

БИБЛИОТЕЧКА РАБОЧЕГО - ХИМИКА

Н.Б. РАШКОВСКАЯ

**Сушка
в химической
промышленности**

Н. Б. РАШКОВСКАЯ

СУШКА
В ХИМИЧЕСКОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ХИМИЯ»
Ленинградское отделение · 1977

Рашковская Н. Б.

P28 Сушка в химической промышленности. Л., «Химия», 1977.

80 стр., 36 рис., 5 табл., список литературы 4 названия.

Сушка широко применяется в химической, а также в пищевой, химико-фармацевтической и других отраслях промышленности. От правильного проведения этой операции зависят и экономичность процесса, и качество готового продукта.

В брошюре в доступной форме излагаются основы теории и техники процесса сушки, принципы расчета сушильных установок и выбора оптимального режима. Рассматриваются основные конструкции сушилок и вспомогательное оборудование. Особое внимание уделено контролю, автоматизации и регулированию процессов, а также вопросам техники безопасности.

Книга предназначена для рабочих и мастеров химической и смежных отраслей промышленности. Кроме того, она может быть использована в качестве пособия для профессионально-технических училищ.

P $\frac{31402-097}{050(01)-77}$ 97-77

6П7.1

Редакционная коллегия:

проф. чл.-корр. АН СССР П. Г. Романков,
доцент канд. техн. наук М. И. Курочкина,
доцент канд. техн. наук Н. Н. Смирнов

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одной из основных стадий химико-технологического процесса, часто завершающей его, является сушка, которая в значительной степени определяет технико-экономические показатели всего производства.

Применение неправильных режимов или несоответствующих конструкций аппаратов при сушке того или иного материала приводит к выпуску продукта неудовлетворительного качества. Поэтому важно строго соблюдать регламентированные режимы сушки и использовать наиболее рациональные конструкции сушилок.

Для повышения производительности необходимо интенсифицировать процесс сушки, снизить расход топлива и энергии. Создание современных типов экономичных и высокопроизводительных сушилок, отличающихся малой металлоемкостью, требует освоения новых методов сушки с использованием высокотемпературных теплоносителей.

Обслуживание современного оборудования, в том числе и сушильного, требует достаточной теоретической подготовки, знания технологического процесса, конструкций сушилок и вспомогательного оборудования, умения анализировать и оптимизировать процесс. В связи с этим в брошюре в популярной форме излагаются основы теории и техники сушки, иллюстрируемые расчетными примерами. Рассмотрены основные конструкции широко используемых в химической промышленности сушильных установок, включающих собственно сушилки и вспомогательное оборудование, указаны их преимущества и недостатки, причины неполадок и меры для их устранения. Уделено также внимание вопросам автоматизации и техники безопасности.

СВОЙСТВА ВЫСУШИВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Подвергаемые сушке материалы поступают в сушилки обычно после фильтрования или центрифугирования, а иногда минуя эти стадии. Для проведения процесса сушки важное значение имеют такие свойства материала, как размеры и форма его частиц, влажность, допустимая температура нагрева, взрывоопасность и пожароопасность, химическая агрессивность и токсичность (вредное действие на человеческий организм).

Влажные материалы делятся на зернистые, волокнистые, пастообразные, суспензии и растворы.

Зернистые материалы состоят из отдельных гранул или кристаллов размером от долей до нескольких миллиметров. Чаще всего в химической промышленности высушивают кристаллические продукты, например минеральные соли — хлористый натрий, хлористый калий, сульфат натрия и т. д.

Примерами волокнистых материалов могут служить этилцеллюлоза, асбестовое волокно, хлопок, бумажная масса.

Пастообразные материалы очень часто встречаются в химической промышленности и получают обычно после фильтрования суспензий (пульп) с целью понижения содержания воды перед сушкой. Твердое вещество пасты представляет собой очень мелкие частицы размером от тысячных до десятых долей миллиметра. Чем меньше воды в пасте, тем лучше она сохраняет приданную ей форму. Некоторые пасты под действием давления или при перемешивании становятся текучими (например, пасты органических красителей). Иногда сушке подвергают суспензии (если они очень плохо фильтруются), а также растворы солей.

Влажность является важнейшей характеристикой материала. Материал, не содержащий влаги, называют абсолютно сухим. Влажность материала выражают двумя способами: относя содержащуюся в нем влагу ко всему количеству влажного материала (u) или к количеству абсолютно сухого материала (u'). Величина u' представляет собой абсолютную влажность. Для установления связи между u и u' возьмем 100 массовых частей влажного материала. В нем будет содержаться u частей влаги и $100 - u$ частей сухого материала. Отношение этих величин, выраженное в процентах, даст значение абсолютной влажности:

$$u' = \frac{u}{100 - u} 100 \quad (1)$$

Из выражения (1) можно найти:

$$u = \frac{100u'}{100 - u'} 100 \quad (2)$$

Следует иметь в виду, что u' может быть значительно больше 100%.

При сушке необходимо знать начальную (u_1) и конечную (u_2) влажности. Если материал после сушки хранится на складе в открытой таре, то его не следует пересушивать, поскольку атмосферный воздух содержит некоторое количество влаги, а абсолютно сухие материалы, а также материалы, имеющие низкую влажность, при соприкосновении с влажным воздухом увлажняются. При этом количество поглощенной влаги зависит как от свойств материала, так и от влажности и температуры окружающего воздуха. Материалы, влажность которых равновесна с влажностью окружающего воздуха, называются воздушно-сухими. Способность материала увлажняться при соприкосновении с влажным воздухом носит название гигроскопичности.

Высушивать материал следует до влажности, не ниже той, которая соответствует воздушно-сухому состоянию в условиях складирования, так как на удаление лишней влаги затрачивается дополнительное количество теплоты и, таким образом, перерасходуется топливо.

Начальная влажность материала должна быть возможно более низкой. Чем она ниже, тем меньшее количество воды потребуется удалить при сушке и, следовательно, затратить меньшее количество теплоты. Поэтому перед сушкой воду из материала рекомендуется удалять механическим путем — фильтрованием или центрифугированием.

Многие продукты химической промышленности при определенной температуре плавятся, возгоняются или подвергаются распаду. Сушка должна проводиться при такой температуре, при которой ни один из перечисленных выше процессов не будет происходить. При составлении технологического регламента предельно допустимая температура для данного материала должна быть известна, и сушку надо вести при несколько более низкой температуре. Следует иметь в виду, что чем выше температура поступающего теплоносителя и ниже уходящего, тем экономичнее процесс. Предельная температура материала зависит не только от физических свойств высушиваемого материала, но и от продолжительности сушки, а также от способа подвода теплоты. Влажность материала тоже влияет на предельную температуру. Чем эффективнее процесс, т. е. чем быстрее он протекает, тем меньше материал соприкасается с горячим теплоносителем и тем выше предельная температура сушки. Например, в распылительных сушилках некоторые материалы можно сушить при температуре теплоносителя 300 °С без ухудшения качества, так как материал находится в зоне действия высокой температуры только несколько

секунд; в камерных сушилках те же материалы нельзя сушить при температуре выше 100 °С, поскольку время сушки составляет десятки часов.

Если материал соприкасается с горячей стенкой аппарата (вальцовые или гребковые сушилки), то его температура будет выше, чем при соприкосновении с газообразным теплоносителем той же температуры, и поэтому в первом случае температура теплоносителя должна быть ниже, чем во втором.

Обычно перед выдачей регламента проводят сушку на опытной установке и находят наилучший температурный режим, который и рекомендуют для промышленной установки.

ТЕПЛОНОСИТЕЛИ

Теплоносителями в промышленных сушильных установках служат водяной пар, воздух и топочные газы. В сушильных установках малой производительности иногда используют электрический ток промышленной и высокой частоты, а также радиационный нагрев высушиваемого материала.

ВОДЯНОЙ ПАР

Водяной пар предназначается для сушки термочувствительных материалов. Его используют как для нагрева высушиваемых материалов через стенку в контактных сушилках, так и для подогрева в теплообменниках (калориферах) воздуха, который затем направляется в качестве теплоносителя в конвективные сушилки. Пар — чистый теплоноситель. Температуру водяного пара легко регулировать путем дросселирования. Он обладает высокой теплотой конденсации и высоким коэффициентом теплоотдачи; следовательно, расход его и требуемая поверхность теплообмена невелики. Кроме того, пар безопасен в пожарном отношении.

Пар, температура которого равна температуре кипения воды (t_k) при данном давлении, называется насыщенным. При отводе от него теплоты он постепенно превращается в воду — конденсируется, однако температура его при этом не изменяется. Поступающий из котельной пар всегда содержит некоторое количество воды в результате конденсации в паропроводе, и перед подачей на установку его надо осушить, используя конденсатоотводчик (конденсационный горшок).

Перегретым называется пар, температура которого $t_{п.п}$ выше температуры кипения воды t_k при данном давлении. Получают его при перегреве насыщенного водяного пара в перегревателе. При охлаждении перегретый пар не будет конденсироваться до тех пор, пока его температура не станет равной температуре кипения воды при данном давлении. Обычно пар перегревают лишь настолько, чтобы он не конденсировался в паропроводе.

Значения теплоты парообразования, температуры конденсации, плотности и энтальпии насыщенного водяного пара в зависимости от абсолютного давления приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры сухого насыщенного пара

p — давление; t_K — температура; ρ — плотность; r — теплота парообразования; i_{II} — энтальпия.

p		$t_K, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$r \cdot 10^{-3}, \text{Дж/кг}$	$i_{II} \cdot 10^{-3}, \text{Дж/кг}$
МПа	кгс/см ²				
0,04	0,40	75,4	0,246	2320	2632
0,06	0,60	85,5	0,36	2296	2650
0,08	0,80	93,0	0,470	2278	2663
0,1	1,0	99,1	0,58	2264	2677
0,12	1,2	104,2	0,687	2249	2686
0,14	1,4	108,7	0,793	2237	2693
0,16	1,6	112,7	0,898	2227	2703
0,18	1,8	116,3	1,0	2217	2709
0,2	2,0	119,6	1,11	2208	2710
0,3	3,0	132,9	1,62	2171	2730
0,4	4,0	142,9	2,12	2141	2744
0,5	5,0	151,1	2,61	2117	2754
0,6	6,0	158,1	3,10	2095	2768
0,7	7,0	164,2	3,59	2075	2769

Значение коэффициента теплоотдачи α , характеризующего теплоперенос от насыщенного пара к стенке, в среднем составляет 11 500 Вт/(м²·К), т. е. $\sim 10\,000$ ккал/(м²·ч·°С). Коэффициент теплоотдачи значительно уменьшается в случае присутствия воздуха и воды в паре, поэтому их надо удалять.

Расход греющего пара $G_{г.п}$ определяют по формуле:

$$G_{г.п} = \frac{Q}{rx} \quad (3)$$

где Q — количество теплоты, отдаваемое паром (рассчитывается по уравнению теплового баланса — см. стр. 19); r — теплота парообразования (берется из табл. 1); x — степень сухости насыщенного пара, в среднем равная 0,95 (это означает, что на 100 кг влажного насыщенного пара приходится 95 кг сухого насыщенного пара и 5 кг воды).

Пример 1. Определить расход насыщенного водяного пара, поступающего в калорифер при избыточном давлении (т. е. давлении, показываемом манометром) 5 кгс/см² (0,5 МПа), если его сухость 97%, а количество передаваемой в калорифере теплоты 14 000 Вт (12 000 ккал/ч).

Решение. Расход греющего пара определяем по формуле (3):

$$G_{г.п} = \frac{Q}{rx} = \frac{14\,000}{2095 \cdot 10^3 \cdot 0,97} = 0,00692 \text{ кг/с; или } 24,8 \text{ кг/ч}$$

Здесь $r = 2095 \cdot 10^3$ Дж/кг находится по табл. 1 при абсолютном давлении, равном $5 + 1 = 6$ кгс/см² (0,6 МПа).

ВОЗДУХ

Воздух, нагретый в калорифере, является теплоносителем и одновременно переносчиком паров воды, испарившейся из влажного материала, т. е. в сушильных установках воздух влажный. Атмосферный воздух также содержит водяной пар, количество которого зависит от температуры воздуха, времени года, погоды и других условий.

Отдача теплоты нагретым воздухом стенке приблизительно в 500 раз ниже, чем насыщенным водяным паром, поэтому нагретый воздух используют для непосредственного соприкосновения с влажным материалом, а не отделяют стенкой.

Влажный воздух характеризуется следующими параметрами: температурой t , точкой росы t_p , влагосодержанием x , относительной влажностью φ , энтальпией i .

Влагосодержание x — это количество содержащихся в воздухе водяных паров (в кг), отнесенное к 1 кг абсолютно сухого воздуха.

Относительной влажностью φ называется массовое количество содержащихся в воздухе паров, отнесенное к содержанию их в состоянии насыщения при той же температуре. Значение x для температур от 0 до 100°C и значений φ от 5 до 100% приведены в табл. 2 (для барометрического давления 99,3 кПа, т. е. 745 мм рт. ст.). Относительную влажность воздуха определяют специальным прибором — психрометром.

Точка росы t_p является температурой, которую будет иметь воздух с влагосодержанием x в результате охлаждения до состояния насыщения ($\varphi = 1$ или 100%).

Энтальпия i влажного воздуха — это количество содержащейся в нем теплоты, отнесенное к 1 кг сухого воздуха. Отсчет ведут от 0°C. Величина i равна сумме энтальпий 1 кг сухого воздуха и x кг водяного пара:

$$i = i_{\text{в}} + xi_{\text{п}} \quad (4)$$

где $i_{\text{в}}$ — энтальпия воздуха; $i_{\text{п}}$ — энтальпия пара.

Для определения параметров воздуха удобно пользоваться диаграммой в координатах энтальпия i — влагосодержание x . Угол между координатными осями на такой диаграмме равен 135°, но для расчета пользуются вспомогательной осью x , проведенной под углом 90°. Диаграмма i — x представлена на рис. 1. На ней нанесены изотермы — линии постоянных температур (они идут с некоторым наклоном) и семейство кривых, каждая из которых соответствует постоянному значению относительной влажности φ . При $t = 99,1$ °C (температуре кипения воды при давлении 99,3 кПа, т. е. 745 мм рт. ст., для которого составлена диаграмма) кривые имеют перелом и идут почти вертикально.

Рассмотрим некоторые примеры определения параметров влажного воздуха с помощью диаграммы i — x .

Пример 2. Определить энтальпию, влагосодержание и точку росы влажного воздуха при $t = 60$ °C и $\varphi = 30$ %.

Таблица 2
Влагосодержание воздуха $x \cdot 10^3$ кг/кг при различных ϕ и t

Температура воздуха, °С	Значения $x \cdot 10^3$ при относи				
	100	90	80	70	60
0	3,85	3,46	3,07	2,69	2,30
5	5,51	4,95	4,40	3,85	3,29
10	7,78	7,00	6,21	5,43	4,65
15	10,86	9,76	8,66	7,56	6,47
20	15,00	13,46	11,04	10,42	8,91
25	20,50	18,39	16,29	14,21	12,14
30	27,78	24,89	22,03	19,19	16,37
35	37,37	33,43	29,54	25,70	21,90
40	49,98	44,62	39,35	34,16	29,05
45	66,57	59,28	52,14	45,15	38,31
50	88,42	78,17	68,79	59,38	50,21
55	117,50	103,80	90,60	77,86	65,57
60	156,64	137,54	119,35	102,00	85,44
65	210,31	183,15	157,69	133,77	111,26
70	285,99	246,21	209,73	176,15	145,16
75	397,29	336,27	282,25	233,85	190,31
80	571,34	471,60	387,06	314,53	251,62
85	874,65	691,72	548,25	432,75	337,78
90	1508,85	1097,51	818,24	616,33	463,62
95	3601,74	2071,68	1352,19	934,27	661,27
100	—	5761,26	2555,95	1488,73	955,60

Решение. По диаграмме $i-x$ (рис. 1) находим точку пересечения изотермы $t = 60^\circ\text{C}$ с линией $\phi = 30\%$. Этой точке соответствуют: энтальпия $i = 166$ кДж/кг сухого воздуха, влагосодержание $x = 0,04$ кг/кг сухого воздуха, точка росы $t_p = 36^\circ\text{C}$. Схема решения дана на рис. 2, а.

Пример 3. Определить относительную влажность воздуха при $t = 90^\circ\text{C}$ и влагосодержании $x = 0,047$ кг/кг сухого воздуха.

Решение. По диаграмме $i-x$ (рис. 1) находим точку пересечения изотермы $t = 90^\circ\text{C}$ с линией постоянного влагосодержания $x = 0,047$ кг/кг сухого воздуха. Этой точке соответствует относительная влажность воздуха $\phi = 10\%$. Схема решения дана на рис. 2, б.

ТОПОЧНЫЕ ГАЗЫ

Топочные газы в смеси с атмосферным воздухом широко используют при сушке различных материалов, в том числе и органических продуктов. Многие материалы, например песок, глину, топливо, неорганические соли и т. д., высушивают при довольно высоких температурах — от 300 до 800°C и выше. Для этой цели можно использовать топочные газы, разбавляя их до нужной температуры атмосферным воздухом.

Преимущества сушки топочными газами: возможность получения высоких температур; простота топочных устройств; возможность непосредственного применения отработанных газов котельных установок, печей и других агрегатов.

тельной влажности воздуха Φ (в %)

50	40	30	20	10	5
1,92	1,53	1,15	0,77	0,38	0,19
2,74	2,19	1,64	1,09	0,55	0,27
3,87	3,09	2,31	1,54	0,77	0,38
5,38	4,30	3,22	2,14	1,07	0,53
7,41	5,91	4,42	2,94	1,47	0,73
10,08	8,04	6,01	3,99	1,99	0,99
13,59	10,82	8,08	5,36	2,67	1,33
18,14	14,43	10,76	7,13	3,55	1,77
24,03	19,07	14,20	9,40	4,66	2,32
31,60	25,03	18,58	12,27	6,07	3,02
41,29	32,60	24,13	15,88	7,84	3,90
58,70	42,24	31,15	20,43	10,05	4,98
69,61	54,48	39,98	26,10	12,78	6,33
89,75	70,02	51,08	33,15	16,14	7,97
116,33	89,83	65,03	41,90	20,27	9,97
150,96	115,21	82,60	52,74	25,30	12,40
196,55	147,96	104,77	66,15	31,41	15,32
258,35	190,95	133,07	82,83	38,84	18,83
344,13	248,12	169,34	103,54	47,81	23,02
469,12	326,60	216,75	129,55	58,68	28,02
636,07	423,39	271,75	158,08	70,23	33,24

Недостатки сушки топочными газами: возможность попадания на высушиваемый материал сажи или капель несгоревшего жидкого топлива, наличие в газах вредных сернистых соединений, что может вредно повлиять на качество высушенных материалов, а также возникновение пожаров в газоходах и пылеулавливающей аппаратуре при догорании угольной пыли или капель жидкого топлива.

В тех случаях, когда не рекомендуется непосредственное соприкосновение топочных газов с материалом, но при допустимости применения высоких температур, используют огневые калориферы, в которых воздух подогревается топочными газами и направляется в сушилку.

Топочные газы получают при сжигании газообразного, жидкого (мазут, нефть) или твердого (уголь, торф) топлива в топках и смешивают их в специальных камерах (камерах смешения) с атмосферным воздухом для получения смеси определенной температуры.

Топочные (дымовые) газы состоят из кислорода, азота, окиси и двуокиси углерода, сернистого газа и водяных паров. Состав топочных газов зависит от количества воздуха, подводимого в топку для сжигания топлива (первичный воздух) и подмешиваемого к продуктам сгорания для понижения их температуры до заданной (вторичный воздух).

При обычных условиях сжигания топлива в котельных и других промышленных установках теплота водяных паров продуктов сгорания не может быть использована, так как температура превышает точку росы. Поэтому при характеристике топлива эту теплоту

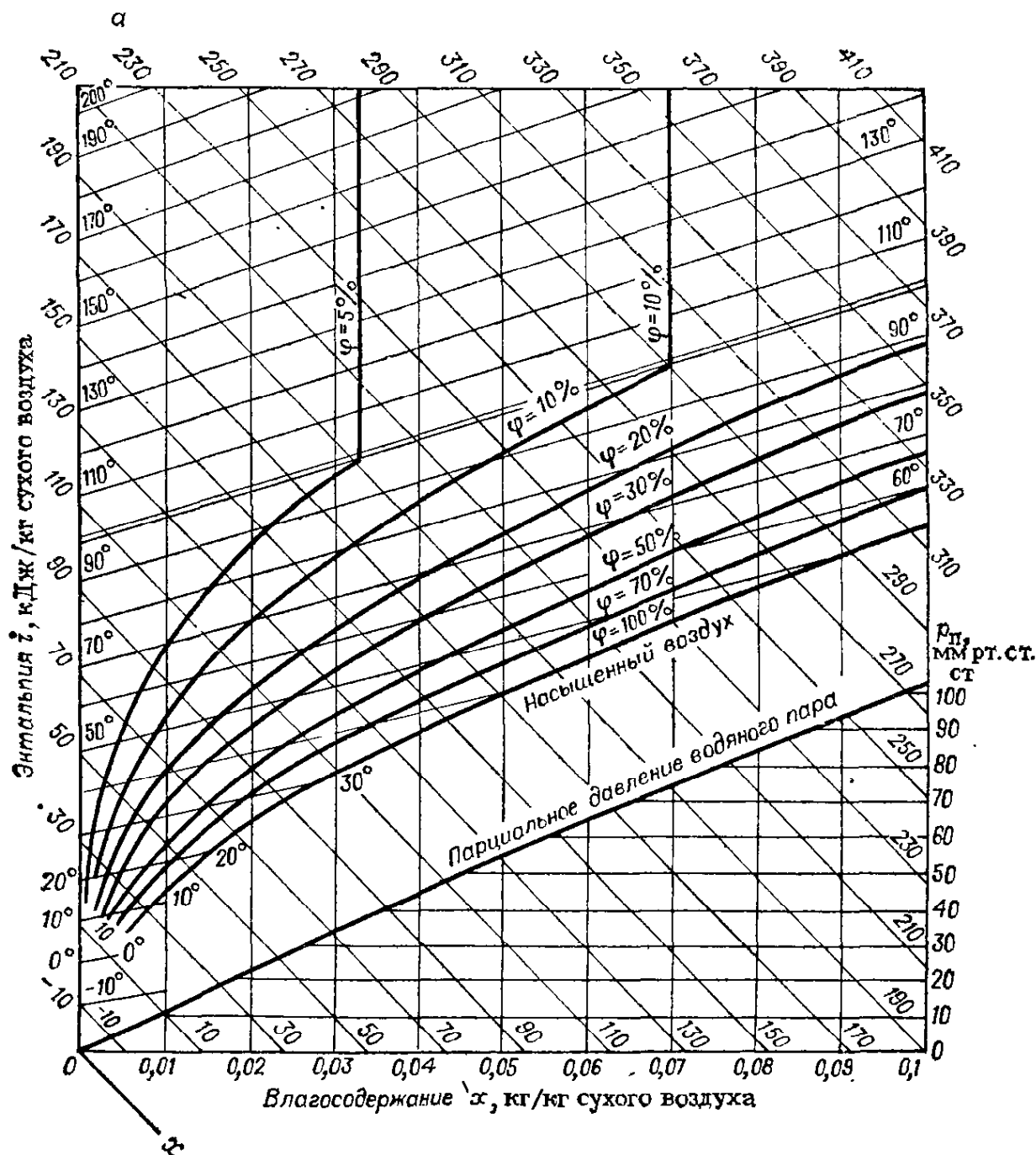
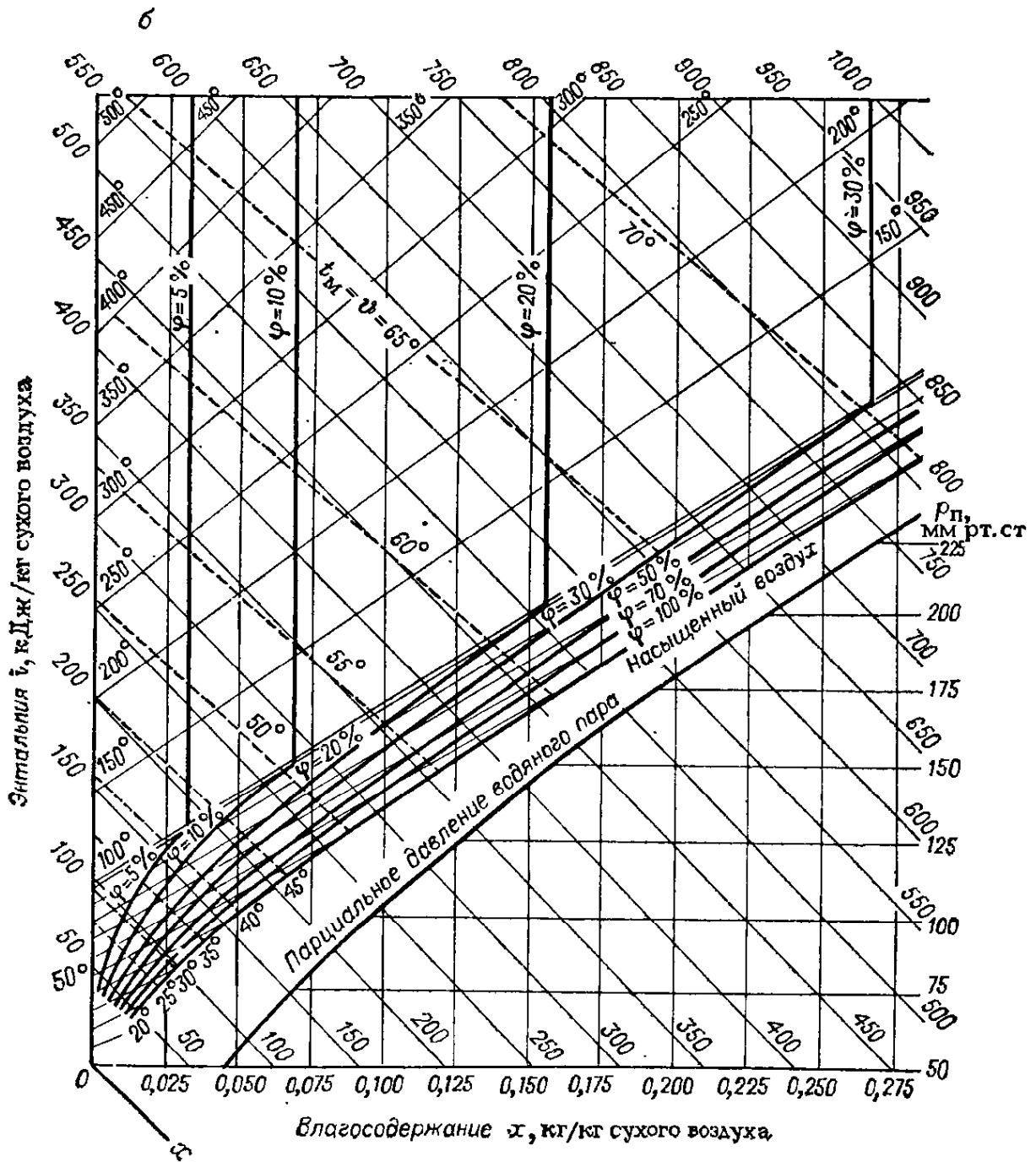


Рис. 1. Диаграмма $i - x$.
1 мм рт. ст. = 133,3 Па.

исключают и получают значение его нижней теплоты сгорания $Q_{н}$. В значении высшей теплоты сгорания топлива $Q_{в}$ эта теплота учитывается.

Нижняя теплота сгорания углей в зависимости от их месторождения, марки и сорта колеблется в пределах от 10 000 до 28 500 кДж/кг, жидких топлив (мазут, гудрон) — от 30 000 до 40 000 кДж/кг, газообразных топлив (природный газ) — от 38 000 до 50 000 кДж/кг.

При поступлении топлива на завод к нему прилагается паспорт, в котором указывается химический состав и теплота сгорания. При отсутствии паспорта анализ топлива проводит центральная заводская лаборатория.



