

# ПРОМЫШЛЕННАЯ СУШКА

А. В. Нестеров



ЛАНЬ

А. В. НЕСТЕРОВ

# ПРОМЫШЛЕННАЯ СУШКА

МОНОГРАФИЯ



ЛАНЬ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ • МОСКВА • КРАСНОДАР  
2021

УДК 66.047  
ББК 30.600.9я73

**Н 56      Нестеров А. В. Промышленная сушка : монография / А. В. Нестеров. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 304 с. — Текст : непосредственный.**

**ISBN 978-5-8114-8013-5**

Изложены основы теории сушки влажных материалов (кинетика и статика процесса термической сушки). Проанализированы различные упрощенные модели кинетики сушки. Рассмотрены методы сушки, применительно к различным видам влажных материалов. Даны технологические схемы и конструкции сушилок.

Для каждого типа сушильных аппаратов дан пример расчета на основе конкретных исходных данных. Рассмотрены вопросы выбора типа сушильного аппарата в зависимости от свойств влажного материала и требований к конечному продукту.

Дан обзор методов сушки и конструкций аппаратов, применяемых в различных отраслях промышленности применительно к наиболее распространенным продуктам.

Для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием и эксплуатацией сушильных установок в химической и других отраслях промышленности. Может быть полезна научным работникам, а также студентам соответствующих вузов.

УДК 66.047  
ББК 30.600.9я73

**Обложка**  
**П. И. ПОЛЯКОВА**

© Издательство «Лань», 2021  
© А. В. Нестеров, 2021  
© Издательство «Лань»,  
художественное оформление, 2021

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	5
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ.....	8
2. СВОЙСТВА ВЛАЖНОГО МАТЕРИАЛА.....	12
2.1. Влажность материалов, формы связи влаги с материалом.....	12
2.2. Равновесное состояние влажного материала.....	18
3. СВОЙСТВА ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА.....	20
3.1. Основные параметры влажного воздуха.....	20
3.2. $I-x$ диаграмма влажного воздуха.....	25
4. МАТЕРИАЛЬНЫЙ И ТЕПЛОВОЙ БАЛАНСЫ СУШИЛКИ.....	35
5. ВАРИАНТЫ ПРОЦЕССА СУШКИ.....	43
6. КИНЕТИКА ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ СУШКИ.....	57
6.1. Механизм тепломассопереноса в процессе термической сушки влажного материала.....	58
6.2. Экспериментальные кривые сушки.....	64
6.3. Внешнедиффузионная кинетика сушки влажного материала.....	67
6.4. Внутридиффузионная кинетика сушки влажного материала.....	74
6.5. Кинетические модели переноса влаги в капиллярно-пористых материалах различной формы.....	80
6.6. Экспериментальное определение коэффициентов влагопереноса.....	95
6.7. Модели кинетики процесса сушки в сушильных аппаратах.....	104
7. КОНСТРУКЦИИ СУШИЛОК.....	114
7.1. Конвективные сушилки с неподвижным или движущимся плотным слоем материала.....	115
7.2. Конвективные сушилки с перемешиванием слоя материала.....	122
7.3. Конвективные сушилки с взвешенным слоем материала.....	134
7.4. Конвективные сушилки с пневмотранспортом материала.....	161
7.5. Контактные сушилки.....	164
7.6. Специальные виды сушки и типы сушилок.....	176
8. СУШКА В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....	185
8.1. Химическая промышленность.....	187
8.2. Производство строительных материалов.....	191
8.3. Деревообрабатывающая промышленность.....	195
8.4. Переработка отходов.....	199
8.5. Пищевая промышленность.....	201
8.6. Химико-фармацевтическая промышленность.....	203



9. ПРОИЗВОДИТЕЛИ СУШИЛОК.....	206
10. РАСЧЕТ СУШИЛОК. ВЫБОР СУШИЛЬНОГО АППАРАТА И ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ .....	213
10.1. Расчет конвективной сушки карьерного песка в барабанной вращающейся сушилке. Топливо — природный газ .....	213
10.2. Расчет конвективной сушки золотвалов ТЭС в барабанной вращающейся сушилке. Топливо — природный газ .....	231
10.3. Расчет конвективной сушки карьерного песка в сушилке кипящего слоя .....	241
10.4. Расчет конвективной сушки карьерного песка в барабанной вращающейся сушилке с горелкой на дизельном топливе .....	249
10.5. Расчет сушилки взвешенного слоя с подогревом воздуха внутри сушильной камеры. Обогрев греющим паром .....	262
10.6. Расчет сушилки с кипящим слоем инертного материала на газовом топливе для сушки пластификатора. ....	265
10.7. Расчет пневматической флэш-сушилки для сушки фосфогипса с горелкой на дизельном топливе .....	270
10.8. Расчет распылительной сушилки для сушки поливинил-пирролидона, электрообогрев. ....	273
10.9. Расчет шестиярусной сушилки с ленточным ситом для сушки древесных стружек, теплоноситель — горячая вода. ....	278
10.10. Расчет вальцовой сушилки для сушки гидролизованного полиакрилонитрила, теплоноситель — греющий пар .....	289
10.11. Расчет двухконусной вакуум-сушилки периодического действия для сушки металлического порошка. ....	294
ЛИТЕРАТУРА.....	299

# ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

## ОБЩИЕ

$\tau$  — время, с  
 $v$  или  $w$  — скорость, м/с  
 $x, y, z$  — координаты, м  
 $r, R$  — радиус частицы (текущий и полный), м

## ВЛАЖНЫЙ МАТЕРИАЛ

$G, G_c$  — масса влажного материала, масса сухого вещества во влажном материале, кг  
 $G_n, G_k$  — расход влажного материала начальный, конечный, кг/с  
 $G_c$  — расход материала в пересчете на абсолютно сухой продукт, кг/с  
 $W$  — расход влаги, испаренной из влажного материала, кг/с  
 $w_n, w_k$  — влажность материала, начальная и конечная соответственно (кг влаги, отнесенной к 1 кг влажного материала), %  
 $w_n^c, w_k^c$  — влажность материала, начальная и конечная соответственно (кг влаги, отнесенной к 1 кг абсолютно сухого материала), %  
 $w_p^c, w_p$  — равновесная влажность материала, кг/кг  
 $w_g^c, w_g$  — гигроскопическая влажность материала, кг/кг  
 $u$  — локальная влажность материала, кг/м<sup>3</sup>  
 $t, \theta, \theta_m$  — температура материала, °С или К  
 $\rho, \rho_t, \rho_c$  — плотность влажного и абсолютно сухого материала, кг/м<sup>3</sup>  
 $F_{уд}$  — удельная поверхность материала, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>  
 $\varepsilon$  — порозность зернистого слоя частиц, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

## ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

$L$  — расход абсолютно сухого воздуха, кг/с  
 $x_0, x_1, x_2$  — влагосодержание воздуха, кг/кг (1 кг влаги, отнесенной к 1 кг абсолютно сухого воздуха)  
 $p$  — парциальное давление паров воды в воздухе (газовой смеси), Па  
 $p_n, p_h$  — парциальное давление водяного пара и насыщенного водяного пара, Па  
 $p_m$  — парциальное давление водяного пара над поверхностью материала, Па  
 $\phi$  — относительная влажность воздуха, %  
 $T$  — температура воздуха, К

$t, t_b$  — температура воздуха, °С  
 $P$  — барометрическое (атмосферное) давление воздуха, Па (кПа, МПа)  
 $I$  — энтальпия воздуха, кДж/кг (кДж тепла, отнесенного к 1 кг абсолютно сухого воздуха)  
 $i_0$  — энтальпия водяного пара при 0 °С, кДж/кг  
 $i_n$  — энтальпия водяного пара, кДж/кг  
 $r_0$  — удельная теплота испарения влаги, кДж/кг  
 $c, c_{с.в}, c_n$  — теплоемкость воды, сухого воздуха, водяного пара, Дж/(кг·К)  
 $\rho, \rho_n, \rho_{с.в}$  — плотность воздуха, водяного пара, плотность абсолютно сухого воздуха, кг/м<sup>3</sup>  
 $\rho_{вл.в}$  — плотность влажного воздуха, кг/м<sup>3</sup>  
 $M_v, M_n$  — молекулярная масса воздуха и водяного пара, кг/кмоль  
 $v$  — скорость воздуха, м/с  
 $\mu$  — динамический коэффициент вязкости, Па·с  
 $\nu = \mu/\rho$  — кинематический коэффициент вязкости, м<sup>2</sup>/с

### ТЕПЛОПЕРЕНОС

$q$  — удельный поток тепла, Вт/м<sup>2</sup>  
 $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К)  
 $K$  — коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К)  
 $\lambda$  — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)  
 $c$  — теплоемкость, Дж/(кг·К)  
 $a = \lambda/c\rho$  — коэффициент температуропроводности, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

### МАССОПЕРЕНОС

$j$  — удельный поток массы (жидкости или паров воды), кг/(м<sup>2</sup>·с)  
 $j_m$  — удельный поток массы внутри материала, кг/(м<sup>2</sup>·с)  
 $\beta$  — коэффициент массоотдачи, м/с или кг/(кг/м<sup>3</sup>·м<sup>2</sup>·с)  
 $\beta_p, \beta_x$  — коэффициент массоотдачи, отнесенный к парциальному давлению или влагосодержанию кг/(Па·м<sup>2</sup>·с), кг/(кг/кг·м<sup>2</sup>·с)  
 $D_m$  — эффективный коэффициент диффузии (влагопроводности), м<sup>2</sup>/с  
 $\Delta$  — коэффициент термовлагопроводности, К<sup>-1</sup>

### ИНДЕКСЫ

н — начальный (расход)	м — у поверхности материала
к — конечный (расход)	п — на поверхности материала
с — сухое (вещество)	г — гигроскопичное состояние
т — твердая фаза	с.в — сухой воздух
п — пары воды	кр — критическая (влажность)
н — насыщенные пары воды	

**КРИТЕРИИ ПОДОБИЯ**

Гидродинамические:

$Re = vd\rho/\mu$  — гидродинамический критерий Рейнольдса

$Ar = gd^3/\mu(\rho_t - \rho)\rho$  — критерий Архимеда

$Ly = w^3\rho^2/(g\mu(\rho_t - \rho))$  — критерий Лященко

Тепловые:

$Nu = \alpha d/\lambda$  — тепловой критерий Нуссельта

$Pr = \nu/a$  — тепловой критерий Прандтля

$Gu = \Delta T/T$  — критерий Гухмана

$Fo = a\tau/R^2$  — критерий Фурье

$Bi = \alpha R/\lambda$  — критерий Био<sup>1</sup>

Диффузионные:

$Nu' = \beta d/D_m$  — диффузионный критерий Нуссельта

$Pr' = \nu/D_m$  — диффузионный критерий Прандтля

$Fo' = D_m\tau/R^2$  — диффузионный критерий Фурье

$Bi' = \beta R/D_m$  — критерий Био

---

<sup>1</sup> Критерий Био, характеризующий подобие процессов нестационарной теплопроводности, внешне сходен с критерием Нуссельта, но отличается от последнего тем, что коэффициент теплоотдачи  $a$ , входящий в критерий  $Bi$ , не является искомой величиной, а задается условиями однозначности. Величина  $\lambda$  в критерии  $Bi$  представляет собой коэффициент теплопроводности не жидкости (газа), а твердого тела.

# 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Процесс тепловой (термической) сушки широко используется в химической, пищевой, деревообрабатывающей и других отраслях промышленности. Удаление влаги из твердых и пастообразных материалов позволяет удешевить их транспортировку, придать им необходимые потребительские свойства.

Сушка часто является последней операцией на производстве, предшествующей выпуску готового продукта. При этом предварительное удаление влаги обычно осуществляется более дешевыми механическими способами (например, фильтрованием или центрифугированием), а окончательное — сушкой. Такой комбинированный способ удаления влаги позволяет повысить экономичность процесса.

Сушку обычно осуществляют в специальных аппаратах, позволяющих быстро и качественно высушить продукт при минимальных затратах тепла и электроэнергии.

Для удаления влаги из материала требуется подвести к нему тепло; при этом только менее половины от подведенного тепла идет собственно на испарение из материала влаги, а большая часть тепла теряется в окружающую среду (идет на нагрев материала, сушильного агента и транспортных устройств).

По способу подвода тепла к высушиваемому материалу различают следующие виды сушки [5]:

1) конвективная сушка осуществляется путем непосредственного соприкосновения высушиваемого материала с *сушильным агентом*, в качестве которого обычно используют нагретый воздух или топочные газы (как правило, в смеси с воздухом);

2) контактная сушка — путем передачи тепла от теплоносителя к материалу через разделяющую их стенку;

3) инфракрасная (радиационная) сушка — путем передачи тепла инфракрасными лучами;

4) диэлектрическая сушка — путем нагревания материала в поле токов высокой частоты (ТВЧ) и сверхвысокой частоты (СВЧ);

5) сублимационная сушка — сушка в замороженном состоянии при глубоком вакууме. По способу передачи тепла этот вид сушки аналогичен контактной, но своеобразие процесса заставляет выделять сублимационную сушку в особую группу.

