих годовых расходов $P_{пр}$ (в частности, затрат на материалы для текущего ремонта).

Таким образом, годовые эксплуатационные расходы

$$\Sigma P_T = P_Э + P_T + P_M + P_З + P_{пр}. \quad (XII.1)$$

По суммарным годовым эксплуатационным расходам и по количеству высушенного в год материала определяют себестоимость

S_c сушки единицы материала по формуле

$$S_c = \frac{\Sigma P_r}{П}, \quad (\text{XII.2})$$

где ΣP_r — суммарные годовые затраты; $П$ — годовая производительность сушильной установки.

Для примера можно принять углеобогадательную фабрику мощностью по обогащению рядового угля 2100 тыс. т в год, которая оборудована трубами-сушилками для сушки мелкозернистого обогащенного угля. При полной стоимости обогащения рядового угля 1 руб. 53 коп, стоимость процесса сушки составляет 34,9 коп, тогда как стоимость основных процессов обогащения (отсадки, флотации вместе с фильтрацией) — 25,2 коп.

По элементам затрат расходы (коп.) на сушку 1 т рядового угля распределяются следующим образом:

Вспомогательные материалы	1,6
Топливо	15
Электроэнергия	2,4
Зарплата с начислениями	6,0
Амортизация	3,7
Прочие расходы	3,4
Непроизводственные расходы	2,8
<hr/>	
Всего	34,9

Наиболее высокие статьи расхода составляют топливо — 50% и зарплату — 20%. Удешевление операции сушки должно идти по пути уменьшения расхода топлива и комплексной автоматизации сушильных установок.

Расход топлива может быть сокращен как путем повышения к. п. д. при его сжигании, что может быть достигнуто при использовании жидкого и газообразного топлив, так и повышением начальной температуры газов с 700—800 до 1200—1300°C.

Расходы по заработной плате будут значительно снижены при переводе сушильных установок на автоматическое регулирование. В этой области уже проведены значительные работы. При автоматической работе сушилок обслуживающий персонал сушильного отделения будет состоять из двух человек в смену — оператора и мастера-прибориста.

В настоящее время в сушильных цехах отдельных обогадательных фабрик численность обслуживающего персонала в смену достигает 10—12 чел.

Таким образом, статья расхода по заработной плате может быть снижена в 3—5 раз.

Стоимость процесса сушки можно снизить также уменьшением расходов на текущий ремонт.

Опыт эксплуатации сушильных установок показывает, что текущие и капитальные ремонты сушилок вызываются главным образом сравнительно быстрым износом оборудования. На его ремонт задалживается большое число рабочих, материалов и оборудования.

Затраты (руб.) на техническое обслуживание и ремонт оборудования сушильных установок (по данным УкрНИИУглеобогащения) следующие:

Сушильный барабан $D=2,8$ м, $L=14$ м	4764
Труба-сушилка $D=0,9$ м	187
Топки:	
шахтно-мельничная с молотковой мельницей ШМА-1000/470	465
слоевая топка БЦРМ 2370×6500 мм	1668

Наиболее высокие затраты на ремонт приходится на сушильные барабаны и топки с цепными решетками. Затраты на ремонт труб-сушилок примерно в 25 раз ниже затрат на ремонт сушильных барабанов.

В процессе эксплуатации барабанных сушилок на ЦОФ «Комендантская» при сушке антрацита класса 0,5—6 мм наблюдался быстрый износ насадки барабана. В текущие ремонты производилось частичное восстановление участков насадки, а через два года эксплуатации — полная замена лопастной и восстановление винтовой насадок. В связи с трудностью изготовления часть сложной насадки заменена на лопастную.

Агрегатированные нормы расхода (по данным УкрНИИУглеобогащения) основных видов материалов (кг) на 1000 т переработки рядового угля в период ремонтно-эксплуатационных работ следующие:

	Трубы-сушилки	Барабанные сушилки
Прокат черных металлов	10,566	19,221
Поковки, литье, подшипники	0,375	0,642
Метизы	0,124	0,240
Всего	11,065	20,103

Для увеличения срока службы технологического оборудования и повышения безопасности эксплуатации сушильных установок представляется целесообразным применение нержавеющей сталей и износостойких материалов.

Существенным недостатком пылеулавливающих циклонов является низкий срок их службы. С целью повышения износостойчивости циклонов в зарубежной практике широко применяется облицовка рабочих поверхностей циклонов антиабразивными материалами [53]. На цементном заводе «Большевик» производственного объединения «Вольскцемент» проведены сравнительные испытания циклонов диаметром 1410 мм, зафутерованных армированными плитками из базальтового и термостойкого литья и шпунтовыми базальтовыми деталями. Армированные плиты крепятся к стенке корпуса циклона путем приварки к металлической оболочке выведенных из плит концов арматуры, перевязочные швы заделываются силикатной замазкой, приготовленной из жидкого стекла.

В течение 5 лет эксплуатации циклонов камнелитая облицовка оставалась в хорошем состоянии: износ плит в улитке циклона со-

ставлял 2—3 мм, в цилиндрической и конической частях — практически отсутствовал. Наибольшему износу подвергались ребра, выступающие навстречу потоку запыленного газа. На некоторых базальтовых плитах обнаружены трещины термического происхождения, а также установлено, что термостойкое литье износоустойчивее базальтового. Вольским отделением Оргпроектцемента проведены сравнительные технологические испытания футерованных и нефутерованных циклонов. Испытания показали, что футеровка не снижает эффективности пылеочистки. При условной скорости газа 2,6 м/с гидравлическое сопротивление батареи из восьми циклонов составляет 1100 Н/м² при температуре газа 140°С. Испытания по транспортабельности футерованных циклонов показали, что при доставке автотранспортом из Тольятти в Вольск по грунтовой дороге циклона, зафутерованного шпунтовой плиткой, не было обнаружено трещин в плитах и швах.

Таким образом, представляется возможным производить монтаж облицовки непосредственно на заводе-изготовителе.

На Жигулевском комбинате строительных материалов также прошли испытания циклоны диаметром 4 м и сепаратор диаметром 3,5 м, зафутерованные камнелитыми плитами коническая часть аппаратов была выложена из плиток размером 180×115×18 мм, а их вертикальные стенки и крышки — армированными плитами размером 300×300×300 мм.

Проведенные испытания и длительная эксплуатация облицовок показали, что в условиях цементного производства каменное литье на основе базальта является износостойким и эффективным заменителем металла, сроки службы которого в десятки раз превышают сроки службы стальных стенок аппаратов, испытывающих воздействие взвешенных в потоке газа частиц клинкера и цемента. В настоящее время на Кондопожском заводе камнелитых изделий и минерального сырья осуществляются работы по освоению серийного производства камнелитой плитки для облицовки циклонов и сепараторов.

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К СУШИЛЬНЫМ ЦЕХАМ,
ИХ ОБОРУДОВАНИЮ И ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

Сушильные установки при сушке взрывоопасных материалов должны размещаться либо в отдельно стоящем здании, либо в блоке с главным корпусом предприятия. В последнем случае здание сушильного цеха должно быть изолировано от него стеной с большей сопротивляемостью давлению взрыва, чем наружные стены здания сушильного цеха.

Сушильные цехи с газовыми сушилками подразделяются на топочное и сушильное отделения, которые размещаются в одном помещении или в разных. Целесообразность применения того или иного варианта определяется в каждом конкретном случае.

Целесообразно сушильные цехи размещать таким образом, чтобы до минимума сократить расстояния транспортирования сухого материала.

В сушильных цехах должны предусматриваться отопление и устройства хозяйственно-противопожарного и технического водопровода, а также хозяйственно-фекальной и производственной канализации.

Сушильный цех должен иметь не менее двух выходов (по каждому перекрытию), монтажные проемы и подъемные приспособления. Все элементы зданий сушильных цехов должны выполняться из несгораемых материалов.

Оборудование сушильных цехов следует располагать таким образом, чтобы оставались и удобные проходы и доступ к основным узлам оборудования и лестничным клеткам.

Стены между сушильным цехом и главным корпусом предприятия должны иметь минимальное число проемов, оснащенных устройствами, препятствующими проникновению взрывных газов в главный корпус.

Сушильные цехи следует располагать с учетом преобладающего направления ветров.

Стены внутри сушильных цехов должны быть гладкими, окрашиваться в светлые тона или облицовываться плитками.

В местах возможного скопления пыли необходимо предусматривать уклоны и мероприятия для гидроизоляции.

Здания проектируемых сушильных цехов при сушке взрывоопасных материалов должны иметь:

одинарное остекление — не менее 30% поверхности одной из наибольших наружных стен помещения сушильного цеха;

металлические оконные переплеты;

подоконники, выполненные с углом наклона к горизонту не менее 60°.

Применение армированного стекла и стеклоблоков в сушильных цехах при сушке взрывоопасных материалов не допускается.

Оборудование сухой газоочистки и тракта высушенного материала должно размещаться в изолированном помещении.

Помещения сушильных установок должны оборудоваться системами промвентиляции и аспирации с укрытием технологического оборудования и поточно-транспортной системы, а также иметь постоянно действующую и аварийную вентиляцию для удаления из помещения загазованного воздуха. Аварийную вентиляцию следует рассчитывать на 6-кратный воздухообмен.

Помещение для удаления золы и шлака должно быть оборудовано постоянно действующей приточно-вытяжной вентиляцией.

Оборудование в сушильных цехах, как правило, должно располагаться в закрытых помещениях, оснащенных механизированными средствами для ремонтных работ.

Оборудование сушильных установок, как правило, должно компоноваться по агрегатной (блочной) схеме: топка с растопочной трубой и комплектом индивидуального оборудования — сушильный аппарат — система выделения высушенного материала и пылеулавливания — дымовая труба.

При проектировании новых сушильных цехов желательно избегать размещения технологического оборудования сушильных установок в подвальных помещениях.

Компоновка технологического оборудования в сушильных цехах должна предусматривать минимальную протяженность коммуникаций. Основная часть тракта высушенного материала должна, как правило, проходить вне главного корпуса предприятия.

Тракты высушенного материала не должны иметь мешков и тупиков, где может задерживаться пыль.

Расчетную производительность проектируемого сушильного цеха по исходному материалу необходимо определять, исходя из среднечасовой производительности предприятия с учетом коэффициента неравномерности.

Число работающих сушильных установок следует определять по следующим формулам:

$$n = \frac{G}{G_1}, \quad (\text{XIII.1})$$

где n — число работающих сушильных установок; G — исходное количество материала, направляемого на сушку, т/ч; G_1 — производительность сушильного агрегата по исходному материалу, т/ч;

$$n = \frac{W}{W_1}, \quad (\text{XIII.2})$$

где W — общее количество влаги, которую необходимо удалить из исходного материала, т/ч; W_1 — производительность одной сушильной установки по испаренной влаге, т/ч.

Число сушильных установок необходимо выбирать по наибольшему значению, полученному по указанным формулам, и округлять в большую сторону до целого числа.

Расчет и выбор системы пылеулавливания и пылеулавливающих аппаратов должны производиться на основе выдаваемых заказчиком данных о гранулометрическом составе материала, поступающего на сушку.

Проектирование сушильных установок должно осуществляться с учетом их автоматизации с целью:

повышения эффективности технологического процесса сушки и работы оборудования;

стабилизации влажности готовой продукции с обеспечением установленных норм;

обеспечения безопасной эксплуатации сушильных установок;

обеспечения выполнения санитарных норм, охраны труда обслуживающего персонала;

повышения производительности труда обслуживающего персонала.

Сушильные установки должны быть оборудованы аккумулялирующими бункерами для исходного материала, желательно, чтобы они были емкостью не менее часовой производительности сушилки без учета емкости, необходимой для ликвидации подсоса воздуха через бункера.

Бункера для исходного материала должны выполняться металлическими или железобетонными с гладкой внутренней поверхностью и футеровкой нержавеющей сталью наклонных плоскостей. Форма бункеров должна обеспечивать возможность полного спуска из них материала самотеком. Углы между стенками бункера должны быть плавно закруглены, угол наклона стенок бункера к горизонту должен быть не менее 65° .

Внутри бункеров не допускаются какие-либо выступы, на которых может оседать и задерживаться материал. При проектировании в возможных местах отложения материала следует предусматривать мероприятия против его зависания.

Помещения, в которых размещается оборудование для шлакозолоудаления, должны иметь подвод воды к шлаковым и зольным бункерам для гашения золы и шлака, а также должна быть предусмотрена их заливка при транспортировании.

Бункера для золы и шлака должны быть оборудованы затворами с дистанционным управлением.

Угол наклона газоходов к горизонту должен составлять не менее 45° .

Применение газоходов горизонтальных и газоходов с меньшим углом наклона может быть допущено при обеспечении скорости газового потока, исключая осадение пыли (не менее 20 м/с).

Между топками и сушильными аппаратами желательно иметь отсекающие шибера.

Конструкция шибера должна обеспечивать надежное отделение топочного устройства от сушилки, шибер должен быть жаростойким и быстродействующим.

Каждая топка должна иметь растопочную трубу с перекрывающим клапаном.

Сушильные установки, за исключением мокрых пылеуловителей, дымососов, компенсаторов, сушильных барабанов, не имеющих теплоизоляции по техническим условиям завода-изготовителя, и быстроизнашиваемых участков разгрузочных циклонов и сушильного тракта, должны быть теплоизолированы.

Для обеспечения безопасной эксплуатации сушилок, работающих на дымовых газах, в зарубежной практике нашли применение кислородомеры, измеряющие содержание кислорода в парогазовой смеси (рис. XIII.1).

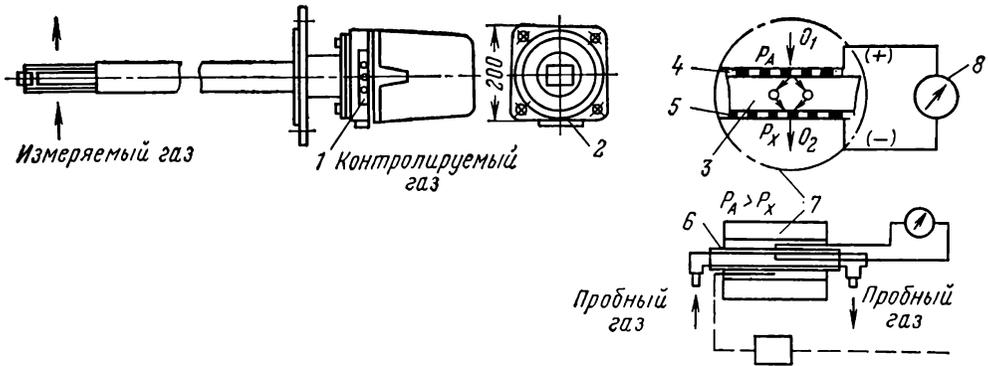


Рис. XIII.1. Принципиальная схема прибора по измерению содержания кислорода в дымовых газах с учетом водяных паров:

1 — входящее отверстие для воздуха; 2 — электропроводка; 3 — электрод из пористой планки; 4 — катод; 5 — анод; 6 — трубка циркония; 7 — электродный узел; 8 — индикатор концентраций

С помощью этого прибора представляется возможным автоматически поддерживать заданное содержание кислорода в сушильном тракте при пуске, остановке и нормальной работе сушилки. При пусках и остановках сушилок содержание кислорода поддерживается за счет ввода в сушильный тракт защитного пара.

Каждый сушильный агрегат должен, как правило, иметь дымовую трубу для выброса отработанных газов в атмосферу. Размер дымовой трубы следует определять расчетом.

Для устранения присосов воздуха, удаления провалившегося материала и посторонних предметов на провальной части трубы-сушилки необходимо устанавливать скребково-барабанные питатели, шлюзовые затворы или гидрозатворы.

Стенки бункерной части (нижней) разгрузочной камеры барабанных сушилок должны иметь угол наклона к горизонту не менее 65° , углы между стенками должны быть плавно закруглены.