Теоретическое (минимальное) количество абсолютно сухого воздуха L_0 (в кг/кг топлива), необходимое для сжигания 1 кг твердого или жидкого топлива, может быть рассчитано по приближенной формуле:

$$L_0 = 0,0042Q_H \quad (5)$$

Практически для полного сгорания топлива в топку вводят больше воздуха (L_1), чем рассчитано теоретически (L_0). Отношение этих количеств называется коэффициентом избытка воздуха

(λ_1). Кроме того, в камеры смешения вводят атмосферный воздух для понижения температуры продуктов сгорания до пределов, допустимых при сушке тех или иных материалов (L_2). Для тепловых расчетов сушилки устанавливают общий коэффициент из-

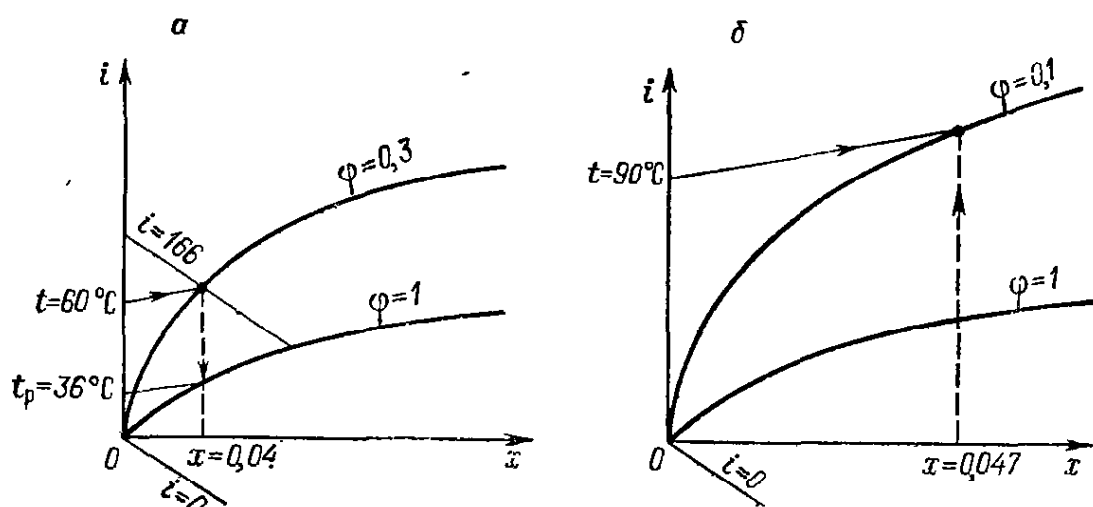


Рис. 2. Схема решений:
а—к примеру 2, б—к примеру 3.

бытка воздуха $\lambda = L/L_0$, где L — полный расход воздуха в топке и камере смешения, определяемый в зависимости от природы

Таблица 3

Удельный объем влажного воздуха v (в $\text{м}^3/\text{кг}$)

$t, \text{°C}$	Значения v при относительной влажности воздуха φ (в %)								
	0	5	10	20	30	40	60	80	100
—15	0,746	0,746	0,746	0,746	0,746	0,746	0,747	0,747	0,747
—10	0,760	0,760	0,761	0,761	0,761	0,761	0,762	0,762	0,762
—5	0,775	0,775	0,775	0,775	0,776	0,776	0,777	0,777	0,778
0	0,789	0,789	0,790	0,790	0,791	0,791	0,792	0,793	0,794
10	0,818	0,819	0,819	0,820	0,821	0,822	0,824	0,826	0,828
20	0,847	0,848	0,849	0,851	0,853	0,855	0,859	0,863	0,867
40	0,905	0,908	0,912	0,919	0,925	0,933	0,947	0,962	0,977
60	0,963	0,972	0,982	1,000	1,020	1,050	1,090	1,150	1,200
80	1,020	1,050	1,070	1,130	1,190	1,230	1,430	1,650	1,950
100	1,080	1,140	1,200	1,350	1,550	1,810	2,720	5,450	
120	1,140	1,200	1,260	1,420	1,630	1,900	2,860	5,730	
140	1,190	1,260	1,330	1,490	1,710	2,000	3,000	6,010	
160	1,250	1,320	1,390	1,570	1,790	2,090	3,140	6,300	
180	1,310	1,380	1,460	1,640	1,870	2,190	3,290	6,680	
200	1,370	1,440	1,520	1,710	1,960	2,280	3,430	6,860	
250	1,510	1,590	1,680	1,890	2,160	2,520	3,790	7,580	
300	1,660	1,740	1,840	2,070	2,370	2,760	4,150	8,290	
350	1,800	1,900	2,000	2,250	2,570	3,000	4,500	9,010	
400	1,940	2,050	2,160	2,430	2,780	3,240	4,870	9,730	
500	2,230	2,350	2,480	2,790	3,190	3,720	5,590	11,20	
600	2,520	2,660	2,800	3,150	3,600	4,210	6,310	12,60	
700	2,810	2,960	3,120	3,510	4,020	4,690	7,030	14,610	
800	3,100	3,260	3,450	3,880	4,430	5,170	7,750	15,50	

топлива и необходимой температуры смеси по соответствующим справочным таблицам.

Объем топочных газов можно приблизительно рассчитывать так же, как и для воздуха (табл. 3). Влагосодержание их несколько выше, но это увеличение не отражается на процессе сушки влажного материала. Энтальпия топочных газов может быть определена по диаграмме $i - x$, поскольку теплоемкости этих газов и воздуха близки.

Отдача теплоты топочными газами стенке такая же, как и для воздуха, поэтому при сушке топочные газы обычно приводятся в непосредственное соприкосновение с высушиваемым материалом.

ОСНОВЫ ПРОЦЕССА СУШКИ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Общая схема сушильной установки представлена на рис. 3. Материал в количестве G_1 с влажностью u_1 поступает в сушильную камеру B , где соприкасается либо непосредственно с горячим газообразным теплоносителем (с горячим воздухом или топочными газами) — конвективная сушка, либо через разделяющую стенку (обычно с водяным паром) — контактная

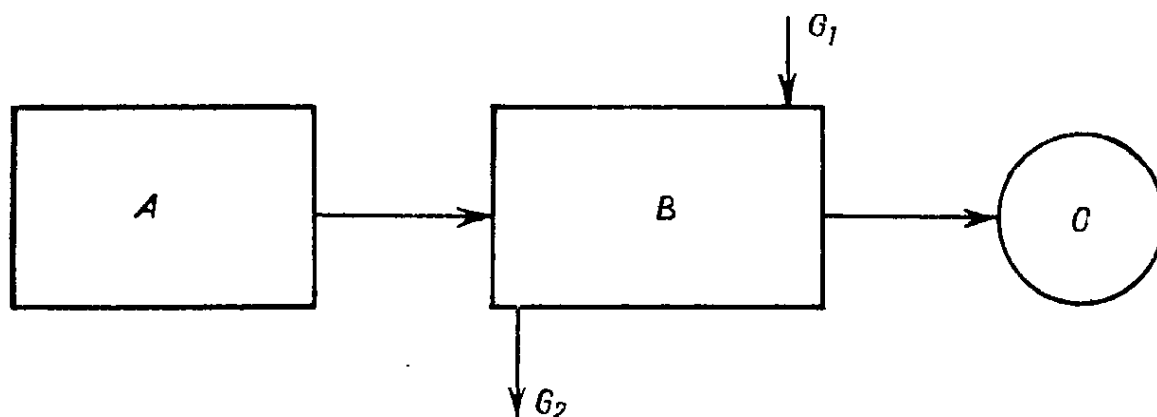


Рис. 3. Общая схема сушильной установки:
А — источник теплоты; В — сушильная камера; С — вентилятор.

сушка. Источник теплоты показан на схеме в виде устройства А. В результате взаимодействия с теплоносителем влага из материала испаряется и либо отводится в конденсатор, где конденсируется (при работе под вакуумом), либо поглощается газообразным теплоносителем и вместе с ним отсасывается из сушилки вентилятором С.

Сушильные установки могут работать периодически и непрерывно. При периодической работе в сушилку загружают определенное количество влажного материала G_1 , а через некоторое время выгружают высушенный материал в количестве G_2 . При непрерывной сушке загрузка и выгрузка материала производятся постоянно (тогда G_1 и G_2 — производительности сушилки по влажному и высушенному материалу, соответственно). Разность $G_1 - G_2$ будет представлять количество удаленной из материала влаги или производительность сушилки по влаге:

$$W = G_1 - G_2$$

Если известны влажности поступающего в сушилку материала (u_1) и выходящего высушенного материала (u_2), а также производительность сушилки (G_1 , G_2 или W), то два другие неизвестные значения производительности можно подсчитать следующим образом. Общее количество влаги, содержащееся в материале до сушки, будет равно $u_1 G_1/100$, а количество влаги, оставшееся в материале после сушки, $u_2 G_2/100$. Разность этих величин дает количество влаги W , удаленной в сушилке:

$$W = \frac{u_1 G_1}{100} - \frac{u_2 G_2}{100}$$

Так как

$$G_2 = G_1 - W \quad (6)$$

то можно написать

$$W = \frac{u_1 G_1}{100} - \frac{u_2 (G_1 - W)}{100}$$

или после преобразований

$$W = G_1 \frac{u_1 - u_2}{100 - u_2} \quad (7)$$

Связь между начальным и конечным количествами материала и его влажностью выражается соотношением:

$$G_2 = G_1 \frac{100 - u_1}{100 - u_2}$$

Зависимость между производительностью по высушенному материалу, удаленной влагой и влажностями имеет вид:

$$G_2 = W \frac{100 - u_1}{u_1 - u_2}$$

Пример 4. 3,5 т пастообразного материала с влажностью 70% высушены до влажности 7%. Сколько удалено воды и выгружено материала из сушилки?

Решение. Количество удаленной воды определяем по формуле (7):

$$W = G_1 \frac{u_1 - u_2}{100 - u_2} = 3,5 \frac{70 - 7}{100 - 7} = 2,37 \text{ т, или } 2370 \text{ кг}$$

Количество высушенного материала находим по соотношению (6):

$$G_2 = G_1 - W = 3,5 - 2,37 = 1,13 \text{ т, или } 1130 \text{ кг}$$

РАСХОД ГАЗООБРАЗНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Массовый расход газообразного теплоносителя L определяют в зависимости от производительности по испаренной влаге:

$$L = Wl \quad (8)$$

Удельный расход сухих газов l (в кг/кг влаги) рассчитывается по формуле:

$$l = \frac{1}{x_2 - x_1} \quad (9)$$

где x_1 и x_2 — влагосодержание газообразного теплоносителя на входе в сушилку и выходе из нее, соответственно.

На рис. 4, а приведена схема сушильной установки, работающей по нормальному сушильному варианту, и обозначены параметры процесса. Изображение процесса на рис. 4, б дано в двух вариантах: ABC — при использовании воздуха, подогретого в калорифере, и $AB'C'$ — при сушке топочными газами. Обозначения:

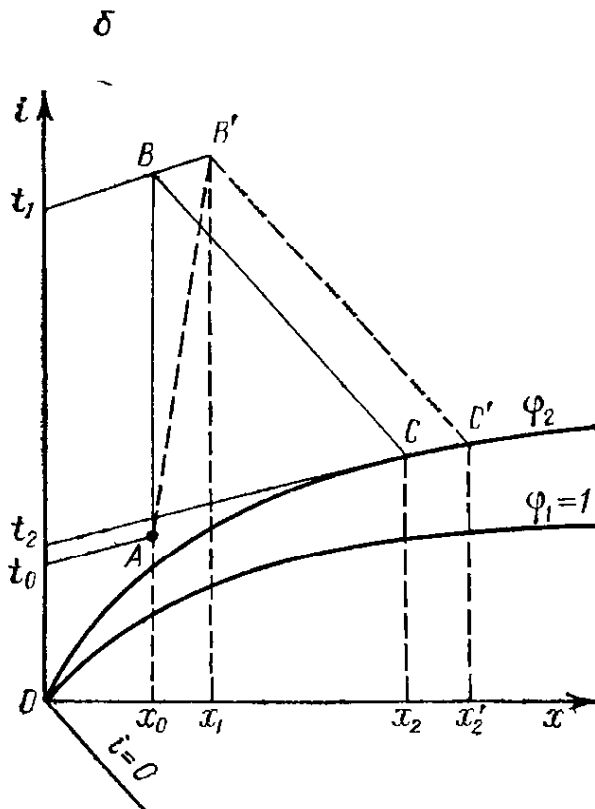
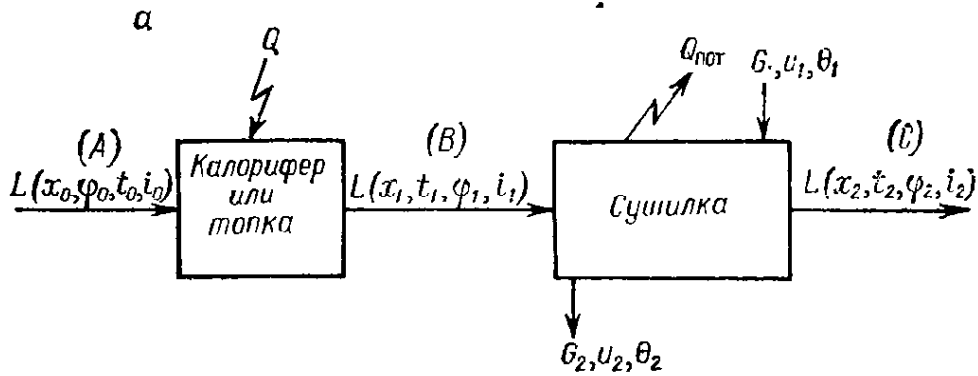


Рис. 4. Нормальный сушильный вариант (теоретическая сушилка):

а — схема установки с обозначениями параметров; б — изображение процесса на диаграмме $i-x$;

ABC — сушка нагретым воздухом; $AB'C'$ — сушка топочными газами.

AB — нагревание воздуха в калорифере (процесс идет при постоянном значении x); BC — процесс сушки, который для так называемой «теоретической сушилки» (сушилки без потерь) идет при постоянной энтальпии ($i_1 = i_2$); AB' — изменение влагосодержания газов в топке ($x_1 > x_0$); $B'C'$ — процесс сушки.

Объемный расход газов можно найти следующим образом:

$$V = L/\rho = Lv \tag{10}$$

где ρ — плотность газов, кг/м³; v — удельный объем, м³/кг (см. табл. 3).

Пример 5. Определить расход воздуха и его температуру на входе в сушилку при испарении в ней 1000 кг влаги в 1 ч. Состояние атмосферного воздуха (до калорифера): $t_0 = 15^\circ\text{C}$, $\varphi_0 = 80\%$; состояние воздуха на выходе из сушилки: $t_2 = 44^\circ\text{C}$, $\varphi_2 = 50\%$.

Решение. Массовый расход воздуха определяем по соотношению (8), а удельный расход воздуха — по формуле (9), для чего из диаграммы $i-x$ (рис. 1) находим: $x_0 = 0,01$ кг/кг влаги, $x_2 = 0,032$ кг/кг влаги. Тогда $l = 1/(0,032 - 0,01) = 45,5$ кг сухого воздуха/кг влаги, а $L = Wl = 1000 \cdot 45,5 = 45\,500$ кг сухого воздуха/ч. Иллюстрация к примеру дана на рис. 5.

Объемный расход определяем по уравнению (10). Удельный объем влажного воздуха v_2 , выходящего из сушилки (при $t_2 = 44^\circ\text{C}$ и $\varphi_2 = 50\%$), будет равен $0,965$ м³/кг. Следовательно

$$V = Lv_2 = 45\,500 \cdot 0,965 = 44\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$$

[В табл. 3 отсутствуют данные для $t = 44^\circ\text{C}$ и $\varphi = 50\%$, поэтому необходимо интерполировать имеющиеся значения. Для этого выпишем ближайшие данные при 40 и 60 °C. Для $t = 40^\circ\text{C}$: при $\varphi = 40\%$ $v = 0,933$ м³/кг; при $\varphi = 60\%$ $v = 0,947$ м³/кг. Тогда при $\varphi = 50\%$ $v = (0,933 + 0,947)/2 = 0,94$ м³/кг. Для $t = 60^\circ\text{C}$: при $\varphi = 40\%$ $v = 1,05$ м³/кг; при $\varphi = 60\%$ $v = 1,09$ м³/кг. Тогда при $\varphi = 50\%$ $v = (1,05 + 1,09)/2 = 1,07$ м³/кг. При изменении температуры с 40 до 60 °C, т. е. на 20 °C, удельный объем влажного воздуха изменился на $1,07 - 0,94 = 0,13$ м³/кг. Так как нам надо найти плотность при 44 °C, т. е. при температуре, отличающейся от $t = 40^\circ\text{C}$ на 4 °C, то к значению удельного объема 0,94 кг/м³ необходимо прибавить величину $4 \cdot 0,13/20 = 0,025$ кг/м³. Окончательно получим удельный объем $0,965$ м³/кг.]

Объемный расход влажного воздуха, уходящего из сушилки, необходимо знать при подборе вытяжного вентилятора.

Температуру поступающего в сушилку воздуха (после калорифера) находим следующим образом. Из точки A проводим вертикаль до пересечения с линией $i_1 = i_2 = 130$ кДж/кг, проходящей через точку C (энтальпией выходящего из сушилки воздуха). Пересечение этих линий даст точку B , характеризующую состояние воздуха, выходящего из калорифера и поступающего в сушилку. Найденная таким образом температура равна $t_1 = 100^\circ\text{C}$.

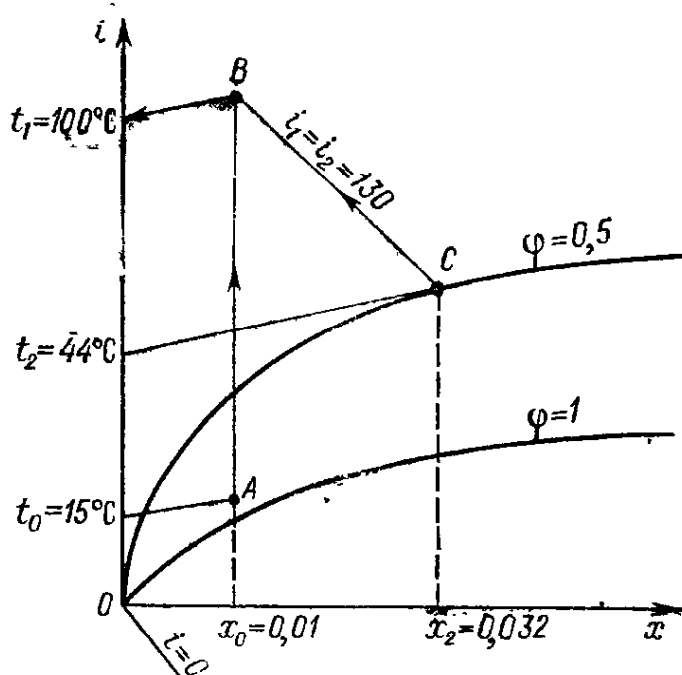


Рис. 5. К примеру 5.

РАСХОД ТЕПЛОТЫ

Расход теплоты при конвективной сушке рассчитывают по уравнению:

$$Q = Q_{y.r} + Q_{mat} + Q_{тр} - Wc_{в}\theta_1 + Q_{пот} \quad (11)$$

Здесь $Q = L(i_1 - i_0)$ — количество теплоты, затраченное на нагрев воздуха или содержащееся в топочных газах (i_1 — энтальпия теплоносителя, поступающего в сушилку; i_0 — энтальпия атмосферного

воздуха); $Q_{y.r} = L(i_2 - i_0)$ — количество теплоты в уходящем из сушилки теплоносителе (i_2 — энтальпия уходящих газов); $Q_{\text{мат}} = G_2 c_2 (\theta_2 - \theta_1)$ — количество теплоты, расходуемое на нагревание материала (G_2 — производительность сушилки по высушенному материалу; c_2 — теплоемкость высушенного материала; θ_1 и θ_2 — температуры поступающего и высушенного материала, соответственно); $Q_{\text{тр}} = G_{\text{тр}} c_{\text{тр}} (\theta_2 - t_0)$ — потери теплоты с транспортирующими устройствами ($G_{\text{тр}}$ — масса транспортирующих устройств, $c_{\text{тр}}$ — их теплоемкость); $c_{\text{в}}$ — теплоемкость воды; $Q_{\text{пот}}$ — потери теплоты в окружающую среду, принимаемые обычно равными 5—7% от общего расхода теплоты Q .

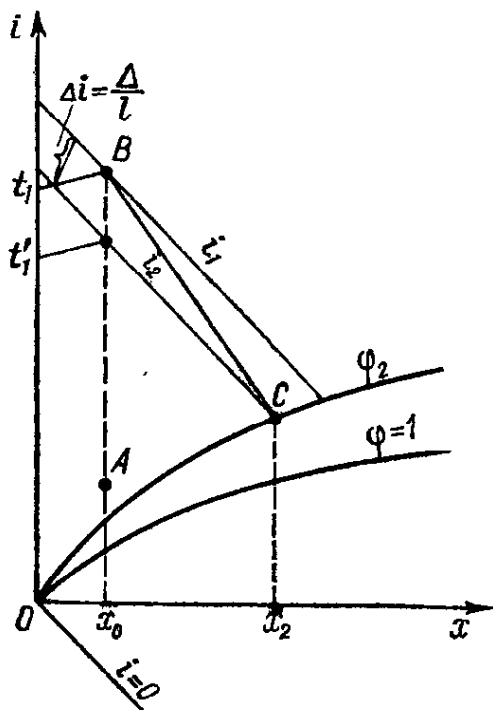


Рис. 6. Изображение процесса в реальной сушилке.

Δ. Тогда после несложных преобразований, учитывая, что $l = L/W$, получим:

$$\Delta i = i_1 - i_2 = \Delta/l$$

Часто величину Δ/l оценивают в 8—10% от i_2 . Тогда, зная i_2 , можно определить i_1 (рис. 6). Действительный процесс сушки изобразится на диаграмме $i - x$ прямой BC . При $\Delta = 0$, $i_1 = i_2$ — сушилка теоретическая.

Удельный расход теплоты q (на испарение 1 кг влаги):

$$q = \frac{Q}{W} = \frac{L}{W} (i_1 - i_0) = l (i_1 - i_0) = \frac{i_1 - i_0}{x_2 - x_0} \quad (13)$$

Пример 6. В условиях предыдущего примера найти часовой и удельный расходы теплоты, температуру поступающего в сушилку воздуха, если $\Delta/l = 10\%$ от i_2 , и сравнить их с полученными ранее значениями.

Решение. Сначала определим энтальпию воздуха, поступающего в сушилку: $i_1 = 1, i_2 = 1,1 \cdot 130 = 143$ кДж/кг; $i_0 = 43$ кДж/кг. Удельный расход воздуха не изменится (x_2 и x_0 остались прежними), поэтому удельный расход теплоты будет равен $q = l(i_1 - i_0) = 45,5(143 - 43) = 4550$ кДж/кг влаги. Для теоретической сушилки $q_{\text{т}} = l(i_2 - i_0) = 45,5(130 - 43) = 3950$ кДж/кг влаги.

Часовой расход теплоты:

$$Q = Wq = 1000 \cdot 4550 = 455 \cdot 10^4 \text{ кДж/ч, или } 1260 \text{ кВт}$$

Температуру поступающего в сушилку воздуха t_1 найдем по диаграмме $i-x$ (рис. 1) для $x_0 = 0,01$ и $i_1 = 143$. Она равна 112°C , т. е. на 12°C выше, чем для теоретической сушилки.

МЯГКИЕ УСЛОВИЯ СУШКИ

В тех случаях, когда высушиваемый материал портится при высоких температурах, стремятся к созданию более мягких условий сушки — либо подмешиванием к атмосферному воздуху

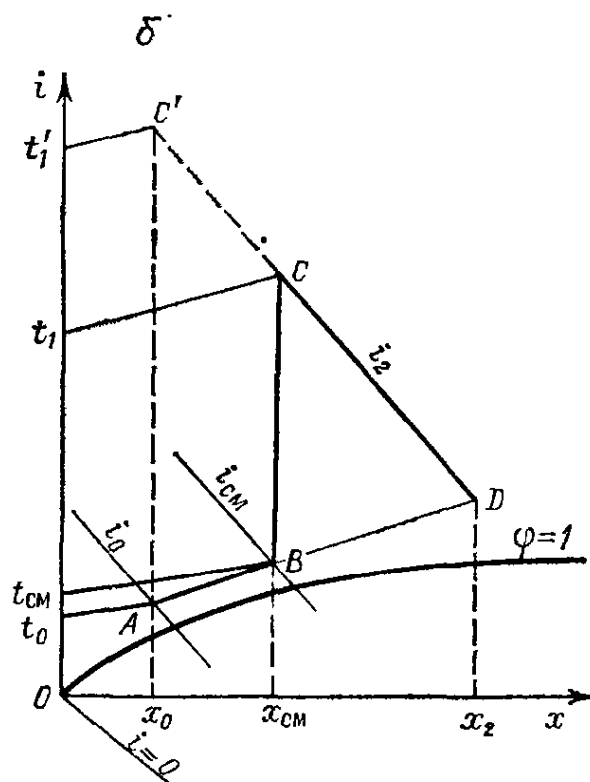
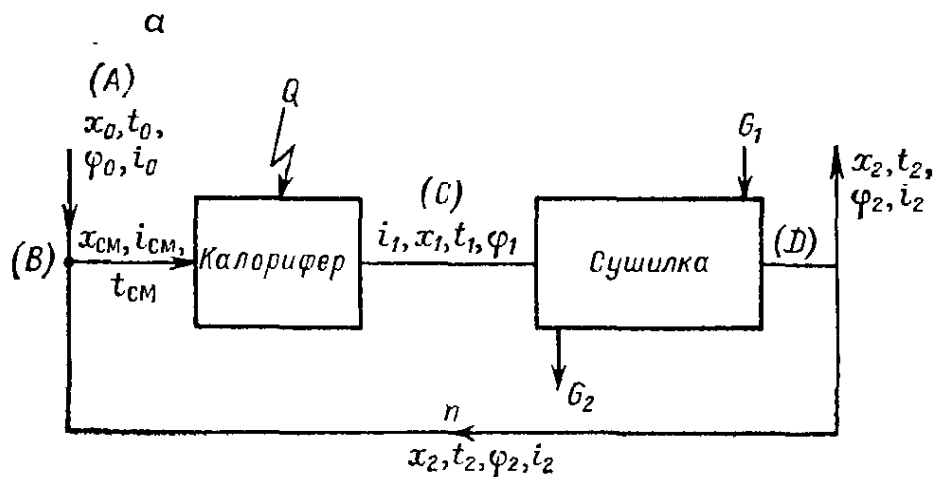


Рис. 7. Сушильный вариант с рециркуляцией:

а — схема установки с обозначением параметров; б — изображение процесса на диаграмме $i-x$.

части уже отработанного воздуха (так называемый сушильный вариант с рециркуляцией), либо проводя ступенчатый подогрев воздуха.

Вариант с рециркуляцией. Схема установки представлена на рис. 7, а, а изображение процесса в $i-x$ диаграмме дано на рис. 7, б; AB — смешивание; BC — подогрев смеси в калорифере;

CD — сушка. Для сравнения показан также нормальный вариант сушки ($AC'D$), причем температура по этому варианту значительно выше, чем при использовании рециркуляции ($t'_1 > t_1$). Параметры смеси рассчитываются по уравнениям:

$$x_{см} = \frac{x_0 + nx_2}{1 + n} \quad (14)$$

$$i_{см} = \frac{i_0 + ni_2}{1 + n} \quad (15)$$

где n — количество возвращаемого в сушилку отработанного воздуха, приходящееся на 1 кг атмосферного воздуха.

Из рис. 7, б следует, что при работе с рециркуляцией влагосодержание поступающего в сушилку воздуха больше, т. е. $x_{см} > x_0$. Удельные расходы воздуха и теплоты не изменились, так как они определяются лишь начальными и конечными параметрами воздуха.

Пример 7. В условиях примера 5 определить температуру и влагосодержание поступающего в сушилку воздуха, если $n = 4$.