Последние три вида сушки применяются относительно редко и обычно называются специальными видами сушки.

Тепло для сушки может быть получено сжиганием твердого, жидкого или газообразного топлива. Обычно для сушки используют природный газ, греющий пар или электроэнергию.

Природный газ является наиболее дешевым видом топлива. Дымовые газы, полученные при сжигании природного газа в горелках или топках, используются в конвективных сушилках в качестве сушильного агента либо направляются в теплообменники для нагрева чистого воздуха или инертного газа для сушки. Последний прием используется в случаях, когда недопустим контакт продуктов сгорания с материалом (пищевые продукты, соли, щелочные материалы и др.).

Греющий пар вырабатывают на ТЭС (теплоэлектростанциях), и предприятия, расположенные вблизи ТЭС, покупают пар для своих нужд, в том числе и для сушки. В некоторых случаях пар вырабатывается непосредственно в парогенераторах, обогреваемых природным газом или ТЭНами (теплоэлектронагревателями). Это более дорогой вид обогрева; кроме того, температура греющего пара обычно не превышает 160–180 °С.

Самым дорогим видом подвода тепла является электронагрев. Он используется обычно в малотоннажных производствах, когда другие виды топлива недоступны или их использование нерационально. Основным преимуществом электронагрева является его доступность и простота применения. Для конвективной сушки используются электрокалориферы. Электроэнергия используется в ТВЧ и СВЧ сушилках.

Иногда в качестве теплоносителя используют горячую воду (с температурой 80–100 °С), перегретую горячую воду (110 °С), горячее минеральное масло (150–180 °С) и некоторые органические теплоносители (до 350 °С).

Коэффициент полезного действия<sup>1</sup> большинства сушильных агрегатов не превышает 40–45 %. Учитывая то, что сушка представляет собой энергоемкий процесс, стоимость топлива или теплоносителя является важным экономическим аргументом при выборе способа сушки. Сравнительная стоимость испарения 1 кг влаги при использовании различных видов топлива или теплоносителя приведена в табл. 1-1.

К данной таблице надо дать пояснение, что цена топлива для разных регионов России может быть различной и зависит от транспортных расходов, сложившихся рыночных отношений и других факторов. В настоящее время цена природного газа и жидкого топлива в России существенно ниже, чем в странах Евросоюза. Так, стоимость природного газа на внутреннем рынке Российской Федерации составляет 6100–6300 руб. (не более \$95) за 1000 м<sup>3</sup>, а в странах Евросоюза — \$230–260.

---

<sup>1</sup> Коэффициент полезного действия (к.п.д.) сушилки определяется как отношение количества тепла, необходимое для испарения из влажного материала воды, к общему расходу тепла на сушку.

Т а б л и ц а 1-1

№ п/п	Вид топлива (теплоносителя)	Параметры
1	Природный (горючий) газ: низшая теплота сгорания*, кДж/нм <sup>3</sup> расход топлива** на испарение 1 кг влаги, нм <sup>3</sup> /кг цена топлива, руб./нм <sup>3</sup> (€/нм <sup>3</sup> )*** стоимость испарения 1 кг влаги, руб./кг	33600 0,158 6,1 (0,085) 0,96
2	Дизельное топливо (солярка): низшая теплота сгорания*, кДж/кг расход топлива** на испарение 1 кг влаги, кг/кг цена топлива, руб./кг (€/кг) стоимость испарения 1 кг влаги, руб./кг	42700 0,124 38,5 (0,54) 4,77
3	Греющий пар****: теплота конденсации (164 °С), кДж/кг расход теплоносителя на испарение 1 кг влаги, кг/кг цена теплоносителя, руб./Гкал (€/Гкал) стоимость испарения 1 кг влаги, руб./кг	2075 2,5 1160 (16,1) 1,44
4	Электроэнергия: расход электроэнергии на испарение 1 кг влаги, кВт·ч/кг цена электроэнергии, руб./кВт·ч (€/кВт·ч) стоимость испарения 1 кг влаги, руб./кг	1,52 4,8 (0,067) 7,3

\* нм<sup>3</sup> — объем м<sup>3</sup>, приведенный к нормальным условиям (0 °С, 760 мм рт. ст.).

\*\* принят средний к.п.д. сушилки 42 %, средняя теплота испарения влаги из материала равна 2320 кДж/кг.

\*\*\* стоимость без учета НДС в ценах 2019 года (курс € — 72 руб., \$ — 64 руб.).

\*\*\*\* для контактных сушилок расход греющего пара на сушку меньше (примерно 1,4 кг/кг).

Таким образом, самым дешевым способом сушки является сжигание природного газа и смешение полученных дымовых газов с воздухом. Наиболее дорогой способ сушки происходит при нагреве воздуха в электрокалорифере. Однако в каждом конкретном случае требуется определить целесообразность применения того или иного вида топлива. Так, например, для сушки пищевых продуктов, где недопустим контакт продукта с дымовыми газами, вполне приемлемо использование электроэнергии. Для сушки песка, щебня, несомненно, использование природного газа будет оптимальным вариантом сушки. Однако не все районы России газифицированы, поэтому наряду с газовыми горелками и топками применяются мазутные горелки, а в некоторых случаях — угольные (твердотопливные) котлы.

По своей физической сущности сушка является сложным диффузионным процессом, скорость которого определяется скоростью диффузии влаги из глубины высушиваемого материала в окружающую среду. Сушка может протекать и без подвода тепла, при температуре окружающей среды до тех пор, пока не наступит равновесие между влажным материалом и сушильным агентом. Однако в промышленности для

ускорения процесса сушку проводят при повышенных температурах, нагревая материал или сушильный агент.

В этом случае удаление влаги при сушке сводится к перемещению тепла внутрь материала, а влаги — к его поверхности, а также к испарению и удалению влаги с поверхности материала в окружающую среду. Таким образом, процесс сушки является сочетанием связанных друг с другом процессов тепло- и массообмена (влагообмена).

Высушиваемый материал в процессе сушки чаще всего находится в контакте с газом, который называется *сушильным агентом*. В большинстве случаев в качестве сушильного агента используют нагретый атмосферный воздух, который имеет определенную влажность. При конвективной сушке влажному газу (являющемуся сушильным агентом) принадлежит *основная* роль.

В процессе сушки влага из материала перемещается в поток сушильного агента, который чаще всего удаляется в окружающую среду, пройдя предварительную очистку от пыли и других вредных веществ. В вакуумных сушилках влага удаляется из материала в виде смеси пара и воздуха.

Для расчета тепловых и материальных потоков, а также времени сушки необходимо знать свойства как влажного материала, так и сушильного агента (горячего воздуха).



# 2

## СВОЙСТВА ВЛАЖНОГО МАТЕРИАЛА

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

Свойства влажного материала и требования к высушенному продукту напрямую определяют конструкцию сушильного аппарата, а также конструкцию вспомогательного оборудования (питатели, разгрузители, циклоны, фильтры).

### 2.1. ВЛАЖНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ, ФОРМЫ СВЯЗИ ВЛАГИ С МАТЕРИАЛОМ

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

*Кусковые материалы* состоят из кусков размером от нескольких миллиметров до нескольких десятков сантиметров. Это, как правило, минеральные вещества, строительные материалы (такие как щебень, песок), рудные и нерудные минералы. Отдельно рассматривается сушка формованных изделий (керамические изделия, формованные пластмассы и др.).

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

В фармацевтической и пищевой промышленности нередко сушат растворы, пасты, суспензии.

*Пастообразные материалы* 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*.

При проектировании сушильных аппаратов необходимо учитывать такие характеристики высушиваемого материала, как абразивность, слипаемость, комкуемость, пожаро- и взрывоопасность.

При сушке абразивных материалов следует применять износостойкие конструкционные материалы, защищать газоходы и тягодутьевое оборудование от абразивного износа.

Для сушки материалов, склонных к слипанию, применяют аппараты с активным гидродинамическим режимом. Для комкуемых материалов в сушильной камере устанавливают специальные устройства, которые размалывают комки, тем самым разрушая образующуюся на комках корку, которая препятствует сушке.

Для сушки пожароопасных материалов температура сушильного агента должна быть ниже температуры самовоспламенения сухого материала, а при сушке топочными газами — ниже температуры воспламенения. С целью повысить безопасность проведения сушки в сушильной камере устанавливают аппараты автоматического пожаротушения, которые срабатывают при возникновении пожара.

При сушке взрывоопасных веществ в сушильной камере устанавливают взрывной клапан.

Очень большое значение имеет дисперсный состав материала. Тонкодисперсный продукт склонен к образованию большого количества пыли, что увеличивает нагрузку на газоочистное оборудование. Крупнокусковой продукт требует специальных загрузочных и выгрузочных устройств, а также особых условий сушки.

В результате сушки получают продукт, конечная влажность которого также определяется свойствами материала. Высушивать материал следует до достижения влажности не ниже той, которая соответствует воздушно-сырому состоянию в условиях складирования, так как на удаление лишней влаги затрачивается дополнительное количество теплоты и, таким образом, перерасходуется топливо. В зависимости от конструкции сушильного аппарата можно получить порошкообразный или гранулированный продукт. Для предотвращения слеживаемости высушенного продукта используют специальные добавки.

**Влажность материала** является основным параметром при расчете сушильных аппаратов. Влажность материала может быть рассчитана по отношению к его общей массе  $G$  или по отношению к массе находящегося в нем абсолютно сухого вещества  $G_c$ , причем

$$G = G_c + G_{вл},$$

где  $G_{вл}$  — масса содержащейся в материале влаги.

Влажность, отнесенная к общему количеству материала:

$$w = \frac{G_{\text{вл}}}{G} \cdot 100\% . \quad (2.1)$$

Влажность, отнесенная к количеству абсолютно сухого материала:

$$w^c = \frac{G_{\text{вл}}}{G_c} \cdot 100\% .$$

Масса абсолютно сухого материала не меняется в процессе сушки, и для упрощения расчетов обычно пользуются величинами  $w^c$ . Влажность, отнесенная к массе абсолютно сухого материала  $w^c$ , и влажность, рассчитанная на его общую массу  $w$ , связаны между собой зависимостью

$$w^c = \frac{w}{100 - w} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

или

$$w = \frac{w^c}{100 + w^c} \cdot 100\% . \quad (2.4)$$

При сушке листовых материалов удобно выражать влажность как количество влаги, отнесенное к поверхности листового материала.

**Формы связи влаги с материалом.** Механизм процесса сушки в значительной степени определяется формой связи влаги с материалом: чем прочнее эта связь, тем труднее протекает процесс сушки. При сушке связь влаги с материалом нарушается.

Форма связи влаги с материалом может быть химической, физико-химической и физико-механической.

*Химически связанная влага* наиболее прочно соединена с материалом в определенных стехиометрических соотношениях и может быть удалена только при нагревании материала до высоких температур или в результате проведения химической реакции. Эту влагу нельзя удалить из материала при сушке.

В процессе сушки удаляется, как правило, только влага, связанная с материалом физико-химически и механически. Наиболее легко может быть удалена *механически связанная влага*, которая, в свою очередь, подразделяется на влагу *макрокапилляров* и влагу *микрокапилляров* (капилляров со средним радиусом приблизительно больше и меньше  $10^{-7}$  м). Макрокапилляры заполняются влагой при непосредственном соприкосновении ее с материалом, в то время как в микрокапилляры влага поступает как при непосредственном соприкосновении, так и в результате поглощения ее из окружающей среды. Влага макрокапилляров свободно удаляется не только сушкой, но и механическими способами, например фильтрацией или центрифугированием.

Физико-химическая связь объединяет два вида влаги, отличающиеся прочностью связи с материалом: *адсорбционно* и *осмотически* связанную влагу. Первая прочно удерживается на поверхности и в порах материала. Осмотически связанная влага, называемая также влагой набухания, находится внутри клеток материала и удерживается осмотическими силами. Адсорбционная влага требует для своего удаления значительно большей затраты энергии, чем влага набухания. Присутствие этих видов влаги особенно характерно для коллоидных и полимерных материалов.

Применительно к процессу сушки влагу материала классифицируют в более широком смысле на свободную и связанную. Под свободной влагой материала понимают влагу, скорость испарения которой из материала равна скорости испарения воды с ее свободной поверхности. Под связанной понимают влагу, скорость испарения которой из материала меньше скорости испарения воды со свободной поверхности.

**Измерение влажности материала** может выполняться лабораторным способом для отобранной пробы либо приборами, называемыми *влажномерами* [12].

Лабораторный (термогравиметрический) способ предполагает отбор пробы, ее усреднение (квартование) и высушивание определенной навески в сушильном шкафу при определенной температуре (обычно 105–110 °С) до определенного веса. На большинство видов продукции составлены технические условия (ТУ), где подробно описана методика отбора проб и проведения анализа. Термогравиметрический метод наиболее точный, однако он требует затрат времени, а для твердых материалов требуется разрушить (отделить) небольшую часть материала как образец, что не всегда приемлемо. Современные приборы для выполнения анализа этим методом совмещают весы и сушильную камеру (см. рис. 1), что упрощает сам анализ и сокращает время его проведения.