Бункерная часть (нижняя) разгрузочной камеры барабанных сушилок должна иметь вместимость, обеспечивающую выгрузку всего высушенного материала, находящегося в барабане, и, как правило, одно выгрузочное отверстие.

Желательно предусматривать непрерывное удаление из смесительной камеры топки провалившегося материала из сушильного барабана.

Выделение высушенного материала в системе пылеулавливания следует производить в аппаратах сухой очистки газов в две стадии. Для доведения до санитарных норм запыленности газов, выбрасываемых в атмосферу, необходимо предусматривать мокрые пылеуловители и электрофильтры.

Запыленность газов на входе в аппараты мокрого пылеулавливания должна быть, как правило, не более 3 г/м^3 .

Средняя скорость газов в горизонтальном сечении разгрузочных камер и гравитационных сепараторов должна составлять не более 4 м/с .

Разгрузочные камеры и пылеулавливающие аппараты сухой очистки газов сушильных установок при сушке наиболее взрывоопасных материалов (уголь, торф, сланец и др.) должны оборудоваться устройствами, препятствующими проникновению взрывных газов в помещение (скребково-барабанные питатели, шлюзовые затворы, мигалки с принудительным открыванием клапанов, роторные пылеразгрузчики).

Для обеспечения эффективной работы труб-сушилок на аппаратах второй ступени пылеулавливания следует предусматривать на выгрузке из них последовательную установку двух затворов.

Дымососы сушильных установок следует размещать после аппаратов сухой пылеулавливания (до устройств с мокрой очисткой газов).

Дымососы и вентиляторы должны иметь направляющие аппараты (заслонки).

Температура газов перед дымососом не должна превышать 150°C и при сушке углей, торфа, сланца — 120°C . Она должна быть выше температуры точки росы на $10\text{—}15^\circ\text{C}$.

Сушильные установки, в которых производится сушка материалов, склонных к воспламенению и самосгоранию (уголь, торф, сланец, полукокс, лигнит и др.) и в которых используются топки, работающие на пылеугольном, газовом и жидком топливах, должны выполняться, как для взрывоопасного материала.

В этих сушильных установках объемное содержание кислорода (в пересчете на сухой газ) в отработанных газах (после дымососа) не должно быть выше следующих норм (%):

торф, лигнит и сланец	16
бурые угли и полукокс этих углей и каменных углей с выходом летучих веществ более 35%	18
каменные угли с выходом летучих веществ менее 35% и полукокс этих углей	19

При сушке антрацита и полуантрацита содержание кислорода в сушильном агенте не ограничивается.

Для целей пожаротушения должен быть предусмотрен подвод водяного пара или инертных газов в сушильный аппарат, во все ступени пылеулавливания сухой очистки газов, в бункера высушенного угля и угольной пыли.

При сушке углей (кроме антрацита и полуантрацита) в периоды пуска и остановки сушильной установки должен проводиться водяной пар или инертный газ:

для труб-сушилок — в зону забрасывания угля;

для сушилок кипящего слоя — в зону под решеткой;

для барабанных сушилок — в смесительную и разгрузочные камеры.

Расход водяного пара или инертного газа следует определять расчетом.

В исключительных случаях допускается применение воды в тонкораспыленном состоянии.

Взвешенная в воздухе пыль углей, сланцев, лигнита, торфа, полукокса и других воспламеняющихся материалов образует взрывоопасную смесь, которая, воспламенившись, может вызвать взрыв. Наиболее взрывоопасными являются частицы: торфа, лигнита и сланца (0,2 мм), бурых углей (0,15 мм), каменных углей (0,12 мм).

Понижение влажности пыли увеличивает взрывоопасность пылевоздушной смеси.

Наибольшая опасность взрыва возникает в периоды пуска, остановки и перебоев в подаче материала в сушилку и топлива в топку.

Основными причинами возникновения взрыва в эти периоды являются:

повышение температуры сушильного агента во всем тракте, и особенно за сушилкой выше предельно допустимой;

поступление в сушилку во время пуска угля с влажностью ниже определенной по режимной карте;

увеличение подсосов воздуха, при которых содержание кислорода в сушильном тракте превышает предельные значения.

Опыты показали, что торфяная пыль взрывобезопасна при влажности выше 10%, крупности частиц менее 0,2 мм и влагосодержании газов менее 280 г/кг. Минимальная концентрация пыли торфа в потоке, при которой возможно развитие взрыва, составляет 0,16—0,18 кг/м³ воздуха. Минимальная концентрация, при которой взрывается пыль, определена в пределах 20—120 г/м³ при влажности торфа менее 20%.

Использование сушильного агента с высокой начальной температурой резко сокращает длительность процесса сушки и снижает содержание кислорода в сушильном тракте. На рис. XIII.2 показан график зависимости между содержанием кислорода и температурой дымовых газов.

При сушке взрывоопасных продуктов (уголь, торф, сланец и др.) разгрузочные и пылеулавливающие аппараты и их соединительные газоходы должны иметь предохранительные клапаны, площадь которых определяется на основе объема и прочностной характеристики оборудования.

На рис. XIII.3 показана зависимость между расчетным давлением и сечением для свободного выхода взрывных газов. Как пра-

вило, при сушке взрывоопасных углей разгрузочные и пылеулавливающие аппараты и их соединительные газоходы должны рассчитываться на внутреннее избыточное давление не менее $4 \times 10^3 \text{ Н/м}^2$.

При установке диафрагмы предохранительного клапана в конце патрубка длина последнего не должна превышать 10 калибров (эквивалентных диаметров патрубка).

При установке предохранительного клапана с отводом длина патрубка до места установки диафрагмы не должна превышать 2 калибров, а длина отвода после диафрагмы — 10 калибров отвода.

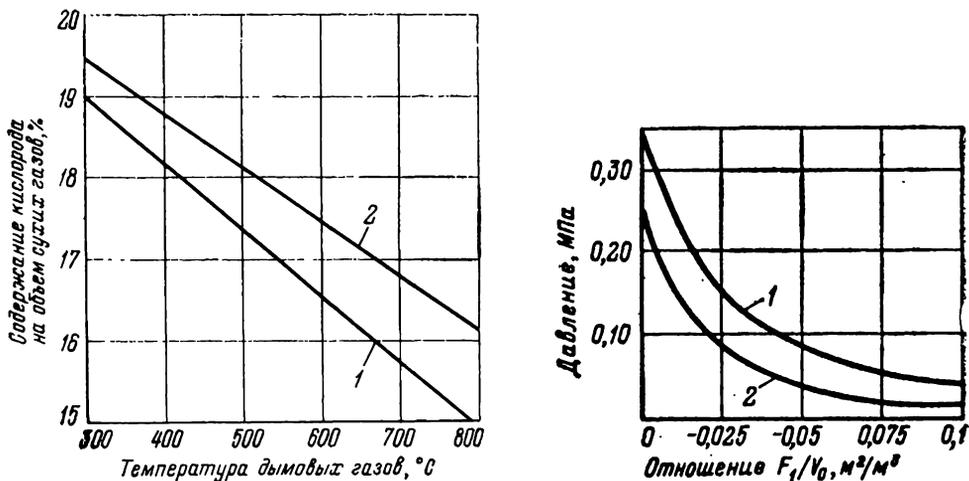


Рис. XIII.2. Зависимость между содержанием кислорода и температурой дымовых газов:

1 — без присосов воздуха $\alpha_{пр}=0$; 2 — с присосами воздуха $\alpha_{пр}=0,5$

Рис. XIII.3. Зависимость между расчетным давлением и сечением для свободного выхода взрывных газов:

1 — сланцы и бурый уголь; 2 — каменный уголь

Сечение отвода должно быть не менее сечения клапана.

В случае установки отводов длиной более 10 калибров, но не более 15 калибров, необходимо рассчитывать оборудование на избыточное внутреннее давление $6 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$.

Для оборудования объемом менее 10 м^3 может быть допущена установка предохранительных клапанов, если они размещены в местах, исключающих нахождение обслуживающего персонала.

Диафрагмы предохранительных клапанов должны выполняться либо легкоразрывными диаметром не более 1 м, либо из мягкой жести толщиной не более 0,5 мм и с одинарным швом посередине, либо из алюминиевого листа толщиной 0,5—1 мм и с надрезом посередине на 50% его толщины, либо из асбестового картона толщиной 3—5 мм. Диафрагмы из асбестового картона следует применять диаметром менее 500 мм и при установке их лишь внутрь здания.

Клапаны должны иметь с внутренней стороны поддерживающую решетку или сетку, выдерживающую нагрузку не менее 1000 Н.

На элементах оборудования, газоходах и коробах, работающих под давлением, предохранительные клапаны следует устанавливать с металлической диафрагмой диаметром не более 600 мм (сечение не более 0,285 м²). Эти клапаны могут быть сгруппированы в блоки, состоящие из нескольких диафрагм.

Допускается замена одного клапана несколькими, сконцентрированными около защищаемого участка, суммарным сечением не менее сечения заменяемого клапана.

Предохранительные клапаны и отводы от них должны устанавливаться таким образом, чтобы исключалась возможность попадания выбрасываемых при взрыве газов на рабочие места и в проходы, а также на кабельные линии, мазутопроводы и маслопроводы.

Топки с камерным сжиганием топлива (пылеугольного, газообразного и жидкого) должны быть снабжены предохранительными клапанами. Клапаны должны быть установлены в обмуровке камеры горения и камеры смещения.

Предохранительные клапаны должны быть размещены в местах, безопасных для обслуживающего персонала. Допускаются отводные короба или ограждения отбойными щитами со стороны возможного нахождения людей. Допускается применение откидных предохранительных клапанов. Клапаны не следует устанавливать в топках, работающих над наддувом.

Каркасы камеры горения, камеры смещения и борова топок должны быть рассчитаны на внутреннее давление, превышающее атмосферное на 2000 Н/м² для установок, работающих под разрежением, и на внутреннее давление, превышающее рабочее на 2000 Н/м² для установок, работающих под наддувом.

На топках, работающих под разрежением или под давлением не более 15 000 Н/м², при сжигании пылеугольного, газообразного и жидкого топлив должны быть предусмотрены предохранительные клапаны с суммарным сечением не менее 0,2 м².

Топки, работающие под давлением и не оборудованные предохранительными клапанами, рассчитываются на внутреннее давление по формуле

$$P_{\text{расч}} = (0,25 + 0,4P_{\text{нач}}), \text{ МПа}, \quad (\text{XIII.3})$$

где $P_{\text{расч}}$ — избыточное расчетное давление; $P_{\text{нач}}$ — избыточное начальное давление в топке.

Монтаж сушильных установок и их эксплуатацию необходимо осуществлять в соответствии с техническими условиями завода-изготовителя. В сушильном отделении должны быть: паспорт отдельно на каждую сушильную установку, режимная карта, журнал приема и сдачи смен и журнал работы сушильных установок.

Сушильные установки после модернизации и капитального ремонта вводятся в эксплуатацию после приемки их комиссией. Приемка должна оформляться актом.

Содержание кислорода в дымовых газах на выходе из сушилки можно определить по формуле

$$C_{O_2} = \frac{18(V_r - V_0 B)}{W + V_r} 100, \% \quad (\text{XIII.4})$$

где V_r — объем сухих газов, отнесенный к нормальным условиям, м³/ч; V_0 — теоретический объем воздуха, необходимого для сгорания 1 кг топлива, м³/кг; B — расход топлива, кг/ч; W — количество испаренной влаги, кг/ч.

На основании экспериментальных исследований ЦКТИ установил, что взрываемость угольной, торфяной и сланцевой пыли может характеризоваться значениями топливного коэффициента $\beta_{л}$, определяемого по формуле

$$\beta_{л} = 2,37 \frac{H^r - 0,125O^r}{C_{л}},$$

где H^r ; O^r — содержание водорода и кислорода в топливе на горючую массу, %; $C_{л}$ — содержание углерода в летучей части топлива, %;

$$C_{л} = V^r - (H^r + O^r + S^r + N^r);$$

V^r — выход летучих веществ на горючую массу, %; S^r и N^r — содержание серы и азота в топливе на горючую массу, %.

С увеличением значения величины $\beta_{л}$ уменьшается взрывоопасность угля. Для углей разреза «Нерюнгринский» Южной Якутии коэффициент $\beta_{л}$ нерюнгринских углей на уровне тощих углей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Богословский В. П., Тертичник Е. И.* Учет влияния влажности режима на теплозащитные свойства ограждающих конструкций. — В кн.: Сборник трудов Московского инженерно-строительного института им. Куйбышева, № 52, 1967, с. 24—29.
2. *Благов И. С., Филиппов В. А.* Сушилки кипящего слоя США. — М., 1978 (ЦНИЭИуголь, экспресс-информация).
3. *Бобриков В. В., Кофанов А. С., Тарасенко А. Е.* Новая система пылеулавливания на трубе-сушилке ЦОФ «Брянковская». — В кн.: Обогащение и брикетирование угля, 1973, № 10, с. 17—19.
4. *Бобриков В. В., Филиппов В. А.* Защита воздушного бассейна от загрязнения промышленными газами. М., 1975 (ЦНИЭИуголь).
5. *Богословский В. Н.* О потенциале влажности. — ИФЖ, 1965, т. VIII, № 2, с. 216—222.
6. *Булышко М. Г., Васильев В. И.* О выборе типа сушильной установки для торфобрикетных заводов. — Торфяная промышленность, 1970, № 7, с. 15—16.
7. *Бильдюкевич В. А., Мелешко В. Ю., Якимович Д. Т.* Совершенствование конструкции распылительной сушилки. — Строительные материалы, 1978, № 8, с. 22—23.
8. *Баскаков А. П.* Процессы тепло- и массопереноса в кипящем слое. — М., Металлургия, 1978.
9. *Благов И. С., Филиппов В. А.* Сушка угля в США. М., 1979. ЦНИЭИуголь, экспресс-информация).
10. *Гусев А. М., Черчинцев В. Д., Нильсен В. Г.* Повышение эффективности работы электрофильтров. — Цемент, 1978, № 3, с. 11—12.
11. *Ефремов Н. А., Коробок А. А.* Совершенствовать конструкцию сушильных агрегатов. — Цемент, 1970, № 12, с. 6—8.
12. *Жильцов К. К., Кричевский Г. Я., Лурье Л. Ю.* Автоматическое управление процессом сушки материалов в трубах-сушилках. — Цветные металлы, 1975, № 7, с. 13—17.
13. *Зайцев В. С., Петин В. А.* О работе циклонов пневмопароводяной сушилки. — Торфяная промышленность, 1971, № 2, с. 13.
14. *Закон Ю. Х.* Результаты исследования скоростного режима процесса сушки торфа в трубе-сушилке. — Торфяная промышленность, 1976, № 11, с. 10—13.
15. *Закон Ю. Х.* Исследование процесса сушки торфа в трубе-сушилке с зоной противотока. — Торфяная промышленность, 1977, № 11, с. 19—21.
16. *Исследование процесса сушки асбестовых руд/ А. А. Соколов, Г. К. Лисовская, М. А. Ивакина, Ф. П. Заостровский* — Известия высших учебных заведений. Горный журнал, 1976, № 6, с. 147—149.
17. *Казанский М. Ф.* Определение термодинамических функций влаги. — ИФЖ, 1965, т. IX, № 3, с. 327—330.
18. *Казанский В. М.* Определение термодинамических функций влаги, поглощенной дисперсным телом, по удельной теплоте испарения ее. — ИФЖ, 1965, т. IX, № 5, с. 328—330.
19. *Корягин А. А.* Техничко-экономические вопросы выбора сушильных аппаратов и установок для химических материалов. Сушильное оборудование. Сб. научных трудов НИИХИММАША. М., 1976.
20. *Куржман Г. И.* Теоретические основы и процесс получения мелкокускового торфяного топлива для энергогазохимического использования. М.—Л., Госэнергоиздат, 1961.
21. *Лыков А. В.* Явления переноса в капиллярно-пористых телах. М.—Л., Гостехиздат, 1954.
22. *Лыков А. В.* Теория сушки. М., Энергия, 1968.
23. *Лыков А. В.* Тепло- и массообмен в процессах сушки. М., Госэнергоиздат, 1956.