Решение. Рассчитываем параметры смеси (точка B) по уравнениям (14) и (15):

$$x_{см} = (0,01 + 4 \cdot 0,032)/5 = 0,0276 \text{ кг/кг влаги}$$

$$i_{см} = (43 + 4 \cdot 130)/5 = 112 \text{ кДж/кг влаги}$$

Для определения температуры воздуха t_1 строим процесс на диаграмме $i-x$. Оказывается, что температура $t_1 = 56^\circ\text{C}$ (рис. 8), т. е. значительно ниже,

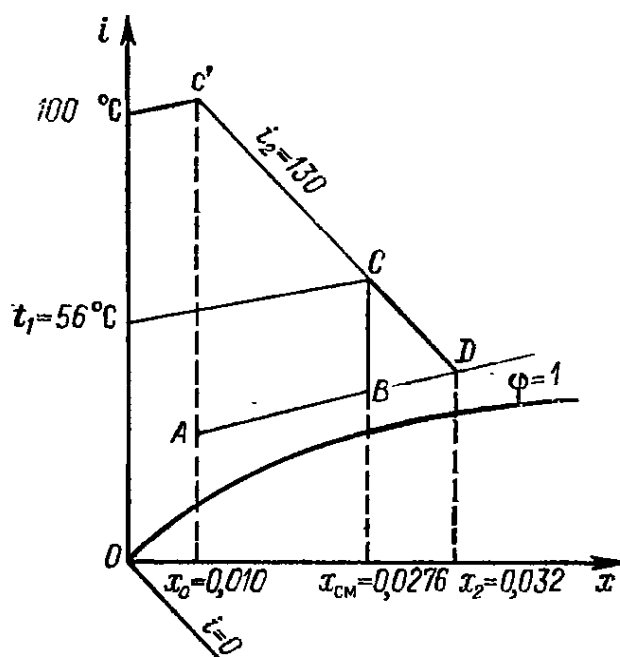


Рис. 8. К примеру 7

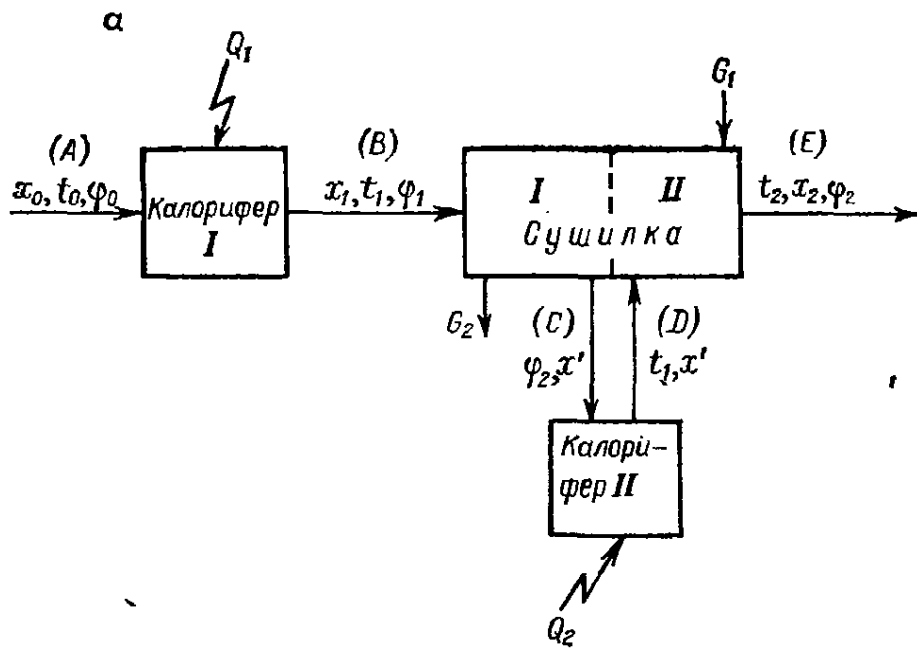
чем при работе по нормальному сушильному варианту, когда необходимо было подогреть воздух до 100°C . Расход атмосферного воздуха не изменился, но расход воздуха (смеси), проходящего через калорифер, стал значительно больше:

$$l_{см} = 1/(x_2 - x_{см}) = 1/(0,032 - 0,0276) = 227 \text{ кг/кг влаги}$$

$$L_{см} = Wl_{см} = 1000 \cdot 227 = 227\,000 \text{ кг/ч}$$

Расход атмосферного воздуха составляет $227\,000/5 = 45\,500 \text{ кг/ч}$.

Вариант со ступенчатым подогревом воздуха. Схема установки показана на рис. 9,а, а изображение процесса дано на рис. 9,б. При работе по такому варианту в установке имеется несколько ка-



б

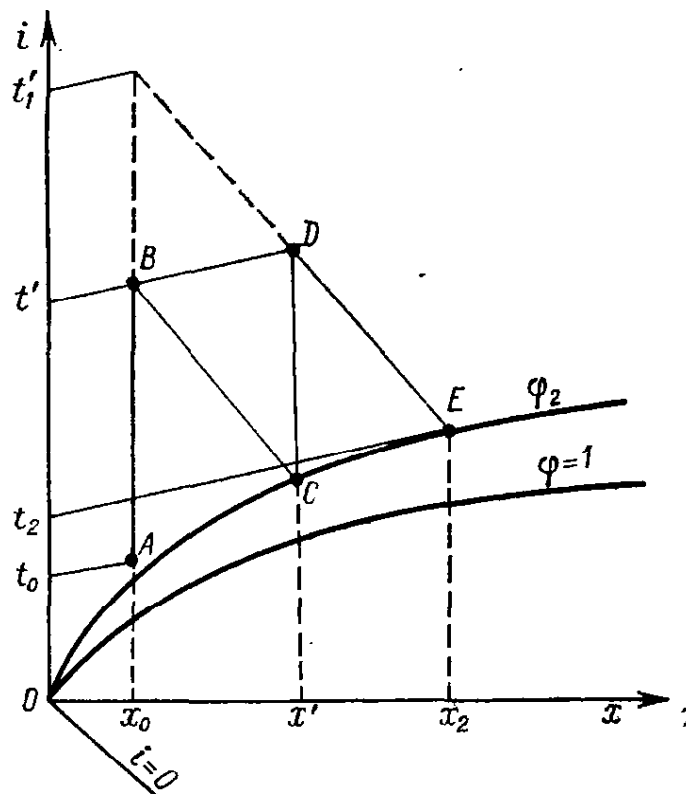


Рис. 9. Сушильный вариант с промежуточным подогревом: а—схема установки с обозначением параметров; б—изображение процесса на диаграмме $i-x$.

лориферов (на схеме показаны два). Атмосферный воздух подогревается в первом калорифере (АВ), затем увлажняется при подсушке влажного материала в первой части сушилки (ВС), вторично подогревается во втором калорифере (СД) и увлажняется

при досушке материала во второй части сушилки (DE). По сравнению с нормальным сушильным вариантом, изображенным на том же рис. 9, температура поступающего в сушилку воздуха ниже, т. е. создаются более мягкие условия сушки. Расходы воздуха и теплоты не изменились, но, поскольку процесс сушки по обоим вариантам (с рециркуляцией и промежуточным подогревом) менее интенсивен, размеры сушилок в этих случаях больше.

ТЕПЛОВОЙ КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

Теоретический коэффициент полезного действия (к. п. д.) конвективной сушилки (без учета потерь теплоты в окружающую среду) определяют из выражения:

$$\eta_{\text{т}} = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_c}$$

где t_1 и t_2 — температура поступающего и уходящего теплоносителя, соответственно; t_c — температура окружающей среды. Очевидно, что $\eta_{\text{т}}$ тем больше, чем выше t_1 и ниже t_2 .

Действительный к. п. д. составляет обычно 0,8—0,9 от теоретического и рассчитывается по соотношению:

$$\eta = r/q$$

где r — теплота парообразования, определяемая при давлении в сушильной камере; q — удельный расход теплоты.

Пример 8. В условиях примера 5 определить тепловой к. п. д. теоретической сушилки.

Решение. По табл. 1 находим $r = 2260$ кДж/кг. Удельный расход теплоты $q = 3950$ кДж/кг влаги. Следовательно

$$\eta = 2260/3950 = 0,57, \text{ или } 57\%$$

При контактной сушке требуется меньше теплоты, так как отсутствуют тепловые потери с уходящими из сушилки газами.

ХОД ПРОЦЕССА СУШКИ

С течением времени влагосодержание высушиваемого материала уменьшается и изменяется его температура (рис. 10, a). Процесс сушки складывается из двух этапов: испарения влаги с поверхности материала и перехода (диффузии) влаги из внутренних слоев к поверхности. Скорость процесса лимитируется наиболее медленным из этих этапов.

В ходе процесса сушки различают три следующих друг за другом периода: период подогрева материала (на рис. 10,а не показан), первый (AB) и второй (BC) периоды сушки.

В первый период сушки влага испаряется с поверхности материала, поскольку она подводится из внутренних слоев в таком количестве, что поверхность остается влажной (подвод из крупных пор). Температура материала в течение этого периода остается постоянной и близка к температуре мокрого термометра (A'B'). Скорость сушки (количество испаренной влаги в расчете на 1 кг абсолютно сухого материала в единицу времени) в этот период тоже постоянна и имеет наибольшее значение (участок AB на рис. 10,б).

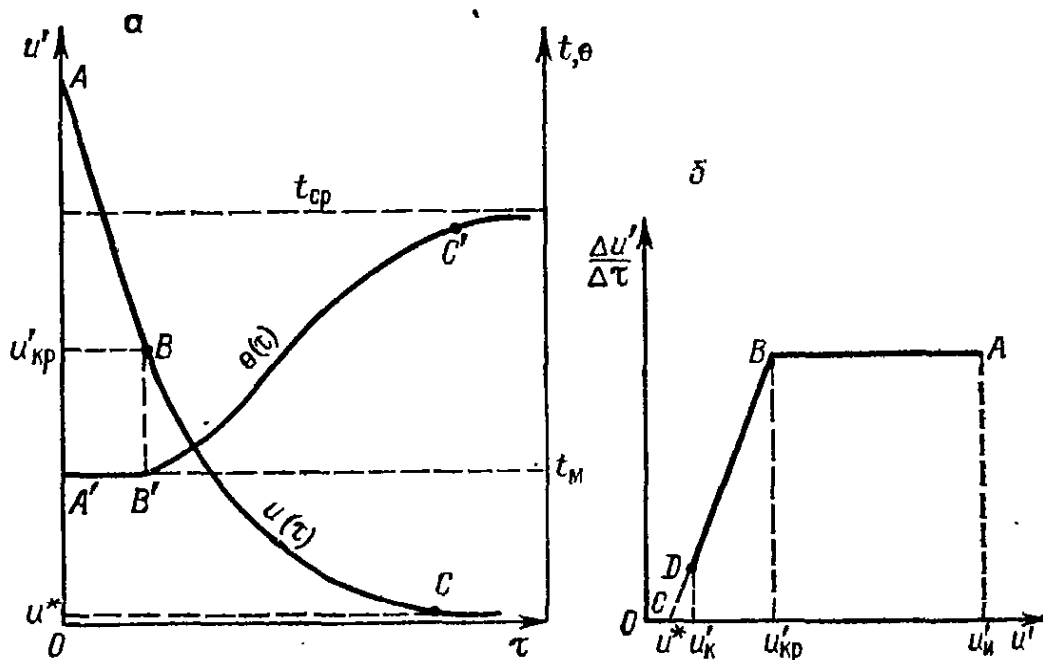


Рис. 10. Кривые сушки:

а — зависимость влагосодержания u' (ABC) и температуры материала θ (A'B'C') от времени τ (t_{cp} — температура среды); б — зависимость скорости сушки от влагосодержания.

Во втором периоде сушки, который начинается с момента достижения критического влагосодержания $u'_{кр}$, скорость процесса определяется скоростью перемещения влаги из внутренних слоев к поверхности; скорость сушки непрерывно падает, пока не достигнет равновесного влагосодержания u^* , и тогда процесс прекращается. Температура материала в этот период непрерывно повышается и к моменту достижения u^* приближается к температуре окружающей среды (температуре воздуха — при конвективной сушке, температуре греющей поверхности — при контактной сушке).

Важно отметить, что даже при высоких температурах теплоносителя в первом периоде сушки температура материала не намного превышает температуру мокрого термометра. Это позволяет, как будет видно из дальнейшего, высушивать термочувствительные материалы при высоких температурах при условии,

что досушка будет производиться теплоносителем со значительно более низкой температурой во избежание перегрева продукта.

Продолжительность процесса сушки может быть рассчитана по уравнению:

$$\tau = \frac{1}{N} \left[(u'_n - u'_{кр}) + (u'_{кр} - u^*) \ln \frac{u'_{кр} - u^*}{u'_к - u^*} \right]$$

где N — скорость сушки в первом периоде; $u'_n, u'_{кр}, u'_к, u^*$ — начальное, критическое, конечное и равновесное влагосодержание материала, соответственно.

Обычно $u'_{кр}, u^*$ и N определяют экспериментально, а u'_n и $u'_к$ заданы.

СУШИЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

Используемые в химической промышленности сушилки можно разделить в основном на контактные, в которых обогрев высушиваемого материала производится насыщенным водяным паром (реже горячей водой) через стенку, и конвективные (газовые), в которых теплота передается высушиваемому материалу при непосредственном соприкосновении с нагретым газообразным теплоносителем (воздухом или топочными газами).

КОНТАКТНЫЕ СУШИЛКИ

Контактные сушилки делятся на периодически- и непрерывнодействующие. Из периодическидействующих сушилок наиболее распространены в химической промышленности вакуум-сушильные шкафы и гребковые вакуум-сушилки, а из непрерывнодействующих — двухвальцовые атмосферные и вакуумные сушилки, а также одновальцовые формующие сушилки (последние являются первой ступенью вальцово-ленточных сушилок — см. стр. 41).

Высушивание при пониженном (по сравнению с атмосферным) давлении в замкнутом пространстве (под вакуумом) используется в тех случаях когда материал чувствителен к высоким температурам или окисляется; применяется оно также для увеличения скорости процесса сушки. При сушке под вакуумом возможна рекуперация летучих растворителей путем конденсации их паров и последующего использования конденсата в технологическом процессе.

Вакуум-сушильные шкафы

Такие аппараты давно используются в химической промышленности, однако в последнее время вытесняются более высокопроизводительными сушилками непрерывного действия и сохранились только в малотоннажных производствах.

Установка состоит из герметически закрывающейся сушильной камеры (шкафа цилиндрической или прямоугольной формы), снабженной рядом горизонтальных полых греющих плит, внутрь которых подводится пар или горячая вода. Противни с высушиваемым

материалом помещают на греющие плиты. Пары влаги (из материала) и воздух, поступающий через неплотности, отводятся из камеры в конденсатор, из которого воздух откачивается вакуум-насосом.

В установках с барометрическим конденсатором греющий пар подается в верхнюю часть шкафа, конденсат стекает через конденсатоотводчик и направляется в сборник, откуда по мере заполнения перекачивается в котельную, где используется для питания паровых котлов. Испарившаяся из материала влага частично конденсируется внутри шкафа, конденсат стекает по внутренним стенкам и отводится после окончания процесса сушки. Основное количество паров направляется в барометрический конденсатор, в верхнюю часть которого подается вода. Конденсат вместе с охлаждающей водой стекает по барометрической трубе в сборник и оттуда в канализацию. Несконденсировавшиеся газы (воздух) проходят брызгоуловитель, спускная линия от которого подведена к барометрической трубе, а освобожденный от брызг воздух откачивается вакуум-насосом.

Вакуум-сушильный шкаф показан на рис. 11. Чугунный цилиндрический корпус 1 состоит из двух половин, скрепленных между собой болтами. Внутри шкафа установлены четыре вертикальные паровые коллектора, два из которых (2), расположенные с одной стороны шкафа, служат для подачи греющего пара, а два других (3), помещающиеся на другой стороне шкафа, предназначены для отвода конденсата греющего пара. Полые греющие плиты 4 имеют внутри ряд перегородок. Греющий пар проходит внутри плит длинный извилистый путь, что способствует равномерному обогреву. Плиты поддерживаются вертикальными стойками 5. Пары влаги уходят через штуцер 6, а конденсат стекает через штуцер 7. С торцов шкаф оборудован крышками 8. Для сообщения с атмосферой служит кран 9. Крышки шкафа закрываются откидными болтами, которые входят в специальные вырезы, имеющиеся в крышке, и прижимают ее к наружным фланцам шкафа посредством резиновых прокладок. Для уменьшения потерь теплоты в окружающее пространство корпус и крышки шкафа покрывают слоем изоляции толщиной 40—50 мм.

Перед загрузкой шкафа необходимо щеткой очистить поверхность греющих плит. Через каждые 8—10 операций сушки, а также при переходе с одного материала на другой, плиты моют горячей водой. Пар в греющие плиты надо пускать медленно, отводя сначала конденсат через обводную линию конденсатоотводчика (при быстром пуске пара может быть разорвана греющая плита!). После спуска всего конденсата из греющих плит (что устанавливается при помощи контрольного вентиля у конденсатоотводчика) открывают полностью паровой вентиль, закрывают вентиль на обводной линии конденсатоотводчика и начинают загружать влажный материал. В первую очередь загружают верхние плиты. Перед тем как закрыть шкаф, смазывают резиновую прокладку графитовым маслом. Закрыв шкаф и повернув крышки болтами,

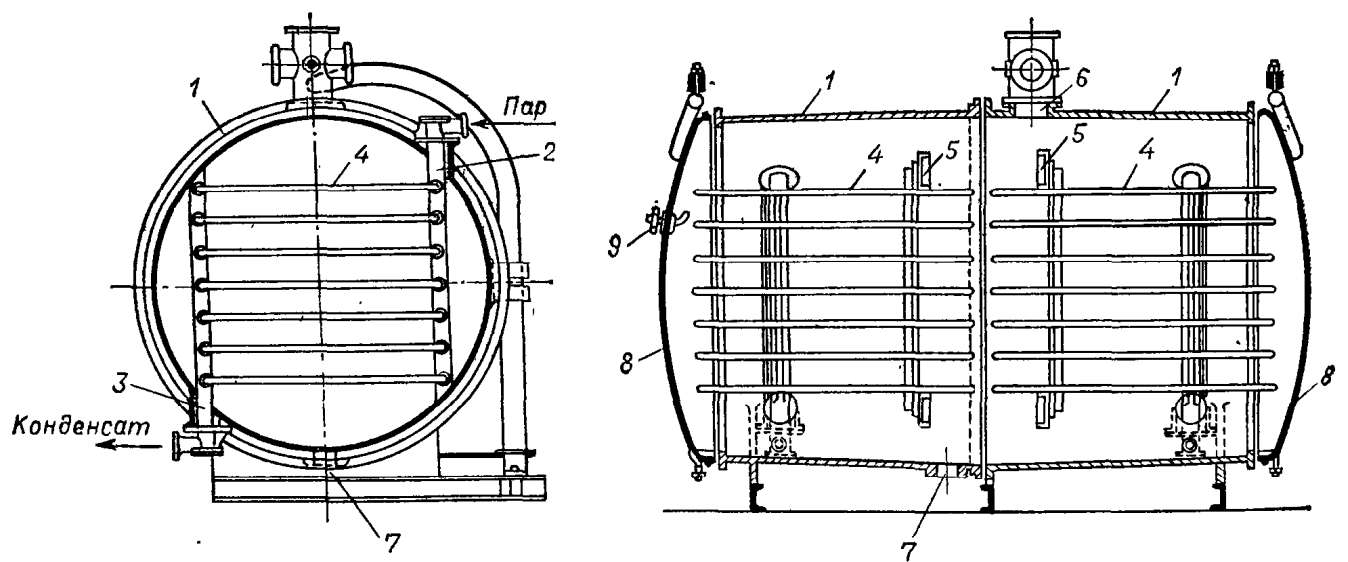


Рис. 11. Вакуум-сушильный шкаф:

1—корпус; 2, 3—паровые коллекторы; 4—греющие плиты; 5—стойки; 6, 7—штуцеры; 8—крышка; 9—воздушный кран.

закрывают воздушный кран на крышке, открывают задвижку на вакуумной линии и по показаниям вакуумметра наблюдают за увеличением разрежения в сушильной камере. Когда разрежение установится на заданном уровне (не ниже 66,6 кПа, т. е. 500 мм рт. ст.), пуск установки можно считать законченным.

В течение процесса сушки необходимо следить за тем, чтобы температура греющих плит не превышала значения, установленного для данного материала. Регулирование температуры достигается изменением давления греющего пара, подаваемого в плиты. Во избежание разрыва плит давление греющего пара не должно превышать 0,3 МПа, т. е. 3 кгс/см² (по манометру).

Разрежение в шкафу должно быть возможно выше, так как с его увеличением скорость процесса сушки возрастает. При падении разрежения необходимо тщательно проверить герметичность шкафа и вакуумной линии и принять меры к устранению неплотностей.

Температура воды в барометрической трубе равна 30—40 °С. При повышении или понижении температуры необходимо отрегулировать подачу воды в конденсатор при помощи вентиля на водопроводной линии.

Необходимо следить за состоянием высушиваемого материала во время сушки, чтобы он не расплавился, не перелился при вскипании через борта противней и т. д. Для этого шкаф периодически открывают. Если на высушиваемом материале образуется плотная корка, то для ускорения сушки его надо перелопачивать на противнях.

Конец сушки обычно устанавливают, определяя сухость материала на ощупь. Наиболее точным и удобным способом определения конца процесса сушки в вакуум-шкафу является наблюдение за температурой материала при помощи небольшой термопары, введенной в слой высушиваемого материала, и сравнение этой температуры с температурой пара в плитах (по давлению греющего пара). К концу процесса температура материала приближается к температуре пара (см. рис. 10, а), а при полном его высушивании остается постоянной.

По окончании сушки закрывают вентиль на линии, подводящей греющий пар к плитам, отключают шкаф от вакуумной линии и выпускают в него воздух через кран в крышке, открывают крышку и отводят ее в сторону. Противни выгружают из шкафа вручную, начиная с нижней плиты, и укладывают на вагонетку. После охлаждения ссыпают высушенный материал в тару.

Сушка в вакуум-сушильных шкафах продолжается десятки часов. Тепловой к. п. д. равен в среднем 80% (теплота, расходуемая на подогрев материала и оборудования, считается полезно затраченной). Количество влаги, удаляемое с 1 м² греющей поверхности (напряжение сушилки по выпаренной влаге), в зависимости от физико-химических свойств материала составляет 0,5—1,5 кг/ч.

Установки с поверхностным конденсатором используют преимущественно при высушивании от летучих растворителей с целью их последующего возвращения в производство.

Преимущества вакуум-сушильных шкафов по сравнению с другими типами сушилок: 1) возможность одновременной сушки нескольких материалов, причем количество каждого материала может быть весьма небольшим; 2) небольшой унос высушиваемого материала с отходящими из сушилки влагой и воздухом; 3) сравнительная легкость чистки при переходе с одного материала на другой.

К недостаткам вакуум-сушильных шкафов можно отнести следующие: 1) периодичность работы и в связи с этим большую затрату времени на загрузку и выгрузку материала; 2) низкую производительность; 3) необходимость применения ручного труда.

Гребковые вакуум-сушилки

Схема установки дана на рис. 12. Пары влаги из сушилки 1 поступают в мокрую ловушку 2 с барометрической трубой. Отсюда очищенные от пыли пары направляются в барометрический конденсатор 3. Воздух из конденсатора отделяется от брызг в ловушке 4 и отсасывается вакуум-насосом 5.

Сушилка (рис. 13) имеет стальной барабан 1 (толщина стенок 16 мм), снабженный паровой рубашкой (толщина стальных стенок 9 мм). Расстояние между стенками барабана и рубашки 20 мм. Снаружи рубашка покрыта слоем изоляции толщиной 40 мм. Греющий пар поступает в рубашку сверху через штуцеры 5. Конденсат удаляется снизу через штуцеры 6. Для выпуска воздуха из рубашки при прогреве ее паром служат два отверстия с кранами.

В торцевых стенках барабана устроены лазы с крышками, через которые можно попасть в сушилку во время ремонта, а также повесить на цепях вал мешалки при разборке аппарата.

Высушиваемый материал загружают в сушилку через верхний люк 4 и плотно закрывают ее крышкой, висящей на кронштейне. Пары влаги удаляются по трубе, подведенной сбоку к загрузочному штуцеру. Высушенный материал выгружают через нижний люк 8, который закрывают специальным клапаном 7, расположенным заподлицо с внутренней поверхностью барабана.

Торцевые стенки барабана имеют один или два смотровых люка.

Вал 2 пропущен сквозь отверстия с сальниками в торцевых стенках барабана. Со стороны привода вал вращается в подшипнике, расположенном на стойке. С противоположной стороны барабана подшипник устанавливается в торцевой стенке. На валу насажены 42—43 чугунные лопасти 3. Частота вращения вала 8 об/мин. Вращение вала передается от электродвигателя через червячную передачу и две цилиндрические шестерни. Между лопастями мешалки свободно положены четыре стальные трубы (скалки), закрытые с концов. Трубы при вращении мешалки свободно перекатываются, способствуя лучшему перемешиванию и измельчению высушиваемого материала.

Лопастями расположены с некоторым наклоном по отношению к оси вала. В результате при вращении вала в одну сторону

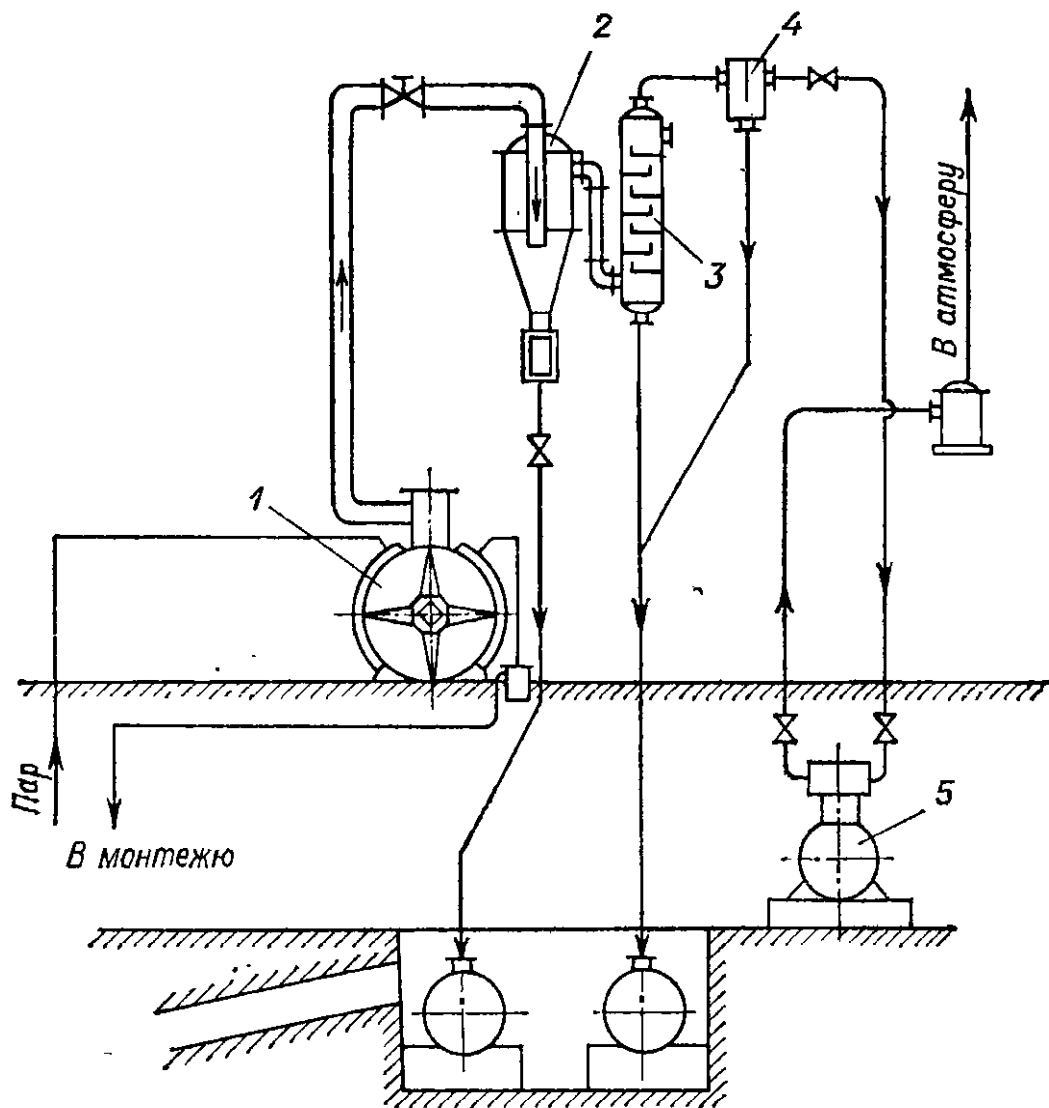


Рис. 12. Схема сушильной установки с вакуум-гребковой сушилкой:
 1—сушилка; 2—мокрая ловушка; 3—барометрический конденсатор; 4—брызгоуловитель; 5—вакуум-насос.

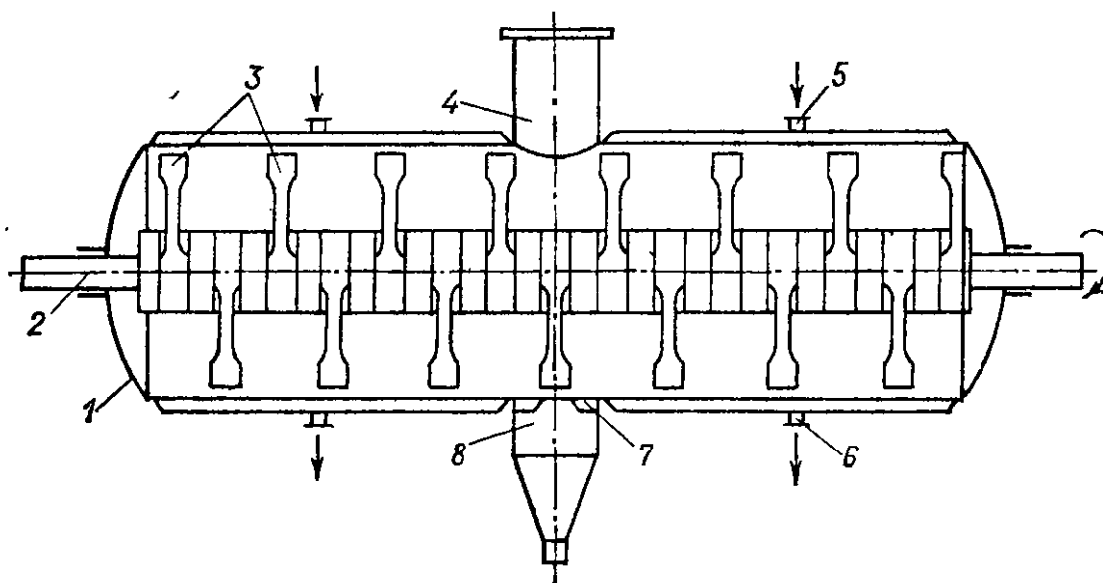


Рис. 13. Гребковая вакуум-сушилка:
 1—барабан с рубашкой; 2—вал; 3—лопасти; 4—загрузочный люк; 5—штуцеры для подачи греющего пара; 6—штуцеры для стока конденсата; 7—клапан; 8—выгрузочный люк.