Рис. 1. Влагомер, основанный на термогравиметрическом методе анализа

Для оперативного или непрерывного контроля влажности используют косвенные методы измерения влажности, основанные на зависимости физических свойств материала от его влажности.

Влагомеры, работающие по косвенным методам, измеряют не саму влажность, а связанный с ней физический параметр, и переводят измеренную величину в значение влажности. Косвенные методы требуют предварительной градуировки с целью установления зависимости

между влажностью материала и измеряемой величиной. Самыми распространенными методами измерения влажности являются:

- кондуктометрический;
- диэлькометрический (емкостной метод);
- инфракрасный;
- сверхвысокочастотный;
- оптический;
- нейтронный.

*Кондуктометрический метод.* Неотъемлемая часть такого влагомера — острые металлические иглы (см. рис. 2), которые погружают в исследуемый материал. Прибор измеряет электрическое сопротивление материала между иглами и по заложенной в память микропроцессора формуле вычисляет процентное содержание влаги. К достоинствам этого метода следует отнести простоту прибора и быстроту измерения влажности. Недостаток метода — значительное влияние качества контакта игл с исследуемым материалом на результаты измерения. Кроме того, портативным прибором невозможно измерить влажность ниже 5–8%. Для этого нужен источник высокого напряжения (500–1500 В), с помощью которого измеряют большие значения электрического сопротивления.

Приборы, основанные на кондуктометрическом принципе измерения, хороши для контроля за влажностью на глубинах до 2–3 см и имеют широкий диапазон измерения влажности, но не подходят для контроля влажности ниже 4%. Такими приборами измеряют влажность древесины, бетона, различных строительных материалов, керамической массы и других влажных изделий.



Рис. 2. Влагомер, основанный на кондуктометрическом методе измерения влажности

*Диэлькометрический метод* определения влажности капиллярно-пористых материалов основан на увеличении диэлектрической проницаемости материала с ростом его влажности. При отсутствии влаги капиллярно-пористые материалы имеют очень низкую диэлектрическую проницаемость и малые диэлектрические потери. Так, для бумаги, угля, древесины диэлектрическая проницаемость равна 1,5–4, для гипса и каменной соли — 5–6. В диапазоне частот 1–100 МГц диэлектрическая проницаемость чистой воды при комнатной температуре имеет значение около 80. Второе важное для измерений влажности проявление поляризации материалов заключается в отчетливо выраженной зависимости их диэлектрической проницаемости от частоты поля.

Для измерения влажности этим способом в конструкции влагомера используется генератор радиочастот 3–30 МГц, с помощью которого измеряют диэлектрическую проницаемость исследуемого материала. Датчики прибора представляют собой обычные контактные площадки с закругленными краями. Датчики прижимают с небольшим усилием в 0,5–1 кг к поверхности материала и производят замер. Высокочастотные токи проникают в материал на глубину до 20–30 мм; прибор оценивает величину диэлектрической проницаемости, которая зависит от свойств материала и его влажности. Микропроцессорный блок устройства пересчитывает величину диэлектрической проницаемости в абсолютную влажность. В памяти влагомера обычно хранятся данные о плотности материалов, на которые он рассчитан. Достоинства метода — высокая точность, простота и быстрота измерения. Однако точность измерения снижается для материалов с влажностью менее 1 %.

Приборы этой группы имеют неконтролируемую глубину измерения, результатом чего является некая средняя влажность на глубине 2–6 см, но при этом не портится внешний вид поверхности. Кроме того, конструкция датчика влажности позволяет проводить измерения изделий сложной формы под любым углом. Они имеют высокую чувствительность при невысоких значениях влажности (от 1–2 %), дают возможность обнаружения переувлажненных участков под покрытиями, например под кафельной плиткой, и могут контролировать влажность сыпучих материалов. К сожалению, такими приборами нельзя точно измерить влажность свыше 50–60 %, так как свыше этого диапазона погрешность их измерений не нормируется.

Существуют влагомеры для измерения конкретных видов материалов бесконтактным способом в непрерывном режиме, которые устанавливаются стационарно на производственной линии для контроля качества выпускаемой продукции. Так, для контроля влажности листовых материалов, таких как картон, бумага, древесностружечные плиты, гипсокартонные листы и др., используют приборы, которые анализируют отраженный от материала поток инфракрасного излучения, интенсивность которого зависит от влажности листового материала. Данные направляются на компьютер, который пересчитывает полученную информацию и выдает текущую влажность материала.



Рис. 3. Измерение влажности материала на транспортной ленте



Влажность сыпучих материалов может измеряться непрерывно непосредственно на транспортной ленте, как показано на рис. 3.

## 2.2.

### РАВНОВЕСНОЕ СОСТОЯНИЕ ВЛАЖНОГО МАТЕРИАЛА

Рассмотрим изменение состояния материала, находящегося в контакте с влажным воздухом (рис. 4). Свойства влажного воздуха характеризуются относительной влажностью  $\phi$ , которая определяется как отношение парциального давления паров воды  $p_n$  к парциальному давлению насыщенных паров воды  $p_n$  (см. п. 3.1). При изменении влажности от  $w_n$  до  $w_r$  материал находится во влажном состоянии и содержит свободную влагу. В этом случае парциальное давление над поверхностью влажного материала  $p_m$  равно парциальному давлению насыщенных паров воды  $p_n$  ( $p_m = p_n$ ). При изменении влажности от  $w_r$  до  $w_p$  материал содержит связанную влагу ( $p_m < p_n$ ) и находится в *гигроскопическом* состоянии. Точка A называется *гигроскопической*, а соответствующая ей влажность  $w_r$  — *гигроскопической влажностью*. Во всей области влажного состояния от  $w_n$  до  $w_r$ , в том числе в точке A,  $\phi = 100\%$ ,  $p_m = p_n$ .

Гигроскопическая влажность  $w_r$  находится на границе свободной и связанной влаги в материале. Свободная влага будет удаляться



Рис. 4. Изменение влажности материала в процессе сушки

из материала при любой относительной влажности окружающей среды меньше 100% ( $\phi < 100\%$ ). Удаление связанной влаги возможно лишь при той относительной влажности окружающей среды, которой соответствует влажность материала, большая равновесной. На рис. 4 закрашена вся область, где материал может сушиться воздухом с относительной влажностью  $\phi$ , соответствующей равновесной влажности материала  $w_p$ . При

гигроскопическом состоянии материала, отвечающем области над кривой равновесной влажности, возможно только увлажнение материала, но не его сушка.

Если материал находится в контакте с влажным воздухом, то принципиально возможны два процесса:

- сушка (десорбция влаги из материала) при парциальном давлении пара над поверхностью материала  $p_m$ , превышающем его парциальное давление в воздухе или газе  $p_n$ , т. е. при  $p_m > p_n$ ;
- увлажнение (сорбция влаги материалом) при  $p_m < p_n$ .

В процессе сушки давление  $p_m$  уменьшается и приближается к пределу  $p_m = p_n$ . При этом наступает состояние динамического равновесия, которому соответствует предельная влажность материала, называемая равновесной влажностью  $w_p$ .

Равновесная влажность зависит от парциального давления водяного пара в воздухе над материалом  $p_n$  или пропорциональной ему величины относительной влажности воздуха  $\phi$  и определяется опытным путем.

Для этой цели навеска высушиваемого материала помещается в среду с различной относительной влажностью  $\phi$  при  $t = \text{const}$  и периодически взвешивается. Влажность материала при достижении им постоянной массы является равновесной. Обычно навески доводят до постоянной массы в эксикаторе с растворами серной кислоты различной концентрации и получают зависимость  $w_p$  от  $\phi$  (рис. 5).

Зависимость  $w_p = f(\phi)$  устанавливается при постоянной температуре и, таким образом, является изотермой. Кривая 1 на рис. 5 получена при испарении (десорбции) влаги из материала, т. е. при его сушке, и называется изотермой десорбции. Вышерасположенная кривая 2, полученная при обратном процессе — увлажнении высушенного материала, — называется изотермой сорбции.

Расхождение кривых 1 и 2 (гистерезис) указывает на то, что для достижения одной и той же равновесной влажности величина  $\phi$  воздуха при увлажнении материала должна быть больше, чем при сушке последнего. Вероятными причинами гистерезиса являются попадание воздуха в капилляры высушенного материала и его сорбция стенками капилляров. В результате этого при последующем увлажнении материала уменьшается его смачиваемость влагой, так что для вытеснения воздуха из капилляров требуются большее парциальное давление водяного пара или большая величина  $\phi$  (изотерма сорбции 2 расположена выше изотермы десорбции 1).

Гистерезис наблюдается для пористых материалов, таких как целлюлоза, органические продукты, некоторые пористые неорганические вещества. Такие материалы, как кварцевый песок, щебень, каолин, глина и другие минеральные вещества, не имеют гистерезиса.

Значение равновесной влажности находится между двумя значениями влажности, полученными при сушке и при сорбции, однако, так как различия между ними невелики, для практических расчетов можно принять среднее значение равновесной влажности в зависимости от относительной влажности воздуха.

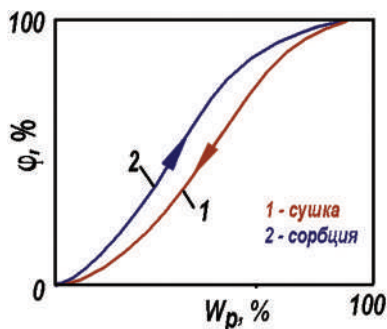


Рис. 5. Зависимость равновесной влажности материала от относительной влажности воздуха:

1 — изотерма десорбции, 2 — изотерма сорбции



# 3

## СВОЙСТВА ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

### 3.1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

При конвективной сушке сушильный агент передает материалу тепло и уносит влагу, испаряющуюся из материала за счет этого тепла. Таким образом, сушильный агент играет роль тепло- и влагоносителя. При других методах сушки находящийся в контакте с материалом влажный газ (обычно воздух) используется лишь для удаления испарившейся влаги, т. е. выполняет роль только влагоносителя.

Влажный газ является смесью сухого газа и водяного пара<sup>1</sup>. В дальнейшем под влажным газом мы будем подразумевать только влажный воздух, учитывая, что физические свойства топочных газов и влажного воздуха отличаются лишь количественно. Влажный воздух как влаго- и теплоноситель характеризуется следующими основными параметрами: абсолютной и относительной влажностью, влагосодержанием и энтальпией (теплосодержанием).

*Абсолютная влажность* определяется количеством водяного пара, содержащегося в единице объема влажного воздуха. С достаточной для технических расчетов точностью можно считать, что влажный воздух подчиняется законам идеальных газов. Тогда водяной пар как компонент газовой смеси (влажного воздуха), находясь под парциальным давлением  $p_n$ , должен занимать весь объем смеси ( $1 \text{ м}^3$ ). Поэтому абсолютная влажность равна массе  $1 \text{ м}^3$  пара, или плотности водяного пара  $\rho_n$  ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) при температуре воздуха  $T$  и парциальном давлении  $p_n$ .

$$\rho_n = \frac{M_n p_n}{RT}.$$

*Относительной влажностью*, или степенью насыщения воздуха  $\varphi$ , называется отношение парциального давления водяного пара влажного воздуха  $p_n$  к максимально возможному парциальному давлению водяного пара  $p_n$  (парциальному давлению насыщенного водяного пара):

$$\varphi = \frac{p_n}{p_n}. \quad (3.1)$$

---

<sup>1</sup> В большинстве случаев влагой материала является вода, которая в виде водяного пара переходит в сушильный агент. Однако при сушке может испаряться любая жидкость, содержащаяся в материале (например, летучие растворители).

Пар, находящийся в равновесии с образующей его жидкостью, будет насыщенным. Давление его в этом состоянии называется давлением насыщенного водяного пара.

Давление насыщенного водяного пара  $p_n$  зависит только от температуры. При комнатной температуре оно невелико и составляет 0,002–0,003 МПа. С повышением температуры  $p_n$  значительно возрастает и при температуре 100 °С становится равно атмосферному давлению ( $\approx 0,1$  МПа). Каждой заданной температуре соответствует определенное давление насыщения и наоборот, каждому давлению — определенная температура насыщения. Давление сухого насыщенного пара  $p_n$  может быть взято из справочных таблиц водяного пара при заданной температуре воздуха.

Давление сухого насыщенного пара  $p_n$  (Па) может быть рассчитано по эмпирической формуле [15]:

$$\lg p_n = A - \frac{a}{T}, \quad (3.2)$$

где  $T$  — температура, К,  $A$  и  $a$  — константы уравнения, которые для воды равны соответственно:

- для температуры от –20 до 60 °С  $A = 11,2761, a = 2317,7$ ;
- для температуры от 20 до 100 °С  $A = 10,9695, a = 2224,4$ ;
- для температуры от 100 до 200 °С  $A = 10,6402, a = 2101,1$ .