24. *Лыков А. В.* Теоретические основы строительной теплофизики. Минск, Изд-во АН БССР, 1961.
25. *Лыков М. В.* Сушка в химической промышленности. М., Химия, 1970.
26. *Лиходиевский В. Л.* Использование тепла топлива в сушильных установках. — Торфяная промышленность, 1971, № 3, с. 9—13.
27. *Лебедев А. Н.* Подготовка и размол топлива на электростанциях. М., Энергия, 1969.
28. *Михайлов Н. М., Шарков А. Г.* Физические свойства топлива и борьба с затруднениями по топливоподаче электростанции. М.—Л., Энергия, 1972.
29. *Наумович В. М.* Сушка торфа и сушильные установки брикетных заводов. М., Недра, 1971.
30. *Приближенный расчет температуры поверхности испарения в процессах сушки влажных материалов/ В. П. Коновалов, В. Б. Коробов, А. И. Плановский, П. Г. Романков.* — В кн.: Теоретические основы химической технологии, 1977, т. XI, № 5, с. 769—771.
31. *Петров В. Н.* Определение критической скорости псевдооживления бинарного слоя частиц различной крупности. — ИФЖ, 1963, т. VI, № 5, с. 299.
32. *Платонов И. И., Федоров Ф. А., Кириченко С. И.* Исследование аэродинамических характеристик марганцевой руды. — ИФЖ, 1975, т. XXVIII, № 6, с. 989—994.
33. *Рубин Ю. М., Лобанов А. В., Наминский В. М.* Опыт сушки антрацитовых шламов. — В кн.: Обогащение и брикетирование угля, 1973, № 9, с. 15—17.
34. *Русанов А. А.* Справочник по пыле- и золоулавливанию. М., Энергия, 1975.
35. *Романков П. Г., Рашковская Н. Б.* Сушка во взвешенном состоянии. М., Химия, 1968.
36. *Рашковская Н. Б.* Сушка в химической промышленности. М., Химия, 1977.
37. *Рубин Ю. М., Марголин Ю. А., Лобанов А. В.* Новые аппараты для сушки флотационного концентрата и шлама. М., 1978 (ЦНИЭИуголь, экспресс-информация).
38. *Романков П. Г., Рашковская Н. Б.* Сушка в кипящем слое. Л.—М. Химия, 1964.
39. *Соколов А. А., Тимофеев В. В.* Автоматический регулятор температуры в сушильном тракте торфобрикетных заводов с пневмогазовой сушкой. — Торфяная промышленность, 1971, № 2, с. 12.
40. *Сыромятников Н. И., Васанова Л. К., Шиманский Ю. Н.* Тепло- и массообмен в кипящем слое. М., Химия, 1967.
41. *Святец И. Е., Агроскин А. А.* Бурые угли как технологическое сырье. М., Недра, 1976.
42. *Совершенствование процесса сушки железных руд Михайловского железорудного комбината/ Б. П. Кузнецов, В. И. Бабков-Эстеркин, А. Н. Хохлов и др.* — Горный журнал, 1974, № 12, с. 47—50.
43. *Тертичник Е. И.* Определение влажностных характеристик строительных материалов способом разрезной колодки. — ИФЖ, 1965, т. VIII, № 2, с. 247—250.
44. *Теплофизические и массообменные свойства гигроскопических материалов.* Сб. статей, Якутск, Наука, 1977.
45. *Тарасов А. С., Хашина Н. В.* Опыт эксплуатации труб-сушилок на ОФ Кузбасса. М., 1978, (ЦНИЭИуголь, экспресс-информация).
46. *Ульянов В. М., Муштаев В. И., Плановский А. Н.* К расчету гидродинамики дисперсных двухфазных потоков. — В кн.: Теоретические основы химической технологии, 1977, т. XI, № 5, с. 716—723.
47. *Филиппов В. А.* Опыт эксплуатации барабанных сушилок на углеобогатительных фабриках. М., Недра, 1970.
48. *Филиппов В. А.* Конструкция, расчеты и эксплуатация устройств и оборудования для сушки минерального сырья. М., Недра, 1969.
49. *Филиппов В. А.* Техника и технология сушки угля. М.—Л., Недра, 1974.
50. *Филиппов В. А.* Сушильные установки на зарубежных углеобогатительных и брикетных фабриках. М., Недра, 1960.
51. *Филиппов В. А.* Высокопроизводительные сушильные установки на углеобогатительных фабриках. М., Недра, 1974.

52. *Филиппов В. А.* Увеличение производительности сушильных установок углеобогатительных фабрик. — В кн.: Обогащение и брикетирование угля, 1969, № 4, с. 9—11.
53. *Фролов Г. П.* Износоустойчивая камнелитая облицовка циклонов и сепараторов. — Цемент, 1978, № 3, с. 10—11.
54. *Чижский А. Ф.* Сушка керамических материалов и изделий. М., Стройиздат, 1971.
55. *Чуприна Л. М., Филоненко Г. М.* Авторское свидетельство № 185410. Бюл. Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки. М., 1966, № 17.
56. *Членов В. А., Михайлов Н. В.* Сушка сыпучих материалов в виброкипящем слое. М., Стройиздат, 1967.
57. *Шейман В. А.* Экспериментальное исследование процесса сушки калийных солей во взвешенном состоянии. — ИФЖ, 1963, № 5, с. 300—303.
58. *Шемаханов М. М.* Сушильные установки углеобогатительных фабрик. М.—Л., Углетехиздат, 1955.
59. *Яшин А. В., Кочуров О. И., Соколов В. И.* Опыт освоения установки для сушки ильменитового концентрата в кипящем слое. — Цветные металлы, 1976, № 4, с. 10—14.

Перевод размерностей основных величин в систему СИ

Наименование величины	Единица измерения в системах		Переводные коэффициенты в единицы СИ
	МКГСС	СИ	
Сила	кгс	Н	1 кгс=9,81 Н
Давление	кгс/м ²	Н/м ²	1 кгс/м ² =1 мм вод. ст.= =9,81 Н/м ²
Коэффициент динамической вязкости	кгс·с/см ²	Па	1 ат=98,1·10 ³ Н/м ²
	кгс/(с·м ²)	Н·с/м ²	1 ат=0,098 МПа 1 кгс·с/м ² =9,81 Н·с/м ²
Работа, энергия, количество теплоты	кгс·м	Дж	1 кгс·м=9,81 Дж 1 ккал=4,1868·10 ³ Дж= =4,1868 кДж=4,19 кДж
Теплосодержание	ккал/кг	Дж/кг	1 ккал/кг=4,19·10 ³ Дж/кг
Теплоемкость	ккал/кг·С	Дж/кг·°С	1 ккал/кг·°С= =4,19·10 ³ Дж/(кг·°С)
Мощность	кгс·м/с	Вт	1 кгс·м/с=9,81 Вт
	ккал/ч		1 ккал/ч=1,16 Вт 1 ккал/(м·ч·°С)= =1,163 Вт/(м·°С)
Коэффициент теплопроводности	ккал/(м ² ·ч·°С)	Вт/м·°С	
Коэффициент теплопередачи, теплоотдачи	ккал/(м ² ·ч·°С)	Вт/(м ² ·°С)	1 ккал/(м ² ·ч·°С)= =1,163 Вт/(м ² ·°С)

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

РАСЧЕТ БАРАБАННОЙ ГАЗОВОЙ СУШИЛКИ
ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Производительность сушилки по сырому материалу G_1 , т/ч	195
Влажность материала, %:	
начальная W_1	18
конечная W_2	6
Максимальная влагоемкость угля $W_{\text{макс}}$, %	3
Ситовый состав материала, %:	
+13 мм	10
13—16 мм	15,5
6—3 »	17,5
3—1 »	21
1—0,5 »	8
0,5—0,25 мм	12,5
0,25—0,1 »	8,5
0,1—0 »	7
Температура газов, °С:	
на входе в сушилку t_1	800
на выходе из сушилки t_2	100
Температура материала, °С:	
начальная ϑ_1	10
конечная ϑ_2	85
Температура пыли $v_{\text{п}}$, °С	90
Насыпная плотность материала $\rho_{\text{н}}$, кг/м ³	760
Температура окружающего воздуха $t_{\text{воз}}$, °С	15

Плотность материала ρ_k , кг/м ³	1400
Влагосодержание окружающего воздуха d_0 , г/кг	8
Топливо:	
температура ϑ_T , °С	15
химический состав, %:	
W ^p	10,46
A ^p	9,84
C ^p	70,54
S ^p	0,39
H ^p	3,41
O ^p	3,51
N ^p	1,85
V ^r	21,0

$$Q_{p_v} = 27865,55 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_{p_H} = 26831,87 \text{ кДж/кг};$$

$$C^{зол} = 0,708 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°С)};$$

$$C_{г_T} = 1,06 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°С)}.$$

МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС

1. Количество испаренной влаги

$$W = G_1 \frac{W_1 - W_D}{100 - W_2} = (-) 195 \frac{(18 - 6)}{100 - 6} = 24,76 \text{ т/ч}.$$

2. Количество сухого угля

$$G_2 = G_1 - W = 195 - 24,76 = 170,24 \text{ т/ч}.$$

ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС СУШИЛКИ

1. Теоретическое количество абсолютно сухого воздуха, необходимого для сжигания 1 кг топлива:

$$L_0 = 0,115 C^p + 0,345 H^p - 0,043 (O^p - S^p) = 0,115 \cdot 70,54 + 0,345 \cdot 3,41 - 0,043 (3,51 - 0,39) = 9,18 \text{ кг};$$

$$V_0 = 0,089 (C^p + 0,375 S^p) + 0,265 H^p - 0,033 \cdot O^p = 6,42 \text{ м}^3.$$

2. Теплоемкость топлива

$$C_T = C_{г_T} \frac{100 - W^p - A^p}{100} + C^{зол} \frac{A^p}{100} + \frac{W^p}{100} = 1,06 \frac{100 - 10,46 - 9,84}{100} + 0,708 \frac{9,84}{100} + \frac{10,46}{100} = 1,02 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°С)}.$$

3. Теплосодержание пара, находящегося в газах

$$i_{II} = 2490 + 1,97 t_1 = 2490 + 1,97 \cdot 800 = 4066 \text{ кДж/кг}.$$

4. Коэффициент избытка воздуха в газах на входе в сушилку

$$\alpha_b = \frac{Q_{p_v} \gamma_{топки} + C_{г_T} t_T - \left(1 - \frac{9H^p + W^p + A^p}{100} \right) C_{с.г} t_1 - \frac{9H^p + W^p}{100} i_{II}}{L_0 \left(C_{с.г} t_1 + \frac{i_{II} d_0}{1000} - I_0 \right)}$$

$$= \frac{27865,55 \cdot 0,95 + 1,02 \cdot 15 - \left(1 - \frac{9,3,41 + 10,46 + 9,84}{100}\right) 1,12 \cdot 800 - 9,18 \left(1,12 \cdot 800 + \frac{4066 \cdot 8}{1000} - 18,75\right) - \frac{9,3,41 + 10,46}{100} 4066}{\rightarrow} = 2,9.$$

5. Количество сухих газов, получаемых при сжигании 1 кг топлива

$$G_{с.г} = 1 + \alpha_n \cdot L_0 - \frac{9H^p + W^p + A^p}{100} = 1 + 2,9 \cdot 9,18 - \frac{9 \cdot 3,41 + 10,46 + 9,84}{100} = 27,11 \text{ кг.}$$

6. Влагодержание газов на входе в сушилку при полном сгорании топлива

$$d_1 = \frac{\alpha_n \cdot L_0 \cdot d_0 + (9H^p + W^p) 10}{G_{с.г}} = \frac{2,9 \cdot 9,18 \cdot 8 + (9 \cdot 3,41 + 10,46) 10}{27,11} = 23,04 \text{ г/кг.}$$

7. Расход тепла на испарение из материала 1 кг влаги

$$q_0 = 2490 + 1,97(t_2 - v_1) = 2490 + 1,97(100 - 10) = 2667,3 \text{ кДж/кг}$$

8. Расход тепла на нагрев материала:

$$q_M = \frac{G_2}{W} C_M (\vartheta_2 - \vartheta_1) = \frac{170,2}{24,76} 1,1 (85 - 10) = 567 \text{ кДж/кг;}$$

$$C_M = C_T^c \frac{100 - W_2}{100} + \frac{W_2}{100} = 1,1 \frac{100 - 6}{100} + \frac{6}{100} = 1,1 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C);}$$

C_T^c — теплоемкость абсолютно сухой массы материала, равная 1,1 кДж/(кг·°C)

9. Потери тепла в окружающую среду

$$q_5 = 0,05(q_0 + q_M) = 0,05(2667,3 + 567) = 161,7 \text{ кДж/кг.}$$

10. Расход сухих газов на 1 кг испаренной влаги:

$$l = \frac{q_0 + q_M + q_5}{C'_{вл.г} t_1 - C''_{вл.г} t_2} = \frac{2667,3 + 567 + 161,7}{1,17 \cdot 800 - 1,05 \cdot 100} = 4,08 \text{ кг;}$$

$$C'_{вл.г} = C'_{с.г} + \frac{d_1}{1000} C'_{в.п} = 1,12 + \frac{23,04}{1000} 2,08 = 1,17 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C);}$$

$$C''_{вл.г} = C''_{с.г} + \frac{d_1}{1000} C''_{в.п} = 1,01 + \frac{23,04}{1000} 1,87 = 1,05 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C).}$$

11. Потери тепла с отработанными газами:

$$q_2 = l \cdot (C''_{вл.г} t_2 - t_{вл.в}) = 4,08(1,05 \cdot 100 - 1,025 \cdot 15) = 365,6 \text{ кДж/кг;}$$

$$C_{вл.в} = C''_{с.г} + \frac{d_0}{1000} C_{в.п} = 1,01 + \frac{8}{1000} 1,91 = 1,03 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C).}$$

12. Суммарный расход тепла на 1 кг испаренной влаги

$$\Sigma q = q_0 + q_M + q_2 + q_5 = 2667,3 + 567 + 365,6 + 161,7 = 3761,6 \text{ кДж.}$$

13. Часовой расход топлива, сжигаемого в топке сушилки,

$$B = \frac{\Sigma q W}{\eta_T Q_{н}} = \frac{3761,6 \cdot 24760}{0,95 \cdot 26831,87} = 3654 \text{ кг.}$$

14. Проверочный расчет расхода топлива:

$$B_1 = \frac{l \cdot W}{G_{с.г}} = \frac{4,08 \cdot 24760}{27,11} = 3726 \text{ кг/ч.}$$

15. Влажосодержание газов на выходе из сушилки

$$d_2 = d_1 + \frac{1000}{l} = 23,04 + \frac{1001}{4,08} = 268,13 \text{ г/кг.}$$

16. Объем смеси сухих газов и водяного пара, отнесенный к 1 кг сухих газов на выходе из сушилки,

$$v_{02} = 4,64 \cdot 10^{-6} (622 + d_2) (273 + t_2) = 4,64 \cdot 10^{-6} (622 + 268,13) (273 + 100) = 1,54 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

17. Объем отработанных газов

$$V_{г2} = (1 + \alpha_{пр}) \cdot W \cdot v_{02} \cdot l = (1 + 0,3) \cdot 24760 \cdot 1,54 \cdot 4,08 = 202 \text{ 141 м}^3/\text{ч.}$$