высушиваемый материал передвигается в барабане от середины к торцевым стенкам, а при вращении в другую сторону — в обратном направлении, что целесообразно как в процессе сушки, так и при разгрузке высушенного материала.

Продолжительность вращения вала в одну сторону устанавливается автоматически с помощью пускового прибора. Вал вращается в течение 5 мин, затем следует остановка 20—25 с, после чего вал в течение 5 мин вращается в противоположную сторону, вновь останавливается и т. д.

Перед пуском установки после длительного перерыва в работе необходимо проверить герметичность всех частей установки. Для этого соединяют ее с вакуумной линией и наблюдают по вакуумметру за разрежением, которое должно быть не менее 80 кПа, т. е. 600 мм рт. ст. Плотность отдельных соединений (фланцев, лазов и т. д.) проверяют на слух по отсутствию свиста в них воздуха. После проверки герметичности установки и устранения неплотностей начинают прогрев аппарата. Сначала спускают вакуум, закрыв вентиль на вакуумной линии, и с помощью воздушного крана соединяют аппарат с атмосферой. Далее открывают крышку загрузочного люка и крышки на трубках для выпуска воздуха из паровой рубашки, а также вентиль на обводной линии конденсатоотводчика. Затем постепенно открывают вентиль на паровой линии, ведущей в рубашку барабана, при открытых воздушках на рубашке. Воздушки надо закрыть, когда из них покажется пар. Если при открывании пробного вентиля на обводной линии покажется пар, вентиль закрывают и включают в работу конденсатоотводчик. Прогрев аппарата нужно вести при неподвижной мешалке, так как в холодном состоянии лопасти слишком близко подходят к стенкам барабана и могут их задеть. После прогрева барабана пускают мешалку и начинают загрузку материала, следя за тем, чтобы материал не попадал на резиновую прокладку загрузочного люка. Во время загрузки паровой вентиль должен быть немного открыт. По окончании загрузки люк закрывают и включают вакуум, предварительно пустив охлаждающую воду на конденсатор и открыв задвижку на линии от сушилки к мокрой ловушке. Вакуум достаточен, если стрелка вакуумметра показывает 650—700 мм рт. ст. (86,6—93,3 кПа). При вакууме менее 66,6 кПа, т. е. 500 мм рт. ст., необходимо найти и устранить неплотности.

После включения вакуума давление пара в рубашке доводят до заданного, и этот момент считают началом сушки. В начале процесса в барабане слышится глухой звук от удара скалками по мягкой пасте. Постепенно при сушке образуются комки. По мере их измельчения и дальнейшей сушки материала звук от падения скалок становится более звонким, и по характеру этого звука можно судить об окончании процесса сушки.

В период образования комков двигатель работает с максимальной нагрузкой, поэтому во избежание перегорания предохранительных пробок следует на небольшое время выключить мешалку.

Температура выходящей из барометрического конденсатора воды должна быть равна 30—35 °С. Воду в мокрую ловушку надо наливать на 2—3 см выше дырчатого днища, по мере насыщения пылью спускать в отстойник и заменять свежей.

Во время сушки может произойти поломка лопастей. Чаще всего это происходит вследствие попадания в аппарат посторонних металлических предметов (болтов, гаек и т. д.) вместе с высушиваемым материалом. Посторонние предметы заклиниваются между стенкой барабана и лопастью, и хрупкая чугунная лопасть, несмотря на наличие предохранительных шпилек в приводе, иногда ломается. В этом случае надо остановить мешалку, выключить пар, разгрузить сушилку и поставить ее на ремонт.

К концу сушки отбирают пробу высушенного материала. С этой целью останавливают мешалку, спускают вакуум и открывают загрузочный люк. Влажность пробы определяют в лаборатории.

Для выгрузки высушенного материала необходимо открыть загрузочный люк и плотно прикрепить к нему воронку с рукавом, через который материал будет сыпаться в тару. По окончании выгрузки выключают мешалку, снимают воронку, щеткой очищают от пыли отверстие люка, закрывают внутренний клапан и приворачивают нижнюю наружную крышку.

При переходе с одного материала на другой необходимо тщательно удалить из сушилки и трубопроводов, а также мокрой ловушки остатки материала. Последнее достигается при продувании паром линии, идущей из сушилки к мокрой ловушке. Осевший в трубопроводе материал при этом увлажняется и сползает по стенкам трубы в сушилку. Затем сушилку тщательно моют, промывают трубопроводы и ловушку. Промывные воды необходимо вернуть в производство.

При обслуживании вакуум-гребковой сушилки должны быть соблюдены следующие правила.

1. Давление греющего пара на паровую рубашку не должно превышать 0,5 МПа (5 кгс/см²). Рубашка должна быть снабжена предохранительным клапаном и манометром. Во время сушки давление в рубашке надо поддерживать постоянным и не выше того, которое предусмотрено для данного материала.

2. Во время загрузки нужно следить за тем, чтобы в сушилку не попали посторонние предметы, особенно металлические.

3. Открывать люк надо только после того, как в аппарат через воздушный кран поступит атмосферный воздух.

4. При выгрузке аппарата необходимо пользоваться индивидуальными защитными устройствами от пыли.

5. Движущиеся части установки должны иметь ограждения.

Двухвальцовые атмосферные сушилки

Схема установки дана на рис. 14. Суспензия подается в напорный бак (объемом ~ 10 м³), снабженный стальной рамной мешалкой и стальным змеевиком для подогрева паром. Бак футе-

рован изнутри кислотоупорной плиткой. Из бака суспензия стекает в корыто барабанного фильтра 2. При переполнении корыта избыток суспензии по переливной линии стекает в стальной прямоугольный резервуар 4. Фильтрат отводится в цилиндрический вакуум-ресивер 5, откуда стекает в резервуар 4, а воздух отсасывается через барометрический конденсатор. Ресивер должен быть расположен примерно на 10 м выше резервуара во избежание обратного засасывания фильтрата из резервуара в вакуум-систему.

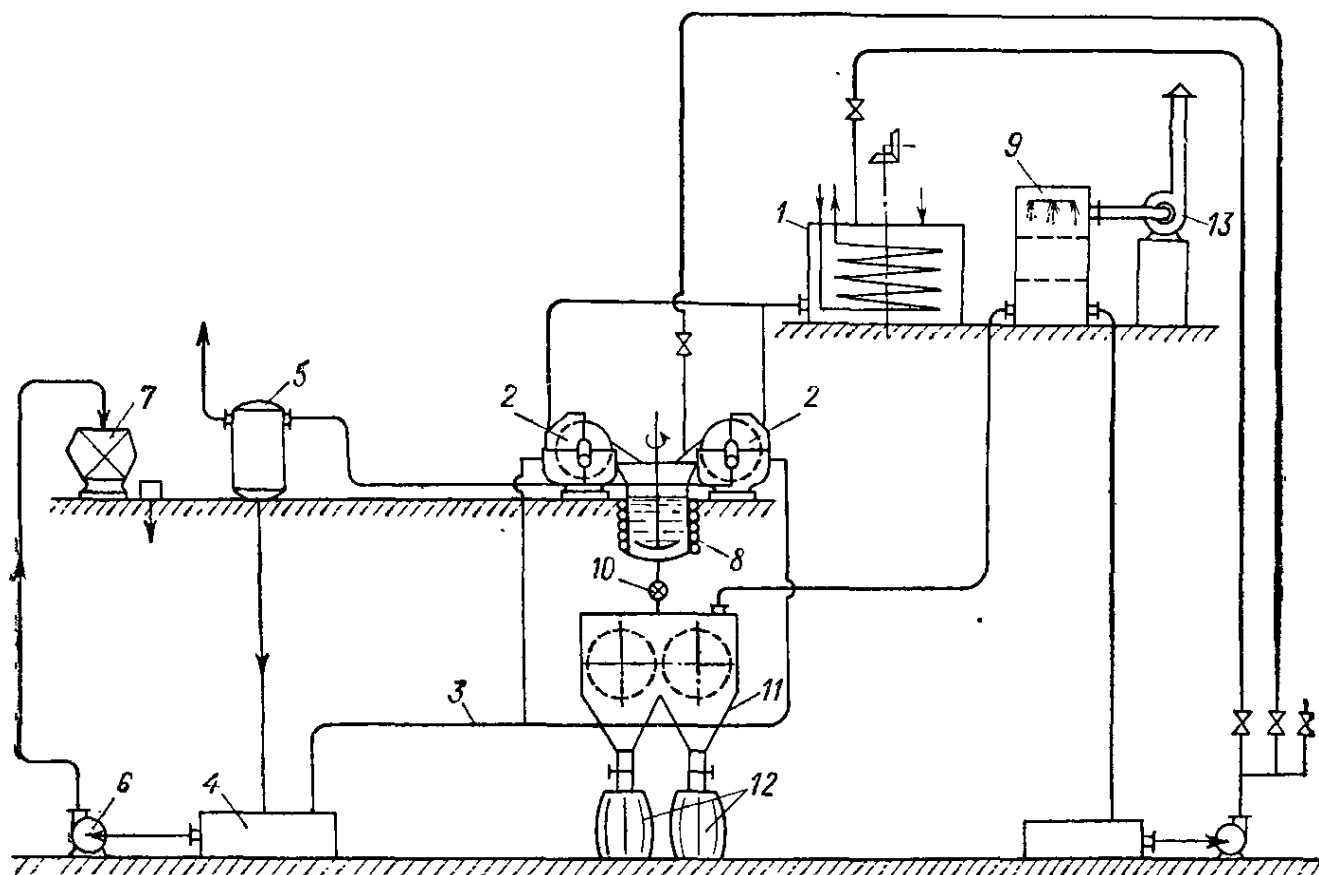


Рис. 14. Схема установки с двухвальцовой сушилкой:

1—напорный бак; 2—барабанный вакуум-фильтр; 3—трубопровод; 4—резервуар; 5—вакуум-ресивер; 6—насос; 7—фильтрпресс; 8—пастосмеситель; 9—скруббер; 10—питатель; 11—сушилка; 12—приемники; 13—вентилятор.

Жидкость из емкости 4 подается центробежным насосом 6 в фильтрпресс 7, где отделяются частицы, прошедшие через ткань барабанного вакуум-фильтра. Снятый ножами с поверхности барабана осадок сползает по наклонным лоткам в пастосмеситель 8, имеющий лопастную мешалку и змеевик для обогрева паром. Паста размешивается, подогревается и питателем 10 подается в двухвальцовую сушилку 11, откуда продукт в виде чешуек сыпается в тару 12.

Пары влаги отсасываются из кожуха сушилки вентилятором 13 и для очистки от пыли проходят через скруббер 9, имеющий насадку из керамических колец Рашига. Скруббер орошается сверху водой или раствором, поступающим из емкости. В эту же емкость стекает жидкость из скруббера. Такая циркуляция раствора продолжается до тех пор, пока концентрация вещества не станет достаточно высокой, после чего раствор подают либо в напорный

бак или в пастосмеситель, либо возвращают в цех. Обеспыленные газы выбрасываются в атмосферу по выхлопной трубе.

Двухвальцовая сушилка с досушивателями изображена на рис. 15. В кожухе 1 расположены вальцы 2 и 3, медленно вращающиеся (2—10 об/мин) навстречу друг другу. Сверху между вальцами непрерывно подается высушиваемый материал. Греющий пар поступает через полуцапфу внутрь каждого из вальцов, конденсат отводится через сифонную трубку 4. Ввод пара и вывод конденсата производятся со стороны, противоположной приводу 5. Вальцы могут также обогреваться горячей водой или высокотемпературными органическими теплоносителями.

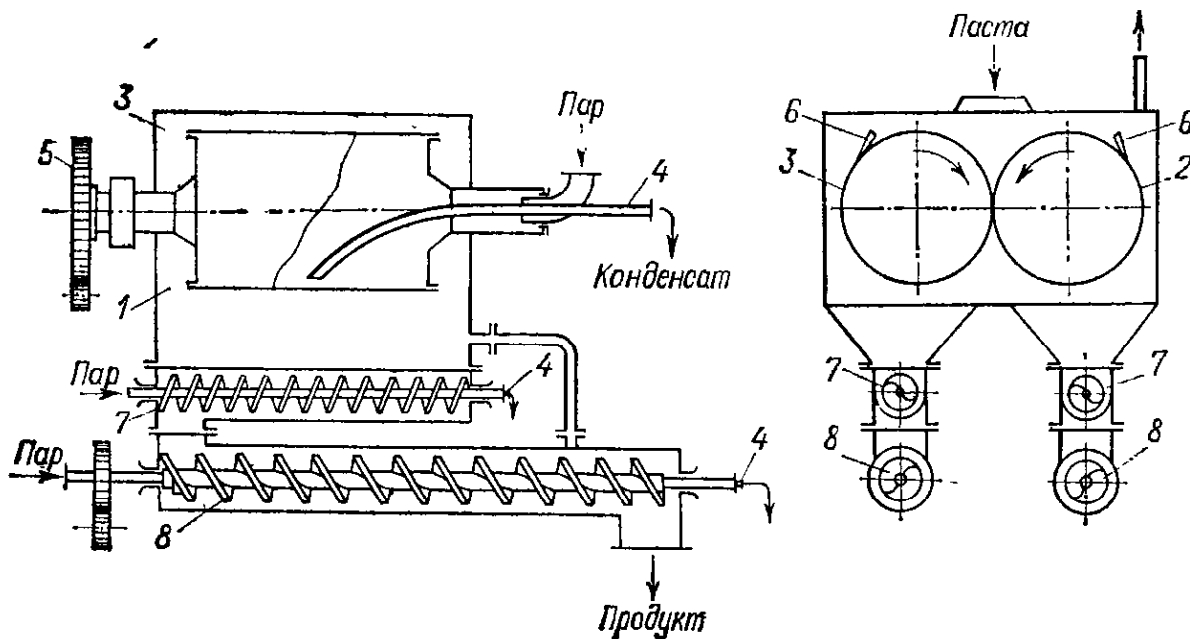


Рис. 15. Двухвальцовая сушилка:

1—кожух; 2—ведомый полый валец на подвижных подшипниках; 3—ведущий полый валец; 4—сифонные трубки; 5—привод; 6—ножи; 7—верхние досушиватели; 8—нижние досушиватели.

Материал покрывает поверхность вальцов тонкой пленкой. Толщина пленки определяется величиной зазора между вальцами, которая обычно не превышает 0,5—1 мм и регулируется путем перемещения ведомого вальца 2. Материал высушивается в течение неполного оборота вальцов и снимается ножами 6, расположенными вдоль образующей каждого вальца. Досушка материала проводится в горизонтальных лотках с паровым обогревом (досушивателях), в которых вращаются валы с гребками.

Перед пуском сушилки убеждаются в отсутствии посторонних предметов между вальцами и проверяют ширину зазора. Затем пускают вальцы, проверяют правильность установки ножей, приводят в действие обе пары досушивателей, включают вентилятор и начинают разогревать вальцы, постепенно пуская в них пар, и в течение 1 ч доводят давление до заданного. Одновременно пускают пар в досушиватели. Затем подают воду или раствор на орошение скруббера, включают в работу дозатор пастосмесителя и подают пасту на вальцы.

При необходимости остановки сушилки закрывают кран на линии подачи пасты на вальцы и останавливают дозатор. После того

как закончится сушка находящегося между вальцами материала, закрывают подачу пара на вальцы и останавливают их. Работа досушивателей продолжается еще 15—20 мин с момента остановки вальцов.

Для обеспечения нормальной работы установки необходимо следить за чистотой воздухопроводов, бункеров и стенок корыт досушивателей.

Влагодсьем для таких сушилок составляет 10—15 кг/(м²·ч).

Двухвальцовые вакуум-сушилки

В одновальцовых сушилках в корыте вращается один полый обогреваемый валец. Под ним имеется питающее устройство с мешалкой, в котором материал тщательно перемешивается и наносится тонким слоем (толщиной 1—2 мм) на валец.

Вакуумные двухвальцовые сушилки устроены и работают так же, как атмосферные, но в них рабочие части находятся внутри герметичного кожуха, соединенного с установкой для создания вакуума.

Процесс контактной сушки может быть интенсифицирован применением более высокотемпературного теплоносителя — дифенильной смеси. При низких температурах для обогрева может быть применена горячая вода.

Перед пуском сушилки необходимо осмотреть через люки состояние поверхности вальцов и при наличии на них остатков продукта или других загрязнений тщательно их очистить, проворачивая вручную. Затем аппарат соединяют с линией вакуума и проверяют герметичность всех соединений. Величина разрежения должна быть не ниже 66,6 кПа (500 мм рт. ст.). Работу установки начинают с загрузки в приемник и разогрева пастообразного материала. При загрузке необходимо следить за тем, чтобы вместе с материалом в приемник не попали посторонние предметы.

При пуске пара в полости вальцов необходимо удалять воздух через отверстия в стенках, закрываемые ввинчивающимися пробками. Конденсат первое время спускают по обводной линии, а когда вальцы достаточно прогреваются, направляют его через конденсатоотводчик. Ножи устанавливают до пуска вальцов так, чтобы они равномерно по всей длине прикасались к вальцам. Затем ножи приподнимают и вновь прижимают к поверхности уже после пуска вальцов.

Во время работы сушилки нужно следить через смотровые окна за поступлением пасты на вальцы, контролировать давление греющего пара и разрежение. Необходимо своевременно удалять через люк сливающуюся из зазора между вальцами пасту, своевременно менять тару.

Величину остаточной влажности материала можно в некоторых пределах регулировать, изменяя толщину слоя на вальцах. Для этого следует либо переставить подвижной валец, либо изменить частоту вращения.

При остановке сушилки сначала прекращают подачу высушиваемого материала в дозатор, а после того как весь материал вытечет из него и выйдет из сушилки, останавливают валцы, закрывают пар и выключают вакуум.

Тепловой к. п. д. таких сушилок около 90%.

Одновальцовые атмосферные формующие сушилки

Эти аппараты применяют для подсушки пастообразных материалов с одновременным формованием для получения мелких кусочков с развитой поверхностью, что облегчает их дальнейшую сушку на ленточных конвективных сушилках. Схема такой формующей сушилки приведена на рис. 16.

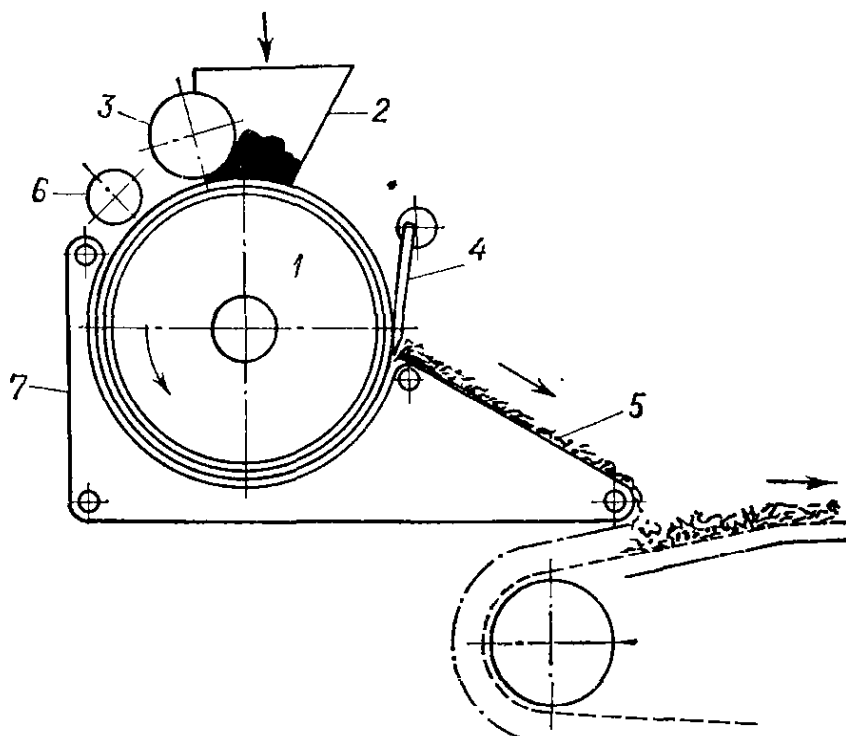


Рис. 16. Схема одновальцовой формующей сушилки:

1—барабан; 2—загрузочный бункер; 3, 6—прижимные валки; 4—нож; 5—транспортёрная лента; 7—прижимная лента.

Боковая поверхность горизонтального барабана 1 имеет кольцевые канавки глубиной 6—12 мм, расположенные на расстоянии 6—10 мм друг от друга. Высушиваемая паста подается на барабан сверху через загрузочный бункер 2 и вмазывается в канавки при помощи специального прижимного валика 3. Барабан сушилки обогревается изнутри паром ($p_{изб} = 0,2 \div 0,9$ МПа, т. е. 2—9 кгс/см²) и имеет температуру 120—175 °С. При соприкосновении с горячей поверхностью барабана материал покрывается корочкой, т. е. приобретает форму, в виде палочек извлекается из канавок гребенчатым ножом 4. Эти отформованные кусочки осыпаются на наклонную транспортёрную ленту 5, которая передает их на досушивание в ленточную сушилку. Так как давлением паров образующейся влаги материал выдавливается из канавок, то в аппарате имеется второй прижимной валик 6, а также прижимная лента 7, охваты-

вающая снизу барабан и являющаяся продолжением транспортной ленты. Частоту вращения барабана устанавливают так, чтобы за один оборот получить достаточно подсушенный материал.

Валец приводится во вращение от двигателя через редуктор и зубчатую передачу.

Формующие сушилки нельзя использовать для подсушки материалов, качество которых ухудшается при температуре около 100°C. Нецелесообразно их применение в малотоннажных производствах, так как в этом случае слишком часто пришлось бы переходить с одного материала на другой и потребовались бы остановки на чистку.

КОНВЕКТИВНЫЕ СУШИЛКИ

В конвективных сушилках высушиваемый материал непосредственно соприкасается с теплоносителем (горячим воздухом или топочными газами). В химической промышленности наибольшее распространение получили следующие конвективные сушилки: из периодически действующих — камерные циркуляционные, а также сушилки с кипящим (взвешенным, псевдооживленным) слоем; из непрерывно действующих — барабанные, гребковые, турбинные, ленточные, петлевые, пневматические, с кипящим слоем и распылительные.

Камерные циркуляционные сушилки

Такие аппараты применяются главным образом для сушки малотоннажных материалов с невысокой допустимой температурой сушки. Выходящий из сушилки теплоноситель может быть частично возвращен в нее, что способствует созданию более мягких условий проведения процесса (см. на стр. 21 сушильный вариант с рециркуляцией отработанного теплоносителя). В этих аппаратах могут быть высушены материалы, имеющие различную консистенцию, однако производительность их мала, поскольку материал сушится в неподвижном слое на противнях и продолжительность процесса составляет несколько десятков часов. На загрузку противней и их выгрузку расходуется много ручного труда, при ссыпании сухого материала в тару происходит сильное пыление, что отрицательно сказывается на здоровье обслуживающего персонала.

Камерная циркуляционная сушилка изображена на рис. 17. Она представляет собой прямоугольную камеру (длина 2,2 м, ширина 3,4 м, высота 1,9 м), которая закрывается двустворчатой дверью. Камера и дверь теплоизолированы. Через дверь осуществляется загрузка и выгрузка противней, которые размещаются на двух вагонетках. Противни могут быть деревянными или из нержавеющей стали. Длина противней 0,9 м, ширина 0,45 и 0,58 м, высота 40 мм. Противни устанавливают на вагонетку в 20 горизонтальных рядов. На вагонетке помещается 60 широких и 80

узких противней; следовательно, общая загрузка составляет 120 или 180 противней. Устройство сушилки ясно из рис. 17. В ней совмещены два варианта работы — с частичным возвратом теплоносителя и ступенчатый подогрев.

Высушиваемый материал загружают на противни, устанавливают их на вагонетки, которые вкатывают в камеру, и плотно закрывают двери. Затем производят продувку конденсатоотводчика и дают пар во все три калорифера, постепенно открывая вентили на паропроводах. После прогрева калориферов вводят в действие конденсатоотводчики и включают вентилятор, установив шибер

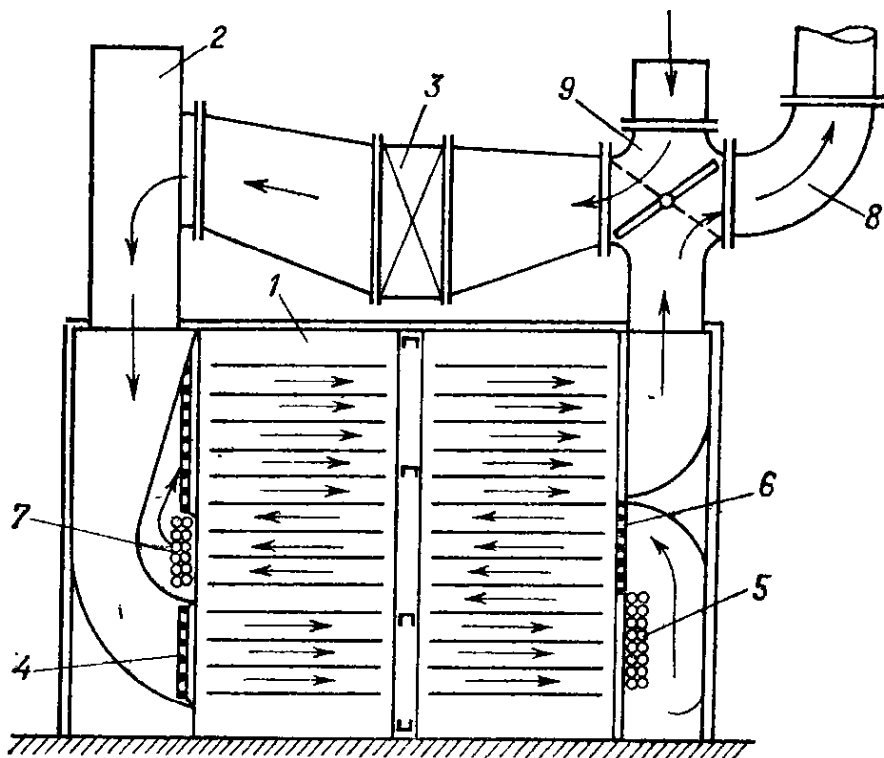


Рис. 17. Камерная циркуляционная сушилка:

1 — камера; 2 — вентилятор; 3, 5, 7 — калориферы; 4, 6, 9 — сетки; 8 — воздуховод.

в такое положение, при котором весь воздух из сушилки удаляется в атмосферу.

Во время работы сушилки необходимо контролировать температуру внутри камеры. Ее значение должно соответствовать указанному в регламенте. Регулирование температуры осуществляется с помощью вентиля на паропроводах, подводящих пар к калориферам. Через несколько часов работы шибер устанавливают так, чтобы часть отработанного теплоносителя возвращалась в камеру, создавая, таким образом, более мягкие условия сушки. В некоторых случаях в течение процесса сушки необходимо переставлять местами противни (нижние — наверх, верхние — вниз), чтобы материал высыхал равномерно. Конец сушки материала устанавливают путем определения влажности взятой пробы материала или путем наблюдения за изменением температуры материала — к концу процесса она приближается к температуре теплоносителя в камере.

По окончании сушки вагонетки выкатывают из сушилки, сгружают противни и ссыпают высушенный материал в тару. Некоторые материалы для ускорения сушки подвергают перемешиванию (перелопачиванию).

Продолжительность процесса сушки в камерных циркуляционных сушилках, как уже отмечалось, равна 20—50 ч в зависимости от влажности и свойств высушиваемого материала и от температурного режима. Производительность такого аппарата при сушке некоторых паст составляет 25—35 кг/ч по высушенному материалу и 13—20 кг/ч по влаге, удельный расход греющего пара равен в среднем 2,3 кг/кг влаги.

Ленточные и вальцово-ленточные сушилки

Ленточные сушилки предназначены для сушки мелкокусковых материалов. Лента может быть сплошной (холст, бельтинг и т. д.) или сетчатой. В сушилках со сплошной лентой теплоноситель проходит над слоем высушиваемого материала обычно в направлении, противоположном движению ленты (противоток). Из-за сложности обслуживания и перебоев в работе, вызванных перекосом ленты, а также низкой производительности эти сушилки применяют редко.

Более распространены сушилки с сетчатой лентой, в которых теплоноситель проходит в направлении, перпендикулярном плоскости ленты. Такие аппараты применяются при высушивании материалов, образующих рыхлый, хорошо продуваемый слой.