Относительную влажность можно также определить как отношение массы водяного пара в 1 м<sup>3</sup> влажного воздуха  $\rho_n$  при данных условиях к максимально возможной массе водяного пара в 1 м<sup>3</sup> воздуха  $\rho_n$  (плотности насыщенного пара) при тех же условиях:

$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_n}. \quad (3.3)$$

В соответствии с уравнением состояния идеальных газов (уравнение Менделеева — Клапейрона):

$$\rho_n = \frac{p_n M_n}{RT} \quad \text{и} \quad \rho_n = \frac{p_n M_n}{RT}, \quad (3.4)$$

где  $T$  — абсолютная температура, К;  $M_n$  — молярная масса водяного пара, равная 18 кг/кмоль,  $R$  — универсальная газовая постоянная, равная 8314 Дж/(кмоль · К);  $p_n$  — давление насыщенного водяного пара при данной температуре и общем барометрическом давлении, Па.

Подставляя значения  $\rho_n$  и  $\rho_n$  в выражение (3.3), получим

$$\varphi = \frac{p_n}{p_n}. \quad (3.1)$$

Если температура воздуха не превышает температуру насыщения, которая для большинства районов чуть меньше  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то максимально возможное давление водяного пара равно давлению сухого насыщенного пара, которое может быть взято из справочных таблиц водяного пара при данной температуре воздуха или рассчитано по эмпирическому уравнению (3.2).

Если температура воздуха выше температуры насыщения, то максимально возможное давление водяного пара будет равно общему, т. е. барометрическому, давлению  $P$ . В этих условиях

$$\varphi = \frac{P_{\text{п}}}{P}. \quad (3.5)$$

Барометрическое давление  $P$  зависит от географического положения местности (высоты расположения над уровнем моря, долготы, широты) и меняется в соответствии с метеоусловиями. Средние значения барометрического давления для района г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области составляет 753–755 мм рт. ст., а для Москвы, расположенной на Среднерусской возвышенности (168–255 м над уровнем моря) — 747–748 мм рт. ст. Принято считать среднее давление для большинства регионов средней полосы России равным 745 мм рт. ст., что составляет 99,31 кПа ( $\approx 0,1$  МПа).

Относительная влажность  $\varphi$  является одной из важнейших характеристик воздуха как сушильного агента, определяющего влагоемкость воздуха, т. е. способность воздуха к насыщению парами влаги.

При нагревании воздуха приблизительно до  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  величина  $p_{\text{п}}$ , входящая в выражение (3.1), возрастает и соответственно снижается  $\varphi$ ; дальнейшее повышение температуры происходит при  $\varphi = \text{const}$ . При охлаждении воздуха  $p_{\text{п}}$  уменьшается, а  $\varphi$  возрастает, в отдельных случаях вплоть до полного насыщения воздуха парами воды ( $\varphi = 1$ ).

В процессе сушки воздух увлажняется и охлаждается, и соответственно меняется его объем. Поэтому использование в качестве параметра воздуха его абсолютной влажности усложняет расчеты. Более удобно относить влажность воздуха к единице массы абсолютно сухого воздуха (1 кг сухого воздуха) — величине, не изменяющейся в процессе сушки.

*Влагосодержание воздуха.* Масса водяного пара (кг), содержащегося во влажном воздухе и приходящегося на 1 кг абсолютно сухого воздуха, называется *влагосодержанием воздуха*:

$$x = \frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{с.в}}} = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{с.в}}}, \quad (3.6)$$

где  $m_{\text{п}}$  и  $m_{\text{с.в}}$  — масса водяного пара и масса абсолютно сухого воздуха в данном объеме влажного воздуха, кг;  $\rho_{\text{п}}$  — плотность водяного пара, кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{\text{с.в}}$  — плотность абсолютно сухого воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Для того чтобы установить связь между влагосодержанием  $x$  и относительной влажностью  $\phi$ , подставим в выражение (3.6) значения  $p_{\pi}$  и  $p_{c.в.}$ , определенные из уравнения (3.4). Тогда

$$x = \frac{p_{\pi} M_{\pi}}{RT} : \frac{p_{c.в.} M_{c.в.}}{RT} = \frac{M_{\pi}}{M_{c.в.}} \cdot \frac{p_{\pi}}{p_{c.в.}}, \quad (3.6a)$$

где  $p_{c.в.}$  — парциальное давление абсолютно сухого воздуха;  $M_{c.в.}$  — мольная масса абсолютно сухого воздуха, равная 29 кг/кмоль;  $M_{\pi}$  — мольная масса водяного пара 18 кг/кмоль.

По закону Дальтона  $p_{c.в.}$  равно разности общего давления влажного воздуха  $P$  и парциального давления водяного пара в нем:

$$p_{c.в.} = P - p_{\pi}.$$

Тогда выражение (3.6) можно записать в виде

$$x = \frac{M_{\pi}}{M_{c.в.}} \cdot \frac{p_{\pi}}{P - p_{\pi}} = 0,621 \cdot \frac{p_{\pi}}{P - p_{\pi}}, \quad (3.7)$$

где  $M_{\pi}/M_{c.в.} = 0,621$  — отношение молекулярных масс водяного пара и воздуха.

Из уравнения (3.1)

$$p_{\pi} = \phi p_{\pi}.$$

Тогда выражение (3.7) можно записать в виде

$$x = 0,621 \cdot \frac{\phi p_{\pi}}{P - \phi p_{\pi}}. \quad (3.7a)$$

**Энтальпия**  $I$  влажного воздуха также относится к 1 кг абсолютно сухого воздуха (Дж/кг сухого воздуха) и определяется при температуре воздуха  $t$  (°C) как сумма энтальпии 1 кг абсолютно сухого воздуха  $c_{c.в.} \cdot t$  и  $x$  кг водяного пара  $x \cdot i_{\pi}$ :

$$I = c_{c.в.} \cdot t + x i_{\pi}, \quad (3.8)$$

где  $c_{c.в.}$  — средняя удельная теплоемкость абсолютно сухого воздуха, которая может быть принята приближенно равной 1005 Дж/(кг·К);  $i_{\pi}$  — энтальпия водяного пара, Дж/кг.

Водяной пар находится в процессе сушки в перегретом состоянии в смеси с воздухом. Обозначим энтальпию водяного пара при 0 °C через  $i_0$  ( $i_0 = 2493 \cdot 10^3$  Дж/кг) и примем среднюю удельную теплоемкость перегретого водяного пара  $c_{\pi} = 1,97 \cdot 10^5$  Дж/(кг·К). Тогда энтальпия перегретого пара

$$i_{\pi} = i_0 + c_{\pi} t. \quad (3.9)$$

Подставляя выражение  $i_{\pi}$  и значение  $c_{с.в}$  в уравнение (3.8), получим выражение для энтальпии влажного воздуха  $I$  (Дж/кг сухого воздуха)

$$I = (c_{с.в} + c_{\pi}x)t + i_0x. \quad (3.10)$$

или, в численном выражении:

$$I = (1,005 \cdot 10^3 + 1,97 \cdot 10^3 x)t + 2,493 \cdot 10^6 x. \quad (3.10a)$$

Энтальпию влажного воздуха удобно выражать в кДж/кг:

$$I = (1,005 + 1,97x)t + 2493x. \quad (3.106)$$

Кроме  $x$ ,  $\phi$  и  $I$ , при расчетах процесса сушки необходимо знать плотность влажного воздуха или обратную величину — его удельный объем. Плотность влажного воздуха  $\rho_{вл.в}$  равна сумме плотностей абсолютно сухого воздуха  $\rho_{с.в}$  и водяного пара  $\rho_{\pi}$ . Учитывая, что, согласно выражению (3.6), плотность водяного пара  $\rho_{\pi} = x\rho_{с.в}$ , плотность влажного воздуха

$$\rho_{вл.в} = \rho_{с.в} + \rho_{\pi} = \rho_{с.в}(1 + x). \quad (3.11)$$

Плотность абсолютно сухого воздуха из уравнения состояния

$$\rho_{с.в} = \frac{M_{с.в}p_{с.в}}{RT} = \frac{M_{с.в}(P - p_{\pi})}{RT}.$$

Подставляя значения  $\rho_{с.в}$  и  $x$  из уравнения (3.6a) в выражение (3.11), находим плотность влажного воздуха (кг/м<sup>3</sup>):

$$\rho_{вл.в} = \frac{M_{с.в}(P - p_{\pi})}{RT} \left( 1 + \frac{M_{\pi}}{M_{с.в}} \cdot \frac{p_{\pi}}{P - p_{\pi}} \right) = \frac{P - \left( \frac{M_{с.в} - M_{\pi}}{M_{с.в}} \right) \cdot p_{\pi}}{R / M_{с.в} \cdot T}, \quad (3.11a)$$

где  $R$  — универсальная газовая постоянная  $R = 8,3145$  кДж/(кмоль · К); отношение  $R/M_{с.в} = 287$  Дж/(кг · К).

Подставляя численные значения  $M_{с.в}$ ,  $M_{\pi}$  и  $R$ , получаем выражение для плотности влажного воздуха (кг/м<sup>3</sup>):

$$\rho_{вл.в} = \frac{(P - 0,378 p_{\pi})}{287 T}, \quad (3.116)$$

где давление  $P$  и  $p_{\pi}$  выражено в Па, а температура  $T$  — в К.

Из уравнения (3.116) видно, что при данном внешнем давлении  $P$  плотность влажного воздуха является функцией парциального давления водяного пара  $p_{\pi}$  и температуры  $T$ . В процессе сушки воздух

увлажняется (возрастает  $p_n$ ) и охлаждается (уменьшается  $T$ ). Снижение температуры оказывает относительно большее влияние на значение  $\rho_{с.в.}$ , и, как следует из уравнения (3.116), плотность воздуха при сушке увеличивается.

### 3.2. $I-x$ ДИАГРАММА ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

Основные свойства влажного воздуха можно с достаточной для технических расчетов точностью определять при помощи  $I-x$ -диаграммы, впервые разработанной русским ученым Л. К. Рамзиным в 1918 г. Диаграмма  $I-x$  (рис. 6 и 7) построена для постоянного давления  $P = 745$  мм рт. ст. (около 99 кПа), которое, по многолетним статистическим данным, можно считать среднегодовым для центральных районов России.