18. Среднее влажосодержание газов в сушилке

$$d_{ср} = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{23,04 + 268,13}{2} = 145,6 \text{ г/кг.}$$

19. Средняя разность температур газов и материала

$$\Delta t_{ср} = \frac{(t_1 - \vartheta_1) - (t_2 - \vartheta_2)}{2,31 \text{ г} \frac{t_1 - \vartheta_1}{t_2 - \vartheta_2}} = \frac{(800 - 10) - (100 - 85)}{2,31 \text{ г} \frac{800 - 10}{100 - 85}} = 196^\circ\text{C.}$$

20. Средняя температура газов в сушилке

$$t_{ср} = \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2} + \Delta t_{ср} = \frac{10 + 85}{2} + 196 = 243,5^\circ\text{C.}$$

21. Средний объем смеси, приходящейся на 1 кг сухих газов,

$$v_{0ср} = 4,64 \cdot 10^{-6} (622 + d_{ср}) (273 + t_{ср}) = 4,64 \cdot 10^{-6} (622 + 145,6) (273 + 243,5) = 1,84 \text{ м}^3.$$

22. Средняя плотность газов

$$\rho_{гср} = \frac{1 + 0,001 d_{ср}}{v_{0ср}} = \frac{1 + 0,001 \cdot 145,6}{1,84} = 0,62 \text{ кг/м}^3.$$

23. Средний объем газов, проходящих через сушилку,

$$V_{г.ср} = W v_{0ср} l \left(1 + \frac{\alpha_{пр}}{2} \right) = 24760 \cdot 1,84 \cdot 4,08 \left(1 + \frac{0,3}{2} \right) = 213431 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

24. Количество сухих газов, проходящих через сушилку в течение часа,

$$L_{с.г} = \frac{V_{с.г}}{v_{0ср}} = \frac{213431}{1,84} = 115995 \text{ кг.}$$

25. Удельный расход тепла на 1 кг влаги с учетом к. п. д. топки

$$q = \frac{\Sigma q}{\eta_T} = \frac{3761,6}{0,95} = 3960 \text{ кДж.}$$

Определение размеров барабанной сушилки

1. Средний диаметр частиц

$$d_{ср}^{мас} = \frac{d_1 q_1 + d_2 q_2 + \dots + d_n q_n}{q_1 + q_2 + \dots + q_n}$$

$$= \frac{18,05 \cdot 10 + 8,83 \cdot 15,5 + 4,25 \cdot 17,5 + 1,73 \cdot 21 + 0,705 \cdot 8}{72} = 6,02 \text{ мм};$$

$$d_{\text{сд}}^{\text{макс}} = \frac{(0,354)^3 \cdot 12,5 + (0,158)^3 \cdot 8,5 + (0,0705)^3 \cdot 7}{(0,354)^2 \cdot 12,5 + (0,158)^2 \cdot 8,5 + (0,0705)^2 \cdot 7} = 0,35 \text{ мм};$$

$$d_{\text{м.ср}} = \frac{6,02 \cdot 72 + 0,35 \cdot 28}{100} = 4,43 \text{ мм};$$

$$d_{\text{экв}} = d_{\text{м.ср}} \cdot 0,8 = 4,43 \cdot 0,8 = 3,54 \text{ мм}.$$

2. Диаметр сушильного барабана

$$D_{\text{вн}} = \sqrt{\frac{V_{\text{г}2}}{0,785 v_{\text{г}2} \cdot 3600}} = \sqrt{\frac{202141}{0,785 \cdot 7 \cdot 3600}} = 3,2 \text{ м},$$

Принимаем $D_{\text{вн}} = 3,46 \text{ м}$

3. Скорость газов на выходе из барабана

$$v_{\text{г}2} = 0,5 \left[v_{\text{внт.2}}^{0,25} \left(\frac{\mu_{\text{р.ср}}}{B_{\text{к}}} \right) \right]^{0,25} \left(\frac{W_2}{W_{\text{max}}} \right)^{1,5} =$$

$$= 0,5 \left[14,75^{0,25} \left(\frac{1,02}{0,0033} \right) \right]^{0,25} \left(\frac{6}{3} \right)^{1,5} = 7 \text{ м/с};$$

$$v_{\text{внт.2}} = 5,22 \sqrt{\frac{d_{\text{м.ср}} \cdot \rho_{\text{к}2}}{\rho_{\text{г}2}}} = 5,22 \sqrt{\frac{4,43 \cdot 1484}{0,823 \cdot 10^3}} = 14,75 \text{ м/с};$$

$$\rho_{\text{к}2} \rho_{\text{к}} \frac{100}{100 - W_2} = 1400 \frac{100}{100 - 6} = 1484 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{\text{г}2} = \frac{1 + 0,001 \cdot d_2}{v_{02}} = \frac{1 + 0,001 \cdot 268,13}{1,54} = 0,823 \text{ кг/м}^3;$$

$$\mu_{\text{р.ср}} = \frac{G_2}{V_{\text{г}2} \rho_{\text{г}2}} = \frac{170 \ 200}{202 \ 141 \cdot 0,823} = 1,020 \text{ кг/кг}.$$

4. Средний объем газов, проходящих через сушилку

$$V_{\text{г.ср}} = (1 + \alpha_{\text{пр}}) l \cdot W \cdot v_{0,\text{ср}} = (1 + 0,3) 1,84 \cdot 24760 \cdot 4,08 = 241642 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

5. Средняя скорость газов в барабане

$$v_{\text{г.ср}} = \frac{V_{\text{г.ср}}}{(1 - \varphi) \cdot 0,785 \cdot D_{\text{вн}}^2 \cdot 3600} = \frac{241 \ 642}{(1 - 0,25) \cdot 0,785 \cdot 3,46^2 \cdot 3600} = 9,52 \text{ м/с}.$$

6. Высота падения частиц с лопаток

$$h_{\text{ср}} = \left(\frac{h_{\text{ср}}}{D_{\text{вн}}}_{\text{лоп}} \right) \cdot D_{\text{вн}} \cdot \frac{l_{\text{лоп}}}{L_5} + \left(\frac{h_{\text{сек}}}{D_{\text{вн}}}_{\text{сек}} \right) \cdot D_{\text{вн}} \cdot \frac{l_{\text{сек}}}{L_6} = 0,576 \cdot 3,46 \cdot 0,3 +$$

$$+ 0,17 \cdot 3,46 \cdot 0,7 = 1,01 \text{ м}$$

7. Скорость падения частиц с лопаток

$$v_{\text{пад}} = 2,22 \sqrt{h_{\text{ср}}} = 2,22 \sqrt{1,01} = 2,23 \text{ м/с}.$$

8. Скорость газа относительно частиц

$$v_{\text{г.отн}} = \sqrt{v_{\text{г.ср}}^2 + (v_{\text{пад}})^2} = \sqrt{(9,52)^2 + (2,23)^2} = 9,8 \text{ м/с}.$$

9. Средний диаметр частиц, усредненный по поверхности,

$$d_{\text{м.ср}}^{\text{пов}} = \frac{100}{\frac{q_1}{d_1} + \frac{q_2}{d_2} + \dots + \frac{q_n}{d_n}} =$$

$$= \frac{100}{\frac{10}{13} + \frac{15,5}{6} + \frac{17,5}{3} + \frac{21}{1} + \frac{8}{0,5} + \frac{12,5}{0,25} + \frac{8,5}{0,1} + \frac{7}{0,05}} = \frac{100}{321} = 0,31 \text{ мм.}$$

10. Коэффициент теплоотдачи от газов к поверхности падающих частиц в условиях сушки во взвешенном состоянии

$$\alpha_F = 0,62 \frac{\lambda}{\nu^{0,5}} \left(\frac{v_{\text{г.отн}}}{d_{\text{м.ср}}^{\text{пов}}} \right)^{0,5} = 0,62 \frac{3,63 \cdot 10^{-2}}{(40,71 \cdot 10^{-6})^{0,5}} \left(\frac{9,8}{0,31 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,5} =$$

$$= 728 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С} \cdot \text{ч}).$$

11. Параметр, характеризующий передачу тепла частицами материала во время их падения с лопаток,

$$B_{\text{лоп}} = \left(\frac{F_{\text{м.л}}}{D_{\text{вн}}^2} \right)_{\text{лоп}} z_{\text{лоп}} \sqrt{\left(\frac{h_{\text{ср}}}{D_{\text{вн}}} \right)_{\text{лоп}}} = 0,00893 \cdot 24 \sqrt{0,576} = 0,162.$$

$$B_{\text{сек}} = \left(\frac{F_{\text{м.л}}}{D_{\text{вн}}^2} \right)_{\text{сек}} z_{\text{сек}} \sqrt{\left(\frac{h_{\text{ср}}}{D_{\text{вн}}} \right)_{\text{сек}}} = 0,005 \cdot 18 \sqrt{0,17} = 0,037;$$

$$12. B_{\text{п}} = B_{\text{лоп}} \cdot \frac{l_{\text{лоп}}}{L_6} + B_{\text{сек}} \cdot \frac{l_{\text{сек}}}{L_6} = 0,162 \cdot 0,3 + 0,037 \cdot 0,7 = 0,074.$$

13. Поверхность частиц, падающих с лопаток, отнесенная к 1 м³ сушилок

$$F'_{\text{м}} = 57,5 \frac{\rho_{\text{н}} \cdot D_{\text{вн}}^{0,5} \cdot n \cdot B_{\text{п}}}{\rho_{\text{к.ср}} d_{\text{м.ср}}^{\text{пов}}} K_{\text{сл}} = 57,5 \frac{850}{1800} \cdot \frac{3,46^{0,5} \cdot 4,8 \cdot 0,074}{0,31} \cdot 0,64 = 36,8 \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

14. Среднее время падения частиц

$$\tau_{\text{п}} = \sqrt{\frac{2h_{\text{ср}}}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,01}{9,81}} = 0,45 \text{ с} = 0,125 \cdot 10^3 \text{ ч.}$$

15. Поверхность частиц, одновременно находящихся в одной струе, отнесенная к одному метру длины сушилки,

$$F_{\text{общ}} = \tau_{\text{п}} \frac{6000}{d_{\text{м.ср}}^{\text{пов}}} \cdot \frac{\rho_{\text{н}}}{\rho_{\text{к.ср}}} F_{\text{м.л}} \Pi \frac{3600}{\psi} 60 = 0,125 \cdot 10^{-3} \frac{6000}{0,31} \times$$

$$\times \frac{760}{1590} \cdot 0,074 \cdot 4,8 \cdot \frac{360}{120} \cdot 60 = 72,5 \text{ м}^2,$$

$$F_{\text{м.л}} = \left(\frac{F_{\text{м.л}}}{D_{\text{вн}}^2} \right)_{\text{лоп}} \cdot D_{\text{вн}}^2 \cdot \frac{l_{\text{лоп}}}{L_6} + \left(\frac{F_{\text{м.л}}}{D_{\text{вн}}^2} \right)_{\text{сек}} \cdot D_{\text{вн}}^2 \cdot \frac{l_{\text{сек}}}{L_6} = 0,00893 \cdot 3,46^2 \cdot 0,3 +$$

$$+ 0,005 \cdot 3,46^2 \cdot 0,7 = 0,074.$$

16. Средняя плотность газов и материала в сушилке:

$$\rho_{г.ср} = \frac{1 + \frac{d_{ср}}{1000}}{v_{о.ср}} = \frac{1 + \frac{145,6}{1000}}{1,84} = 0,62 \text{ кг/м}^3,$$

$$\rho_{к.ср} = \rho_k \frac{100}{100 - W_{ср}} = 1400 \frac{100}{100 - 12} = 1590 \text{ кг/м}^3.$$

17. Высота скатывания частиц с лопастей

$$h_{ск} = \frac{\Sigma S_H}{D_{вн}} \frac{D_{вн} \sin \psi}{Z_1 \cdot \frac{l_{лоп}}{L_6} Z_2 \cdot \frac{l_{сек}}{L_6}} = \frac{2,47 \cdot 3,46 \cdot 0,707}{24,0 \cdot 0,3 + 18,0 \cdot 7} = 0,3 \text{ м},$$

$$\frac{\Sigma S_H}{D_{вн}} = \left(\frac{\Sigma S_H}{D_{вн}} \right)_{лоп} \cdot \frac{l_{лоп}}{L_6} + \left(\frac{\Sigma S_H}{D_{вн}} \right)_{сек} \cdot \frac{l_{сек}}{L_6} = 1,675 \cdot 0,3 + 2,82 \cdot 0,7 = 2,47 \text{ м}$$

18. Скорость скатывания частиц с лопаток

$$v_{ск} = 4,43 \sqrt{\left(1 - \frac{\varepsilon}{\operatorname{tg} \psi}\right) h_{ск}} = 4,43 \sqrt{\left(1 - \frac{0,25}{0,707}\right) 0,3} = 1,95 \text{ м/с.}$$

19. Начальная ширина струи

$$b_{стр} = \frac{F_{л}^M}{60 \psi v_{ск}} = \frac{0,074}{\frac{60}{4,8 \cdot 360} \cdot 1,95} = 0,009 \text{ м.}$$

20. Объем струи, отнесенный к 1 м длины сушилки,

$$V_{стр} = h_{ср} \{b_{стр} + h_{ср} \operatorname{tg} [3,75 + 0,316 (\rho_{г.ср} v_{г.ср})^2]\} = \\ = 1,01 \{0,009 + 1,01 \operatorname{tg} [3,75 + 0,316 (0,62 \cdot 9,52)^2]\} = 0,27 \text{ м}^3.$$

21. Коэффициент, учитывающий особенности передачи тепла при падении частиц с лопаток,

$$(1 - a) = \left(\frac{F_{обш}}{V_{стр}} \right)^{-0,8} \cdot \frac{2,24}{h_{ср}} = \left(\frac{72,5}{0,27} \right)^{-0,8} \frac{2,22}{1,01} = 0,0244.$$

22. Первая составляющая объемного коэффициента теплообмена

$$a'_v = (1 - a) a'_F F'_m = 0,0244 \cdot 728 \cdot 36,8 = 654 \text{ кДж/(м}^2 \cdot \text{°С} \cdot \text{ч)}.$$

23. Средняя длина скатывания части материала с лопастей

$$l_{ск} = \frac{2 \Sigma S_H}{Z_1 \frac{l_{лоп}}{L_6} + Z_2 \frac{l_{сек}}{L_6}} = \frac{2 \cdot 8,57}{24 \cdot 0,3 + 18 \cdot 0,7} = 0,86,$$

$$\Sigma S_H = \left(\frac{\Sigma S_H}{D_{вн}} \right)_{лоп} \cdot D_{вн} \cdot \frac{l_{лоп}}{L_6} + \left(\frac{\Sigma S_H}{D_{вн}} \right)_{сек} \cdot D_{вн} \cdot \frac{l_{сек}}{L_6} = 1,675 \cdot 3,46 \cdot 0,3 + \\ + 2,82 \cdot 3,46 \cdot 0,7 = 8,57 \text{ м.}$$

24. Число Рейнольдса

$$Re = \frac{v_{г.ср} l_{ск}}{\nu} = \frac{9,52 \cdot 0,86}{40,7 \cdot 10^{-6}} = 201160.$$

25. Коэффициент теплопередачи к наружному слою материала, находящегося на лопатках и в завале,

$$a''_F = \frac{0,347 Re^{0,66} \lambda}{l_{ск}} = \frac{1,163 \cdot 0,347 \cdot 201160^{0,66} \cdot 3,63 \cdot 10^{-2}}{0,86} = 53,97 \text{ кДж/(м}^2 \cdot \text{°С} \cdot \text{ч)}.$$

26. Наружная поверхность материала, находящегося в лопатках и в за-
вале.

$$F''_м = 1,27 \frac{\Sigma S_{\text{н}}}{D_{\text{вн}}^2} = \frac{1,27 \cdot 8,57}{3,46^2} = 0,91 \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