Для сушки пастообразных материалов сушилку с сетчатой лентой используют вместе с одновальцовой формующей сушилкой, на которой происходит подсушка с одновременным отформовыванием пасты, поступающей с барабанного вакуум-фильтра. Вальцово-ленточная сушилка (рис. 18) работает следующим образом. Материал, подсушенный и отформованный на одновальцовой формующей сушилке 1, счищается с вальца гребенчатым ножом 2 и в виде отдельных кусочков падает на огибающую ленту 3, откуда ссыпается на сетчатую ленту 4, образуя на ней слой толщиной около 50 мм. Ленточная часть сушилки разделена на зоны. В первой зоне нагретый воздух проходит через материал снизу вверх, а в той части сушилки, где материал достаточно подсушен, — сверху вниз (во избежание уноса пыли). Внутри камеры, в которую заключена сетчатая лента, имеются вентиляторы 5 и калориферы (на схеме не показаны), с помощью которых осуществляется циркуляция и подогрев воздуха.

Поток воздуха регулируют поворотными шиберами, расположенными в воздуховодах между зонами, а также задвижками на воздуховодах, подающих в сушилку атмосферный воздух. Высушенный материал ссыпается с ленты на шнек или другое транспортирующее устройство и выводится из сушилки. Продолжительность сушки составляет 0,5—2 ч.

Производительность вальцово-ленточной сушилки, имеющей валец диаметром 600 мм и длиной 2 м (длина всей установки 12 м), при сушке литопона от влажности 25% до 1% составляет приблизительно 1250 кг/ч высушенного продукта; влажность после формирующей сушилки равна 16%.

В таких сушилках высушивают органические красители и пигменты. Например, в сушилке СВЛ 800/1200 (диаметр барабана 800 мм, ширина ленты 1200 мм) пигмент желтый светопрочный, лак оранжевый, лак красный, пигмент алый, имеющие после вакуум-фильтра влажность 75—78%, высушиваются до 2%. Ленточная сушилка состоит из шести камер длиной 2 м каждая. В каждой камере имеется вентилятор и калорифер. Расход воздуха

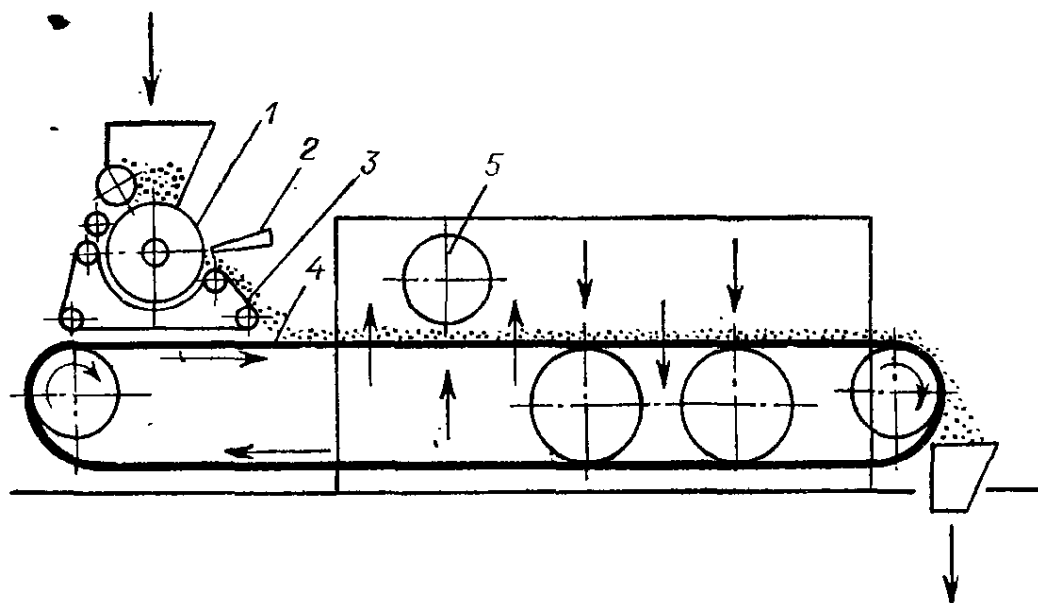


Рис. 18. Вальцово-ленточная сушилка:

1—формирующая сушилка; 2—гребенчатый нож; 3—огибающая лента;
4—сетчатая лента; 5—вентилятор.

7000 м³/ч. Температура поступающего воздуха 80—120 °С, в зависимости от высушиваемого материала температура уходящего воздуха 60—70 °С. Производительность по сухому продукту приблизительно 60 кг/ч. Недостаток таких сушилок — большая запыленность помещения, вследствие чего необходима частая чистка пластинчатых калориферов, служащих для подогрева воздуха. При сушке различных пигментов или красителей в одном помещении ухудшается качество продуктов. Сухой продукт частично проваливается через отверстия сетки, что требует ручной очистки сушилки приблизительно раз в неделю. В настоящее время эти аппараты заменяют сушилками СВЛ 2800/1200, в которых под сеткой имеется транспортер для удаления просыпающегося пигмента.

Петлевые сушилки

Петлевые сушилки (рис. 19) применяют для высушивания пастообразных материалов. Питатель 1 подает пасту на бесконечную сетчатую ленту 2, которая проходит между обогреваемыми

мыми паром вальцами 3, вдавливающими материал внутрь ячеек ленты. Затем лента поступает в сушильную камеру 6, где образует петли благодаря имеющимся на ленте поперечным планкам, которые опираются на цепной конвейер 7. С помощью направляющего ролика 8 лента отводится к ударному устройству 9, материал выбивается из ячеек и транспортером выводится из сушилки.

Циркуляция воздуха создается осевыми вентиляторами 10. Воздух подогревается в паровых калориферах и движется поперек ленты. Теплоносителем могут служить также топочные газы, получающиеся при сжигании природного газа, в смеси с воздухом.

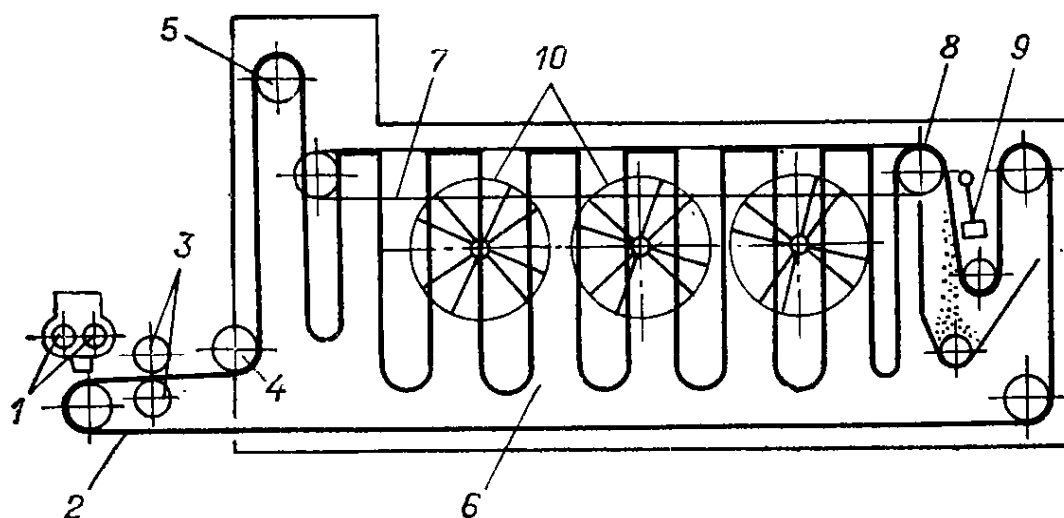


Рис. 19. Петлевая сушилка:

1—питатель; 2—лента; 3—вмазывающие вальцы; 4, 5—валики; 6—камера; 7—цепной конвейер; 8—ролик; 9—ударное устройство; 10—вентилятор.

Горелки обычно устанавливают внутри камеры. Такая сушилка работает по варианту с промежуточным подогревом и частичной рециркуляцией. Толщина слоя материала зависит от толщины ленты и обычно составляет 5—20 мм.

Сушилка, используемая для литопона, имеет длину 11 м, ширину 1,6 м, высоту около 4 м, поверхность сушки 170 м².

Пуск сушилки начинается с ее разогрева, для чего открывают паровые вентили на калориферах и вальцах и включают вентиляторы. После достижения необходимой по регламенту температуры приводят в действие транспортирующие устройства и ленту, а также питатель. Во время работы надо следить за подачей пасты на ленту, давлением пара и постоянством температуры в сушильной камере. Остановку сушилки осуществляют в обратном порядке. Пар закрывают примерно через 1 ч после прекращения подачи пара на вальцы.

В среднем продолжительность сушки составляет 2,5 ч. Производительность по влаге описанной выше сушилки при сушке литопона от влажности 45% до 1% составляет 1000 кг/ч. Напряжение сушилки по влаге достигает 3 кг/(м²·ч).

Барабанные сушилки

Аппараты такого типа широко распространены в химической промышленности для сушки зернистых материалов с влажностью 5—60% (сушка хлористого калия, простых и сложных удобрений, фосфоритной муки и т. д.). Барабанные сушилки имеют достаточно большой тепловой к. п. д. благодаря возможности использования высоких температур поступающего теплоносителя (более 1000°С) при параллельном его движении с материалом без опасения перегрева последнего. Расход теплоты на испарение влаги 3300—3800 кДж/кг. Расход энергии на вращение сушилки 0,8—1,0 кВт·ч в расчете на 1 т высушенного продукта или 5—6 кВт·ч в расчете на 1 т испаренной влаги. Производительность

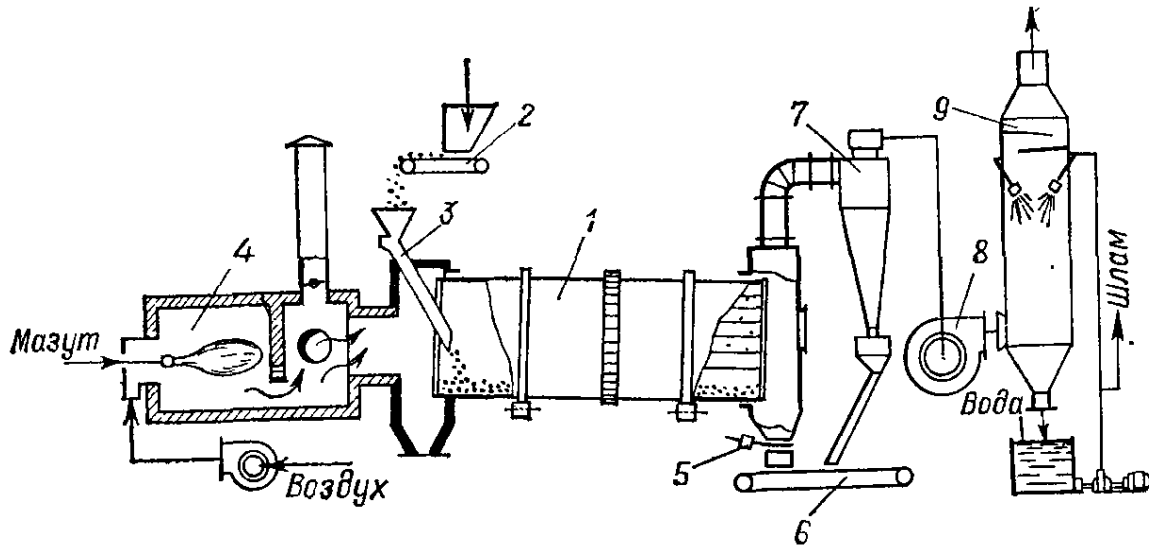


Рис. 20. Барабанная сушильная установка:

1—барабан; 2—питатель-дозатор; 3—лоток; 4—топка; 5—затвор; 6—транспортер; 7—циклон; 8—вентилятор; 9—скруббер.

единичного агрегата достаточно высока. Такие сушилки надежны в эксплуатации и работают 6000—8000 ч без капитального ремонта.

Отечественные барабанные сушилки имеют диаметр $D = 1 \div 3,2$ м и длину $L = 3 \div 27$ м, причем барабаны диаметром до 2,8 м могут быть различной длины ($L/D = 4 \div 8$). Барабаны диаметром 2,8; 3 и 3,2 м выпускаются только одной длины — соответственно 14; 20 и 27 м.

Сушилка (рис. 20) представляет собой установленный с наклоном в сторону разгрузки вращающийся барабан 1, на который надеты бандаж и зубчатый венец привода. Бандажами барабан опирается на четыре ролика. На обоих концах барабана имеются камеры для ввода теплоносителя и влажного материала и для вывода высушенного материала и отработанного теплоносителя. Специальными уплотнениями (например, лабиринтными) достигается предотвращение подсоса наружного воздуха, который особенно нежелателен со стороны ввода теплоносителя.

Материал подается в сушилку через питатель 2 по лотку 3. Газы, получаемые при сжигании жидкого или газообразного топлива в топке 4, поступают в камеру смешения, а потом в барабан.

Благодаря внутренней насадке при вращении барабана материал поднимается и затем ссыпается с различной высоты. Теплота материалу передается конвекцией от газов и теплопроводностью от нагретой внутренней насадки. — Обычно высушенный продукт направляется из камеры через затвор-мигалку 5 на ленточный транспортер 6. Отработанные газы поступают в циклон 7, откуда дымососом 8 подаются в мокрый скруббер 9 и далее отводятся в атмосферу. В топку подается первичный и вторичный воздух (последний — либо вентилятором, либо за счет разрежения в смесительной камере).

Тип устанавливаемого внутреннего устройства зависит от высушиваемого материала. Со стороны загрузочной камеры на длине $0,5D$ устанавливают винтовые лопасти, а при сушке материалов, прилипающих к поверхности, на начальном участке подвешивают цепи, разрушающие комки и сбивающие материал со стенок.

Обычно в барабанных сушилках сушильный агент и материал движутся в одном направлении. При этом достигается высокая интенсивность процесса, что обусловлено возможностью использования высокотемпературного теплоносителя даже для сравнительно термочувствительных материалов, поскольку с наиболее горячими газами соприкасается влажный продукт и его перегрева не происходит. Противоточное движение газов и материала применяют при необходимости совмещения сушки с прокаливанием.

Начальную и конечную температуру теплоносителя устанавливают на основании экспериментальных данных, причем конечная температура выбирается с учетом термочувствительности материала и его конечной влажности и зависит также от условий работы пылеулавливающей аппаратуры. Чтобы не происходила конденсация паров на стенках воздухопроводов и в циклоне, точка росы отходящих газов должна быть на $10—15^{\circ}\text{C}$ ниже их температуры. Обычно температура уходящих газов колеблется в пределах $90—120^{\circ}\text{C}$.

Для полидисперсных материалов с размером частиц от $0,2$ до 5 мм и $\rho_M = 800 \div 1200$ кг/м³ среднюю скорость газов принимают равной $2—5$ м/с (см. также табл. 4).

Таблица 4

Средние скорости газов \bar{w} (в м/с)

Размер частиц, мм	Значения \bar{w} при кажущейся плотности материала ρ_M (в кг/м ³)				
	350	1000	1400	1800	2000
0,3—2	0,5—1	2—5	3—7,5	4—8	5—10
Более 2	1—3	3—5	4—8	6—10	7—12

В производственных условиях может возникнуть необходимость в поверочном расчете сушилки с целью выявления возможности ее интенсификации. Для этого обычно рассчитывают фактическое напряжение сушилки по испаряемой влаге $A_V = W/V_6$ [в кг/(м³·ч)],

Таблица 5

Показатели работы барабанных сушилок при сушке различных материалов

Материал	$u_1, \%$	$u_2, \%$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$A_V, \text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$	Режим
Аммофос	10	1,5	350	110	18	Прямоток
Гранулированный суперфосфат . .	17	2,7	550	120	40	То же
Диаммофос	3—4	1,0	200	90	9	» »
Поваренная соль	4—6	0,2	150—200	—	7,2	Противоток
Преципитат	56	—	625	125	30	Прямоток
Сернокислый аммоний	3,5	0,4	82	—	4—5	То же
Фосфориты	6,0	0,5	600	100	60	» »
Хлористый барий	5,6	1,2	109			» »

где V_6 — объем барабана, и сравнивают с показателями, приведенными в табл. 5. Одновременно определяют удельные расходы сухих газов и теплоты по формулам (9) и (13). Если удельный расход теплоты превышает ~ 4200 кДж/кг влаги, а A_V — величина небольшая, то необходимо проверить, не является ли продукт пересушенным и не превышает ли температура газов, уходящих из сушилки, требуемое по регламенту значение. В этом случае следует увеличить подачу влажного материала или снизить подачу теплоносителя.

В существующих барабанных сушилках не обеспечивается надежная защита деталей передней части барабана от перегрева, что обуславливает их сравнительно быстрый износ. Кроме того, не достигается достаточно хорошее уплотнение зазора между барабаном и стенками загрузочной и выгрузочной камер, что приводит к подсосам атмосферного воздуха, особенно нежелательным в загрузочной камере, так как это снижает температуру теплоносителя и увеличивает скорость газов в барабане сверх рассчитанной.

Сушилки с кипящим (псевдооживленным) слоем

Эти сушилки широко распространены в химической и смежных отраслях промышленности, поскольку в аппаратах такого типа можно высушивать зернистые, пастообразные и жидкие материалы. Процесс протекает с большой скоростью, съем влаги с 1 м^2 газораспределительной решетки в зависимости от размера частиц материала и температурного режима сушки составляет $500\text{—}3000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Возможность сушки слипающихся, пастообразных и жидких материалов объясняется тем, что кипящий (взвешенный, псевдооживленный) слой является как бы «ретуром» предварительно подсушенного продукта.

В установках со взвешенным слоем можно одновременно проводить несколько процессов, например сушку и обжиг, сушку и гранулирование, сушку и измельчение.

Такие установки разнообразны как по конструкции, так и по гидродинамическим и тепловым режимам. Их можно классифицировать по количеству камер, по режиму процесса (периодического, полунепрерывного и непрерывного действия), по конфигурации сушильной камеры (круглые и прямоугольные, постоянного и расширяющегося по высоте сечения), по гидродинамическому режиму (с кипящим, фонтанирующим и вихревым слоем).

Схемы различных сушилок с кипящим слоем показаны на рис. 21: *а* — однокамерная (однозонная) сушилка круглого сечения (применяется обычно для сушки термостойких материалов); *б* — однозонная прямоугольная с отношением длины к диаметру более 2, что обеспечивает направленное движение материала от места

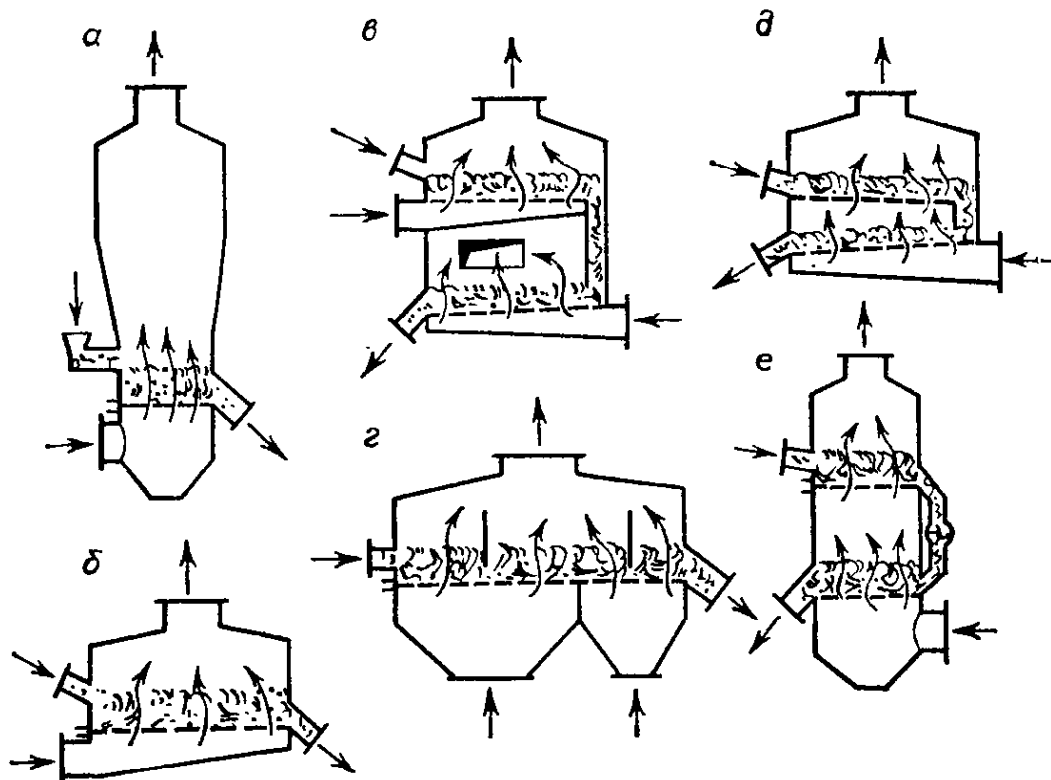


Рис. 21. Схемы различных сушилок с кипящим (псевдооживленным) слоем:

а — однозонная круглая; *б* — однозонная прямоугольная с направленным движением материала; *в* — с направленным движением материала, расположением зон одна над другой и однократным использованием теплоносителя; *г* — многозонная в горизонтальной плоскости; *д* — многозонная с многократным использованием теплоносителя; *е* — цилиндрическая многозонная с многократным использованием теплоносителя.

загрузки к месту выгрузки (используется для дисперсных материалов, содержащих внутреннюю влагу; при этом достигается высокая равномерность сушки); *в* и *г* — многозонные сушилки (в каждой зоне могут создаваться различные гидродинамические и температурные режимы, так как теплоноситель подается в них отдельными вентиляторами; для надежности транспортировки материала из одной зоны в другую такие сушилки применяются для крупнозернистых материалов, обладающих хорошей сыпучестью); *д* и *е* — многозонные сушилки с многократным использованием теплоносителя.

Сушилка, представленная на рис. 21, *г*, имеет горизонтальное расположение зон, причем в каждую зону может подаваться

теплоноситель с определенными параметрами, и, таким образом, каждая зона может работать со своими значениями температуры и скорости газов. Над решеткой зоны не разделяются порогами, что обеспечивает беспрепятственное движение материала вдоль решетки.

Время пребывания материала в такого типа аппаратах (а следовательно, и время сушки) можно легко регулировать. Оно рассчитывается из соотношения:

$$\tau_{\text{ср}} = G_{\text{сл}}/G_2$$

где $\tau_{\text{ср}}$ — среднее расходное время пребывания материала в слое; $G_{\text{сл}}$ — масса слоя; G_2 — производительность сушилки по высушенному материалу. Изменяя высоту слоя и, таким образом, его массу, можно регулировать $\tau_{\text{ср}}$.

Периодически действующие сушильные установки предназначены для сушки сыпучих и пастообразных материалов в малотоннажных производствах химической и химико-фармацевтической промышленности.

Сушилка имеет камеру, которая установлена на тележке, что позволяет производить загрузку влажного и выгрузку высушенного материала вне пределов установки. После загрузки камера вкатывается в нижнюю часть сушильной зоны, при помощи рычагов поднимается и соединяется с фильтром, расположенным в верхней части сушильной зоны. Фильтр представляет собой каркас из системы концентрических колец, на которые натянут конус из стеклоткани (площадь поверхности 20 м²). Фильтр периодически встряхивается с частотой вибраций 2800 в 1 мин. Вибратор заключен в кожух с поддувом чистого воздуха или азота. К сушильной зоне примыкает зона со вспомогательным оборудованием — вентилятором, паровыми калориферами и калориферами для высокотемпературного теплоносителя. Последние используются при необходимости более высокой температуры нагрева воздуха, чем та, которая достигается в паровых калориферах (т. е. до 180—200 °С). Установка имеет систему КИП и автоматики.

Сушилки такого типа могут быть снабжены перемешивающими устройствами для пастообразных материалов, рассыпающихся в процессе сушки.

Примером сушилки полунепрерывного действия, обеспечивающей непрерывность процесса по транспорту твердой фазы при периодической сушке, может служить сушилка с вращающимися перегородками. В этих аппаратах достигается равномерная сушка, однако применять их можно только в малотоннажных производствах.

В химической промышленности чаще всего используют непрерывно действующие сушильные установки кипящего слоя или других разновидностей взвешенного слоя (фонтанирующего, вихревого). На рис. 22 показана сушильная установка для хлористого калия производительностью около 100 т/ч (диаметр сушилки 3,2 м, площадь решетки 8 м²). Влажный материал подается транспортером в приемный бункер 2 и питателем-забрасывателем 3

распределяется на поверхности слоя. Вентилятором 4 воздух направляется для подачи в горелку, где сгорает природный газ или мазут, а также на разбавление продуктов сгорания в камеру смешения, составляющую одно целое с топкой 5. Теплоноситель поступает в подрешеточное пространство камеры 6 и, выходя с большой скоростью из отверстий газораспределительной решетки, псевдоожижает находящийся на ней слой высушенного продукта. Высушенный продукт разгружается непрерывно через отверстие, находящееся на уровне решетки (в других установках разгрузка

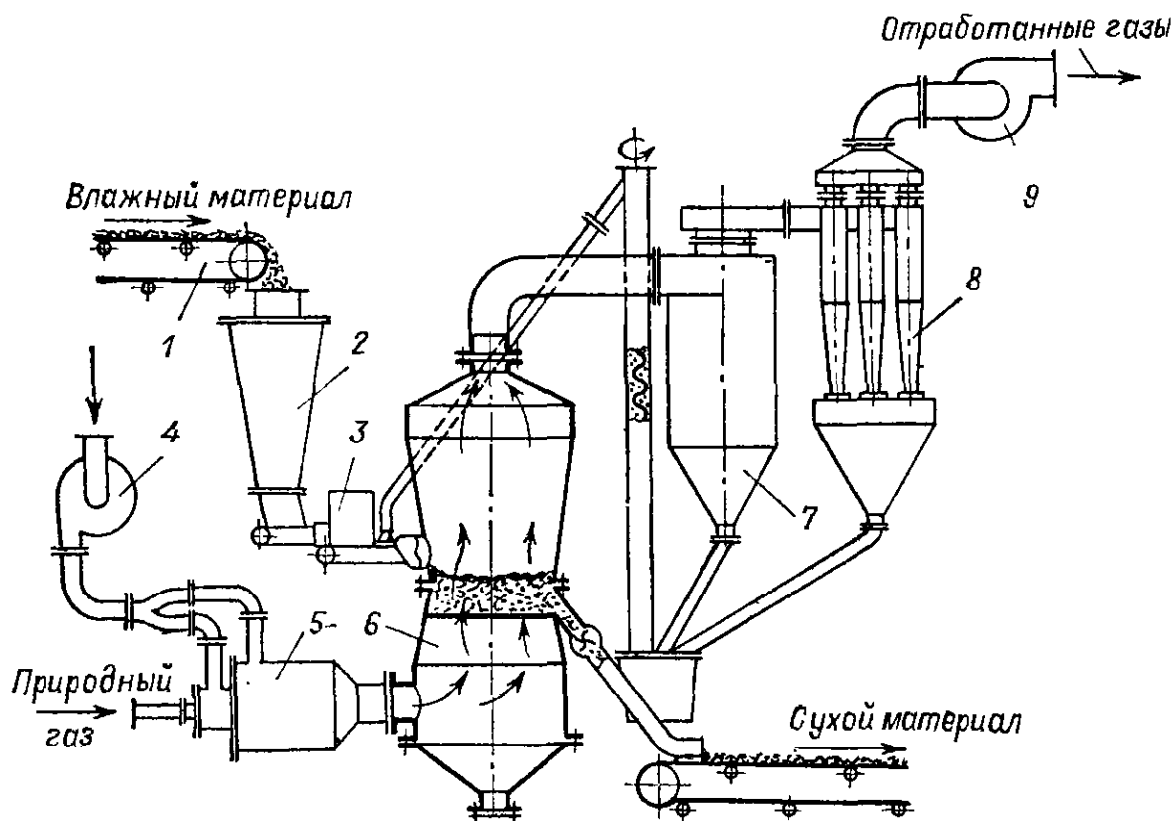


Рис. 22. Крупномасштабная сушильная установка с кипящим (псевдоожиженным) слоем:
 1— транспортер; 2—бункер; 3—питатель; 4—вентилятор; 5—топка; 6—камера;
 7—циклон; 8—батарейный циклон; 9—дымосос.

производится через переливное устройство, расположенное на уровне слоя). Разгрузка на уровне решетки способствует выводу крупных комков. Сухой материал поступает на ленточный транспортер.

Мелкая фракция, выделенная в системе циклонов (обычном 7 и батарейном 8), вертикальным шнеком подается из сборника к месту загрузки и смешивается с влажным материалом. Окончательная очистка отходящего из сушильной установки теплоносителя осуществляется в мокром скруббере, перед которым установлен дымосос 9.