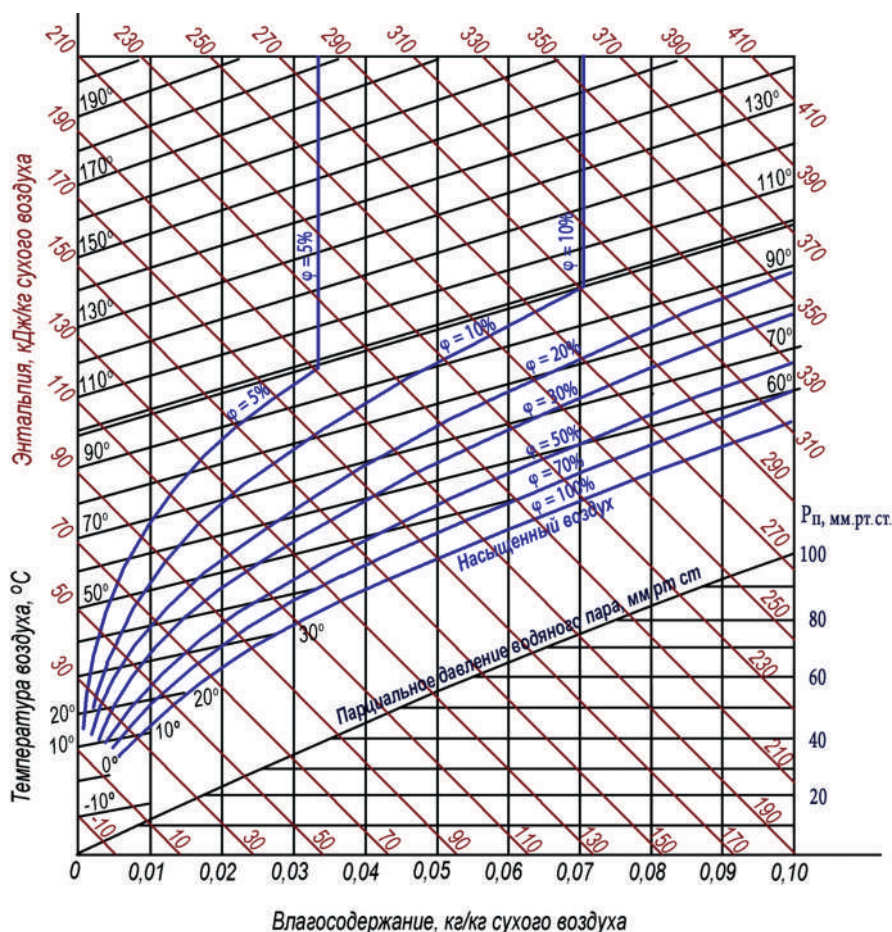
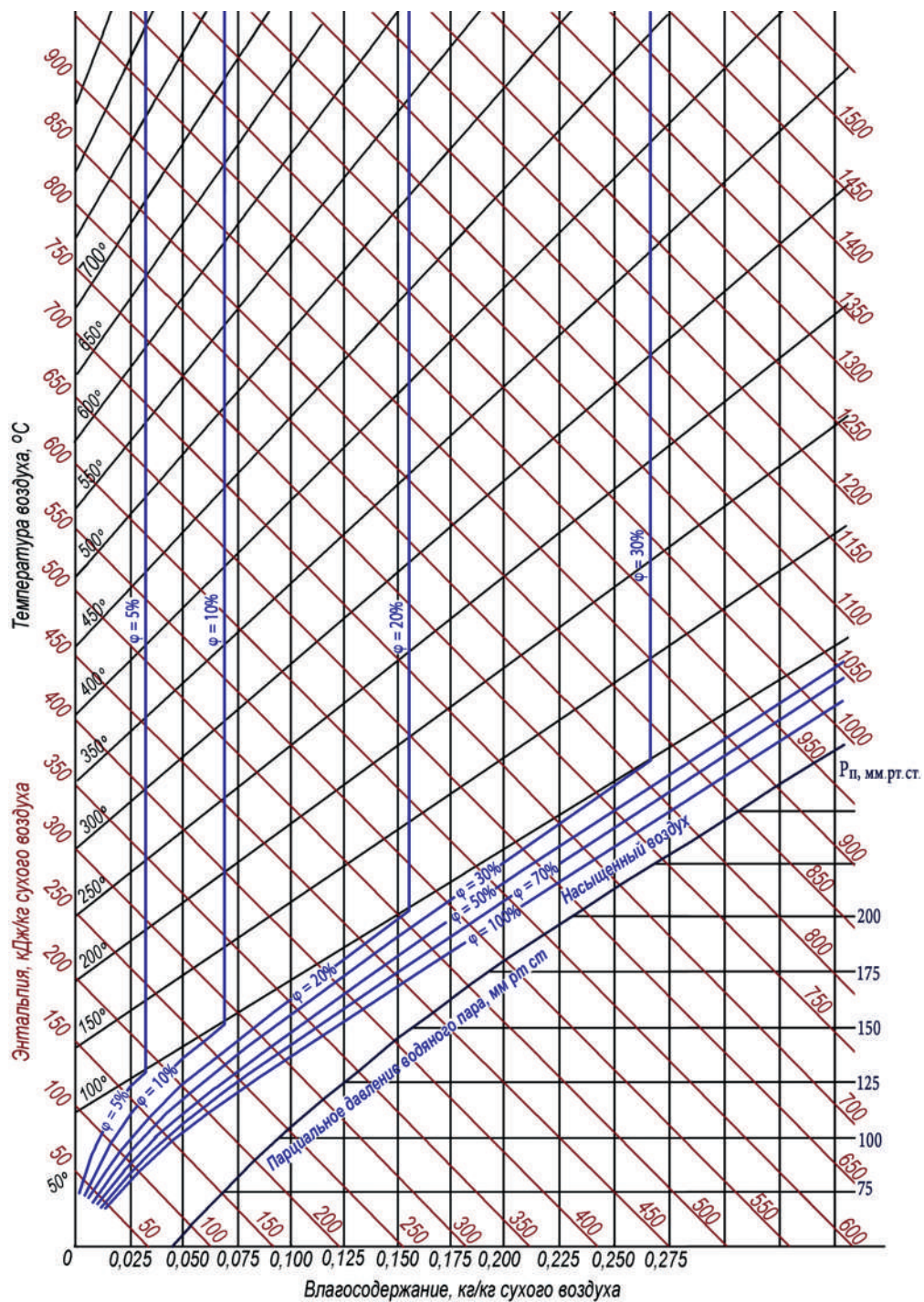


Рис. 6. Диаграмма  $I-x$  для влажного воздуха



Рис. 7. Диаграмма  $I - x$  для влажного воздуха

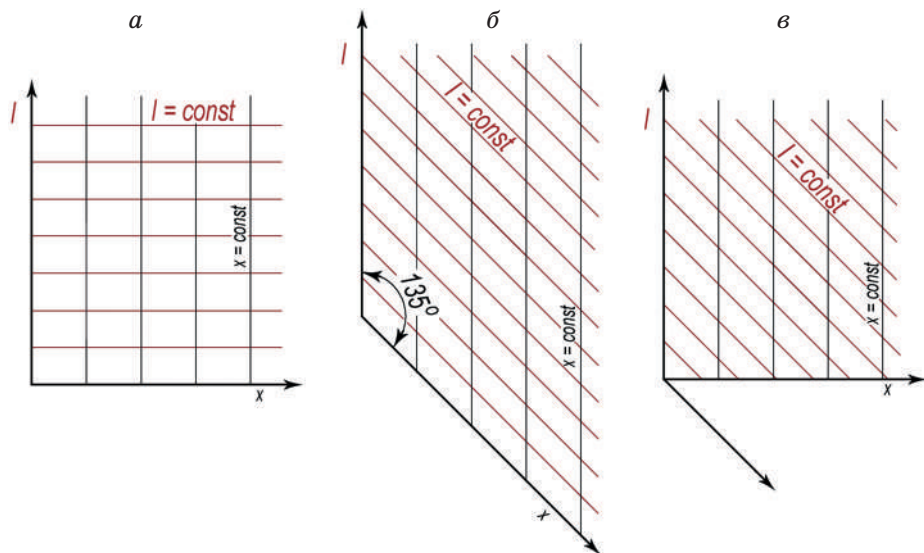


Рис. 8. Системы координат для  $I$ - $x$  диаграммы:

$a$  — прямоугольная,  $б$  — косоугольная,  $в$  — проекция оси  $x$  на вспомогательную горизонтальную линию

Диаграмма строится на основе уравнений (3.1–3.10), связывающих все основные параметры влажного воздуха. Диаграмма построена в косоугольной системе координат (рис. 8), что позволяет расширить область ненасыщенного влажного воздуха и делает диаграмму удобной для графических построений.

Вертикальная ось, на которой откладываются значения энтальпии ( $I$ ), и ось, соответствующая значениям влагосодержания воздуха ( $x$ ), расположены не под прямым углом друг к другу, а под углом  $135^\circ$ .

При выбранной величине угла между осями  $I$  и  $x$  под кривой  $\varphi = 100\%$  остается незначительная площадь для размещения вспомогательного графика зависимости парциального давления водяного пара ( $p_n$ ) от влагосодержания ( $x$ ) воздуха.

В косоугольной системе линии  $I = \text{const}$  располагаются параллельно действительной оси влагосодержания  $x$ . Однако на диаграмме изображается не сама действительная ось влагосодержания, а вспомогательная горизонтальная линия, на которую проектируются значения влагосодержания смеси с действительной оси  $x$ .

На диаграмме нанесены следующие изолинии:

- 1) линии постоянного влагосодержания ( $x = \text{const}$ ) — вертикальные прямые, параллельные оси ординат;
- 2) линии постоянной энтальпии ( $I = \text{const}$ ) — прямые, параллельные оси абсцисс, т. е. идущие под углом  $135^\circ$  к оси ординат;
- 3) линии постоянных температур, или изотермы ( $t = \text{const}$ );
- 4) линии постоянной относительной влажности ( $\varphi = \text{const}$ );



5) линия парциальных давлений водяного пара  $p_n$  во влажном воздухе, значения которых отложены в масштабе на правой оси ординат диаграммы.

Линии постоянной температуры паровоздушной смеси ( $t = \text{const}$ ) оказываются практически прямыми, расположенными под небольшим положительным углом к горизонтали. На диаграмме также могут быть нанесены линии постоянных значений температуры мокрого термометра ( $t_m = \text{const}$ ).

Линии постоянных температур, или *изотермы*  $t_n$ , выражающие зависимость  $I$  от  $x$  при  $t = \text{const}$ , построены с помощью уравнения (3.10):

$$I = (c_{св} + c_n x) \cdot t_n + r_0 x, \quad (3.10в)$$

где  $t_n$  — изотерма  $t = \text{const}$ , °C.

Наклон изотерм несколько увеличивается с возрастанием температуры, так как теплоемкость водяного пара  $c_n$  (а следовательно, и энтальпия  $i_n$  (см. уравнение 3.9)) при этом возрастает.

Линия парциального давления водяного пара  $p_n$  (Па) строится по уравнению (3.7):

$$p_n = \frac{P \cdot x_n}{0,621 - x_n}, \quad (3.7б)$$

где  $x_n$  — линия постоянного влагосодержания  $x = \text{const}$ , кг/кг;  $P$  — барометрическое давление 99 309 Па (745 мм. рт. ст.).

Линии постоянной *относительной влажности* построены с помощью уравнений, выражающих зависимость между  $x$  и  $p_n$  при  $\varphi = \text{const}$ .

Для заданного значения  $x_n$  по уравнению (3.7б) рассчитывают парциальное давление паров воды  $p_n$  (Па). Далее по уравнению (3.1) при заданном значении относительной влажности  $\varphi_n$  рассчитывают парциальное давление насыщенных паров воды  $p_n$  (Па):

$$p_n = \varphi_n \cdot p_n^*$$

Парциальное давление насыщенных паров воды зависит только от температуры; следовательно, температуру при заданном значении  $\varphi_n$  можно определить из справочных таблиц либо рассчитать по уравнению (3.2):

$$t = 2224,4 / (5,9778 - \lg p_n) - 273,2. \quad (3.10г)$$

Таким образом, каждому заданному значению  $\varphi_n$  ( $\varphi = \text{const}$ ) на диаграмме соответствует линия  $t(x)$  или  $I(x)$ .

Линии  $\varphi = \text{const}$  образуют пучок расходящихся кривых, выходящих из одной точки (не показанной на диаграмме) с координатами  $t = -273^\circ \text{C}$

и  $x = 0$ . При температуре  $99,4^\circ\text{C}$  давление насыщенного пара  $p_n$  становится постоянным и равным барометрическому давлению  $P = 745$  мм рт. ст. (99,3 кПа), для которого и построена диаграмма.

В этом случае, согласно выражению (3.1), величина  $\varphi = p_n/P$  и уравнение (3.7) принимает вид

$$x = \frac{M_n}{M_{c.v}} \cdot \frac{\varphi p_n}{P - \varphi p_n}.$$

Следовательно, при температурах  $t \geq 99,4^\circ\text{C}$  влажность  $\varphi$  не зависит от температуры и фактически является величиной постоянной, так же как и влагосодержание воздуха  $x$  (при заданном значении  $p_n$  и  $P = \text{const}$ ). Поэтому при  $t = 99,4^\circ\text{C}$  линии  $\varphi = \text{const}$  имеют резкий перелом и идут почти вертикально вверх. Незначительное отклонение направления линий  $\varphi = \text{const}$  от вертикального объясняется тем, что в области высоких температур несколько меняются параметры пара и воздуха.

Линия  $\varphi = 100\%$  соответствует насыщению воздуха водяным паром при данной температуре. Эта линия ограничивает снизу расположенную над ней рабочую площадь диаграммы, отвечающую ненасыщенному влажному воздуху, используемому в качестве сушильного агента. Площадь диаграммы, расположенная под линией  $\varphi = 100\%$ , относится к воздуху, пересыщенному водяным паром, и для расчетов сушилок интереса не представляет.

Таким образом, на диаграмме  $I-x$  по любым двум известным параметрам влажного воздуха можно найти точку, характеризующую состояние воздуха, и определить все его остальные параметры.

### **Изображение процессов изменения состояния воздуха на диаграмме.**

При нагревании влажного воздуха в специальных теплообменниках — калориферах — относительная влажность воздуха  $\varphi$  уменьшается, а его влагосодержание  $x$  остается постоянным. Поэтому на диаграмме  $I-x$  процесс нагрева воздуха изображают отрезком  $AB$  (рис. 9), проводя из точки, отвечающей начальному состоянию воздуха ( $t_0, x_0$ ), вертикальную линию  $x = \text{const}$  вверх до пересечения с изотермой, отвечающей температуре нагрева воздуха  $t_1$ .