27. Вторая составляющая объемного коэффициента теплопередачи

$$\alpha''_v = \alpha''_F F''_м = 53,97 \cdot 0,91 = 49,1 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{ч}).$$

28. Поверхность деталей внутреннего устройства, незакрытая материалом,

$$F_{\text{гол}} = 1,27 \frac{\Sigma S_{\text{гол}}}{D_{\text{вн}}^2} = 1,27 \frac{25}{3,46^2} = 2,65 \text{ м}^2/\text{м}^3;$$

$$\Sigma S_{\text{гол}} = \left(\frac{\Sigma S_{\text{гол}}}{D_{\text{вн}}} \right)_{\text{лоп}} \cdot D_{\text{вн}} \cdot \frac{l_{\text{лоп}}}{L_5} + \left(\frac{\Sigma S_{\text{гол}}}{D_{\text{вн}}} \right)_{\text{сек}} \cdot D_{\text{вн}} \cdot \frac{l_{\text{сек}}}{L_6} = 5,3 \cdot 3,46 \cdot 0,3 + \\ + 8,15 \cdot 3,46 \cdot 0,7 = 25$$

29. Коэффициент теплопередачи от газов к оголенной поверхности деталей
внутреннего устройства

$$\alpha_{\text{л.г}} = 4,4 + 3(\rho_{\text{г.ср}} \cdot v_{\text{г.ср}}) = 4,4 + 3(0,62 \cdot 9,52) = \\ = 25,7 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{ч}).$$

30. Средняя температура поверхностей, не закрытых материалом,

$$t_{\text{ср}}^{\text{гол}} = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} + 10 = \frac{10 + 85}{2} + 10 = 57,5 \text{°C}.$$

31. Третья составляющая объемного коэффициента теплоотдачи

$$\alpha'''_v = \frac{F_{\text{гол}} \cdot \alpha_{\text{л.г}} (t_{\text{ср}}^{\text{гол}} - t_{\text{ср}}^{\text{гол}})}{\Delta t_{\text{ср}}} = \frac{2,65 \cdot 25,7 (243,5 - 57,5)}{196} = 64,6 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{ч}).$$

32. Полный объемный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_v = \alpha'_v + \alpha''_v + \alpha'''_v = 654 + 53,97 + 64,6 = 772,57 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{ч}).$$

33. Объем барабанной сушилки

$$V_6 = \frac{(q_0 + q_m) W}{\alpha_v \Delta t_{\text{ср}}} = \frac{(2667,3 + 567) \cdot 24760}{772,57 \cdot 196} = 147 \text{ м}^3.$$

34. Конструктивный объем барабанной сушилки

$$V^{\text{кб}} = 1,15 V_6 = 1,15 \cdot 147 = 169,1 \text{ м}^3.$$

35. Длина корпуса барабанной сушилки

$$L_6 = \frac{V^{\text{кб}}}{0,785 D_6^2} = \frac{169,1}{0,785 \cdot 3,5^2} = 17,6 \text{ м}.$$

Принимаем $L_6 = 18 \text{ м}$

36. Окончательные размеры сушилки принимаем следующие:

$$D_6 = 3,5 \text{ м}; D_{\text{вн}} = 3,46 \text{ м}; L_6 = 18 \text{ м}.$$

ПРОВЕРКА ЗАПОЛНЕНИЯ СУШИЛКИ МАТЕРИАЛОМ

37. Время пребывания материала в сушилке

$$\tau_{\text{лоп}} = \frac{L_6 \left(\frac{l_{\text{нас}}}{L_6} \right)}{n^{0,65} D_{\text{вн}} \left[\text{atg } \omega + \frac{b \rho_{\text{г.ср}}}{\alpha_{\text{м.ср}}^{\text{нас}} \rho_{\text{к.ср}}} (v_{\text{г.ср}})^{1,8} \right]} =$$

$$= \frac{18,0,3}{4,8^{0,65} \cdot 3,46 \left[\left(3,8 \cdot 0,0524 + \frac{0,194 \cdot 0,62}{4,43 \cdot 10^{-3} \cdot 1590} (9,52)^{1,6} \right) \right]} = 2,19 \text{ мин};$$

$$\tau_{\text{сек}} = \frac{18,0,7}{4,8^{0,7} \cdot 3,46 \left[\left(1,95 \cdot 0,0524 + \frac{0,0336 \cdot 0,62}{4,43 \cdot 10^{-3} \cdot 1600} (9,52)^{1,7} \right) \right]} = 17,47 \text{ мин};$$

$$\tau_{\text{ср}} = \tau_{\text{лоп}} + \tau_{\text{сек}} = 2,19 + 17,47 = 19,66 \text{ мин};$$

38. Заполнение сушилки

$$q_{\text{зап}} = 0,5 \frac{\tau_{\text{ср}}}{60} \left(\frac{G_1 + G_2}{2} \right) = 0,5 \frac{19,66}{60} 182600 = 30 \text{ т.}$$

39. Заполнение сушилки

$$\varphi = \frac{q_{\text{зап}} \cdot 100}{\rho_n V K_6} = \frac{30000 \cdot 100}{760 \cdot 169,1} = 23,3\%.$$

40. Сопротивление сушильного барабана

$$\Delta H_c = \xi_n \frac{\rho_{г.ср} v_{г.ср}}{2} l_6 = 1,45 \frac{0,62 \cdot 9,52^2}{2} 18 = 747 \text{ Н/м}^2;$$

$$\xi_n = \xi_{\text{сек}} (1 + \mu_p) \left(\frac{l_{\text{сек}}}{L_6} \right) + \xi_{\text{лоп}} (1 + \mu_p) \left(\frac{l_{\text{лоп}}}{L_6} \right) = 0,53_{\text{сек}} (1 + 1,02) 0,7 + \\ + 0,4_{\text{лоп}} (1 + 1,02) \cdot 0,3 = 0,99$$

41. Напряжение объема барабанной сушилки по испаренной влаге

$$A_6 = 0,8 \frac{\rho_{г.ср} v_{г.ср}}{\sqrt{d_{м.ср}}} n B_n^{0,5} \sqrt{\frac{tg \omega}{tg \psi}} \cdot \left(\frac{W_2}{W_{\text{max}}} \right)^{0,66} = \\ = 3,03 \frac{0,62 \cdot 9,52}{\sqrt{4,43 \cdot 10^{-3}}} 4,8 \cdot 0,105^{0,5} \sqrt{0,233 \frac{0,0524}{1}} \cdot 1 = 146,5 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{ч}$$

РАСЧЕТ ПНЕВМОСОПЛОВОЙ СУШИЛКИ И СУШИЛКИ ВЗВЕШЕННОГО СЛОЯ

МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС СУШИЛКИ

1. Количество материала, поступающего на сушку:

Продукт	Выход, % к смеси	Выход, % к классу	Выход, т/ч	Влажность W, %
Концентрат класса 0,5—13 мм	32,6	50,7	163	8
Флотоконцентрат класса 0—0,5 мм	31,7	49,3	158,5	25
Всего	64,3	100	321,5	17,2

2. Количество материала, поступающего на сушку, с учетом коэффициента неравномерности $K=1,15$:

$$321,5 \times 1,15 = 369,7 \text{ т/ч.}$$

3. Содержание влаги в исходном материале

$$G_{w1} = 369,7 \times \frac{17,2}{100 - 17,2} = 76,8 \text{ т/ч.}$$

4. Содержание влаги в сухом материале

$$G_{w2} = 369,7 \times \frac{6}{100 - 6} = 23,6 \text{ т/ч.}$$

5. Количество испаренной влаги

$$G_{w1} - G_{w2} = 76,8 - 23,6 = 53,2 \text{ т/ч}$$

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

1. Гранулометрический состав материала, поступающего на сушку:

Класс, мм	Выход, %
+13	9,6
6—13	23,0
3—6	28,2
1—3	39,2
<hr/>	
Итого	100,0
0,5—1,0	14,9
0—0,5	85,1
<hr/>	
Итого	100,0
<hr/>	
Всего	100,0

Результаты сушки приведены в таблице

Наименование параметра	Сушилка	
	пневмосопловая	взвешенного слоя
Температура газов, °С:		
перед сушкой t_1	900	500
конечная t_2	100	100
Температура материала, °С:		
перед сушкой θ_1	10	10
после сушки θ_2	70	70
Влажность материала, %:		
перед сушкой W_1	17,2	17,2
после сушки W_2	6	6
максимальная гигроскопическая $W_{\text{гиг}}^{\text{max}}$	4	4
Температура, °С:		
окружающего воздуха t_0	20	20
топлива t_T	10	10

РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

1. В качестве топлива принята угольная пыль из второй ступени сухой очистки газов: зольность $A^c = 8,2\%$, влажность $W^p = 3\%$.

2. Элементарный состав топлива на горючую массу, %:
 $C^r = 88,9$; $S^r_{\text{общ}} = 0,4$; $O^r = 3$; $H^r = 5$; $N^r = 2,7$.

3. Рабочий состав топлива, %:

$$A^p = A^c \frac{(100 - W^p)}{100} = 8,2 \frac{(100 - 3)}{100} = 8;$$

$$C^p = C^r \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} = 88,9 \frac{100 - (8,0 + 3)}{100} = 79,1;$$

$$H^p = H^r \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} = 5 \frac{100 - (8 + 3)}{100} = 4,45;$$

$$O^p = O^r \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} = 3 \frac{100 - (8 + 3)}{100} = 2,7;$$

$$N^p = N^r \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} = 2,7 \frac{100 - (8 + 3)}{100} = 2,4;$$

$$S^p_{\text{общ}} = S^r_{\text{общ}} \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} = 0,4 \frac{100 - (8 + 3)}{100} = 0,35.$$

4. Теплота сгорания топлива:

высшая теплота сгорания топлива

$$Q^p_{\text{в}} = 339,13C^p + 1256H^p - 108,86(O^p - S^p) =$$

$$= 339,13 \cdot 79,1 + 1256 \cdot 4,45 - 108,86(2,7 - 0,35) = 32158; 56 \text{ кДж/кг};$$

низшая теплота сгорания топлива

$$Q^p_{\text{н}} = Q^p_{\text{в}} - 25,12(9H^p + W^p) = 32158,56 - 25,12(9 \cdot 4,45 + 3) =$$

$$= 31077,14 \text{ кДж/кг}.$$

5. Теоретическое количество сухого воздуха, необходимого для сжигания 1 кг топлива:

$$L_0 = 0,115C^p + 0,375 S^p_{\text{общ}} - 0,0431O^p + 0,342 H^p =$$

$$= 0,115 \cdot 79,1 + 0,375 \cdot 0,35 - 0,0431 \cdot 2,7 + 0,342 \cdot 4,45 = 10,5 \text{ кг};$$

$$V_0 = 0,0899C^p + 0,375 S^p_{\text{общ}} + 0,265H^p - 0,0333O^p =$$

$$= 0,0899 \cdot 79,1 + 0,375 \cdot 0,35 + 0,265 \cdot 4,45 - 0,0333 \cdot 2,7 = 8,3 \text{ м}^3.$$

6. Теплосодержание пара, находящегося в газах,

$$i_{\text{г}} = 2490 + 1,97t_1 = 2490 + 1,97 \cdot 900 = 4266 \text{ кДж/кг}.$$

7. Теплоемкость золы топлива

$$C^{\text{зол}} = 0,7 + 5 \cdot 10^{-4} t_{\text{г}} = 0,7 + 5 \cdot 10^{-4} \cdot 10 = 0,705 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}.$$

8. Теплоемкость горячей части топлива

$$C_{\text{г}} = 0,84 + 3,8 \cdot 10^{-5} (13 + \nu^r) (130 + t_{\text{г}}) =$$

$$= 0,84 + 3,8 \cdot 10^{-5} (13 + 25,5) (130 + 10) = 1,045 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}.$$

9. Теплоемкость топлива

$$C_{\text{т}} = C_{\text{г}} \frac{100 - W^p - A^p}{100} + C^{\text{зол}} \frac{A^p}{100} + \frac{W^p}{100} = 1,045 \frac{100 - 3 - 8}{100} +$$

$$+ 0,705 \frac{8}{100} = \frac{3}{100} = 1,01 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}.$$

10. Коэффициент избытка воздуха в газах при входе в сушку

$$\alpha_B = \frac{Q_{\text{в}}^{\text{п}} \eta_{\text{т}} + C_{\text{т}} t_{\text{т}} - \left(1 - \frac{9\text{HP} + \text{W}^{\text{п}} + \text{A}^{\text{п}}}{100}\right) C_{\text{с.г}} t_1 - \frac{9\text{HP} + \text{W}^{\text{п}}}{100} i_{\text{п}}}{L_0 \left(C_{\text{с.г}} t_1 + \frac{i_{\text{п}} d_0}{1000} - I_0\right)}$$

$$= \frac{32158,56 \cdot 0,95 + 1,01 \cdot 10 - \left(1 \cdot \frac{9 \cdot 4,45 + 3 + 8}{100}\right) 1,17 \cdot 900 -}{10,5 \left(1,17 \cdot 900 + \frac{4266 \cdot 8,91}{1000} - 42,7\right)} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{- \frac{9 \cdot 4,45 + 3}{100} 4266}{=} = 2,56.$$

d_0 — влагосодержание влажного воздуха; $d_0 = 8,91$ г/кг;

I_0 — теплосодержание влажного воздуха; $I_0 = 42,7$ кДж/кг.

11. Количество сухих газов, получаемых при сгорании 1 кг топлива,

$$G_{\text{с.г}} = 1 + \alpha_B L_0 - \frac{9\text{HP} + \text{W}^{\text{п}} + \text{A}^{\text{п}}}{100} = 1 + 2,56 \cdot 10,5 - \frac{9 \cdot 4,45 + 3 + 8}{100} = 27,37 \text{ кг.}$$

12. Начальное влагосодержание газов на входе в сушилку при полном сгорании топлива

$$d_1 = \frac{\alpha_B L_0 d_0 + (9\text{HP} + \text{W}^{\text{п}}) 10}{G_{\text{с.г}}} = \frac{2,56 \cdot 10,5 \cdot 8,91 + (9 \cdot 4,45 + 3) \cdot 10}{27,37} = 24,5 \text{ г/кг.}$$

РАСЧЕТ ЧАСОВОГО РАСХОДА ГАЗОВ И ТЕПЛА

1. Расход тепла на испарение из материала 1 кг влаги

$$q_0 = 2490 + 1,97(t_2 - \vartheta_1) = 2490 + 1,97(100 - 10) = 2670,3 \text{ кДж.}$$

2. Расход тепла на нагрев материала

$$q_M = \frac{G_2}{W} C_M (\vartheta_2 - \vartheta_1), \text{ кДж/кг,}$$

где G_2 — масса высушенного материала, т/ч; W — количество испаренной влаги, т/ч; C_M — теплоемкость подсушенного материала;

$$C_M = C_c \frac{100 - \omega_2}{100} + \frac{\omega_2}{100},$$

где C_c — теплоемкость абсолютно сухой массы материала, 1 кДж/(кг·°C); ϑ_1 — температура материала при входе в сушилку, °C; ϑ_0 — температура материала при выходе из сушилки, °C; $\omega_2 = 6\%$; $\vartheta_2 = 70^\circ\text{C}$; $\vartheta_1 = 10^\circ\text{C}$;

$$C_M = 1 \frac{100 - 6}{100} + \frac{6}{100} = 1,0 \text{ кДж/(кг·°C);}$$

$$q_M = \frac{393,3}{53,2} 1 (70 - 10) = 443,57 \text{ кДж/кг.}$$

3. Потери тепла в окружающую среду

$$q_5 = 0,05(q_0 + q_M) = 0,05(2670,3 + 443,57) = 155,7 \text{ кДж/кг.}$$

4. Масса водяных паров на 1 кг сжигаемого топлива

$$G_{\text{в.п}} = \frac{9\text{HP} + \text{W}^{\text{п}}}{100} + \frac{\alpha_B L_0 d_0}{1000} = \frac{9 \cdot 4,45 + 3}{100} + \frac{2,56 \cdot 10,5 \cdot 8,91}{1000} = 0,67 \text{ кг;}$$