Техническая характеристика сушилки для хлористого калия

Площадь решетки, м ²	8
Живое сечение, %	5
Влажность материала, %:	
начальная	10—5
конечная	0—0,1

Температура газов, °С:	
начальная	650—700
конечная	120—140
в слое	130—150
Скорость газов над слоем, м/с	1,5—2,5
Гидравлическое сопротивление слоя и решетки:	
кПа	5,5—6,0
мм вод. ст.	550—600
Производительность, т/ч	80—120
Удельный расход газов кг сухого газа/кг влаги	3,5—5
Удельный расход тепла, кДж/кг влаги	3350—3770
Удельный расход мазута, кг/т влаги	110—115

При сушке комкующихся материалов, а также термочувствительных продуктов гидродинамический режим в прирешеточной зоне должен быть достаточно активным, застойные зоны должны отсутствовать. Такой режим обеспечивается в аппаратах со слоем

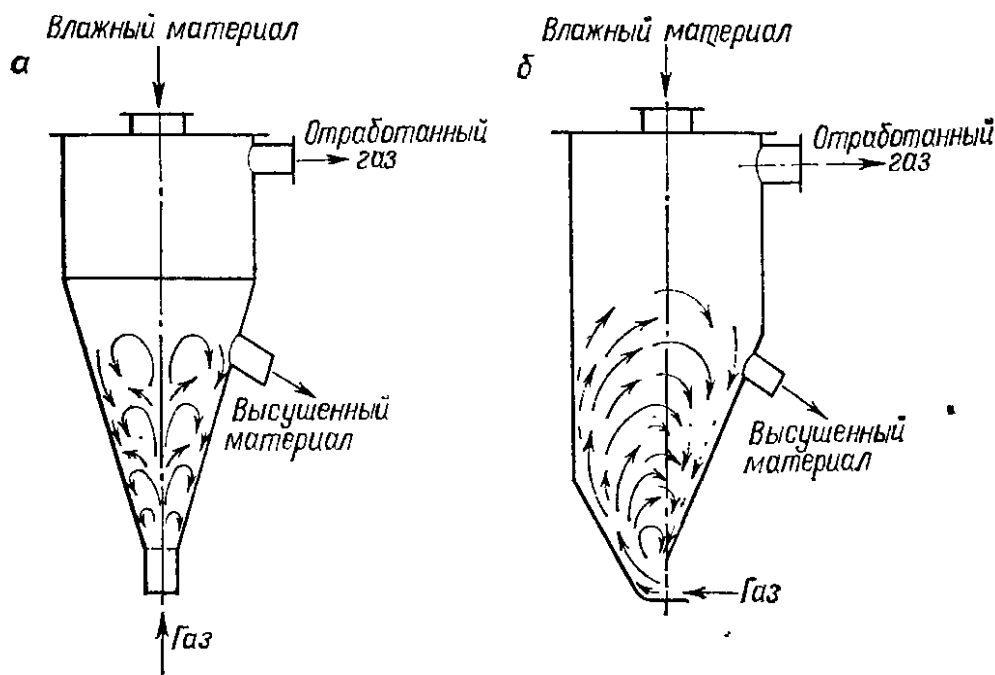


Рис. 23. Схемы сушильных аппаратов:
а—с фонтанирующим слоем; б—с вихревым слоем.

расширяющегося сечения — фонтанирующим (рис. 23, а) и вихревым (рис. 23, б). Эти аппараты легко масштабируются путем параллельного соединения соответствующего количества желобов. Отличие состоит в том, что в аппарате с вихревым слоем теплоноситель подводится в слой тангенциально, решетка беспровальная, а в аппарате с фонтанирующим слоем ввод теплоносителя осуществляется снизу.

Сушилки со взвешенным слоем успешно используются для сушки суспензий и растворов, причем высушенный продукт может быть получен либо в гранулированном виде, либо в виде порошка.

При получении высушенного материала в виде гранул процесс обычно проводят в слое высушиваемого материала с разгрузкой продукта из слоя, а при необходимости получения сравнительно тонкодисперсного материала и в тех случаях, когда высушиваются термочувствительные и вязкие материалы (желатина, дубители,

красители, пигменты), рекомендуется сушка с использованием инертных частиц (фторопластовых, фарфоровых и др.). Следует иметь в виду, что в последнем случае процесс более устойчив, поскольку масса слоя, состоящего практически только из инертных частиц, в процессе сушки не изменяется.

Гранулированный продукт не слеживается при хранении и удобен для использования вследствие малого пыления. Если гранулы являются полупродуктом, то последующую технологическую операцию можно проводить в кипящем слое.

Схема установки принципиально не отличается от показанной на рис. 22. Раствор из напорного бака подается в аппарат с кипящим слоем с помощью насоса при давлении 0,15—0,2 МПа (1,5—2 кгс/см²) через механическую форсунку грубого распыла, расположенную над фронтом слоя. Топка размещается в подрешеточном пространстве. Плоская решетка изготовлена из жароупорной стали с круглыми отверстиями диаметром 5 мм (живое сечение 8%). Установка оборудована системой автоматического контроля основных показателей процесса — температур топочных газов, слоя и отходящих газов; сопротивления слоя; давления; расходов воздуха, газа и раствора.

При обезвоживании растворов сульфата цинка температура теплоносителя равна 900 °С, скорость газов над слоем достигает 3 м/с, влагосъем при температуре отходящего теплоносителя около 140 °С составляет приблизительно 3 т/(м²·ч), причем унос продукта в циклон не превышает 5%. При обезвоживании растворов природной соды при предельной температуре теплоносителя 750 °С и слоя 120 °С влагосъем равен 1,8—2,0 т/(м²·ч). При обезвоживании сбросных сульфатных вод, получаемых в производстве синтетических жирных кислот, также используют аппарат с кипящим слоем. Раствор подают над фронтом слоя тремя механическими форсунками грубого распыла. Скорость теплоносителя над слоем составляет 2,5 м/с (минимальное значение). Аппарат имеет круглое сечение. Решетка площадью 4 м², выполненная в виде секторов из чугуна, лежит на опорной балке, охлаждаемой воздухом. Выгрузка осуществляется на уровне решетки с помощью шлюзового затвора с регулируемой частотой вращения. При температуре теплоносителя до 760 °С влагосъем составляет 1,7—1,8 т/(м²·ч).

Для сушки пастообразных красителей была испытана установка, схема которой дана на рис. 24. Диаметр цилиндрической части внутреннего конуса сушилки 1,6 м, ширина кольцевой щели, в которой установлена решетка, 40 мм. Продукты сгорания керосина в смеси с воздухом поступают под решетку с температурой до 350 °С и скоростью около 30 м/с в слой гранул уже сухого красителя. Паста красителя, прошедшая после пастосмесителя ситчатые фильтры, подается винтовым насосом в четыре тангенциально установленные форсунки с пневматическим распылением. Высушенный краситель в виде гранул диаметром 1—4 мм в основном разгружается через центральную трубу секторным дозатором. Пыль из отходящего теплоносителя отделяется в батарейном

циклоне НИИОГАЗ (диаметр каждого циклона 450 мм). Из циклонов газы отсасываются двумя последовательно установленными вентиляторами (ВД-9) и направляются для окончательной очистки в насадочный скруббер, орошаемый водой. Для подачи воздуха используется вентилятор ВД-8. Влажность пасты колеблется в пределах 65—70%, высушенный краситель имеет влажность 3—5% при температуре отходящих газов 100—105 °С.

В результате длительных испытаний было установлено, что производительность сушилки превышает проектную (200 кг продукта/ч), съем влаги с 1 м³ составляет до 250 кг/ч, расход сухих газов

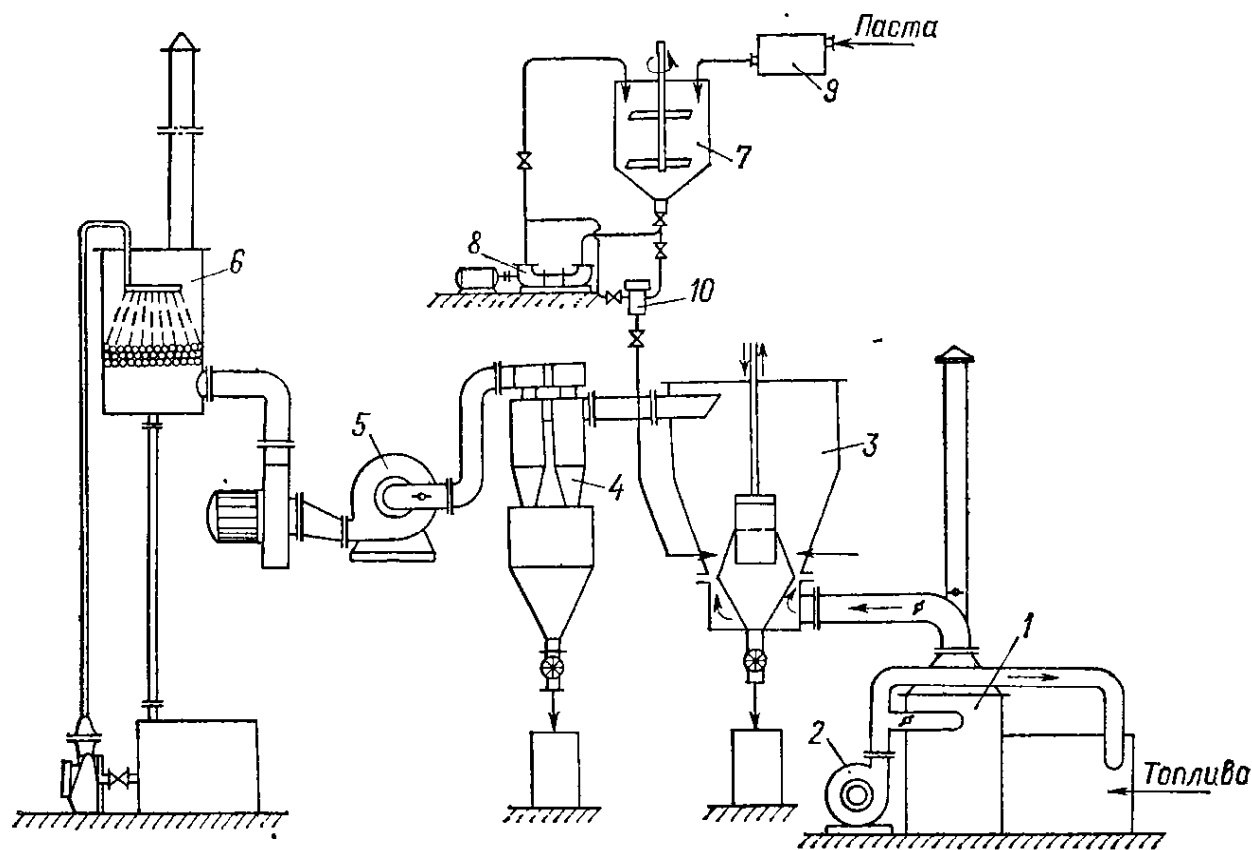


Рис. 24. Схема сушильной установки для пастообразных материалов:

1—топка с камерой смешения; 2—дутьевой вентилятор; 3—сушилка; 4—циклоны; 5—вытяжной вентилятор; 6—скруббер; 7—пастосмеситель; 8—винтовой насос; 9, 10—ловушки.

равен 10—12 кг/кг влаги, расход теплоты колеблется в пределах 4000—4200 кДж/кг влаги, тепловой к. п. д. достигает до 60%.

Аналогичные установки применяются для сушки раствора натровой соли метадисульфокислоты бензола. Концентрация поступающего раствора 50%, высушенный продукт полностью обезвожен.

Сушка во взвешенном слое инертных частиц получила в последнее время распространение для высушивания, например, суспензий органических красителей, пастообразных неорганических пигментов, растворов солей при сравнительно небольших производительностях по испаряемой влаге (всего в промышленности работает более 60 сушилок). При этом способе сушки одновременно происходит измельчение высушенного материала и его вынос в пылеулавливающую аппаратуру. Среднее время пребывания частиц в слое

определяется скоростью испарения влаги с поверхности и истиранием высушенного материала.

В качестве инертных используют такие частицы, которые имеют достаточно большую плотность и практически не истираются; кроме того, они должны быть достаточно устойчивы к температурным воздействиям. Например, применяют фарфоровые шарики размером от 5 до 10 мм, фторопластовую крошку или цилиндрики, керамзитовый песок и т. д.

В некоторых случаях такой метод сушки оказывается более экономичным по сравнению с сушкой распылением (можно сушить концентрированные растворы и суспензии без предварительного разбавления, поскольку не требуется тонкого диспергирования материалов). Чаще используют сушилки цилиндро-конические, но работают успешно и цилиндрические сушилки. Объем таких сушилок различен, съем влаги с единицы объема 50—250 кг/(м³·ч), тепловой к. п. д. 60—80%.

Опыт работы сушилок со взвешенным слоем показал, что процесс псевдооживления весьма чувствителен к изменению параметров, в том числе температуры и главным образом расхода теплоносителя, поэтому эти установки должны быть полностью автоматизированы. При высушивании высоковлажных и комкующихся материалов, а также продуктов, перегрев которых недопустим, вблизи решетки должны полностью отсутствовать застойные зоны, что обеспечивается применением аппаратов расширяющегося по высоте сечения (с фонтанирующим и вихревым слоем).

Надежность работы аппаратов со взвешенным слоем материала зависит от надежности всех узлов — газораспределительной решетки, топки, пылеуловителей. Тяго-дутьевое оборудование должно обеспечить с некоторым запасом прохождение заданного по регламенту количества теплоносителя через систему, поэтому должны быть устранены неплотности в соединениях. На некоторых установках на это обстоятельство не обращают должного внимания, вследствие чего большое количество воздуха из помещения подсасывается через неплотности в фланцевых соединениях. В результате загружается вытяжной вентилятор, соответственно уменьшается количество теплоносителя, проходящего через сушилку, слой «садится», начинается комкование материала, и установку приходится останавливать.

При использовании жидкого топлива для получения теплоносителя должно быть обеспечено полное его сгорание, хорошее перемешивание со вторичным воздухом, перемешивание в подрешеточном пространстве. При недостаточно хорошем перемешивании имеет место разность температур по сечению решетки, что вызывает термические напряжения и коробление решетки. При неполном сгорании топлива отдельные его капли проскакивают на решетку и сгорают на ней, что приводит к забиванию отверстий коксом; проскочившие через решетку и слой капли осаждаются на воздуховодах и могут воспламениться.

Необходимо следить за постоянством гидравлического сопротивления циклонов: оно должно быть не более 0,6 кПа для одиночных аппаратов и не более 1 кПа для батарейных. Гидравлическое сопротивление мокрого пылеуловителя (скруббера или пенного газопромывателя) не должно превышать 0,6—0,8 кПа, а для скруббера Вентури — 2,5—3 кПа. При больших значениях гидравлических сопротивлений необходимо произвести очистку аппаратов.

Пуск установки осуществляется следующим образом. Включают вытяжной, а затем нагнетательный вентилятор и приступают к розжигу топки. Когда температура газов, проходящих через сушилку, достигнет заданной по регламенту температуры слоя, начинают загружать питателем сухой материал до заданной высоты, регистрируемой по косвенному параметру — гидравлическому сопротивлению слоя. После заполнения сушилки начинают загрузку влажного материала и одновременно разгрузку сухого. После того как все показатели процесса, а главным образом температура и расход теплоносителя, достигнут заданных по регламенту значений, переключают установку на автоматическое регулирование.

Остановку осуществляют в обратном порядке. Следует отметить, что при непрерывной работе установки пуск ее и остановка производятся при необходимости профилактического осмотра или капитального ремонта.

Вихревые сушилки применяют в химической промышленности для сушки дисперсных материалов (преимущественно полимерных) с целью удаления в основном свободной влаги. Сушилка состоит из цилиндрической камеры небольшой ширины. Одна из торцевых стенок камеры представляет собой крышку с люком и смотровым окном, а к другой торцевой стенке крепится улитка для выхода взвеси. В корпусе со стороны улитки консольно расположен вал с мешалкой, на гребнях которой укреплены цепи. На боковой стенке корпуса сушилки расположен штуцер для подсоединения питателя влажного материала. Снизу предусмотрен тангенциальный штуцер для подачи теплоносителя, который вводится в камеру через поворотные лопасти, позволяющие регулировать скорость и направление подаваемого воздуха.

Время пребывания материала в сушилке — от десятка секунд до нескольких минут, поэтому частично может быть удалена и внутренняя влага. В аппаратах такого типа сушка может сочетаться с химической реакцией (например, поликонденсации). Вихревые сушилки успешно работают на заводах пластмасс (производительность по сухому продукту достигает 500 кг/ч), химико-фармацевтических заводах (высушивают витаминные препараты) и т. д.

Пневматические сушилки

Пневматические сушилки (трубы-сушилки) используют для сушки дисперсных сыпучих материалов, содержащих поверхностную влагу. Продолжительность пребывания материала в таких аппаратах составляет несколько секунд. Схема установки

приведена на рис. 25. Влажный материал подается в трубу питателем 4. Топочные газы из топки 2 поступают в нижнюю часть пневмотрубы 5 со скоростью, обеспечивающей вынос наиболее крупных частиц материала (бóльшей скорости витания наиболее крупных частиц), подхватывают материал и вместе с ним движутся вверх. При движении материала по трубе происходит интенсивная сушка. Основная часть материала выделяется из теплоносителя в расширительной камере (на схеме не показана), а остальное количество — в циклоне 6. Очищенные от пыли топочные газы отсасываются дымососом 7. Скорость транспортирующего теплоносителя зависит также от концентрации материала: чем значительней концентрация, тем выше должна быть скорость.

На начальных участках трубы количество испаренной влаги больше. Наиболее интенсивен процесс на первых 2—3 м трубы. Прямоточное движение теплоносителя и материала позволяет использовать высокие температуры без опасения перегрева материала.

Для увеличения времени пребывания материала в таких аппаратах делают расширяющиеся участки, выполняют сушилки многосекционными, снабжают внутренними винтовыми вставками и т. д.

Недостатки пневматических сушилок: некоторое истирание материала, а также провал его в нижнюю часть трубы, что вызывает необходимость остановки и чистки аппарата.

При сушке хорошо сыпучих материалов такие сушилки работают эффективно, области их применения расширяются — при смешивании с сухим материалом пневмосушилки могут быть использованы не только для высоковлажных материалов, но и для растворов и паст.

Обслуживание пневмосушилок значительно проще, чем сушилок со взвешенным слоем, гидравлическое сопротивление, а следовательно, и расход энергии меньше.

Такие сушилки работают непрерывно, поэтому их пуск и остановку специально рассматривать не будем. Отметим лишь, что надежность работы установки в целом зависит от работы всех ее узлов, в том числе топки и пылеулавливающей аппаратуры (см. стр. 61 и 63).

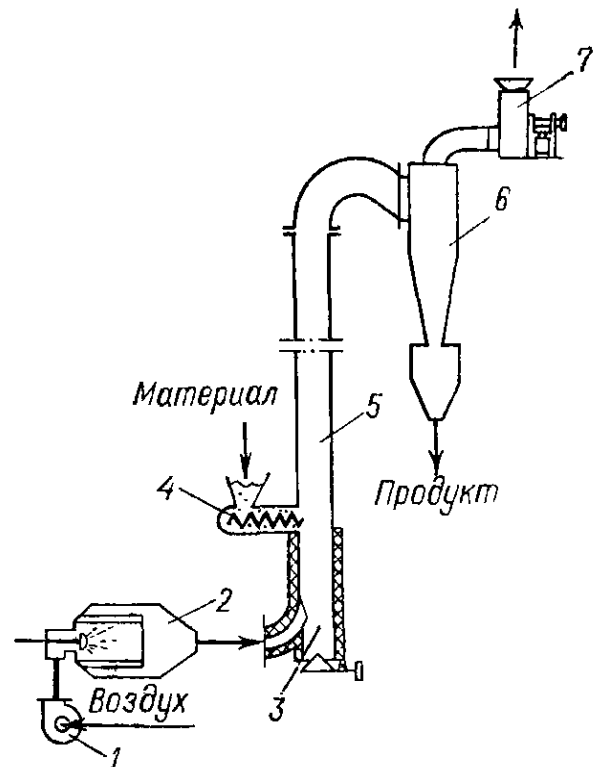


Рис. 25. Пневматическая сушилка:
1 — вентилятор; 2 — топка; 3 — затвор-мигалка; 4 — питатель; 5 — пневмотруба; 6 — циклон; 7 — дымосос.

Распылительные сушилки

Для жидких материалов давно применяют сушку распылением. Этот метод заключается в том, что материал диспергируют и высушивают в потоке газообразного теплоносителя. Сушка происходит практически мгновенно, вследствие чего можно использовать газы с высокой температурой без ухудшения качества продукта.

Недостатки такого метода сушки: большие размеры сушильной камеры при использовании низкотемпературного теплоносителя и повышенный расход электроэнергии.

Используют три способа диспергирования влажных материалов: механическими и пневматическими форсунками и центробежными дисками.

Механический распыл производится при давлении до 30 МПа (300 кгс/см^2); форсунки просты, но регулировать их производительность трудно. Ввиду того, что отверстия имеют малый диаметр, они легко засоряются, и такие форсунки непригодны для распыления суспензий.

В пневматических форсунках для распыления используют сжатый воздух давлением 0,5—0,6 МПа ($5\text{—}6 \text{ кгс/см}^2$) или пар давлением 0,4—0,6 МПа ($4\text{—}6 \text{ кгс/см}^2$). В таких форсунках может осуществляться внутреннее или внешнее смешение. При сушке чаще применяют форсунки с внешним смешением (раствор и воздух смешиваются вне корпуса форсунки).

Распыление раствора при помощи центробежных дисков состоит в том, что через специальную распределительную коробку или трубу с отверстиями раствор под небольшим избыточным давлением подают на быстровращающийся диск. Дисперсность распыла зависит от окружной скорости, физических свойств раствора и т. д. Факел распыла расположен в горизонтальной плоскости, и его размер обуславливает диаметр сушильной камеры. Расход электроэнергии при таком распыле составляет 5—10 кВт·ч/т раствора. Основные преимущества распыления дисками: однородность распыла, возможность распыления грубых суспензий, вязких растворов и текучих паст, большая мощность одного распылителя.

В зависимости от технологических требований сушку проводят при прямотоке, противотоке и смешанном токе материала и теплоносителя.

Большинство распылительных сушилок работает при прямотоке, обеспечивающем интенсивный режим, поскольку возможно использование высокотемпературного теплоносителя даже при сушке термочувствительных продуктов. В этом случае тепловой к. п. д. сушилки наибольший.

Противоток применяют редко, например при совмещении сушки с прокалкой. В этом случае теплоноситель покидает сушилку с высокой температурой, и тепловой к. п. д. невелик вследствие больших потерь теплоты с отходящими газами.

Смешанный ток используют при необходимости увеличения времени пребывания материала в зоне сушки: раствор распыляется форсункой снизу навстречу теплоносителю, затем частицы меняют направление и движутся в одинаковом направлении с газом, а сухой продукт выделяется в нижней части сушилки.

Большое влияние на процесс оказывает степень смешения теплоносителя с диспергированным материалом, поскольку

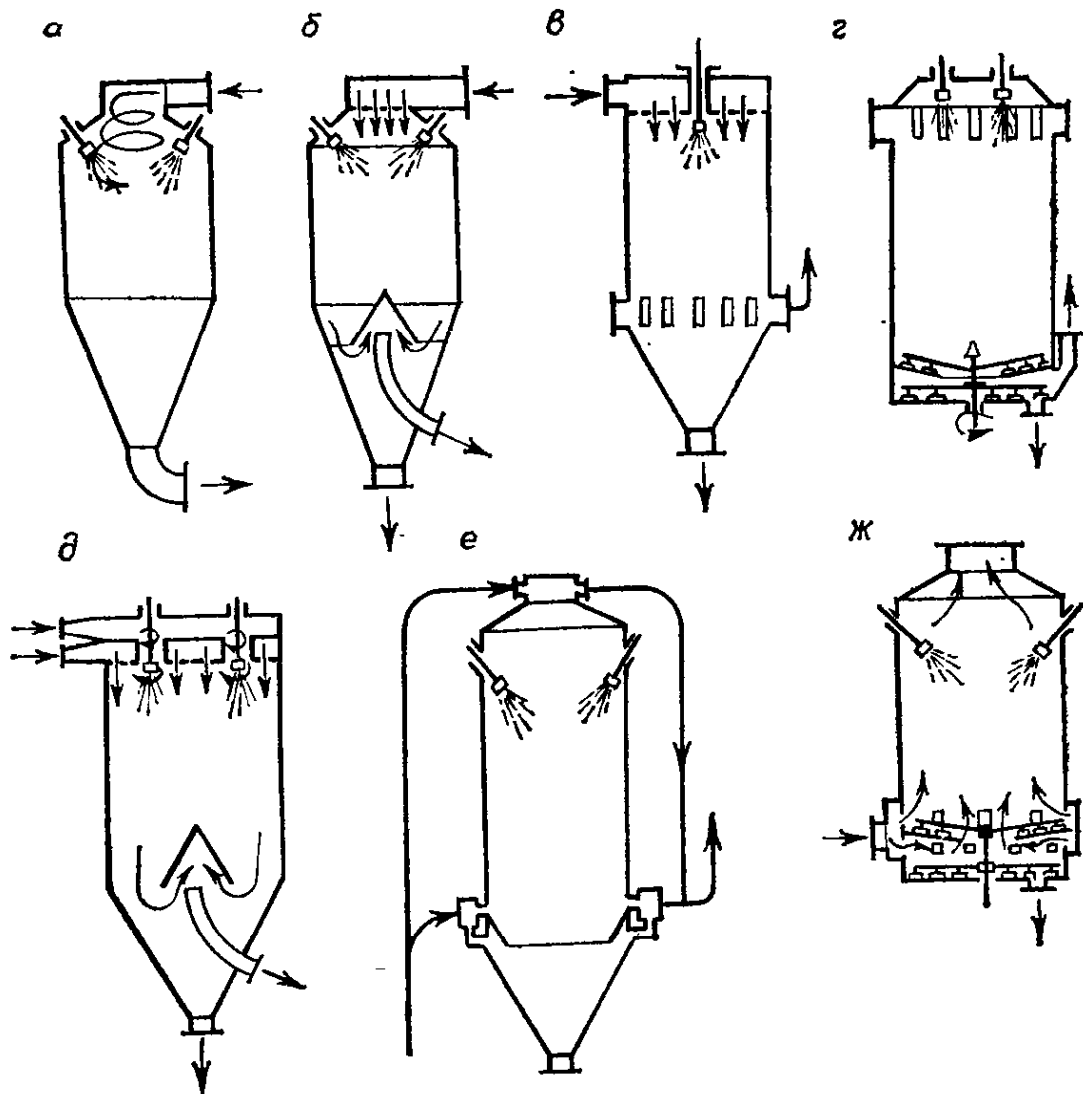


Рис. 26. Схемы форсуночных камер:

а—с центральным закрученным потоком теплоносителя; б—с центральным подводом теплоносителя и разделным отводом газа и продукта; в—с равномерным распределением газов по сечению; г—с радиальным подводом теплоносителя и центральным его отводом; д—с локальным подводом газов к форсунке; е—с параллельным и противоточным движением газов и материала; ж—с центральным и периферийным подводом теплоносителя и отводом газов по центру (противоточная).

продолжительность пребывания материала в сушилке очень мала, что зависит от способа ввода газов в камеру и их вывода из нее.

Конструкции сушильных камер при распылении раствора пневматическими или механическими форсунками существенно отличаются от сушилок с дисковым распылением материала. Схемы наиболее распространенных форсуночных сушильных камер приведены на рис. 26.

Сушилка с центральным тангенциальным вводом газов (скорость 6—12 м/с) и выводом их вместе с высушенным материалом

снизу аппарата изображена на рис. 26, *а*. На рис. 26, *б* показана сушилка с центральной подачей газов через решетку и отводом через трубу. В этом случае газы отбираются из нижней части цилиндрической камеры. При сушке высоковлажного материала газы с низкой температурой их можно подавать через решетку равномерно по всему сечению (рис. 26, *в*) или по периферии через окна (рис. 26, *г*). Сушилка с отдельной подачей газов представлена на рис. 26, *д*. Основную часть газов подают у форсунки, причем в некоторых случаях поток закручивается. Чтобы не происходило налипания материала на верхнем перекрытии камеры, остальное количество газов вводят равномерно по всему сечению камеры через решетку. При таком способе подвода теплоносителя значительно повышается производительность аппарата. Сушилка, показанная на рис. 26, *е*, может работать как при прямоточном, так и при противоточном движении газов. Форсунку устанавливают на 2 м ниже верхней части цилиндра для создания зоны сепарации при работе по противоточной схеме. На рис. 26, *ж* показана противоточная сушилка. Подача газов осуществляется через окна над верхней тарелкой и под тарелкой. Форсунки расположены на 1,5 м ниже верхнего перекрытия.

При дисковом распыле диаметр камеры значительно больше, чем при форсуночном, меньше скорость газов и труднее распределить их равномерно по сечению камеры. Наиболее рационально подавать газы к корню факела распыла, чтобы максимально использовать для сушки горизонтальный участок полета капель с большой скоростью и обеспечить циркуляцию газов вблизи диска. Таким образом, можно подавать газы с высокой температурой, не опасаясь перегрева продукта. Отводить теплоноситель целесообразно из центра камеры.