Процесс охлаждения воздуха (имеющего начальную температуру  $t_1$ ) при постоянном влагосодержании до его насыщения изображается вертикально, проведенной из точки  $B$  (характеризующей начальное состояние охлаждаемого воздуха) вниз до пересечения с линией  $\varphi = 100\%$  (отрезок  $BC$ ). Точка пересечения линий  $x = \text{const}$  и  $\varphi = 100\%$  (точка  $C$  на рис. 9) характеризует состояние воздуха в результате его охлаждения при  $x = \text{const}$  и называется точкой росы. Изотерма, проходящая через эту точку, определяет температуру точки росы. Дальнейшее охлаждение воздуха ниже температуры точки росы (например, до температуры  $t_n$ )

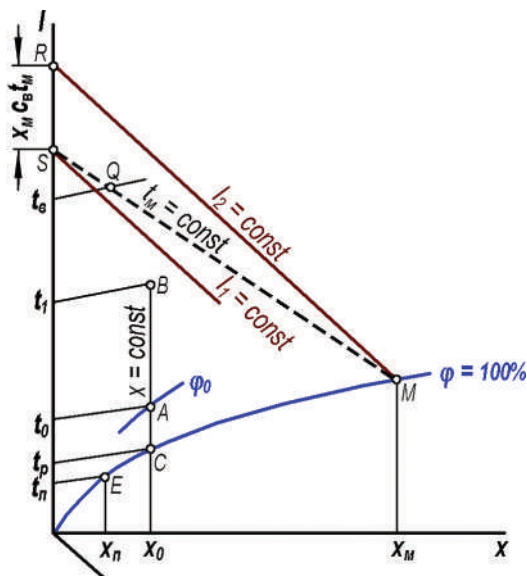


Рис. 9. Изображение изменения состояния влажного воздуха на  $I - x$  диаграмме

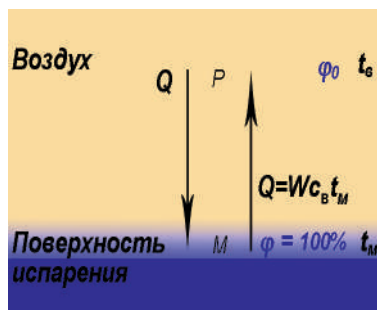


Рис. 10. Схема адиабатического испарения влаги с поверхности воды

термометра  $t_m$ . Данная температура в процессе испарения не меняется, в то время как температура воздуха, по мере его насыщения влагой, все время понижается, приближаясь в пределе к температуре мокрого термометра (при  $\varphi = 100\%$ ). Эту температуру, которую примет воздух в конце процесса насыщения, называют также *температурой адиабатического насыщения*.

приводит к конденсации из него части влаги и, соответственно, к уменьшению его влагосодержания от  $x_0$  до  $x_n$ . На диаграмме процесс охлаждения насыщенного воздуха совпадает с линией  $\varphi = 100\%$  (кривая  $CE$ ).

Рассмотрим процесс испарения влаги в окружающий воздух с поверхности влажного материала (рис. 10).

Если температура испарения равна или принимается равной  $0^\circ\text{C}$ , а процесс испарения идет по линии  $I = \text{const}$  (рис. 9), такой процесс называется процессом адиабатического испарения<sup>1</sup>. В этом случае все тепло  $Q$ , отданное воздухом на испарение влаги, возвращается обратно в воздух с испарившимися парами воды (рис. 9).

Одновременно понижается температура и увеличиваются влагосодержание и относительная влажность воздуха.

В системе «поверхность испарения — воздух» воздух только испаряет влагу, а не нагревает ее. Непосредственно над поверхностью испарения воды (а в равной степени и над поверхностью влажного материала в начальный период сушки) образуется слой насыщенного пара ( $\varphi = 100\%$ ), находящегося в равновесии с водой. Температура влаги при этом имеет постоянное значение, равное *температуре мокрого*

<sup>1</sup> Адиабатический процесс (адиабатный процесс) — это процесс, при котором физическая система не получает теплоты извне и не отдает ее.

Если  $t_m > 0$ , то поступающая в воздух испаренная влага  $W$  вносит в него некоторое количество тепла  $Wc_b t_m$ , поэтому адиабатический процесс охлаждения воздуха в этом случае происходит с повышением его энтальпии ( $I_2 > I_1$ ). Если  $L$  — расход сухого воздуха на испарение (кг/с), то

$$L(I_2 - I_1) = Wc_b \cdot t_m$$

или

$$I_2 - I_1 = \frac{W}{L} \cdot c_b t_m,$$

где  $c_b$  — теплоемкость воды, кДж/(кг·К).

Величина  $W/L$  показывает увеличение влагосодержания воздуха в процессе его адиабатического охлаждения, равное  $(x_m - x_1)$ , где  $x_m$  — влагосодержание воздуха при его полном насыщении влагой при температуре  $t_m$ .

Из найденной выше зависимости  $I_1 = I_2 - (x_m - x_1)c_b \cdot t_m$  при  $x_1 = 0$  следует:

$$I_1 = I_2 - x_m c_b t_m. \quad (3.11)$$

Уравнение (3.11) служит для нанесения на  $I$ - $x$  диаграмму линий адиабатического насыщения воздуха (пунктирная линия на рис. 9).

Если, например, из точки  $M$  (см. рис. 9) провести линию  $I_2 = \text{const}$  до пересечения с осью ординат и отложить от точки пересечения  $R$  в масштабе, выбранном для энтальпий, отрезок, равный  $x_m c_b t_m$  то полученная точка  $S$  и будет искомой, а прямая  $SM$  будет, очевидно, линией адиабатического насыщения воздуха. Эта линия называется иногда также линией постоянной температуры мокрого термометра ( $t_m = \text{const}$ ), потому что мокрый термометр, помещенный в воздух, насыщение которого происходит по линии адиабатического насыщения, будет показывать постоянную температуру  $t_m$ .

По линии адиабатического насыщения воздуха происходит изменение его состояния (температуры, влагосодержания и относительной влажности) при адиабатическом процессе испарения влаги со свободной поверхности воды или с поверхности влажного материала в начальный период сушки.

Разность между температурой воздуха  $t$  и температурой мокрого термометра  $t_m$  характеризует способность воздуха поглощать влагу из материала и носит название потенциала сушки  $\Delta t_m$ :

$$\Delta t_m = t - t_m. \quad (3.12)$$

Потенциал сушки характеризует скорость испарения влаги из материала, которая зависит от состояния воздуха и температуры процесса,

т. е. определяется совместным влиянием тепло- и массообмена. Когда воздух полностью насыщается влагой ( $t = t_m$ ), потенциал  $\Delta t_m$  становится равным нулю.

Значение  $t_m$  определяют с помощью термометра, измерительный элемент которого обернут влажной тканью («мокрый» термометр). По разности показаний обычного («сухого») термометра, температура которого равна температуре воздуха, и мокрого термометра, пользуясь таблицами или номограммами, находят относительную влажность воздуха. Разность температуры сухого и мокрого термометров также называют *психрометрической разностью температур*.

Состояние воздуха (относительная влажность, влагосодержание, энтальпия и парциальное давление водяного пара) можно определить, пользуясь  $I-x$  диаграммой, если известны  $t$  и  $t_m$ . Для этого находят точку  $M$  (см. рис. 9) как пересечение изотермы  $t_m = \text{const}$  с линией  $\phi = 100\%$ . Из точки  $M$  проводят прямую  $t_m = \text{const}$  (пунктирная линия постоянной температуры мокрого термометра) до пересечения с изотермой  $t = \text{const}$ . Искомая точка  $P$  будет характеризовать состояние воздуха по заданным показаниям «сухого» ( $t$ ) и «мокрого» ( $t_m$ ) термометров психрометра.

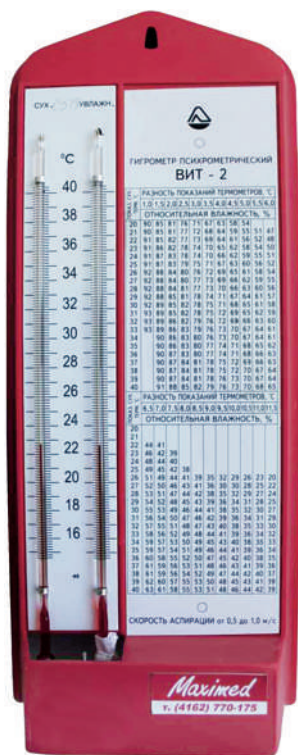


Рис. 11. Психрометр  
Августа

**Измерение влажности воздуха. Психрометрический метод.** Наиболее распространенным и простым прибором измерения влажности воздуха является *психрометр*. Для измерения влажности воздуха используют два термометра, один из которых обернут хлопчатобумажной тканью, смоченной в воде (рис. 11). По специальной таблице (или с помощью диаграммы Рамзина), по показаниям «сухого» и «мокрого» термометров определяют влажность окружающего воздуха.

Недостатком изображенного на рис. 11 психрометра Августа является его сравнительно малая точность из-за существенного влияния радиационных притоков тепла (от окружающей среды и предметов) к незащищенному прибору при недостаточной скорости воздуха около баллончика (движение создается только свободной конвекцией). Поэтому показания мокрого термометра  $t_m$  будут несколько завышены в сравнении с истинной температурой  $t_m$ . При нулевой скорости воздуха ошибка в определении  $\Delta = (t - t_m)$  достигает 14%, а при скорости воздуха 0,8 м/с она уменьшается до 2%.

Для повышения точности показаний мокрого термометра прибегают к искусственному увеличению скорости воздуха около баллончиков психрометра и защите его от внешних теплопритоков (тепловых излучений). Удобным и достаточно точным прибором для определения влажности воздуха служит аспирационный психрометр Ассмана. Оба термометра заключены в металлические трубки, через которые специальным вентилятором с пружинным (заводным) или электрическим двигателем, смонтированным в верхней части прибора, пропускается исследуемый воздух со скоростью 2,5–3 м/с. Психрометр Ассмана определяет относительную влажность воздуха с точностью 1–2 %.

С появлением современных электронных компонентов вместо термометров используются полупроводниковые термодатчики (термопары, термометры сопротивления), а цифровые микросхемы вычисляют влажность воздуха и индицируют результаты на жидкокристаллический дисплей.

*Сорбционный (волосяной) метод.* Этот способ измерения влажности воздуха применяется уже давно. В его основе лежит свойство волоса (гигроскопического материала) изменять свои размеры от степени увлажнения. Измеряя изменение длины волоса в зависимости от количества влаги в воздухе, мы тем самым меряем процентное содержание влажности самого воздуха. В последнее время этот метод трансформировался: вместо волоса применяют различные полимерные материалы, которые тоже реагируют на изменение влажности в воздухе. Тем не менее стабильность показаний приборов невысока, и им присуще явление гистерезиса. Влагомер, работающий на таком принципе, называется *гигрометроом*.

*Методы, основанные на измерении точки росы.* Анализируемый газ охлаждают до температуры, отвечающей температуре насыщения водяного пара, т. е. до точки росы. Эту температуру определяют в момент начала конденсации пара (выпадение росы) на плоской полированной поверхности зеркала. Для охлаждения газа используют дросселирующие, термоэлектрические, термоманитные устройства. Момент выпадения росы фиксируется фотоэлектрическим (по изменению рассеяния света) или кондуктометрическим методом. В последнем случае измеряют поверхностное сопротивление зеркала, на котором находится конденсат. Зная точку росы и температуру анализируемого газа, можно вычислить относительную влажность по формуле (3.1). К достоинству этого метода следует отнести высокую точность измерения и низкий



Рис. 12. Датчик температуры точки росы



предел обнаружения влаги (точка росы до  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что отвечает концентрации влаги  $10^{-6}\%$ ).

Принцип действия *кулонометрических* влагомеров и гигрометров основан на адсорбции паров воды твердым поглотителем. Чувствительный элемент влагомера выполнен в виде трубчатого корпуса из электроизоляционного материала, внутри которого размещены две несоприкасающиеся спирали (электроды) из Pt и Rh. Пространство между спиралями заполнено адсорбентом — частично гидратированным  $\text{P}_2\text{O}_5$ . К электродам подведено напряжение, обеспечивающее электролиз поглощенной влаги. Анализируемый газ с постоянным расходом пропускают через элемент, и водяные пары практически полностью поглощаются  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Ток электролиза связан с концентрацией поглощенной из воздуха влаги.

*Лабораторные* (гравиметрические, химические) способы измерения влажности имеют высокую точность, однако требуют значительного времени на выполнение анализов и затрат ручного труда. Они используются в основном для разовых измерений или для калибровки других приборов.

Гравиметрический метод основан на точном замере содержания влаги в воздухе. Исследуемый воздух, объем которого контролируется специальным счетчиком, прогоняют через трубки, заполненные поглотителем влаги (силикагель, хлористый кальций и др.). Разность масс трубок с адсорбентом до и после пропускания воздуха показывает количество поглощенной влаги.

*Химические методы* основаны на химической реакции реактива с влагой исследуемого газа.

К наиболее известным относится метод титрования реактивом Фишера. Реактив Фишера — это раствор  $\text{SO}_2$  и  $\text{I}_2$  в жидкой смеси пиридина и метанола, который взаимодействует с водой по реакции



где RN — органическое основание, например пиридин;  $\text{R}'\text{OH}$  — органический спирт, обычно метанол.

Определенный объем влажного воздуха пропускают через жидкий поглотитель (например, диэтиленгликоль), который затем титруется реактивом Карла Фишера. Содержание влаги в продукте рассчитывается по количеству йода, затраченному на титрование.

Таким образом, существует большое количество прямых и косвенных методов определения количества влаги в воздухе, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. Задача грамотного инженера — правильно выбрать подходящий метод.

Наиболее полно методы измерения влажности воздуха описаны в книге [12].