5. Расход сухих газов на 1 кг испаренной влаги

$$l = \frac{q_0 + q_m + q_5}{C'_{\text{вл.г.}t_1} - C''_{\text{вл.г.}t_2}} = \frac{2670,3 + 443,57 + 155,7}{1,23 \cdot 900 - 1,056 \cdot 100} = 3,27 \text{ кг};$$

$$C'_{\text{вл.г.}} = C'_{\text{с.г.}} + \frac{d_1}{1000} C'_{\text{в.п.}} = 1,17 + \frac{24,5}{1000} \cdot 2,42 = 1,23;$$

$$C''_{\text{вл.г.}} = C''_{\text{с.г.}} + \frac{d_1}{2000} C''_{\text{в.п.}} = 1,01 + \frac{24,5}{1000} \cdot 1,89 = 1,056$$

6. Часовой расход сухих газов

$$L_1 = l \cdot W = 3,27 \cdot 53200 = 173964 \text{ кг/ч.}$$

7. Потери тепла с отработанными газами

$$\begin{aligned} q_2 &= l(C''_{\text{вл.г.}t_2} - C^0_{\text{вл.в.}t_0}) + l_{\text{пр}}(C''_{\text{с.в.}t_2} - C^0_{\text{вл.в.}t_0}) = \\ &= 3,27(1,056 \cdot 100 - 1,027 \cdot 20) + 0,818(1,01 \cdot 100 - 1,027 \cdot 20) = \\ &= 343,96 \text{ кДж/кг}; \end{aligned}$$

$$l_{\text{пр}} = 0,25 \cdot l = 0,25 \cdot 3,27 = 0,818;$$

$$C^0_{\text{вл.в.}} = C''_{\text{с.в.}} + \frac{d_0}{1000} C_{\text{в.л.}} = 1,01 + \frac{8,91}{1000} \cdot 1,91 = 1,027 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{C)}.$$

8. Суммарный расход топлива, сжигаемого в топке,

$$\Sigma q = q_0 + q_m + q_2 + q_5 = 2670,3 + 443,57 + 343,96 + 155,7 = 3613,5 \text{ кДж/кг.}$$

9. Часовой расход топлива, сжигаемого в топке,

$$B = \frac{\Sigma q W}{\eta_{\text{т}} Q_{\text{п.т}}} = \frac{3613,5 \cdot 53200}{0,95 \cdot 31077,14} = 6511 \text{ кг/ч.}$$

10. Проверочный расчет расхода топлива

$$B_1 = \frac{lW}{G_{\text{с.г.}}} = \frac{3,27 \cdot 53200}{27,37} = 6356 \text{ кг/ч.}$$

11. Влагосодержание газов при выходе из сушилки

$$d_2 = d_1 + \frac{1000}{l + l_{\text{пр}}} = 24,5 + \frac{1000}{3,27 + 0,818} = 269,12 \text{ г/кг.}$$

12. Расход тепла на 1 кг влаги с учетом к. п. д. топки ($\eta = 0,95$)

$$q = \frac{\Sigma q}{\eta_{\text{т}}} = \frac{3613,5}{0,95} = 3803,7 \text{ кДж}$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАБАРИТНЫХ РАЗМЕРОВ СУШИЛОК

Пневмосопловая сушилка

1. Удельный объем газов на начальном участке сушилки

$$\begin{aligned} v_{01} &= 4,64 \cdot 10^{-6} (622 + d_1) (273 + t_1) = 4,64 \cdot 10^{-6} (622 + 24,5) (273 + 900) = \\ &= 3,52 \text{ м}^3/\text{кг.} \end{aligned}$$

2. Объем газов на начальном участке сушилки

$$V_{\text{Г1}} = L_1 \cdot v_{01} = 173964 \cdot 3,52 = 612\,353 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

3. Скорость витания частиц на начальном участке сушилки

$$v_{\text{внт1}} = 5,22 \sqrt{\frac{\rho_{\text{к1}} a_{\text{м}}^{\text{max}}}{\rho_{\text{г1}}}} = 5,22 \sqrt{\frac{1691 \cdot 0,013}{0,284}} = 45,9 \text{ м/с,}$$

$$\rho_{\text{к1}} = \rho_{\text{к}} \frac{100}{100 - W_1} = 1400 \frac{100}{100 - 17,2} = 1691 \text{ кг/м}^3,$$

$$\rho_{\text{г1}} = \frac{1}{v_{\text{о1}}} = \frac{1}{3,52} = 0,284 \text{ кг/м}^3.$$

4. Скорость газа на начальном участке сушилки

$$v_{\text{г1}} = b^1 \cdot v_{\text{внт1}} = 3,0 \cdot 45,9 = 137,7 \text{ м/с,}$$

где $b^1=3$ — коэффициент запаса по скорости газового потока.

5. Диаметр трубы — сушилки

$$D_{\text{тр}} = \sqrt{\frac{V_{\text{г1}} \cdot 4}{\pi \cdot v_{\text{г1}} \cdot 3600}} = \sqrt{\frac{612353 \cdot 4}{3,14 \cdot 137,7 \cdot 3600}} = 1,25 \text{ м}$$

Принимаем $D_{\text{тр}}=1250$ мм.

6. Удельный объем газов на выходе из сушилки

$$v_{\text{о2}} = 4,64 \cdot 10^{-6} (622 + d_2) (273 + t_2) = 4,64 \cdot 10^{-6} (622 + 269,12) \times \\ \times (273 + 100) = 1,53 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

7. Объем газов на выходе из сушилки

$$V_{\text{г2}} = L_2 v_{\text{о2}} = 210805 \cdot 1,53 = 328856 \text{ м}^3/\text{ч,}$$

$$L_2 = L_1 (1 + \alpha_{\text{пр}}) = 173964 (1 + 0,25) = 217455 \text{ кг/ч.}$$

8. Скорость витания частиц на выходе из сушилки

$$v_{\text{внт2}} = 5,22 \sqrt{\frac{\rho_{\text{к2}} a_{\text{м}}^{\text{max}}}{\rho_{\text{г.ср}}}} = 5,22 \sqrt{\frac{1489 \cdot 0,013}{0,654}} = 28,4 \text{ м/с,}$$

$$\rho_{\text{к2}} = \rho_{\text{к}} \frac{100}{100 - W_2} = 1400 \frac{100}{100 - 6} = 1489 \text{ кг/м}^3.$$

$$\rho_{\text{г2}} = \frac{1}{v_{\text{о2}}} = \frac{1}{1,53} = 0,654 \text{ кг/м}^3.$$

9. Средний удельный объем газов, отнесенный к 1 кг сухих газов,

$$v_{\text{ср}} = 4,64 \cdot 10^{-6} (622 + d_{\text{ср}}) (273 + t_{\text{ср}}) = 4,64 \cdot 10^{-6} (622 + 146,8) \times \\ \times (273 + 500) = 2,75 \text{ м}^3/\text{кг;}$$

$$d_{\text{ср}} = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{24,5 + 269,12}{2} = 146,8 \text{ г/кг;}$$

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{900 + 100}{2} = 500^\circ\text{C.}$$

10. Средний объем газов в сушилке

$$V_{\text{г.ср}} = L_{\text{ср}} v_{\text{ср}} = 195710 \cdot 2,75 = 538203 \text{ м}^3/\text{ч;}$$

$$L_{\text{ср}} = \frac{L_1 + L_2}{2} = \frac{173964 + 217455}{2} = 195710 \text{ кг/ч.}$$

11. Средняя массовая концентрация материала

$$\mu_{p.c.p} = \frac{G_{m.c.p}}{G_{r.c.p}} = \frac{420 \cdot 10^3}{222310} = 1,88 \text{ кг/кг};$$

$$G_{m.c.p} = \frac{G_1 + G_2}{2} = \frac{446,5 + 393,3}{2} = 420 \cdot 10^3 \text{ кг/ч.}$$

12. Скорость газов на выходе из сушилки

$$v_{r2} = b'' v_{внт2} = 1,2 \cdot 28,4 = 34,1 \text{ м/с.}$$

13. Коэффициент запаса по скорости газового потока

$$b'' = \frac{v_{r2}}{v_{внт2}} = 1,2.$$

14. Диаметр сушилки на выходе

$$D_{тр} = \sqrt{\frac{V_r \cdot 4}{\pi v_{r2} \cdot 3600}} = \sqrt{\frac{328856 \cdot 4}{3,14 \cdot 34,1 \cdot 3600}} = 1,85 \text{ м.}$$

Принимаем $D_{тр2} = 1850 \text{ мм.}$

15. Средний диаметр сушилки

$$D_{тр.c.p} = \frac{D_{тр1} + D_{тр2}}{2} = \frac{1,25 + 1,85}{2} = 1,55 \text{ м.}$$

16. Средняя скорость газов в сушилке

$$v_{r.c.p} = \frac{V_{r.c.p}}{F_{тр} \cdot 3600} = \frac{538203}{1,89 \cdot 3600} = 79,1 \text{ м/с.}$$

17. Усредненный диаметр частиц материала данного гранулометрического состава

$$d_{m.c.p} = \frac{d'_{m.c.p} q_I + d''_{m.c.p} q_{II}}{q_I + q_{II}} = \frac{5,1 \cdot 186,7 + 0,52 \cdot 260}{446,6} = 2,43 \text{ мм,}$$

где q_I, q_{II} — число фракций.

Для частиц крупностью $> 1 \text{ мм}$

$$d'_{m.c.p} = \frac{d'_{m1} B_1 + d'_{m2} B_2 + \dots + d'_{mn} B_n}{100} =$$

$$= \frac{13 \cdot 9,6 + 8,8 \cdot 23 + 4,24 \cdot 28,2 + 1,73 \cdot 39,2}{100} = 5,1 \text{ мм.}$$

Для частиц крупностью $< 1 \text{ мм}$

$$d''_{m.c.p} = \frac{(d''_{m1})^3 B_1 + (d''_{m2})^3 B_2 + \dots + (d''_{mn})^3 B_n}{(d''_{m1})^2 B_1 + (d''_{m2})^2 B_2 + \dots + (d''_{mn})^2 B_n} =$$

$$= \frac{(0,707)^3 \cdot 14,9 + (0,25)^3 \cdot 85,1}{(0,707)^2 \cdot 14,9 + (0,25)^2 \cdot 85,1} = 0,52 \text{ мм,}$$

где d'_m и d''_m — средние диаметры частиц каждого класса, мм:

B_1 и B_2 — выходы классов, %;

$$d'_{m4} = \sqrt{3 \cdot 1} = 1,73 \text{ мм};$$

$$d'_{m1} = \sqrt{13 \cdot 13} = 13 \text{ мм};$$

$$d''_{m5} = \sqrt[3]{1 \cdot 0,5} = 0,707 \text{ мм};$$

$$d'_{m2} = \sqrt{13 \cdot 6} = 8,8 \text{ мм};$$

$$d''_{m6} = \frac{0,5}{2} = 0,25 \text{ мм.}$$

$$d'_{m3} = \sqrt{6 \cdot 3} = 4,24 \text{ мм};$$

18. Скорость витания угля частиц усредненного диаметра при средних параметрах сушильного агента и материала

$$v_{\text{вит.ср}} = 5,22 \sqrt{\frac{\rho_{\text{к.ср}} d_{\text{м.ср}}}{\rho_{\text{г.ср}}}} = 5,22 \sqrt{\frac{1584 \cdot 0,00243}{0,364}} = 17 \text{ м/с};$$

$$\rho_{\text{к.ср}} = \rho_{\text{к}} \frac{100}{100 - W_{\text{ср}}} = 1400 \frac{100}{100 - 11,6} = 1584 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{\text{г.ср}} = \frac{1}{v_{\text{оср}}}, \quad W_{\text{ср}} = \frac{W_1 + W_2}{2} = \frac{17,2 + 6}{2} = 11,6\%;$$

$$\rho_{\text{г.ср}} = \frac{1}{2,75} = 0,364 \text{ кг/м}^3.$$

19. Критерий Фруда

$$Fr_{\text{м}} = \frac{v_{\text{г.ср}} - v_{\text{вит.ср}}}{\sqrt{g d_{\text{м.ср}}}} = \frac{79,1 - 17}{\sqrt{9,81 \cdot 2,43 \cdot 10^{-3}}} = 403,25.$$

20. Обобщенный коэффициент (фактор скольжения фаз)

$$a = \frac{v_{\text{м.ср}}}{v_{\text{г.ср}}} = 61,5 Fr_{\text{м}}^{0,5} \left(\frac{\rho_{\text{г.ср}}}{\rho_{\text{к.ср}}} \right) = 61,5 \cdot 403,25^{0,5} \cdot \frac{0,364}{1584} = 0,284.$$

21. Средняя скорость частиц материала

$$v_{\text{м.ср}} = a v_{\text{г.ср}} = 0,284 \cdot 79,1 = 22,46 \text{ м/с.}$$

22. Относительная скорость материала

$$v_{\text{отн}} = v_{\text{г.ср}} - v_{\text{м.ср}} = 79,1 - 22,46 = 56,64 \text{ м/с.}$$

23. Критерий Рейнольдса

$$Re_{\text{отн}} = \frac{v_{\text{отн}} d_{\text{экр}}}{\nu} = \frac{56,64 \cdot 2,1 \cdot 10^{-3}}{48,33 \cdot 10^{-6}} = 2461;$$

$$d_{\text{экр}} = 0,85 d_{\text{м.ср}} = 0,85 \cdot 2,43 = 2,1 \text{ мм.}$$

24. Критерий Нуссельта

$$Nu = 0,065 Re_{\text{отн}} \left(\frac{W_2}{W_{\text{гигр}}^{\text{max}}} \right) = 0,065 \cdot 2461 \cdot 1 = 160,$$

при $W_2 > W_{\text{гигр}}^{\text{max}}$ отношение $\frac{W_2}{W_{\text{гигр}}^{\text{max}}} = 1$.

25. Поверхностный коэффициент теплообмена

$$\alpha_{\text{F}} = \frac{Nu \lambda}{d_{\text{экр}}} = \frac{160 \cdot 3,96 \cdot 10^{-2}}{2,1 \cdot 10^{-3}} \cdot 1,163 = 3508,9 \text{ кДж/(м}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{ч)}.$$

26. Удельная поверхность материала в трубе-сушилке

$$F_{\text{м}} = \frac{6 \mu_{\text{р.ср}} \rho_{\text{г.ср}} v_{\text{г.ср}}}{K d_{\text{м.ср}} \rho_{\text{к.ср}} v_{\text{м.ср}}} = \frac{6 \cdot 1,88 \cdot 0,364 \cdot 79,1}{1,3 \cdot 2,43 \cdot 10^{-3} \cdot 1584 \cdot 22,46} = 2,89 \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

27. Поправочный коэффициент

$$K = \left(\frac{W_{\text{ср}}}{W_{\text{max}}} \right)^{0,25} = \left(\frac{11,6}{4} \right)^{0,25} = 1,3$$

28. Объемный коэффициент теплообмена

$$\alpha_{\text{V}} = F_{\text{м}} \alpha_{\text{F}} = 2,89 \cdot 3508,9 = 10141 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{°C} \cdot \text{ч)}.$$

29. Средняя разность температур, равная среднему логарифмическому из разностей температур газа и материала в начале и в конце сушилки:

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{(t_1 - \vartheta_1) - (t_2 - \vartheta_2)}{2,3 \lg \frac{t_1 - \vartheta_1}{t_2 - \vartheta_2}} = \frac{(900 - 10) - (100 - 70)}{2,3 \lg \frac{900 - 10}{100 - 70}} = 254^\circ \text{C}.$$

30. Количество тепла, передаваемого от газов к материалу,

$$Q_{\text{пол}} = W(q_0 + q_m) = 53200(2670,3 + 443,57) = 1656578,8 \cdot 10^9 \text{ кДж/ч} = 46016 \cdot 10^3 \text{ Вт}.$$

31. Рабочий участок сушилки

$$l_{\text{раб}} = \frac{Q_{\text{пол}}}{\alpha_V \Delta t_{\text{ср}} F_{\text{тр}}} = \frac{46016 \cdot 10^3}{10141 \cdot 254 \cdot 1,89} = 9,45 \text{ м}.$$

Принимаем $l_{\text{раб}} = 9,5 \text{ м}$.