Схемы сушилок с дисковым распылением представлены на рис. 27. По способу ввода газов они разделяются на аппараты с равномерной подачей газов над факелом по всему сечению камеры (рис. 27, *а* и *б*) и с сосредоточенной подачей газов к центру факела распыла (рис. 27, *в* — *з*). Вывод газов и материала производится отдельно (кроме схемы *а*). При низкотемпературной сушке высоковлажных растворов рекомендуется использовать камеры типов *а*, *б*. Скорость газов в расчете на полное сечение камеры должна быть не менее 0,2 м/с. На рис. 27, *е* приведена схема сушилки с верхней подачей газов в центр факела распыла. В центре камеры установлен защитный кожух, в котором размещается привод с электродвигателем. Теплоноситель подводится к газораспределительному конусу с помощью равнорасходного кругового газохода. Поток газов на выходе из него закручивается настолько, чтобы не было поднятия факела и теплоноситель двигался вместе с частицами раствора в горизонтальном направлении. На рис. 27, *ж* газы подводятся к центру факела распыла и сухой продукт разгружается механическими скребками. Наличие двух днищ позволяет отводить газы из центра камеры и уменьшить унос пыли. Сушилки с дисковым распылением имеют производительность до 35 т/ч раствора.

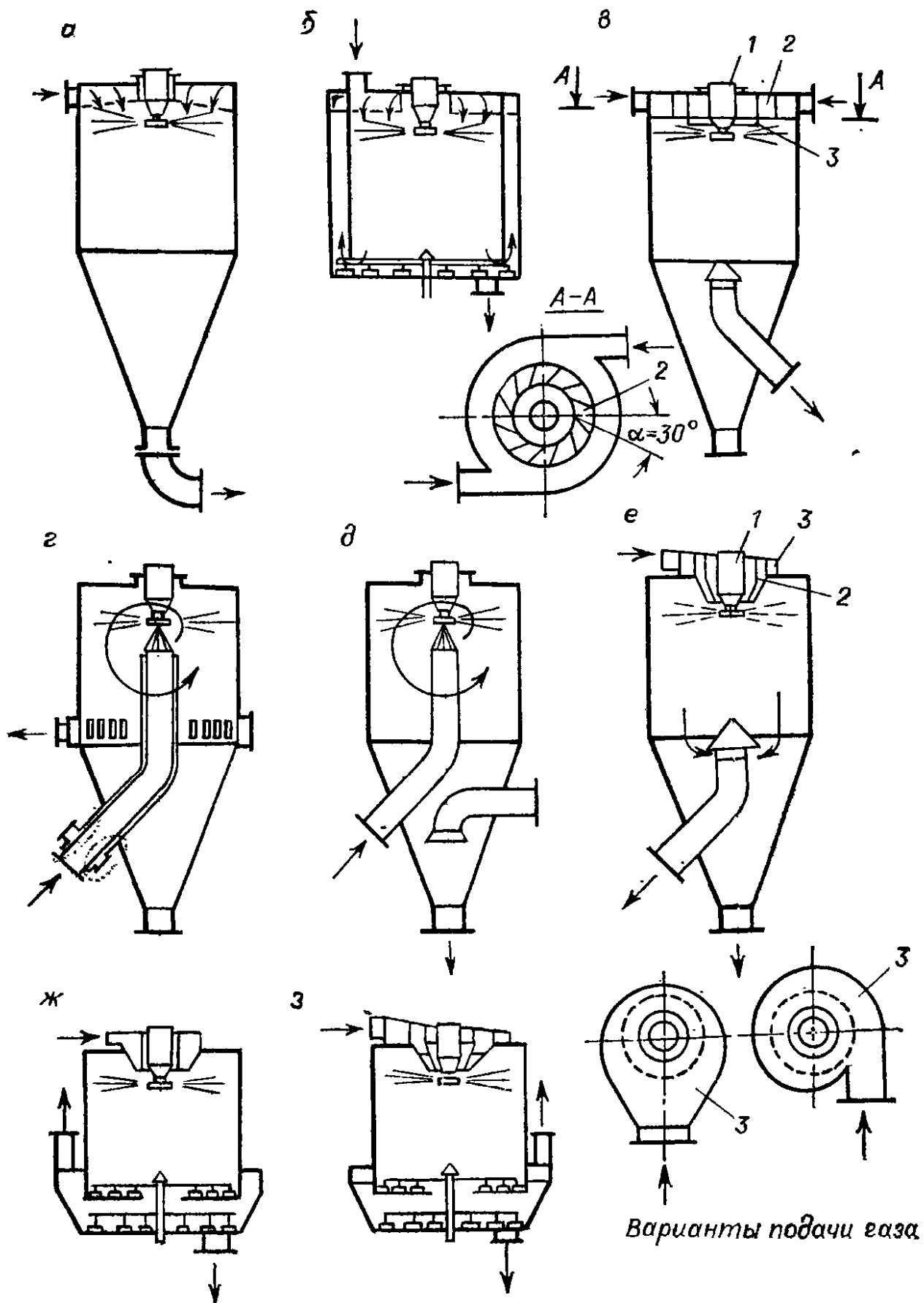


Рис. 27. Схемы сушилок с дисковым распылением (а — з):
 1—привод; 2—газораспределительное устройство; 3—газовый корб.

ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Нормальная работа сушильных установок в значительной степени зависит от надежности и правильного выбора вспомогательного оборудования. Методики выбора и расчета этого оборудования приводятся в специальной литературе, поэтому ниже будут рассмотрены лишь основные конструкции вспомогательных устройств, их достоинства и недостатки.

КАЛОРИФЕРЫ

В зависимости от вида применяемого теплоносителя в сушильных установках могут использоваться паровые, огневые или электрические калориферы (воздухоподогреватели).

Паровые калориферы применяют для подогрева воздуха до 150°C (давление греющего пара в этом случае должно быть $> 0,6$ МПа, т. е. 6 ат). Такие калориферы состоят из ряда трубок, по которым проходит греющий пар, а снаружи — подогреваемый воздух. Поскольку коэффициент теплоотдачи от конденсирующегося пара к стенке в несколько сот раз выше, чем от стенки к воздуху, поверхность калорифера, соприкасающуюся с воздухом, следует делать во много раз больше поверхности, обогреваемой паром. Поэтому трубки калорифера снабжаются ребрами или пластинами. Наибольшее распространение получили пластинчатые калориферы, состоящие из пучка параллельных трубок диаметром около 30 мм, на которые на расстоянии 5 мм одна от другой насажены прямоугольные пластины толщиной приблизительно 1 мм. Концы труб ввальцовываются или ввариваются в стальные доски-решетки. Для удобства сборки на отдельных секциях имеются рамки из угловой стали. В среднем коэффициенты теплоотдачи можно принимать равными 23—35 Вт/(м²·К), т. е. 20—30 ккал/(м²·ч·°С), при скоростях воздуха от 2 до 12 м/с. Размеры калориферов зависят от производительности и колеблются в широких пределах.

Достоинство таких подогревателей — небольшое гидравлическое сопротивление (приблизительно 200—800 Па, т. е. 20—80 мм вод. ст.). Недостатками их являются неравномерное распределение поступающего воздуха, т. е. образование застойных зон, в результате чего температура выходящего воздуха оказывается ниже расчи-

танной, а также возможность загрязнения поверхности со стороны воздуха, что приводит к необходимости остановки аппарата для его чистки.

К. п. д. калориферов доходит до 99%.

Газовые (огневые) воздухоподогреватели применяют в тех случаях, когда требуется нагреть воздух до 200—300 °С, а смесь продуктов сгорания с воздухом нельзя использовать для целей сушки по технологическим причинам.

Для нагревания воздуха используют металлические подогреватели, в которых теплообмен между воздухом и продуктами сгорания происходит через стенку. Применяют стальные трубчатые и пластинчатые, а также чугунные ребристые подогреватели. Необходимо отметить, что вследствие возможности быстрого загрязнения пластинчатых аппаратов чаще используют гладкотрубные подогреватели, а также компактные подогреватели игольчатого типа — с плоскими внутренними иглами.

При высокой температуре отходящих газов к. п. д. подогревателя очень низок. Поэтому используют частично возвратные отходящие газы. При этом к. п. д. повышается, но увеличивается расход электроэнергии вследствие необходимости установки дополнительного вентилятора для рецикла газов. Целесообразность рециркуляции и ее оптимальную кратность можно определить только в результате технико-экономических расчетов.

ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛИ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Такие аппараты применяют в тех случаях, когда из-за особенностей производства недопустимо расположение газовых подогревателей вблизи сушильной установки, а воздух должен быть нагрет до высокой температуры. Нагревание воздуха может осуществляться с помощью жидкого или парообразного высокотемпературного органического теплоносителя (ВОТ) в обычных трубчатых теплообменниках. Достоинства парового обогрева: 1) его равномерность; 2) температура пара зависит только от давления; 3) коэффициент теплоотдачи достаточно высок — до 2900 Вт/(м²·К), т. е. 2500 ккал/(м²·ч·°С).

ТОПКИ

Сушка топочными газами имеет преимущества по сравнению с сушкой нагретым воздухом (возможность достижения высоких температур теплоносителя, отсутствие теплообменников). Обычно применяют топочные газы, получаемые при сжигании жидкого или газообразного топлива, а для получения смеси с заданной температурой их разбавляют воздухом. Для полного сгорания топлива должно обеспечиваться определенное тепловое напряжение

топочного пространства q_V . Ниже приведены рекомендуемые значения $q_V \cdot 10^{-3}$ (в Вт/м³) для топок:

Топливо	$q_V \cdot 10^{-3}$
Доменный газ, мазут	230—350 (200—300)
Генераторный газ, торф, дрова	230—290 (200—250)
Каменный уголь	290—350 (250—300)
Природный газ	350—2300 (300—2000)

Примечание. В скобках даны значения $q_V \cdot 10^{-3}$, выраженные в ккал/(м³·ч).

Топка для сжигания мазута, представляющая собой цилиндрическую камеру, изображена на рис. 28. Кожух изготовлен из листовой стали толщиной 10 мм. По фронту топки размещены две

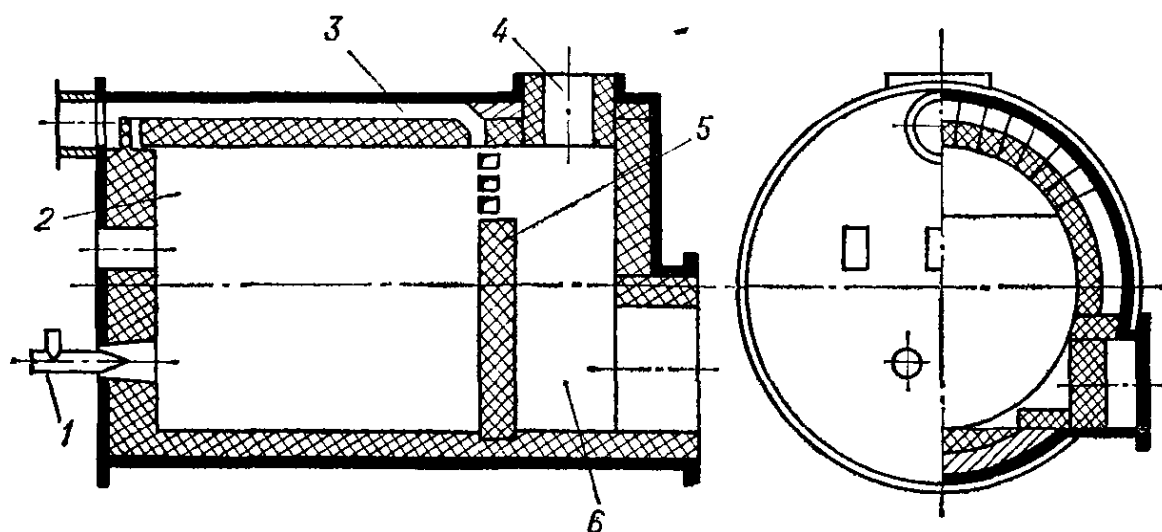


Рис. 28. Топка для сжигания мазута:

1—форсунка низкого давления; 2—камера сгорания; 3—каналы; 4—патрубок растопочной трубы; 5—перегородка; 6—камера смешения.

мазутные форсунки. Воздух для горения подается над форсунками. Воздух для разбавления газов вводится в смешительную 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.

На рис. 29 показана топка для сжигания газа с использованием эжекционной горелки внутреннего смешения. Отличительной особенностью такой топки является зазор между камерой горения и кожухом, куда тангенциально подается вторичный воздух. Воздух охлаждает наружную стенку камеры горения и затем смешивается с продуктами сгорания. При воздушном охлаждении камера может быть футерована в один кирпич, сжигание топлива можно вести при высоких температурах. Так как температура теплоносителя, используемого для сушки, обычно не превышает 700—800 °С, в топочных устройствах имеется специальная камера,

в которой топочные газы разбавляются воздухом до нужной температуры. Топка может работать как под давлением, так и при разрежении. Тепловое напряжение достигает $1,75 \cdot 10^6$ Вт/м³, т. е. $1,5 \cdot 10^6$ ккал/(м³·ч), и зависит от температуры в камере горения и давления.

Основное требование, предъявляемое к топочным устройствам, — обеспечение полного сгорания топлива. Особенно это относится к устройствам, работающим на жидком топливе (об использовании твердого топлива здесь не говорится, поскольку в последнее время его редко применяют в сушильных установках на химических производствах). Таким образом, топливные форсунки должны обеспечивать тонкое диспергирование мазута, чтобы не

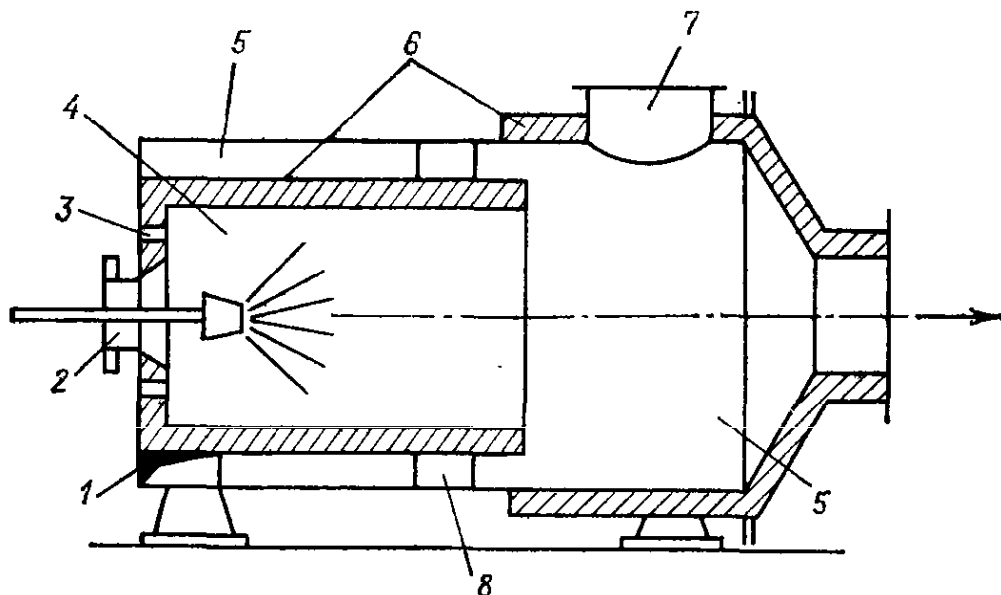


Рис. 29. Топка с охлаждением наружной стенки камеры горения:

1—окно для ввода вторичного воздуха; 2—гнездо для установки горелки; 3—смотровое отверстие; 4—камера горения; 5—камера смешения; 6—футеровка; 7—взрывной клапан; 8—опора.

происходило проскока крупных капель в сушилку и порчи продукта. В сушилке со взвешенным слоем это может привести к сгоранию капель мазута на газораспределительной решетке и забиванию отверстий. Несгоревшее топливо, осевшее на стенках газопроводов и в циклонах, может стать причиной пожаров.

Если топка еще горячая, при пуске установки нужно следить за тем, чтобы мазут был подогрет, а конденсат (когда распыление топлива производится паром) спущен из линии подогрева мазута, так как холодный мазут и конденсат, попав на свод топки, вызовут его растрескивание. Смешение продуктов сгорания с воздухом должно быть полным. Для этого в камере смешения необходимо устанавливать пороги или завихрители.

ПЫЛЕОТДЕЛИТЕЛИ

Этот вид вспомогательного оборудования используют для отделения пыли от потока уходящего теплоносителя с целью более полного выделения продукта (иногда продукт полностью

выделяется в пылеулавливающей аппаратуре), а также для предотвращения загрязнения окружающей среды.

Эффективность очистки теплоносителя η (в %) может быть определена по формуле:

$$\eta = \frac{c_1 - c_2}{c_1} 100$$

где c_1 и c_2 — концентрация частиц в потоке до и после очистки, соответственно.

При установке двух пылеуловителей общая степень очистки будет равна

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 - \eta_1 \eta_2$$

Методы выделения твердых частиц из газового потока разделяют на сухие и мокрые. При сухой очистке используют пылеосадительные камеры, циклоны и рукавные фильтры. Для мокрой очистки применяют мокрые скрубберы и пенные газопромыватели.

Пылеосадительные камеры в химической промышленности используют редко ввиду их низкой эффективности. Интенсивное и эффективное выделение твердых частиц из запыленного газа достигается под действием центробежной силы в циклонах (рис. 30). Запыленный газ поступает в верхнюю цилиндрическую часть 1 циклона по газоходу прямоугольного сечения 2. Сверху циклон закрыт крышкой 3, на которой помещен цилиндрический патрубок 4. Нижняя коническая часть циклона заканчивается выгрузочным отверстием. Попадающий в циклон запыленный газ приобретает вращательное движение, частицы пыли под действием центробежной силы отбрасываются к периферии и сползают по стенкам вниз, а обеспыленный газ выводится сверху. На практике все циклоны снабжаются бункером (на схеме не показан), и разгрузка пыли производится из бункера, что уменьшает вторичный унос, т. е. вынос пыли потоком уходящего из циклона воздуха.

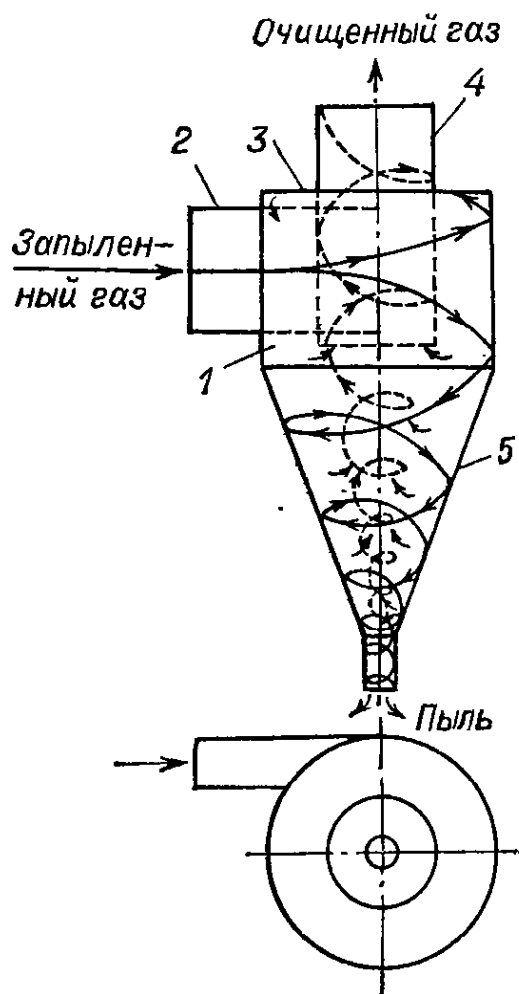


Рис. 30. Схема действия циклона:

1—цилиндрическая часть; 2—патрубок для входа газа; 3—крышка; 4—патрубок для выхода газа; 5—коническая часть.

Скорость движения газов во входном патрубке циклона 15—25 м/с, в выходном около 8 м/с.

Степень очистки газов в циклонах составляет 70—95% и зависит от свойств пыли. Чем крупнее и тяжелее частицы, тем лучше они улавливаются, так как больше величина действующей на них

центробежной силы $p_{ц}$:

$$p_{ц} = \frac{m\omega^2}{r} \quad (16)$$

где m — масса частицы; ω — окружная скорость; r — радиус циклона.

Концентрация пыли в газе влияет на степень очистки не очень существенно. Следует иметь в виду, что с увеличением скорости газа в циклоне ω величина центробежной силы растёт, как это следует из соотношения (16), но одновременно увеличивается гидравлическое сопротивление аппарата.

Существует некоторая оптимальная скорость, при которой гидравлическое сопротивление циклона не превышает ~ 500 — 750 Па (55 — 75 мм вод. ст.), а степень очистки практически достигает наибольшего значения.

При необходимости обеспечения высокой производительности иногда устанавливают групповые или батарейные циклоны, так как делать один циклон большого диаметра нецелесообразно: с увеличением радиуса циклона будет уменьшаться величина центробежной силы и ухудшаться очистка (поэтому не рекомендуется ставить циклоны диаметром более 800 мм). Можно использовать батареи по два, четыре, шесть, восемь циклонов, работающих параллельно. При очистке газов от очень тонких пылей, имеющих низкую плотность (т. е. когда масса частицы очень мала), для увеличения центробежной силы необходимо уменьшить радиус циклона (скорость газа увеличивать не следует). В этом случае устанавливают батареи, состоящие из нескольких десятков, а иногда и сотен циклонов диаметром 150 — 200 мм. Запыленный газ вводится в кольцевой зазор, образуемый корпусом каждого циклона и выходным патрубком, а для закручивания потока внутренняя труба снабжается винтовой вставкой. Степень очистки в батарейных циклонах ниже, а гидравлическое сопротивление выше, чем в одиночных циклонах.

Для нормальной работы циклона необходимо своевременно удалять пыль из бункера, так как при большом уровне пыли она будет частично захватываться потоком газа и степень очистки снизится.

Степень очистки резко уменьшается при наличии неплотностей в циклоне, поскольку засасываемый снаружи воздух движется навстречу сыпавшейся пыли и часть ее выбрасывается в выхлопную трубу. Вследствие этого обязательна проверка герметичности циклонов как при приемке смонтированной установки, так и периодически при ее эксплуатации. Газоходы от сушилок до циклонов могут забиваться пылью (особенно колена и горизонтальные участки), поэтому их необходимо монтировать с наименьшим количеством поворотов и без горизонтальных участков, снабжать специальными люками для чистки. В некоторых случаях для предотвращения быстрого зарастания стенок циклона улавливаемым

материалом аппараты снабжают водяной рубашкой, причем температура воды должна быть на несколько градусов выше точки росы.

Рукавные фильтры, предназначенные для отделения пыли от уходящих из сушилки газов, обычно ставят после циклонов, однако при сравнительно небольшой запыленности (если основное

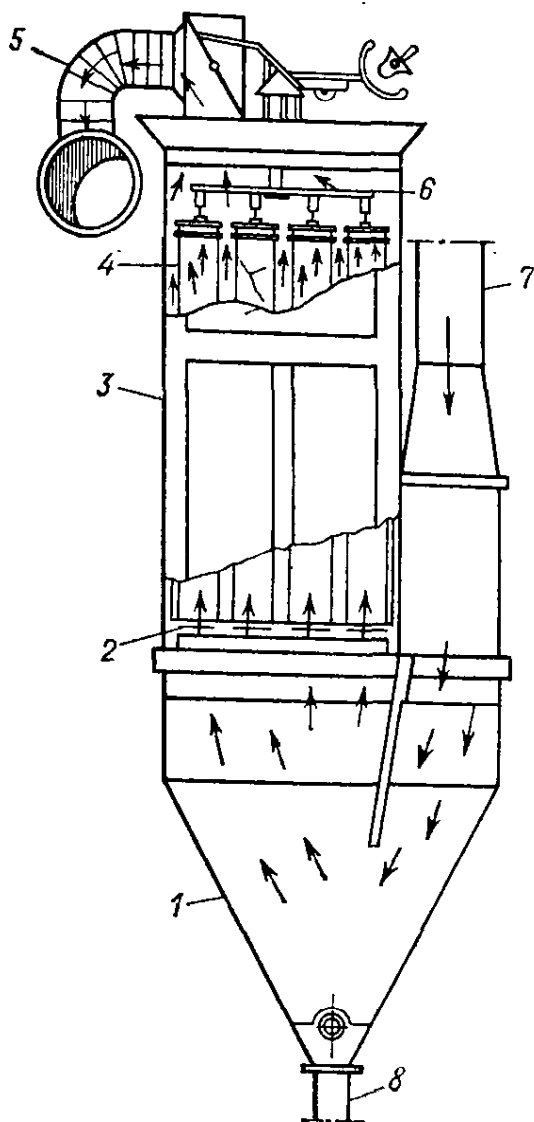


Рис. 31. Рукавный фильтр:

1—дно; 2—нижняя камера; 3—кожух; 4—рукав; 5, 7—газоходы; 6—рама; 8—выгрузочное отверстие.

количество сухого материала выгружается из сушилки) они могут быть единственными пылеочистными устройствами в установке, так как при правильном выборе ткани степень очистки превышает 99%. Внутри кожуха 3 фильтра (рис. 31) вертикально расположены сшитые из ткани рукава (мешки) 4 длиной до 3,6 м и диаметром около 200 мм. Снизу рукава открыты и закреплены на трубной доске, замыкающей нижнюю камеру 2. Сверху рукава закрыты и подвешены на крючках к раме 6 со штангой, выходящей из кожуха. Запыленный газ поступает в аппарат по газоходу 7 в нижнюю камеру, движется вверх по рукавам и через поры ткани выходит в пространство между рукавами и кожухом, а затем удаляется по верхнему газоходу 5. Осевшая внутри рукавов пыль периодически удаляется из них при встряхивании с помощью кулачкового механизма, соединенного с верхней штангой. Одновременно со встряхиванием рукава продуваются воздухом, который специальным небольшим вентилятором подается в направлении, противоположном направлению движения обеспыленного газа. Во время

продувки кожух фильтра автоматически отключается от газохода 5. Ссыпавшаяся в коническую часть кожуха пыль удаляется через выгрузочное отверстие 8 шнеком. Обычно фильтр состоит из нескольких камер, одна из которых отключена на очистку, тогда как в остальных идет фильтрование. Переключение происходит автоматически.

Производительность фильтров зависит от площади поверхности рукавов, размеров пор и частиц, а также от содержания частиц в запыленном газе. Для грубой пыли производительность фильтров составляет 100—250 м³ газа в 1 ч на 1 м² ткани при потере напора около 750 Па (75 мм вод. ст.).

Поступающие на фильтрование газы во избежание их конденсации на рукавах должны иметь температуру на 8—10 °С выше точки росы.

Мокрую очистку применяют обычно в качестве последней ступени перед выбросом отработанных газов в атмосферу. Наиболее часто используют скрубберы. Газ обычно подается навстречу воде, распыленной в виде завесы (полые скрубберы) или стекающей по насадке (насадочные скрубберы). Иногда в процессе сушки из сухого материала частично выделяются ценные вещества (например, аммиак, фтор). В этих случаях скруббер используется как абсорбер. Так, для улавливания аммиака, выделяющегося при сушке аммофоса, скруббер орошают слабой фосфорной кислотой, поступающей далее на сатурацию, в результате которой получается исходная аммофосная пульпа. Мокрые скрубберы отличаются высокой степенью очистки (до 98% и более). Следует отметить, что благодаря большой поверхности соприкосновения пленки жидкости с газом в скрубберах с насадкой достигается очень высокая степень очистки, но такие аппараты используются редко, особенно при улавливании нерастворимых частиц, из-за быстрой забивки насадки. Кроме того, насадочные скрубберы имеют высокое гидравлическое сопротивление и большую высоту.

При скорости газов от 0,5 до 3 м/с унос жидкости из скруббера составляет 0,3—10%. При грубом распыле принимают скорость 1,0 м/с. Заметим, что обычно скруббер орошают водой, которую подвергают многократной циркуляции для получения концентрированного раствора или суспензии, которые возвращают в технологический процесс или на сушку.

Пенный пылеуловитель показан на рис. 32. Запыленные газы с большой скоростью (около 10 м/с) выходят из отверстий перфорированной тарелки, на которую подается жидкость; при этом образуется пена и пыль улавливается жидкостью. Суспензия (шлам) выводится через переливной порог и частично из нижней части аппарата («проваливается» через отверстия тарелки), а очищенные газы — сверху.