# 4

## МАТЕРИАЛЬНЫЙ И ТЕПЛОВОЙ БАЛАНСЫ СУШИЛКИ

**Материальный баланс сушилки.** Баланс по высушиваемому материалу является общим для конвективной, контактной и других видов сушилок непрерывного действия.

Для составления баланса примем следующие обозначения:

$G_{\text{н}}$  — масса влажного материала, поступающего на сушку, кг/с;

$G_{\text{к}}$  — масса высушенного материала, кг/с;

$w_{\text{н}}$  и  $w_{\text{к}}$  — начальная и конечная влажность материала соответственно (считая на общую массу материала), %;

$W$  — масса влаги, удаляемой из материала при сушке, кг/с.

Тогда материальный баланс будет иметь следующий вид:

- по всему материалу, подвергаемому сушке:

$$G_{\text{н}} = G_{\text{к}} + W; \quad (4.1)$$

- по абсолютно сухому веществу в высушиваемом материале:

$$G_{\text{н}} \frac{100 - w_{\text{н}}}{100} = G_{\text{к}} \frac{100 - w_{\text{к}}}{100}. \quad (4.2)$$

Из уравнения (4.2) следует:

$$G_{\text{н}} = G_{\text{к}} \frac{100 - w_{\text{к}}}{100 - w_{\text{н}}} \quad (4.3)$$

и

$$G_{\text{к}} = G_{\text{н}} \frac{100 - w_{\text{н}}}{100 - w_{\text{к}}}. \quad (4.4)$$

Обычно целью составления материального баланса является определение массы влаги  $W$ , удаляемой при сушке. Из уравнения (4.1) находим

$$W = G_{\text{н}} - G_{\text{к}}. \quad (4.5)$$

Подставляя в выражение (4.5) значение  $G_{\text{к}}$  из уравнения (4.4), получим

$$W = G_{\text{н}} \frac{w_{\text{н}} - w_{\text{к}}}{100 - w_{\text{к}}}. \quad (4.6)$$



Уравнения (4.1–4.6) являются основными уравнениями материального баланса процессов сушки.

Влажность материала часто бывает удобно выражать по отношению к массе не всего материала, а к массе содержащегося в нем сухого вещества. В этом случае, из уравнения баланса по испаренной влаге, пользуясь зависимостью (2.4), получим:

$$W = G_c (w_n^c - w_k^c), \quad (4.7)$$

где  $G_c$  — расход влажного материала в пересчете на абсолютно сухое вещество, кг/с.

При расчете конвективных сушилок, помимо баланса по высушиваемому материалу, составляется материальный баланс по влаге, из которого находят расход сухого воздуха на сушку.

Рассмотрим основную схему процессов конвективной сушки на примере воздушной сушилки, в которой воздух нагревается только в подогревателе (калорифере) перед сушилкой и однократно проходит через нее. Принцип устройства такой сушилки соответствует схеме на рис. 13.

Пусть на сушку поступает воздух с влажностью  $x_0$  кг/кг сухого воздуха, причем расход абсолютно сухого воздуха составляет  $L$  кг/с. Из сушилки (при отсутствии потерь воздуха) выходит такое же количество абсолютно сухого воздуха, а его влажность меняется до  $x_2$  кг/кг сухого воздуха. Масса влаги, испаряющейся из материала в сушилке, составляет  $W$  кг/с. Тогда материальный баланс по влаге будет иметь вид:

$$Lx_0 + W = Lx_2. \quad (4.8)$$

Из уравнения баланса определим расход абсолютно сухого воздуха на сушку:

$$L = \frac{W}{x_2 - x_0}. \quad (4.9)$$

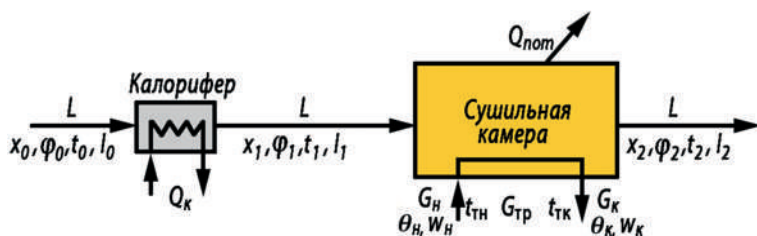


Рис. 13. Принципиальная схема конвективной сушилки непрерывного действия, основной вариант процесса сушки

Удельный расход воздуха на испарение из материала 1 кг влаги (кг сухого воздуха/кг влаги):

$$l = \frac{L}{W} = \frac{1}{x_2 - x_0} \quad (4.10)$$

Проходя через калорифер, воздух не поглощает влагу и не отдает ее, поэтому его влагосодержание остается постоянным, т. е.  $x_1 = x_0$ . Соответственно, уравнения (4.9) и (4.10) могут быть записаны в виде

$$L = \frac{W}{x_2 - x_1} \quad (4.9a)$$

и

$$l = \frac{L}{W} = \frac{1}{x_2 - x_1}. \quad (4.10a)$$

Следует иметь в виду, что влагосодержание наружного воздуха  $x_0$  в среднем летом выше, чем зимой. Величина  $x_0$  входит как вычитаемое в знаменатель правой части уравнения (4.10). Следовательно, расчет удельного расхода воздуха (и, соответственно, подбор калориферов для его нагрева) надо вести по наибольшей величине  $x_0$  в летних условиях для того географического пункта, в котором должна работать сушилка. Средние статистические данные о значениях  $x_0$  в летнее и зимнее время года для различных регионов приводятся в справочных таблицах.

**Тепловой баланс конвективной сушилки непрерывного действия.** Рассмотрим тепловые балансы наиболее распространенных конвективных сушилок [5, 47].

Для составления типового теплового баланса конвективной сушилки непрерывного действия воспользуемся ее общей схемой, приведенной на рис. 13.

Пусть на сушку поступает  $G_n$  кг/с исходного материала, имеющего температуру  $\theta_n$  °С. В сушилке из материала испаряется  $W$  кг/с влаги, и из сушилки удаляется  $G_k$  кг/с высушенного материала при температуре  $\theta_k$  °С. Обозначим удельную теплоемкость высушенного материала  $c_m$  Дж/(кг·К) и теплоемкость влаги  $c_v$  Дж/(кг·К). Теплоемкость воды  $c_v = 4,19$  кДж/(кг·К) или 1 ккал/(кг·°С).

В сушилку подается влажный воздух (сушильный агент), содержащий  $L$  кг/с абсолютно сухого воздуха. Перед калорифером воздух имеет энтальпию  $I_0$  Дж/кг сухого воздуха; после нагрева, т. е. на входе в сушилку, энтальпия воздуха повышается до  $I_1$  Дж/кг сухого воздуха. В процессе сушки в результате передачи тепла материалу, поглощения воздухом испаряющейся из материала влаги и потерь тепла в окружающую среду энтальпия воздуха изменяется, и на выходе из

сушилки энтальпия отработанного воздуха равна  $I_2$  Дж/кг сухого воздуха.

При составлении теплового баланса следует учитывать, что в сушилке могут быть транспортные устройства, на которых находится высушиваемый материал (например, вагонетки, лента, сетка и т. п.). Пусть масса этих устройств  $G_t$  кг/с<sup>1</sup>. Удельная теплоемкость их материала  $c_t$  Дж/(кг·К), их температура на входе в сушилку  $t_{тн}$ . В сушилке температура транспортных устройств возрастает и достигает  $t_{тк}$  на выходе из сушилки.

Согласно схеме на рис. 13, тепло  $Q_k$  подводится в калорифер, установленный перед сушилкой. Тогда, с учетом потерь тепла сушилкой в окружающую среду  $Q_{пот}$ , имеем:

Приход тепла:		Расход тепла	
С наружным воздухом	$L I_0$	С отработанным воздухом	$L I_2$
С влажным материалом <sup>2</sup> , в том числе:			
с сухим материалом	$G_k c_m \theta_n$	С высушенным материалом	$G_k c_m \theta_k$
с влагой, испаряемой из материала	$W c_v \theta_n$	С транспортными устройствами	$G_t c_t t_{тк}$
С транспортными устройствами	$G_t c_t t_{тн}$		
В основном (внешнем) калорифере	$Q_k$	Потери тепла в окружающую среду	$Q_{пот}$

При установившемся процессе сушки тепловой баланс выражается равенством

$$L I_0 + G_k c_m \theta_n + W c_v \theta_n + G_t c_t t_{тн} + Q_k = L I_2 + G_k c_m \theta_k + G_t c_t t_{тк} + Q_{пот}.$$

Из этого уравнения можно определить общий расход тепла  $Q_k$  на сушку:

$$Q_k = L(I_2 - I_0) + G_k c_m (\theta_k - \theta_n) + G_t c_t (t_{тк} - t_{тн}) - W c_v \theta_n + Q_{пот}. \quad (4.11)$$

Разделив обе части последнего равенства на  $W$ , получим выражение для удельного расхода тепла  $q_k$  (на 1 кг испаренной влаги):

$$q_k = l(I_2 - I_0) + q_m + q_t - c_v \theta_n + q_{пот}, \quad q_k = Q_k/W, \quad (4.12)$$

где  $l(I_2 - I_0)$  — количество тепла (с учетом всех видов его прихода и расхода), приходящегося на 1 кг испаренной влаги;  $q_m = G_k c_m (\theta_k - \theta_n)/W$  — удельный расход тепла на нагрев высушенного материала;  $q_t = G_t c_t (t_{тк} - t_{тн})/W$  —

<sup>1</sup> Здесь  $G_t$  — масса транспортных устройств, несущая секундную (часовую) загрузку высушиваемого материала.

<sup>2</sup> Тепло, вносимое исходным влажным материалом, в тепловом балансе рассматривается как сумма тепла, вносимого высушенным материалом и испаряемой влагой.

удельный расход тепла на нагрев транспортных устройств;  $c_v \theta_n$  — энтальпия 1 кг влаги, поступающей в сушилку и испаряемой из материала;  $q_{\text{пот}} = Q_{\text{пот}}/W$  — удельные потери тепла сушилкой в окружающую среду.

Удельный расход тепла в калорифере можно также представить в виде

$$q_k = l(I_1 - I_0). \quad (4.13)$$

Подставляя значение  $q_k$  в уравнение (4.12), находим:

$$l(I_1 - I_0) = l(I_2 - I_0) + q_m + q_t - c_v \theta_n + q_{\text{пот}}, \quad (4.14)$$

или

$$l(I_2 - I_1) = c_v \theta_n - q_m - q_t - q_{\text{пот}}. \quad (4.15)$$

Обозначив правую часть уравнения (4.15)

$$\Delta = c_v \theta_n - q_m - q_t - q_{\text{пот}}, \quad (4.16)$$

запишем его в следующей форме:

$$l(I_1 - I_2) = \Delta; \quad (4.17)$$

$$I_2 = I_1 + \Delta/l. \quad (4.17a)$$

Входящая в уравнение величина  $\Delta$  выражает разность между приходом и расходом тепла непосредственно в камере сушилки, без учета тепла, приносимого и уносимого воздухом, нагретым в основном калорифере. Величину  $\Delta$  часто называют внутренним балансом сушильной камеры. В данном случае для основного сушильного варианта, изображенного на рис. 13, величина  $\Delta$  меньше нуля, поскольку  $c_v \theta_n \ll q_m - q_t - q_{\text{пот}}$ . Следовательно, энтальпия воздуха в процессе сушки уменьшается.

Подставляя в уравнение (4.17) значение  $l$  из уравнения (4.10), получим

$$\frac{I_2 - I_1}{x_2 - x_0} = \frac{I_2 - I_1}{x_2 - x_1} = \Delta, \quad (4.18)$$

откуда

$$I_2 = I_1 + \Delta \cdot (x_2 - x_0). \quad (4.18a)$$

Для анализа и расчета процессов сушки удобно ввести понятие о *теоретической сушилке*, в которой температура материала, поступающего на сушку, равна нулю, нет расхода тепла на нагрев материала

и транспортных устройств, нет потерь тепла в окружающую среду. Тогда для теоретической сушилки

$$c_{\text{в}}\theta_{\text{н}} = q_{\text{м}} = q_{\text{т}} = q_{\text{пот}} = 0 \quad (4.19)$$

и, согласно выражению (4.16), внутренний баланс сушильной камеры

$$\Delta = 0. \quad (4.16a)$$

При этом в соответствии с уравнением теплового баланса (4.15), для теоретической сушилки

$$I_2 = I_1, \quad (4.20)$$

т. е. процесс сушки в такой сушилке изображается на  $I$ - $x$  диаграмме линией  $I = \text{const}$ . Это означает, что испарение влаги в теоретической сушилке происходит только за счет охлаждения воздуха, причем количество тепла, передаваемого воздухом влажному материалу, полностью возвращается в него с влагой, испаряемой из материала.

В действительных сушилках приход тепла в камеру сушилки ( $c_{\text{в}}\theta_{\text{н}}$ ) меньше его расхода ( $q_{\text{м}} + q_{\text{т}} + q_{\text{пот}}$ ), т. е. значение  $\Delta$  отрицательно (см. уравнение (4.16)) и, в соответствии с уравнением (4.17a), энтальпия воздуха при сушке уменьшается.