32. Длина загрузочной части сушилки

$$l_{\text{загр}} = 280 \frac{v_{\text{виг.ср}}}{v_{\text{г.ср}}} \cdot \frac{D_{\text{тр.ср}}}{\psi} = 280 \frac{17}{79,1} \cdot \frac{1,55}{90} = 1,03 \text{ м}.$$

Принимаем $l_{\text{загр}} = 1 \text{ м}$.

33. Длина разгрузочной части сушилки

$$l_{\text{разгр}} = 1,5 D_{\text{тр.ср}} = 1,5 \cdot 1,55 = 2,3 \text{ м}.$$

Принимаем $l_{\text{разгр}} = 2,5 \text{ м}$.

34. Общая длина сушилки

$$l_{\text{общ}} = l_{\text{раб}} + l_{\text{загр}} + l_{\text{разгр}} = 9,5 + 1,0 + 2,5 = 13 \text{ м}.$$

СУШИЛКА ВЗВЕШЕННОГО СЛОЯ

1. Теплосодержание пара, находящегося в газах,

$$i''_{\text{п}} = 2490 + 1,9 t_1 = 2490 + 1,97 \cdot 500 = 3478 \text{ кДж/кг}.$$

2. Коэффициент избытка воздуха в газах при входе в сушилку

$$\alpha_{\text{в}} = \frac{Q_{\text{в}}^{\text{р}} \eta_{\text{г}} + C_{\text{т}} t_{\text{т}} - \left(1 - \frac{9\text{HP} + W^{\text{р}} + A^{\text{р}}}{100}\right) C_{\text{с.г}} t_1 - \frac{9\text{HP} + W^{\text{р}}}{100} i''_{\text{п}}}{L_0 \left(C_{\text{с.г}} t_1 + \frac{i''_{\text{п}} d_0}{1000} - I_0\right)} =$$

$$= \frac{32158,56 \cdot 0,95 + 1,01 \cdot 10 - \left(1 - \frac{9 \cdot 4,45 + 3 + 8}{100}\right) 1,17 \cdot 500 - \frac{9 \cdot 4,45 + 3}{100} 3478}{10,5 \left(1,17 \cdot 500 + \frac{3478 \cdot 8,91}{1000} - 42,7\right)} =$$

$$\rightarrow \frac{- \frac{9 \cdot 4,45 + 3}{100} 3478}{\rightarrow} = 4,78.$$

3. Количество сухих газов, получаемое при сгорании 1 кг топлива,

$$G_{\text{с.г}} = 1 + \alpha_{\text{в}} L_0 - \frac{9\text{HP} + W^{\text{р}} + A^{\text{р}}}{100} = 1 + 4,78 \cdot 10,5 - \frac{9 \cdot 4,45 + 3 + 8}{100} = 50,68 \text{ кг}.$$

4. Начальное влагосодержание газов на входе в сушилку при полном сгорании топлива

$$d_1 = \frac{\alpha_B L_0 d_0 + (9H^p + W^p) 10}{G_{с.г}} = \frac{4,78 \cdot 10,5 \cdot 8,91 + (9 \cdot 4,45 + 3) 10}{50,68} = 17,3 \text{ г/кг.}$$

5. Удельный объем газов на начальном участке сушилки

$$v_{01} = 4,64 \cdot 10^{-6} (622 + d_1) (273 + t_1) = 4,64 \cdot 10^{-6} (622 + 17,3) (273 + 500) = 2,29 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

6. Расход сухих газов на 1 кг испаренной влаги

$$l = \frac{q_0 + q_M + q_s}{C'_{вл.г} t_1 - C''_{вл.г} t_2} = \frac{2670,3 + 443,57 + 155,7}{1,23 \cdot 500 - 1,056 \cdot 100} = 6,42 \text{ кг.}$$

7. Часовой расход сухих газов

$$L_{г1} = l_r W = 6,42 \cdot 53200 = 341544 \text{ кг/ч.}$$

8. Объем газов на входе в сушилку

$$V_{г1} = L_{г1} v_{01} = 341544 \cdot 2,29 = 781136 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

9. Скорость витания частиц на входе в сушилку

$$v_{вит1} = 5,22 \sqrt{\frac{\rho_{к1} d_M^{\max}}{\rho_{г1}}} = 5,22 \sqrt{\frac{1691 \cdot 0,013}{0,437}} = 37 \text{ м/с};$$

$$\rho_{г1} = \frac{1}{v_{01}} = \frac{1}{2,29} = 0,437 \text{ кг/м}^3.$$

10. Удельный объем газов на выходе из сушилки

$$v_{02} = 4,64 \cdot 10^{-6} (622 + d_2) (273 + t_2) = 4,64 \cdot 10^{-6} (622 + 141,9) (273 + 100) = 1,32 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

11. Влагосодержание газов на выходе из сушилки

$$d_2 = d_1 + \frac{1000}{l + l_{пр}} = 17,3 + \frac{1000}{6,42 + 1,605} = 141,9 \text{ г/кг};$$

$$l_{пр} = 0,25l = 0,25 \cdot 6,42 = 1,605 \text{ кг/кг.}$$

12. Объем и количество газов на выходе из сушилки:

$$V_{г2} = L_2 v_{02} = 426930 \cdot 1,32 = 563548 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$L_{г2} = L_{г1} (1 + d_{пр}) = 341544 (1 + 0,25) = 426930 \text{ кг/ч.}$$

13. Расчетная массовая концентрация материала

$$\mu_p = \frac{G_{м.ср}}{L_{г1}} = \frac{420 \cdot 10^3}{341544} = 1,23 \text{ кг.}$$

14. Активная скорость газов

$$v_{акт} = 2,47 v_{вит} \sqrt{\mu_p \cos \varphi} = 2,47 \cdot 37 \sqrt{1,23 \cos 1,5^\circ} = 101,4 \text{ м/с,}$$

где φ — угол наклона газораспределительной решетки, принимаем $\varphi = 1,5^\circ$.

15. Живое сечение решетки

$$\omega = 1,2 \left(\frac{d_{м.ср}}{\rho_{к1}} \right)^{0,25} h_{зад} (1 + \text{tg } \varphi) 10^3 =$$

$$= 1,2 \left(\frac{2,81 \cdot 10^{-3}}{1691} \right)^{0,25} \cdot 3 \cdot 10^{-3} (1 + \text{tg } 1,5^\circ) 10^3 = 0,117.$$

16. Площадь газораспределительной решетки

$$F_{\text{реш}} = \frac{V_{\text{г1}}}{3600v_{\text{акт}}\omega} = \frac{782136}{3600 \cdot 101,4 \cdot 0,117} = 21 \text{ м}^2.$$

17. Критерий Фруда

$$Fr = \frac{v_{\text{г.ср}}}{\sqrt{g d_{\text{м.ср}}}} = \frac{7}{9,8 \cdot 2,81 \cdot 10^{-3}} = 42,17;$$

$$D_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\text{реш}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 21}{3,14}} = 5,2 \text{ м}.$$

18. Средний объем и количество газов в сушилке:

$$V_{\text{г.ср}} = L_{\text{г.ср}} v_{\text{оср}} = 384237 \cdot 1,86 = 714681 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$L_{\text{г.ср}} = \frac{L_{\text{г1}} + L_{\text{г2}}}{2} = \frac{341544 + 426930}{2} = 384237 \text{ кг/ч}.$$

19. Средний удельный объем газов

$$v_{\text{оср}} = 4,64 \cdot 10^{-6} (622 + d''_{\text{ср}}) (273 + t''_{\text{ср}}) = 4,64 \cdot 10^{-6} (622 + 79,6) \times \\ \times (273 + 300) = 1,86 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$d_{\text{ср}} = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{17,3 + 141,9}{2} = 79,6 \text{ г/кг};$$

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{500 + 100}{2} = 300^\circ\text{C}.$$

20. Средняя скорость газов в сушильной камере

$$v_{\text{г.ср}} = \frac{L_{\text{г.ср}} v_{\text{оср}}}{3600 \cdot 1,2 F_{\text{реш}}} = \frac{341544 \cdot 1,86}{3600 \cdot 1,2 \cdot 21} = 7 \text{ м/с}.$$

21. Скорость витания угля для усредненного диаметра частиц при средних параметрах сушильного агента и материала

$$v_{\text{внт.ср}} = 5,22 \sqrt{\frac{\rho_{\text{к.ср}} d_{\text{м.ср}}}{\rho_{\text{г.ср}}}} = 5,22 \sqrt{\frac{15,84 \cdot 2,81 \cdot 10^{-3}}{0,538}} = 15 \text{ м/с};$$

$$\rho_{\text{г.ср}} = \frac{1}{v_{\text{оср}}} = \frac{1}{1,86} = 0,538 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{\text{к.ср}} = \rho_{\text{к}} \frac{100}{100 - W_{\text{ср}}} = 1400 \frac{100}{100 - 11,6} = 1584 \text{ кг/м}^3.$$

22. Критическая высота сушильной камеры

$$\frac{H_{\text{кр.}}}{D_{\text{экв}}} = 0,08 Fr^{0,88} \left(\frac{\mu_{\text{п}}}{\omega} \right)^{0,25} \left(\frac{v_{\text{г.ср}}}{v_{\text{внт.ср}}} \right)^{0,35} = \\ = 0,08 \cdot 42,17^{0,88} \left(\frac{1,23}{0,117} \right)^{0,25} \left(\frac{7,0}{15} \right)^{0,35} = 1,26;$$

$$D_{\text{экв}} = 5,2 \text{ м}, H_{\text{кр}} = 1,26 D_{\text{экв}} = 1,26 \cdot 5,2 = 6,55 \text{ м}.$$

ПРИМЕР РАСЧЕТА ПАРОВОЙ ТРУБЧАТОЙ СУШИЛКИ

Определить количество передаваемого тепла и длину трубок в трубчатой сушилке при следующих условиях. В сушилке производится сушка башкирских бурых углей. Количество испаренной влаги $W=45,4$ т/ч. Масса угля изменяется от $G_1=350$ т/ч до $G_2=304,6$ т/ч, а влажность — от $W_1=53$ до $W_2=46\%$. Начальная температура угля $\vartheta_1=5^\circ\text{C}$, конечная $\vartheta_2=40^\circ\text{C}$. При этой температуре физические константы угля следующие: $C_M=0,6$ ккал/кг $\cdot^\circ\text{C}$, $\lambda_M=0,378$ ккал/м $\cdot\text{ч}\cdot^\circ\text{C}$, $\rho_M=650$ кг/м 3 . Расчетные параметры наружного воздуха $t_0=10^\circ\text{C}$ и $d_0=0,9$ г/кг сухого воздуха. Температура уходящего воздуха $t_2=90^\circ\text{C}$. Количество тепла, передаваемого сушильному материалу, $Q=35\cdot 10^6$ ккал/ч. Количество трубок в сушилке $m_{\text{тр}}=1400$.

Диаметр трубок $d_{\text{тр}}=100/108$ мм. Давление греющего пара $P_{\text{жэб}}=4$ кг/см 2 и $t_{\text{п}}=143^\circ\text{C}$. Частота вращения барабана $n=8$ об/мин. Центральный угол сегмента трубки, заполненного материалом, $\varphi=74^\circ$. Скорость воздуха в трубке $v_{\text{тр}}=1,5$ м/с.

1. Определяем коэффициент теплообмена от трубки к слою материала по формуле Гребера

$$\alpha = 1,13 \sqrt{\lambda_M \cdot C_M \cdot \rho_M} \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{120 \cdot n}}} = 1,13 \sqrt{0,378 \cdot 0,6 \cdot 650} \times$$

$$\times \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{120 \cdot 8}}} = 456 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C} = 456 \cdot 1,163 = 530 \text{ кДж/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}$$

2. Определяем коэффициент теплоотдачи от воздуха к непрерывно обновляющемуся слою топлива

$$\text{Nu} = 0,347 \text{Re}^{0,66}$$

$$\text{Re} = \frac{v_{\text{в}} \cdot d_{\text{тр}}}{\nu} = \frac{1,5 \cdot 0,1}{17 \cdot 10^{-6}} = 8824;$$

$$\text{Nu} = 0,347 \cdot 8824^{0,66} = 139,4$$

$$\alpha_{\text{к}} = \frac{\text{Nu} \lambda}{d_{\text{тр}}} = \frac{139,4 \cdot 2,76 \cdot 10^{-2}}{0,1} = 38,1 \text{ кДж/(ч} \cdot \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}.$$

Физические константы в этой формуле принимаются при

$$t = \frac{t_2 - t_1}{2} = \frac{90 - 10}{2} = 40^\circ\text{C}$$

3. Определяем оголенную поверхность трубы на 1 м трубы:

$$F''' = \pi d_{\text{тр}} \frac{360 - \varphi}{360} = 3,14 \cdot 0,1 \frac{360 - 74}{360} = 0,249 \text{ м}^2/\text{м}$$

4. Определяем наружную поверхность находящегося в трубе материала на 1 м:

$$F'' = d_{\text{тр}} \sin \frac{\varphi}{2} = 0,1 \cdot \sin \frac{74}{2} = 0,0602 \text{ м}^2/\text{м}.$$

5. Определяем коэффициент $\alpha_{\text{луч}}$, учитывающий тепло, переданное наружному слою лучеиспусканием, по формуле

$$\alpha_{\text{луч}} = \frac{4,94 \left[\left(\frac{273 + t_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + \vartheta_2}{100} \right)^4 \right] \varepsilon_{\text{п}}}{(t_{\text{п}} - \vartheta_2)}$$

$$\alpha_{\text{луч}} = \frac{4,94 \left[\left(\frac{273 + 143}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + 40}{100} \right)^4 \right] \cdot 0,94}{143 - 40} =$$

$$= 10,49 \text{ ккал (м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°С)} = 10,49 \cdot 1,163 = 12,20 \text{ кДж/(ч} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{°С)}.$$

6. Определяем количество тепла, передаваемого в единичной трубе материалу:

$$Q'_T = \alpha \cdot F' (t_{\text{п}} - \vartheta_2) = 560 \cdot 0,06 (143 - 40) = 3692 \text{ кДж(ч} \cdot \text{м)},$$

где F' — поверхность соприкосновения материала с трубой на 1 м;

$$F' = \pi \cdot d_{\text{тр}} \frac{\varphi}{360} = 3,14 \cdot 0,1 \frac{74}{360} = 0,064 \text{ м}^2/\text{м}$$

$$Q''_T = \alpha_{\text{луч}} F'' (t_{\text{п}} - \vartheta_2) = 12,20 \cdot 0,06 \cdot (143 - 40) = 75,19 \text{ кДж/(ч} \cdot \text{м)};$$

$$Q'''_T = \alpha_K F''' (t_{\text{в}} - t_{\text{м}}) = 38,1 \cdot 0,25 \cdot 25 = 238,1 \text{ кДж/(ч} \cdot \text{м)};$$

$t_{\text{в}} - t_{\text{м}}$ — принимаем как среднюю разность температур по опытным данным;

$$Q_T = Q'_T + Q''_T + Q'''_T = 3692 + 75,19 + 238,1 = 4005 \text{ кДж/(ч} \cdot \text{м)}.$$

7. Определяем длину труб:

$$l_{\text{тр}} = \frac{Q}{Q_T m_{\text{тр}}} = \frac{40,71 \cdot 10^6}{4005 \cdot 3 \cdot 1400} = 7,2 \text{ м}$$

ПРИМЕР РАСЧЕТА ПАРОВЫХ КОРПУСОВ ПНЕВМОПАРОВОДОЯНОЙ СУШИЛКИ

Расчет производим при следующих условиях: торф — низинный; $A^c = 10\%$; материальный баланс сушилки, кг/ч: $G_1 = 16514$; $G_2 = 10150$; $W = 6010$ (W — количество влаги, испаряемое в трех паровых корпусах); $W_1 = 43\%$; $W_2 = 10\%$.