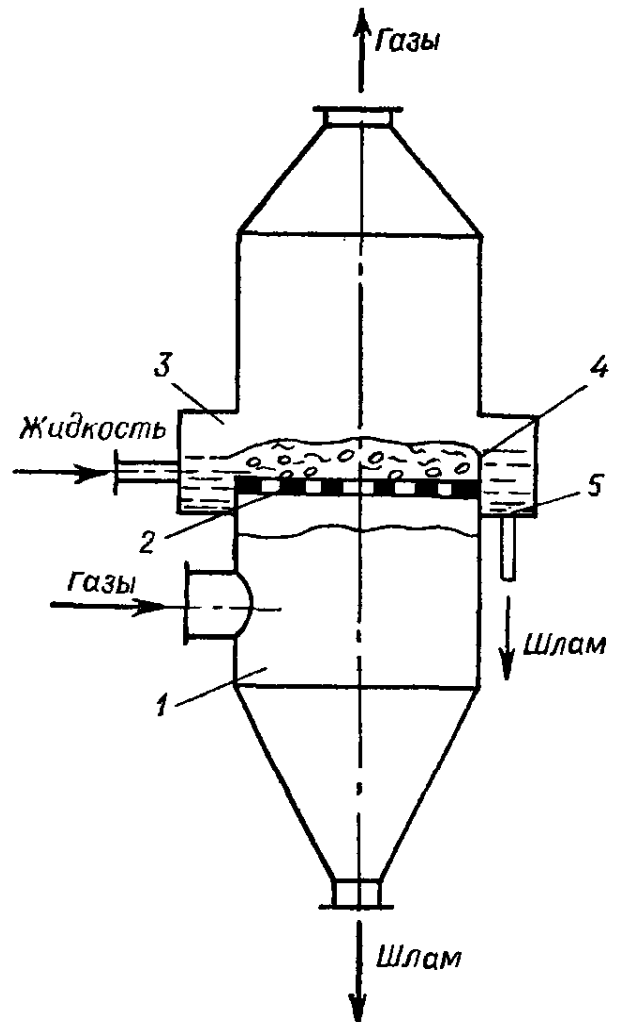


Рис. 32. Пенный пылеуловитель:

- 1—корпус; 2—перфорированная тарелка;
- 3—приемная коробка; 4—порог; 5—сливная коробка.

Для нормальной работы пенного аппарата необходимо, чтобы тарелка была установлена строго горизонтально. Тогда слой пены будет иметь одинаковую высоту и газ равномерно распределится по сечению аппарата. Кроме того, надо следить за тем, чтобы скорость потока газа в отверстиях решетки была постоянной и соответствовала расчетной.

ПИТАТЕЛИ И ЗАТВОРЫ

При сушке необходимо дозировать, а часто и диспергировать материал, подаваемый в сушилку. В некоторых случаях питатель должен служить одновременно затвором между сушильной камерой и окружающим пространством.

На рис. 33 показан лопастной питатель-затвор, применяемый для загрузки и выгрузки материала из сушилок, выгрузки пыли из циклона и т. д.

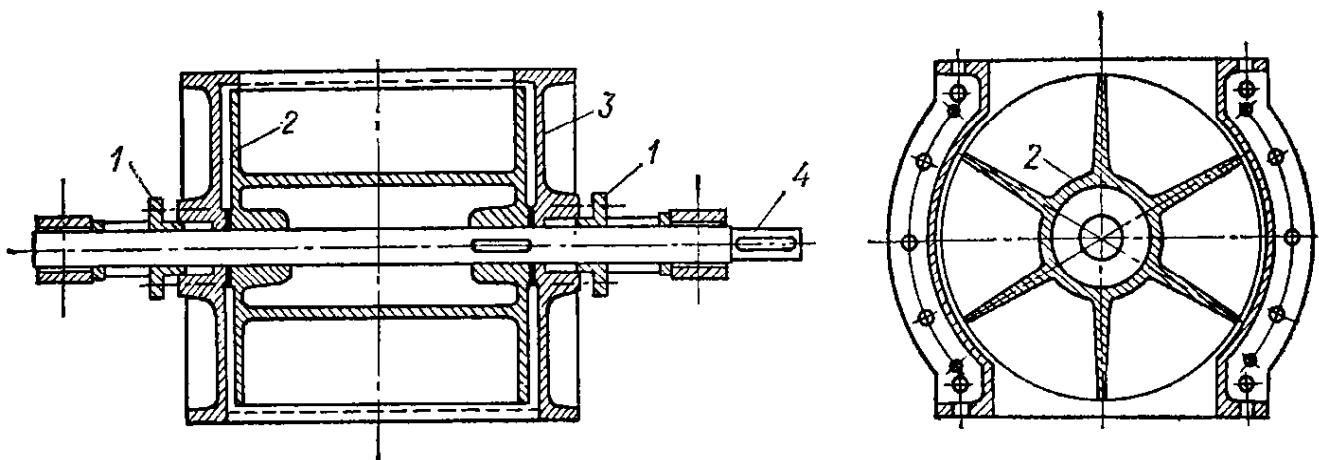


Рис. 33. Лопастной затвор:

1—сальник; 2—ротор; 3—корпус; 4—вал.

На выгрузке сухого сыпучего материала из сушилки или циклона для ликвидации подсосов воздуха в эти аппараты применяют затворы-мигалки (рис. 34), причем для лучшей герметизации их иногда устанавливают по две на одном вертикальном участке. Чем больше расстояние между ними (до 1 м), тем надежнее они работают. Для еще более надежной герметизации можно последовательно устанавливать лопастной затвор и прерывистый шнек.

ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ РЕШЕТКИ

Газораспределительные решетки являются одним из основных элементов сушилок, работающих с кипящим (псевдоожигенным) слоем материала. Они выполняют функцию поддерживающей конструкции для кипящего слоя и способствуют равномерному распределению теплоносителя по сечению сушилки. Решетка должна удовлетворять следующим требованиям: 1) обеспечивать равномерное газораспределение; 2) провал материала в подрешеточное пространство должен быть минимальным; 3) быть

простой в изготовлении и надежной в работе (легкая очистка, ремонт); 4) гидравлическое сопротивление не должно превышать 1,5—2,0 кПа (150—200 мм вод. ст.).

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. Изображенная на рис. 35 плоская решетка, состоящая из ряда перекрывающихся пластин, обеспечивает перемещение материала в горизонтальном направлении вблизи решетки, т. е. в зоне наиболее высоких температур. Теплота отводится от решетки интенсивно, застойные зоны полностью отсутствуют, практически отсутствует также провал через решетку. Опыт эксплуатации этих решеток на аппаратах с площадью поперечного сечения 10 м² показал их надежность. Такую решетку рекомендуется использовать для комкующихся

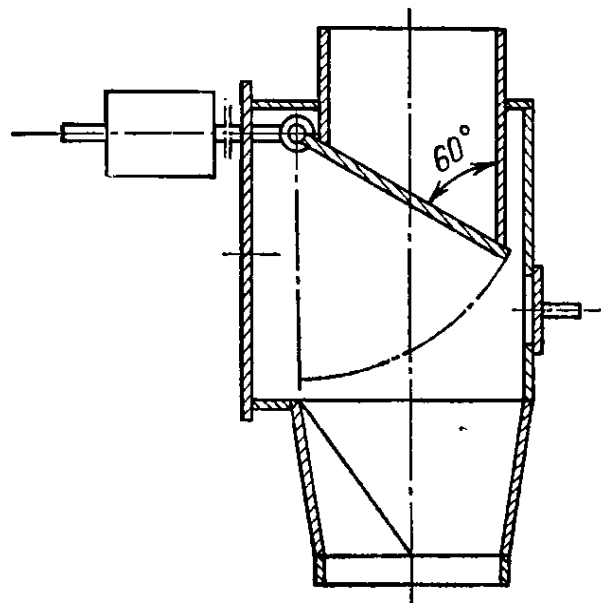


Рис. 34. Затвор-мигалка.

а



б



Рис. 35. Щелевая плоская газораспределительная решетка:
а—желобчатая; б—плоская беспровальная.

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).

Важно правильно установить решетку. При температурах поступающего теплоносителя до 400 °С решетка может быть выполнена сплошной, а для больших аппаратов — из отдельных секций, и ее можно крепить жестко. При более высоких температурах целесообразно изготавливать решетку из отдельных колосников, но сборка и разборка ее должны быть легкими. Во избежание температурных деформаций такая решетка должна быть «плавающей». Следует отметить, что желобообразные решетки не требуют специальных опор, поскольку они сами являются жесткими. Для плоских решеток щелевого типа необходимо применять специальные опоры.

КОНДЕНСАТОРЫ

Эти аппараты служат для конденсации паров, а поскольку жидкость занимает приблизительно в 1000 раз меньший объем, чем пар, из которого она образовалась, то конденсация сопровождается понижением давления. Конденсирующийся пар всегда содержит воздух, который будет постепенно накапливаться в конденсаторе, и разрежение будет падать. Чтобы разрежение в конденсаторе оставалось постоянным, необходимо отводить из него и конденсат и воздух.

Охлаждение паров в конденсаторах осуществляется с помощью холодной воды. В зависимости от способа охлаждения различают поверхностные конденсаторы, в которых теплообмен между парами и водой происходит через стенку, и конденсаторы смешения, в которых конденсирующиеся пары и вода смешиваются. При конденсации паров растворителей не следует использовать конденсаторы смешения; целесообразно конденсировать пары в конденсаторе поверхностного типа, чтобы полученный чистый конденсат вернуть в производство.

В качестве поверхностных конденсаторов применяют кожухотрубчатые теплообменники. Пары, поступающие из сушилки, конденсируются, и конденсат стекает в сборник.

Обслуживание конденсатора сводится к наблюдению за температурой отходящей воды, которая должна быть не менее чем на 10 °С ниже температуры поступающего в конденсатор пара. Температуру регулируют, изменяя расход охлаждающей воды. При перерывах в работе сначала прекращают подачу в конденсатор паров, а затем воды.

Недостатками поверхностных конденсаторов по сравнению с конденсаторами смешения являются сравнительно сложное устройство, высокие требования к чистоте воды, менее полное использование охлаждающей способности воды.

Конденсаторы смешения в сушильной практике применяют чаще поверхностных. В них вода и пары непосредственно контактируют, причем для увеличения поверхности соприкосновения воду вводят через многочисленные мелкие отверстия.

В зависимости от способа отвода конденсата, охлаждающей воды и газов конденсаторы смешения делят на мокровоздушные и сухие (барометрические) конденсаторы. В мокровоздушных конденсаторах жидкость и газы отводятся совместно мокровоздушным вакуум-насосом, а в сухих конденсаторах газы отводятся сухим вакуум-насосом, а жидкость удаляется самотеком по барометрической трубе. Барометрический конденсатор состоит из стального цилиндра с выпуклыми днищами, внутри которого расположены тарелки в форме частично перекрывающихся сегментов: В тарелках имеются отверстия диаметром 2—5 мм. Пары влаги поступают в нижнюю часть корпуса, а охлаждающая вода подается сверху, стекает по тарелкам вниз и вместе с конденсатом выводится по барометрической трубе в приемок, а воздух отсасывается сверху сухим вакуум-насосом через брызгоуловитель.

Высота сливной трубы должна быть около 10 м, чтобы находящийся в ней столб воды мог уравновесить наружное атмосферное давление. Остаточное давление внутри конденсатора равно сумме давлений воздуха и водяного пара над жидкостью и обычно не превышает 10—20 кПа (0,1—0,2 ат), а атмосферное давление уравновешивается столбом воды высотой ~ 10 м. Расход воды G_B на барометрический конденсатор определяют по формуле:

$$G_B = G_{\Pi} \frac{i_{\Pi} - c_B t}{c_B (t - t_0)}$$

где G_{Π} — расход пара; i_{Π} — энтальпия пара при давлении в конденсаторе p_{Π} ; t — температура воды в барометрической трубе; t_0 — температура воды, поступающей в конденсатор; c_B — теплоемкость воды.

ВЕНТИЛЯТОРЫ

В сушильных установках используют обычно вентиляторы типа ВВД и ВМ. Центробежные вентиляторы высокого давления серии ВВД (номера 8; 9 и 11) предназначены для перемещения воздуха и газов (при температуре до 100 °С), не содержащих липких и длинноволокнистых веществ. Содержание пыли в среде не должно превышать 150 мг/м³. Вал вентилятора ВВД-11 приводится во вращение от электродвигателя при помощи эластичной муфты, а вал вентиляторов ВВД-8 и ВВД-9 — при помощи ременной передачи и эластичной муфты. Эти вентиляторы создают давление до 6 кПа (600 мм вод. ст.) и имеют производительность до 20 000 м³/ч (в зависимости от номера).

Мельничные вентиляторы ВМ 15, ВМ 16, ВМ 17, ВМ 18, ВМ 18А, ВМ 19А, ВМ 20А предназначены для работы при температурах до 200 °С и могут работать при запыленности газов до 80 г/м³. Охлаждение подшипников — водяное. Эти вентиляторы имеют производительность (в зависимости от номера) 38 000—150 000 м³/ч и создают давление (при 70 °С) 7,3—12,9 кПа (730—1290 мм вод. ст.).

Вентиляторы могут быть соединены параллельно и последовательно. Необходимость установки двух или нескольких вентиляторов, работающих совместно, может возникнуть, когда один вентилятор не удовлетворяет заданию, а замена его бóльшим невозможна. В остальных случаях следует избегать совместной установки вентиляторов, так как это всегда вызывает уменьшение экономичности и надежности эксплуатации.

Если нужно резко увеличить производительность, то вентиляторы соединяют параллельно. Когда необходимо значительно увеличить давление, их соединяют последовательно.

В сушильной установке надо следить за тем, чтобы заданное количество газов (по регламенту) проходило через сушилку, поэтому не должно быть неплотностей в системе и гидравлическое сопротивление всех аппаратов не должно превышать норму.

КОНТРОЛЬ, УПРАВЛЕНИЕ И ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

КОНТРОЛЬ И УПРАВЛЕНИЕ

Ранее отмечалось, что сушилки с псевдоожигенным слоем могут работать нормально только при наличии полной автоматизации процесса. Поэтому целесообразно привести схему автоматизации такой сушильной установки, имея в виду, что принципиально схема автоматического регулирования трубы-сушилки будет несколько проще, поскольку отпадет необходимость регулирования гидравлического сопротивления аппарата.

В промышленных сушильных установках с псевдоожигенным слоем температуры покидающих слой газов и материала практически равны независимо от начальной температуры теплоносителя и его скорости (при условии, что гидродинамический режим остается нормальным, т. е. не происходит прорыва газов в виде каналов через слой). Таким образом, по температуре слоя можно судить о равенстве между приходом теплоты с теплоносителем и ее расходом на нагревание материала и испарение воды при заданных условиях сушки. Нарушение теплового баланса в результате возмущающих воздействий вызывает изменение выходных параметров.

Изменение производительности по влажному материалу или его влажности при заданных расходе и температуре поступающего теплоносителя приведет к изменению температуры отходящих газов. Например, увеличение производительности или влажности поступающего материала повысит расход теплоты, а поскольку приход ее не изменился, то понизится температура слоя $T_{сл}$. Увеличение расхода теплоносителя или его температуры при неизменной загрузке повысит приход теплоты, что обусловит рост $T_{сл}$. Следовательно, температура слоя — один из основных параметров, по которому можно судить о соответствии прихода и расхода теплоты, поэтому поддержание этой температуры на заданном уровне является главной задачей автоматического регулирования процесса. Понижение $T_{сл}$ приведет к образованию «козлов», а повышение — к пересушке и перегреву материала, снижению эффективности процесса. Температура отходящих газов определяет и конечную влажность материала. Таким образом, необходимость стабилизации температуры диктуется также технологическими требованиями. Кроме того, понижение температуры отходящего теплоносителя может привести к конденсации паров в пылеулавливающей

аппаратуре, ее забиванию влажным материалом. Возрастание температуры отходящих газов в результате повышения $T_{сл}$ снизит производительность хвостового дымососа, поскольку увеличится объем газов, что может быть причиной снижения расхода теплоносителя и уменьшения производительности установки.

В производственных условиях возможны изменения производительности по влажному материалу и по его влажности, поэтому задачей регулирования является компенсация изменений таким образом, чтобы колебания температуры в слое не превышали определенного уровня. На рис. 36 приведена схема автоматического регулирования процесса сушки, причем стабилизируются температура и количество теплоносителя, а постоянство $T_{сл}$ поддерживается путем соответствующего регулирования количества влажного материала, подаваемого в слой (исполнительные механизмы

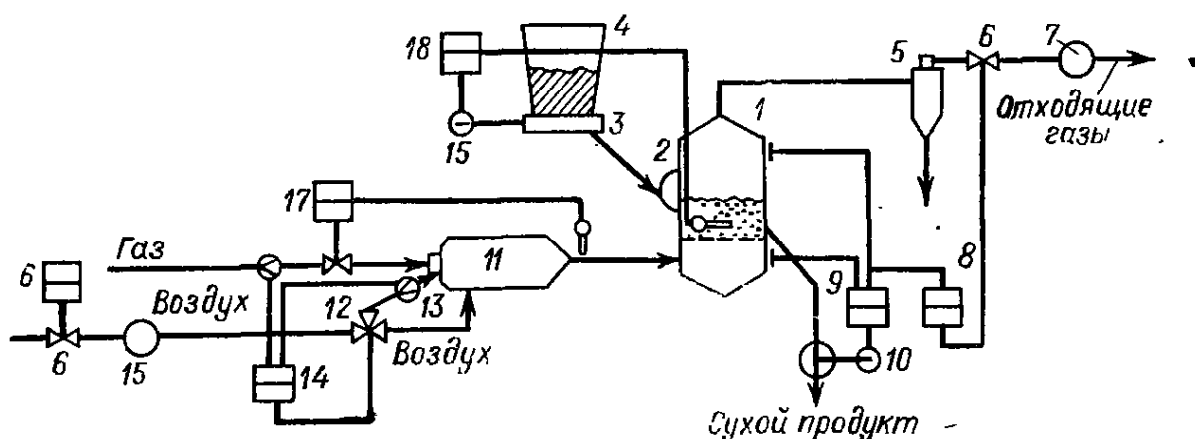


Рис. 36. Схема автоматического регулирования процесса сушки в аппарате с кипящим (псевдооживленным) слоем:

1—аппарат с кипящим слоем; 2—забрасыватель влажного материала; 3—шнек; 4—бункер; 5—циклон; 6 и 12—регулирующие органы; 7—дымосос; 8—регулятор разрежения; 9—регулятор высоты слоя; 10—привод; 11—топка; 13—расходомер; 14—регулятор соотношения газ/воздух; 15—воздуходувка; 16—регулятор соотношения топлива/воздух; 17—регулятор температуры теплоносителя; 18—регулятор температуры слоя.

не показаны). При данном способе регулирования $T_{сл}$ между сушилкой и аппаратом, используемым на предшествующей операции (например, фильтром), устанавливается промежуточный бункер достаточной вместимости, а транспортирующее устройство, подающее материал из промежуточного бункера, должно иметь регулируемый привод, позволяющий менять производительность этого устройства в зависимости от изменения $T_{сл}$.

Схема автоматизации предусматривает регулирование температуры слоя, его гидравлического сопротивления, а следовательно, высоты слоя на решетке и давления газа в газопроводе перед топкой.

Регулятор температуры слоя воспринимает импульс от малоинерционной термопары, помещенной в слой на высоте 200 мм от решетки, и воздействует на вариатор в приводе загрузочного питателя.

Гидродинамическое сопротивление слоя стабилизируется регулятором, воздействующим на редуктор — вариатор выгружающего устройства. Импульсом высоты слоя является перепад давления

под решеткой и в верхней части слоя. Для регулирования давления газа служит пропорциональный регулятор прямого действия, установленный на газопроводе. Постоянство температуры слоя обеспечивает равномерную влажность материала, которая колеблется в интервале 0,1—0,2%.

Регулирование выгрузки необходимо для своевременного отвода сухого материала и стабилизации гидродинамического сопротивления слоя. Гидродинамический режим топки и пылеулавливающей системы в основном стабилизирован и не может быть источником резких и частых возмущений в системе дутья. Высота слоя — единственная переменная гидродинамического сопротивления всей системы. Благодаря стабилизации сопротивления слоя расход теплоносителя является практически постоянным, и тем самым поддерживается оптимальный аэродинамический режим сушки.

Автоматическое регулирование давления газа, подаваемого в топку, обеспечивает постоянство его расхода. Поэтому температура поступающего в сушилку теплоносителя поддерживается с точностью $\pm 5\%$ и является максимально допустимой, обеспечивая наилучший к. п. д. установки и высокое качество высушиваемого материала.

Отметим, что стабилизация сопротивления слоя необходима, поскольку значительные колебания количества материала в слое и, следовательно, высоты и сопротивления слоя могут привести к аварийному состоянию — образованию «козлов», изменению гранулометрического состава продукта и т. д. Поддержание постоянного сопротивления выполняется регулятором 9 (рис. 36) путем изменения количества выгружаемого из слоя продукта. Такое регулирование достигается в результате изменения производительности выгрузного устройства (секторного питателя), имеющего регулируемый привод. Вывод сухого материала производится на уровне решетки.

Следует отметить, что такая разгрузка рекомендуется в случае комкующихся материалов. Когда материал не содержит комков, целесообразно производить разгрузку через переливные устройства. В верхней части аппарата должно поддерживаться небольшое разрежение — порядка 50—100 Па (5—10 мм вод. ст.), чтобы не допустить проникновения запыленных газов из аппарата в рабочее помещение; это достигается при помощи установки направляющего аппарата на всасывающем патрубке дымососа, управляемого регулятором разрежения 8.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

Некоторые из высушиваемых материалов, в частности органические, горючи. Поэтому для понижения огнеопасности их при хранении периодически увлажняют — опрыскивают водой. В качестве примеров огне- и взрывоопасных органических материалов можно привести красители, содержащие нитро- и диазо-

группы, а также красители, в состав которых входит мелкораздробленная сера.

Для устранения пожароопасности красители, содержащие нитрогруппы, перед сушкой смешивают с определенным количеством минеральных солей — наполнителей. Чаще всего применяют сульфат натрия или сульфат аммония.

Азокрасители, содержащие свободную диазогруппу, при температурах выше 100°C могут самопроизвольно вспыхнуть. Такая вспышка может сопровождаться взрывом.

К очень огнеопасным материалам относятся лаковые красители, получающиеся при сочетании некоторых диазосоставляющих с бетаоксинафтойной кислотой. Эти красители в сухом виде способны самовозгораться при температурах около 100°C вследствие самоокисления (самовоспламеняются при выгрузке из сушилок в горячем состоянии). Для предотвращения самовозгорания такие материалы следует сушить в вакуум-шкафах и выгружать после охлаждения. При смешении с некоторым количеством минеральных солей эти красители становятся неогнеопасными.

Твердое вещество горит в воздухе тем энергичнее, чем больше поверхность соприкосновения. Взвешенная пыль обладает громадной поверхностью соприкосновения с воздухом и может гореть весьма интенсивно. Причины взрыва при интенсивном горении органических материалов — возникновение значительных объемов газов и быстрое увеличение объема окружающего воздуха при сильном нагреве его горячей пылью. Отметим, что ряд материалов, например некоторые металлы, которые в обычных условиях негорючи, в распыленном состоянии воспламеняются очень легко.

Для каждого вида пыли существует определенная концентрация, при которой горение происходит наиболее интенсивно. Это та концентрация, при которой весь кислород, содержащийся в данном объеме воздуха, будет потрачен на сжигание пыли, взвешенной в этом объеме. Наименьшая концентрация пыли, при которой возможен взрыв, называется нижним, а наибольшая — верхним пределом взрываемости. Чем мельче частицы пыли, тем меньшая их концентрация может вызвать взрыв. Пыль, оседающая на электрических лампочках, горячих подшипниках, отопительных приборах, горячих трубопроводах и т. п., обугливаясь, может воспламениться при температуре около 120°C .

В помещение цеха пыль высушиваемых материалов проникает через неплотности в стенках сушильной камеры и трубопроводов, а также при выгрузке высушенного материала из аппаратов. В связи с этим целесообразно иметь некоторое разрежение в сушильной камере, газоходах и аппаратах, находящихся после сушилки; разгрузку необходимо проводить под вытяжкой, а транспортеры для высушенного материала должны быть закрытыми.

Для предупреждения опасности взрыва в помещениях, где существует запыленность, запрещено курение. Арматура электрического освещения, корпуса электродвигателей должны иметь взрывобезопасное исполнение. Кроме того, должна быть устранена воз-

возможность накопления статического электричества в движущихся и трущихся частях механизмов путем надежного их заземления. Для отвода статического электричества от приводных ремней целесообразно смазывать их смесью глицерина с водой в отношении 1:1 либо устанавливать вблизи их заземленные медные решетки, щетки и т. д.

Во избежание образования искр при ударах необходимо в случае ремонта или устранения неисправностей оборудования пользоваться инструментом из неискрящих металлов.

Значительная часть материалов, подвергаемых сушке в химической промышленности, относится к категории вредных. Для устранения вредного влияния высушиваемых материалов на обслуживающий персонал необходимо проводить защитные мероприятия, которые можно разбить на две группы — общие и индивидуальные. Общие мероприятия заключаются в тщательной герметизации аппаратуры, возможно более полном удалении пыли из помещений сушильных цехов и т. д. Индивидуальные мероприятия сводятся к применению защитных приспособлений: спецодежды (в частности, рукавиц) для защиты кожи от соприкосновения с высушиваемым материалом, респираторов для защиты дыхательных путей от действия пыли, противогазов для защиты от пыли, вредных паров и т. п.

Кроме того, необходимо соблюдать правила личной гигиены (своевременно менять спецодежду, принимать теплый душ после работы, поддерживать в чистоте рабочее место, принимать пищу вне цеха), а также строго выполнять предписанные правила по технике безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Ю. Лурье. Сушильное дело. М. — Л., Госэнергоиздат, 1948. 711 с.
2. М. В. Лыков. Сушка в химической промышленности. М., «Химия», 1970. 429 с.
3. П. Г. Романков, Н. Б. Рашковская. Сушка во взвешенном состоянии. Л., «Химия», 1968. 360 с.
4. Справочник по пыле- и золоулавливанию. Под ред. А. А. Русанова. М., «Энергия», 1975. 296 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Свойства высушиваемых материалов	4
Глава 2. Теплоносители	7
Водяной пар	7
Воздух	9
Топочные газы	10
Глава 3. Основы процесса сушки	16
Общие сведения	16
Расход газообразного теплоносителя	17
Расход теплоты	19
Мягкие условия сушки	21
Тепловой коэффициент полезного действия	24
Ход процесса сушки	24
Глава 4. Сушильные установки	27
Контактные сушилки	27
Вакуум-сушильные шкафы	27
Гребковые вакуум-сушилки	31
Двухвальцовые атмосферные сушилки	34
Двухвальцовые вакуум-сушилки	37
Одновальцовые атмосферные формирующие сушилки	38
Конвективные сушилки	39
Камерные циркуляционные сушилки	39
Ленточные и вальцово-ленточные сушилки	41
Петлевые сушилки	42
Барабанные сушилки	44
Сушилки с кипящим (псевдооживленным) слоем	46
Пневматические сушилки	54
Распылительные сушилки	56
Глава 5. Вспомогательное оборудование	60
Калориферы	60
Воздухоподогреватели с промежуточным теплоносителем	61
Топки	61
Пылеотделители	63
Питатели и затворы	68
Газораспределительные решетки	68
Конденсаторы	70
Вентиляторы	71
Глава 6. Контроль, управление и техника безопасности	73
Контроль и управление	73
Техника безопасности	75
Литература	77

Наталья Борисовна Рашковская

СУШКА В ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Редакторы: *М. И. Курочкина, Ю. К. Кузнецов*
Технический редактор *Ф. Т. Черкасская*
Корректор *Э. И. Скорюкова*

ИБ № 299

М-12938. Сдано в набор 24.12.76. Подписано в печать 17.03.77. Формат бумаги 60×90^{1/16}. Вумага тип. № 3. Усл. печ. л. 5,0. Уч.-изд. л. 5,07. Тираж 11 000 экз. Заказ № 429. Изд. № 662. Цена 18 коп.

Издательство „Химия“ Ленинградское отделение.
191186, Ленинград. Д-186. Невский пр., 28

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградская типография № 2
имени Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете
Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной
торговли. 198052, Ленинград. Л-52, Измайловский проспект, 29

ИЗДАТЕЛЬСТВО „ХИМИЯ“

ГОТОВЯТСЯ К ВЫПУСКУ

Бакланов Н. А. Насосы в химической промышленности. Изд. 2-е, перераб., 4,5 л. (Библиотечка рабочего-химика), цена 17 к.

В брошюре в доступной форме рассказывается о типах, принципах устройства и действия насосов. В ней рассматриваются вопросы выбора, установки и обслуживания насосов, от правильного решения которых зависит эффективность использования этих машин. Особое внимание уделено технике безопасности при обслуживании и ремонте насосов.

Брошюра предназначена для рабочих и мастеров предприятий химической промышленности. Она может быть использована также в качестве пособия для профессионально-технических училищ. Первое издание вышло в 1970 г.

Берестовой А. М. Жидкостная экстракция в химической промышленности. 4 л. (Библиотечка рабочего-химика), цена 14 коп.

Жидкостная экстракция широко применяется в химической промышленности для выделения различных продуктов органического синтеза, извлечения и разделения редких элементов, очистки сточных вод и т. д.

В предлагаемой брошюре в популярной форме рассказывается об основах процесса жидкостной экстракции, типовом и наиболее перспективном новом оборудовании, правилах его эксплуатации и технике безопасности.

Брошюра предназначена для рабочих и мастеров химической промышленности. Кроме того, она может быть использована в качестве пособия для профессионально-технических училищ.

Предварительные заказы на эти книги можно оформить в магазинах, распространяющих научно-техническую литературу.