Состояние воздуха до и после сушки приводится в таблице.

Воздух	Температура, °С	Относительная влажность воздуха φ , %	d , г/кг сухого воздуха	I_1 , ккал/кг сухого воздуха	$\vartheta_{0,с}$, м ³ /кг сухого воздуха
До сушки	75	75	260	180,6	1,42
После сушки	85	80	548	368,1	1,94

Средний удельный объем воздуха, м³/кг сухого воздуха: III корпус — 1,87; IV корпус — 1,69; V корпус — 1,52.

Температура торфа до сушки 35°С, температура торфа после сушки 82°С.

Скорость аэроземеси, м/с:

III корпус, v_{III} 10,2

IV " v_{IV} 9,8

V " v_{V} 9,5

Напряжение поверхности нагрева по влаге, кг/(м²·с):

III корпус, A_{III} 0,0006

IV " A_{IV} 0,0008

V " A_{V} 0,0002

Для обогрева сушилки пар принять отработанный после турбины с параметрами: $P_{\text{пар}}=1,5 \text{ кг/см}^2$; $t=160^\circ\text{C}$ (частично перегретый); $i_{\text{пар}}=605,7 \text{ ккал/кг}$; $i_{\text{конд}}=161,3 \text{ ккал/кг}$.

Строим процесс на Id — диаграмме.

Находим точку начального A и конечного C состояний воздуха.

Процесс сушки в сушилке с внутренним подогревом характеризуется отрезком AC . Строим процесс, происходящий в скруббере. Вначале воздух будет охлаждаться и это охлаждение изобразится отрезком CB , причем точка B будет лежать на линии $\phi=100\%$, в дальнейшем охлаждение в скруббере будет сопровождаться конденсацией водяного пара, находящегося в данном воздухе, и процесс изобразится изогнутой линией B и закончится в точке D , влагосодержание которой соответствует условию $d_1=260 \text{ г/кг}$ сухого воздуха. Температура, соответствующая точке, равна 68°C , она определяется по Id — диаграмме. Перед тем как использовать этот воздух в сушильном процессе, необходимо нагреть его в калорифере, расположенном в верхней части скруббера, до температуры 75°C во избежание конденсации пара в нем перед входом в сушилку.

Этот подогрев изобразится отрезком DA , а весь процесс — замкнутой кривой $ACBDA$.

1. Определяем удельный расход воздуха:

$$l_{\text{в}} \frac{1000}{d_2 - d_1} = \frac{1000}{548,2 - 260} = 3,47 \text{ кг/г}$$

2. Определяем расход воздуха:

$$L_{\text{в}} = l_{\text{в}} W = 3,47 \cdot 1,76 = 6,10 \text{ кг/с.}$$

3. Определяем объем воздуха:
при входе в сушилку

$$V_{\text{в1}} = L_{\text{в1}} v_0 = 6,10 \cdot 1,42 = 8,66 \text{ м}^3/\text{с};$$

при выходе из сушилки

$$V_{\text{в2}} = 6,10 \cdot 1,94 = 11,83 \text{ м}^3/\text{с.}$$

4. Определяем тепловые потери:

$$q_3 = \frac{G_2}{W} C_2 (\theta_2 - \theta_1) = \frac{2,82}{1,76} 2,08 (82 - 35) = 156,6 \text{ кДж/кг,}$$

$$C_2 = 0,44 \frac{100 - 10}{100} + \frac{10}{100} = 2,08 \text{ кДж/(кг}^\circ\text{C).}$$

Принимаем $q_5=209,5 \text{ кДж/кг}$ влаги.

$$\Sigma q_{\text{потерь}} = q_3 + q_5 = 156,6 + 209,5 = 366 \text{ кДж/кг.}$$

$$\Delta = \theta_1 - \Sigma q_{\text{потерь}} = 35 - 366 = -331.$$

$$\text{Отрезок } CC_0 = \frac{\Delta}{l M_1} = \frac{-366}{3,47 \cdot 0,5} = -211 \text{ мм.}$$

5. Определяем общий расход тепла на 1 кг испаренной влаги:

$$\Sigma q = 3,47 (1542,3 - 756,7) - 35 + 99 = 2790 \text{ кДж/кг.}$$

6. Определяем расход тепла по статьям:

$$q_1 = i''_{\text{п}} - \theta_1 = 2660 - 35 = 2625 \text{ кДж/кг;}$$

$$i''_{\text{п}} = 595 + 0,47 \cdot 85 = 2660 \text{ кДж/кг;}$$

$$i'_{\text{п}} = 595 + 0,47 \cdot 75 = 2640 \text{ кДж/кг;}$$

$$q_2 = 3,47 [0,24 (85 - 75) + 0,001 \cdot 260 (635 - 630)] = 54 \text{ кДж/кг;}$$

$$q_3 = 156,6 \text{ кДж/кг;}$$

$$q_5 = 209,5 \text{ кДж/кг;}$$

$$\Sigma q = q_1 + q_2 + q_3 + q_5 = 2625 + 54 + 156,6 + 209,5 = 3045 \text{ кДж/кг.}$$

7. Определяем расход тепла во всей сушилке:

$$\frac{703 \cdot 1,76}{8740} = 2032 \text{ кДж/кг,}$$

где 8740 кг/ч — производительность всей сушилки по испаренной влаге.

8. Определяем средний объем проходящего воздуха по корпусам, м³/с:

$$V_{в. III} L v_{o III} = 6,10 \cdot 1,87 = 11,40;$$

$$V_{в. II} L v_{o IV} = 6,10 \cdot 1,69 = 10,31;$$

$$V_{в V} L v_{o V} = 6,10 \cdot 1,52 = 9,27.$$

9. Определяем размеры сушильных корпусов:
сечение трубок сушильных корпусов, м²:

$$F_{тр III} = \frac{V_{в III}}{v_{III}} = \frac{11,40}{10,2} = 1,12;$$

$$F_{тр IV} = \frac{V_{в IV}}{v_{IV}} = \frac{10,31}{9,8} = 1,11;$$

$$F_{тр V} = \frac{V_{в V}}{v_V} = \frac{9,27}{9,5} = 0,98;$$

$$m_{тр III} = \frac{F_{тр III}}{f_{тр}} = \frac{1,12}{0,001805} = 619;$$

$$m_{тр IV} = \frac{F_{тр IV}}{f_{тр}} = \frac{1,11}{0,001805} = 608;$$

$$m_{тр V} = \frac{F_{тр V}}{f_{тр}} = \frac{0,98}{0,001805} = 541.$$

где $f_{тр} = 0,001805 \text{ м}^2$ — площадь сечения одной сушильной трубки.
Требуемая поверхность нагрева, м²

$$H_{III} = \frac{W_{III}}{A_{III}} = \frac{0,65}{2,4} = 0,27;$$

$$H_{IV} = \frac{W_{IV}}{A_{IV}} = \frac{0,81}{3,15} = 0,26;$$

$$H_V = \frac{W_V}{A_V} = \frac{0,20}{0,85} = 0,24.$$

Необходимая длина трубок принимается равной 12 м.
Диаметр корпусов приведен в таблице.

Наименование	Номера корпусов				
	I	II	III	IV	V
Диаметр корпуса, мм	1830	1830	1830	1830	1830
Число сушильных трубок	627	627	619	608	514
Поверхность, м ²	0,29	0,27	0,27	0,26	0,24

Введение	3
Глава I. Общие сведения	6
§ 1. Физические свойства влажного газа и воздуха	6
§ 2. Определение основных параметров дымовых газов и их смеси с воздухом	8
§ 3. Физические свойства минерального сырья	10
§ 4. Материальный и тепловой балансы сушильной установки	15
§ 5. Графоаналитический расчет сушилки	18
§ 6. Способы сушки и классификация сушилок	22
Глава II. Основные сведения о механизме сушки минерального сырья .	24
§ 1. Общие сведения о характере связи влаги с материалом	24
§ 2. Гигротермическое равновесное состояние влажных материалов	30
§ 3. Механизм удаления влаги из материала в процессе сушки	32
§ 4. Физические, тепло- и массообменные параметры процесса сушки минерального сырья	37
Глава III. Барабанные газовые сушилки .	46
§ 1. Теория и расчет барабанной сушилки	46
§ 2. Конструкция и техническая характеристика сушильных барабанов	59
§ 3. Технологические схемы, компоновки оборудования и показатели работы барабанных сушилок	68
Глава IV. Газовые трубы-сушилки	75
§ 1. Теория и расчет основных параметров труб-сушилок	76
§ 2. Конструкция, техническая характеристика, технологические схемы, компоновка оборудования и показатели работы труб-сушилок	88
§ 3. Интенсификация и новая организация процесса сушки во взвешенном состоянии	103
§ 4. Питатели-забрасыватели труб-сушилок	111
Глава V. Сушилки кипящего слоя .	115
§ 1. Теория процесса сушки в кипящем слое	116
§ 2. Технологические схемы, конструкция и технические показатели работы сушилок кипящего слоя	122
§ 3. Газораспределительные решетки	141
Глава VI. Сушилки паровые трубчатые, тарельчатые, пневмопароводяные, парогазовые и сушка паром	150
§ 1. Паровые трубчатые сушилки	150
§ 2. Паровые тарельчатые сушилки	170
§ 3. Пневмопароводяные сушилки	173
§ 4. Парогазовые сушилки	178
§ 5. Сушка паром	180

Глава VII. Противоточные барабанные, шнековые, распылительные, вихревые и вибрационные сушилки	185
§ 1. Противоточные барабанные сушилки	185
§ 2. Шнековые сушилки .	188
§ 3. Вихревые сушилки	194
§ 4. Распылительные сушилки	196
§ 5. Вибрационные сушилки	198
Глава VIII. Топки сушильных установок	201
§ 1. Техническая характеристика и показатели работы топок	202
§ 2. Вспомогательное оборудование топок	216
Глава IX. Пылеулавливание	220
Глава X. Вспомогательное оборудование	244
§ 1. Вентиляторы (дымососы)	244
§ 2. Бункера, питатели и затворы	249
Глава XI. Контроль, регулирование и автоматизация сушильных установок	254
Глава XII. Выбор типа сушилки и технико-экономические показатели работы сушильных установок	264
Глава XIII. Основные требования к сушильным цехам, их оборудованию и техника безопасности	273
Список литературы	282
Приложения	285

Владимир Алексеевич Филиппов

**КОНСТРУКЦИЯ, РАСЧЕТ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ
УСТРОЙСТВ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СУШКИ
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ**

Редактор издательства **В. П. Куник**

Переплет художника **Г. И. Бронниковой**

Художественный редактор **О. Н. Зайцева**

Технический редактор **В. В. Соколова, Е. С. Сычева**

Корректор **Л. В. Сметанина**

ИБ№ 6354

Сдано в набор 04.07.79. Подписано в печать 11.12.79. Т-11374.
Формат 60×90^{1/16}. Бумага № 1 писчая. Гарнитура литературная.
Печать высокая. Печ. л. 19,5. Усл. печ. л. 19,5. Уч.-изд. л. 20,86.
Тираж 1800 экз. Заказ 221/6354-11. Цена 1 р. 50 к.

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12, Третьяковский
проезд, 1/19

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома при Государ-
ственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и
книжной торговли. 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

УВАЖАЕМЫЙ ТОВАРИЩ!

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»

ГОТОВИТ К ПЕЧАТИ

НОВЫЕ КНИГИ

КАЛМЫКОВ А. В. Промышленная вентиляция на обогатительных и брикетных фабриках. — 15 л., ил. — В пер.: 90 к. 500 экз.

В книге приведены сведения по санитарно-гигиеническому нормированию запыленности воздуха в производственных помещениях и на выбросе в атмосферу. Описаны вентиляционное оборудование и схемы автоматизации и блокировки вентиляционных установок с технологическим оборудованием обогатительных и брикетных фабрик. Изложены правила эксплуатации этих установок. Дан расчет вентиляционных установок. Намечены мероприятия по снижению пылеобразования на обогатительных и брикетных фабриках.

Книга предназначена для инженерно-технических работников обогатительных и брикетных фабрик, а также проектно-конструкторских и научно-исследовательских институтов, занимающихся вопросами разработки, проектирования и эксплуатации систем промышленной вентиляции и средств борьбы с пылью.

КРАСНОВ Г. Д., СТРУКОВ В. Г. Интенсификация разделения минералов в тяжелых суспензиях. — 15 л., ил. — В пер.: 95 к. 5000 экз.

В книге рассмотрено влияние структурообразования на процесс разделения полезных ископаемых в тяжелых суспензиях. Приведены методика и результаты исследования структурно-механических характеристик суспензий магнетита и гранулированного ферросилиция. Теоретически и экспериментально обоснована возможность повышения эффективности процесса разделения посредством управления свойствами тяжелых суспензий при вибрационных воздействиях. Даны расчеты и конструкция пневматического пульсационного устройства промышленных аппаратов для обогащения в тяжелых средах.

Книга предназначена для научных работников, занимающихся вопросами обогащения полезных ископаемых, а также может быть полезна студентам горных и горно-металлургических институтов.

ТЮРНИКОВА В. И., НАУМОВ М. Е. Повышение эффективности флотации. — 18 л., ил. — В пер.: 1 р. 30 к. 5000 экз.

В книге освещены теоретические основы методов повышения эффективности флотационного процесса при обогащении руд и углей. Изложены исследования физико-химических приемов совершенствования подготовки пульпы введением поверхностно-активных веществ, предварительной аэрацией ее или восстановлением поверхности частиц гидросульфидными ионами. Приведены результаты изучения механизма взаимодействия окисей олефинов с ксантогенатами и углеводородами и с поверхностью минералов. Обоснована взаимосвязь эффективности процесса флотации с конструкциями флотационных аппаратов. Рассмотрены конкретные примеры использования разработанных способов повышения эффективности флотации.

Книга предназначена для инженерно-технических и научных работников обогатительных фабрик, научно-исследовательских и проектных институтов, а также может быть полезна студентам горных и горно-металлургических вузов.

ФИЛИППОВ В. М., ГРОЙСМАН С. И. Аппаратчик углеобогащения: Учебник для профтехобразования. — 17 л., ил. — В пер.: 70 к. 10000 экз.

В учебнике рассмотрены устройства и принцип действия основного оборудования (отсадочных машин, концентрационных столов, флотационных машин, колесных и конусных сепараторов и др.) углеобогатительных фабрик, обслуживаемого аппаратчиками. Изложены вопросы охраны труда и техники безопасности на этих предприятиях. Приведены сведения по стандартизации и контролю качества продукции углеобогатительных фабрик.

Учебник предназначен для подготовки рабочих в профессионально-технических училищах и на производстве и может быть полезен для среднего технического персонала углеобогатительных фабрик.

Интересующие Вас книги Вы можете приобрести в местных книжных магазинах, распространяющих научно-техническую литературу, или заказать через отдел «Книга — почтой» магазинов:

№ 17 — 199178, Ленинград, В. О., Средний проспект, 61;
№ 59 — 127412, Москва, Коровинское шоссе, 20.

Издательство «Недра»