В некоторых сушилках организуется дополнительный подвод тепла непосредственно в сушильную камеру  $Q_{\text{доп}}$ . В этом случае уравнение (4.16) запишется в следующем виде:

$$\Delta = q_{\text{доп}} + c_{\text{в}}\theta_{\text{н}} - q_{\text{м}} - q_{\text{т}} - q_{\text{пот}}, \quad (4.166)$$

где  $q_{\text{доп}} = Q_{\text{доп}}/W$  — удельный расход тепла, подводимый непосредственно в сушильную камеру, кДж/кг.

Для таких сушилок значение  $\Delta$  может быть положительным, что свидетельствует о возрастании энтальпии воздуха в процессе сушки.

В частном случае в действительной сушилке возможны условия, при которых отдельные члены правой части уравнения (4.166) хотя и не равны нулю, как для теоретической сушилки, но вследствие того, что приход тепла в сушильную камеру равен его расходу:

$$q_{\text{доп}} + c_{\text{в}}\theta_{\text{н}} = q_{\text{м}} + q_{\text{т}} + q_{\text{пот}}, \quad (4.21)$$

значение  $\Delta$  также будет равно нулю и процесс сушки в действительных условиях равнозначен процессу в теоретической сушилке.

Таким образом, определив величину внутреннего баланса сушильной камеры  $\Delta$ , можно рассчитать удельный расход тепла основного  $q_{\text{к}}$  и дополнительного калорифера  $q_{\text{доп}}$ . Зная удельный расход тепла, легко найти мощность калорифера  $Q_{\text{к}} = q_{\text{к}} \cdot W$ .

Значение удельного расхода теплоты  $q_k$  или  $(q_k + q_{\text{доп}})$  характеризует экономичность конкретного процесса сушки. Однако при термической сушке существует физический минимум, ниже которого значение удельного расхода теплоты быть не может. Это связано с величиной удельной теплоты испарения влаги  $r_0$ , кДж/кг, удаляемой из материала, поскольку при термической сушке удаляемую влагу необходимо перевести из состояния жидкой фазы в фазу паровую.

Показателем экономичности процесса термической сушки является термический коэффициент полезного действия (к.п.д.), который обычно выражают в процентах:

$$\eta = r_0/q_k \text{ или } \eta = r_0/(q_k + q_{\text{доп}}), \quad (4.20)$$

где удельный расход теплоты на сушку превышает удельную теплоту испарения влаги на величину затрат теплоты на нагревание материала, транспортных средств, на потери теплоты в окружающую среду и на теплоту, теряемую с отходящим из сушилки сушильным агентом. Для теоретической сушилки ( $\Delta = 0$ ) к.п.д. сушилки также меньше 100 %, поскольку из сушилки отводится сушильный агент, имеющий температуру выше температуры воздуха, поступающего в калорифер ( $t_2 > t_0$ ). Более того, чаще всего в процессах конвективной сушки основные потери теплоты — это потери с отходящим сушильным агентом.

Для электрокалориферов значение  $Q_k$  определяет мощность теплоэлектронагревателей (ТЭНов). Для паровых калориферов расход греющего пара  $G_{\text{гр.п}}$  можно найти из уравнения<sup>1</sup>:

$$Q_k = G_{\text{гр.п}} \cdot (I_{\text{гр.п}} - I_{\text{конд}}),$$

где  $I_{\text{гр.п}}$  и  $I_{\text{конд}}$  — энтальпия греющего пара и конденсата, кДж/кг.

**Контактные сушилки.** Как указывалось, при контактной сушке тепло, необходимое для испарения влаги, передается материалу через стенку, отделяющую материал от теплоносителя. В качестве теплоносителя при контактной сушке обычно используют насыщенный водяной пар. На рис. 14 показана схема вальцовой сушилки: внутрь полого вала 1 подается греющий пар; влажный материал поступает сверху в сушильную камеру 3, где при контакте с поверхностью горячего вальца 2 происходит сушка.

В дополнение к обозначениям, введенным ранее, примем, что расход греющего пара составляет  $G_{\text{гр.п}}$  кг/с, его энтальпия  $I_{\text{гр.п}}$  Дж/кг, температура конденсации  $T$  °С и энтальпия паров воды, испарившейся из материала,  $i_n$  Дж/кг.

<sup>1</sup> В уравнении не учтены потери тепла через кожух калорифера в окружающую среду, которые зависят от качества теплоизоляции кожуха и составляют 5–7 % от общего расхода тепла в калорифере.



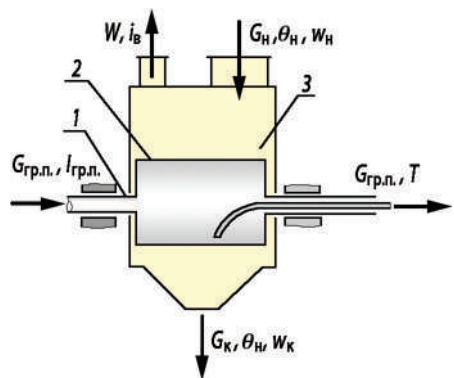


Рис. 14. Принципиальная схема контактной сушилки непрерывного действия:  
1 — полый вал, 2 — валец, 3 — сушильная камера

Рассмотрим статьи прихода и расхода тепла в сушилке:

Приход тепла:		Расход тепла:	
С греющим паром	$G_{гр.п} I_{гр.п}$	С конденсатом греющего пара	$G_{гр.п} c_v T$
С влажным материалом, в том числе:		С высушенным материалом	$G_K c_m \theta_K$
с сухим материалом	$G_K c_m \theta_N$	С испаренной из материала влажгой	$W i_{\pi}$
с влагой, испаряемой из материала	$W c_v \theta_N$	Потери тепла в окружающую среду	$Q_{пот}$

Тепловой баланс контактной сушилки:

$$G_{гр.п} I_{гр.п} + G_K c_m \theta_N + W c_v \theta_N = G_{гр.п} c_v T + G_K c_m \theta_K + W i_v + Q_{пот},$$

или

$$G_{гр.п} (I_{гр.п} - c_v T) = G_K c_m (\theta_K - \theta_N) + W (i_v - c_v \theta_N) + Q_{пот}. \tag{4.34}$$

Из последнего выражения может быть определен расход пара  $G_{гр.п}$ , тепло которого затрачивается на нагрев высушенного материала  $G_K c_m (\theta_K - \theta_N)$ , на испарение влаги  $W (i_v - c_v \theta_N)$  и на компенсацию потерь тепла в окружающую среду  $Q_{пот}$ .

В уравнении теплового баланса не учитывается конвективная составляющая контактной сушилки, поскольку зачастую испаренная влага вместе с холодным или подогретым воздухом удаляется вытяжным вентилятором и направляется в конденсатор для выделения влаги в виде конденсата перед сбросом отработанного воздуха в атмосферу.

# 5

## ВАРИАНТЫ ПРОЦЕССА СУШКИ

При определенном сочетании параметров сушильного агента ( $t$  и  $\varphi$ ) и скорости его движения относительно материала ( $v$ ) достигается тот или иной режим сушки в конвективной сушилке.

Чем выше температура сушки и скорость сушильного агента в сушильной камере, тем быстрее протекает процесс и тем меньшие габариты сушильной камеры требуются для сушки. Однако не все материалы выдерживают высокую температуру; существуют также ограничения по скорости воздуха в сушилке. Для сушки различных материалов требуются различные режимы сушки.

Поэтому в сушильной технике помимо основного сушильного варианта широко применяют другие варианты процесса сушки [5, 36, 80], которые рассмотрены ниже.

**Основной сушильный вариант.** В сушилке основного варианта, т. е. работающей по *основной схеме* (см. рис. 13), создаются жесткие условия сушки. Это объясняется тем, что все тепло, необходимое для испарения влаги из материала, подводится однократно (в наружном калорифере) и воздух нагревается сразу до относительно высокой температуры  $t_1$ , являющейся обычно предельно допустимой для высушиваемого материала. При превышении этой температуры возможно разложение материала или ухудшение его качества. При нагреве в калорифере влагосодержание воздуха остается неизменным и резко падает его относительная влажность. Поэтому сушка по основной схеме происходит при значительном перепаде температур  $t_1 - t_0$ , воздуха с малым влагосодержанием  $x$  и низким значением относительной влажности  $\varphi$ . Такие условия допустимы для сушки большинства минеральных материалов, таких как кварцевый песок, минеральные удобрения, пигменты и др., но недопустимы для сушки древесины, целлюлозы и некоторых органических материалов, которые требуют сушки в более мягких условиях — во влажном воздухе и при более низких температурах.

Рассмотрим изображение основного процесса сушки в теоретической сушилке (рис. 15). Для построения процесса сушки на  $I - x$  диаграмме должны быть известны два любых параметра наружного воздуха; обычно такими параметрами являются его температура  $t_0$  и относительная влажность  $\varphi_0$ . По пересечению линий  $t_0 = \text{const}$  и  $\varphi_0 = \text{const}$  находят точку  $A$ , характеризующую состояние воздуха перед калорифером. Из точки  $A$  проводят вертикаль до пересечения с изотермой  $t_1 = \text{const}$ , где  $t_1$  — температура воздуха после калорифера, которая должна быть задана.

Точка  $B$  характеризует состояние нагретого воздуха перед входом в сушильную камеру. Вертикальный отрезок  $AB$  изображает процесс нагрева воздуха в калорифере, протекающий при  $x_0 = x_1 = \text{const}$  ( $x_1$  — влагосодержание нагретого воздуха).

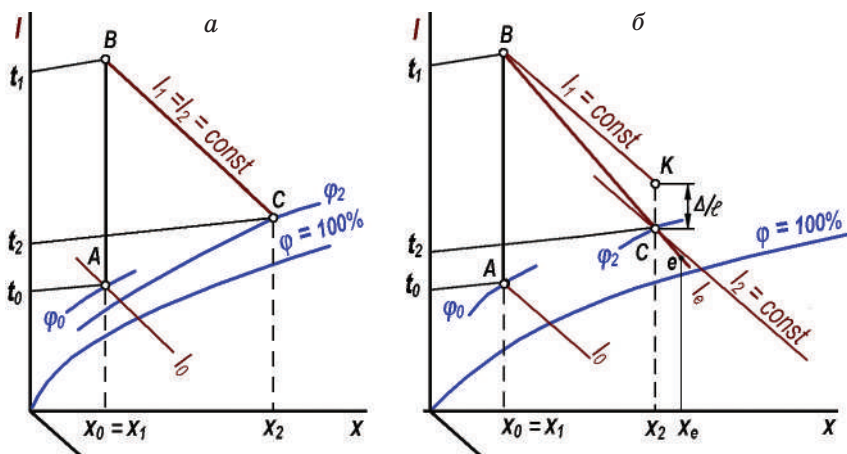


Рис. 15. Изображение процессов сушки на  $I - x$  диаграмме:  
 $a$  — теоретическая сушилка;  $b$  — действительная сушилка

Из точки  $B$  проводят линию  $I_1 = \text{const}$ , которой изображается процесс изменения состояния воздуха в теоретической сушилке (рис. 15,  $a$ ). Кроме значений  $t_0$ ,  $\varphi_0$  и  $t_1$  при расчете должен быть задан один из параметров отработанного воздуха<sup>1</sup> — обычно  $t_2$  или  $\varphi_2$ . Поэтому, продолжая линию  $I_1 = \text{const}$  до пересечения изотермой  $t_2 = \text{const}$  или линией  $\varphi_2 = \text{const}$ , получают точку  $C$ , выражающую состояние отработанного воздуха на выходе из сушилки. Отрезок  $BC$  ( $I_1 = I_2 = \text{const}$ ) изображает изменение характеристик воздуха в процессе сушки.

Ломаная линия  $ABC$  — графическое изображение всего процесса изменения состояния воздуха в теоретической сушилке (в калорифере и сушильной камере), работающей по *основной схеме*.

Завершив построение, для точек  $A$  и  $C$  находят на диаграмме значения  $x_0 = x_1$  и  $x_2$ , которые необходимы для расчета удельного расхода воздуха  $l$  по уравнению (4.10), и для точек  $B$  и  $A$  — значения  $I_1$  и  $I_0$ , с помощью которых по уравнению (4.13) определяют удельный расход тепла  $q_k$  в калорифере:

$$l = \frac{1}{(x_2 - x_0)}, \quad q_k = l(I_1 - I_0). \quad (5.1)$$

<sup>1</sup> Температура отработанных газов может быть рассчитана по кинетическим зависимостям, о чем будет сказано ниже.

Умножив величины  $l$  и  $q_k$  на  $W$ , находят расходы воздуха  $L$  и тепла  $Q_k$  на сушку:

$$Q_k = q_k \cdot W, L = l \cdot W. \quad (5.2)$$

Для изображения процесса в действительной сушилке (рис. 15, б) из точки  $A$ , характеризующей состояние воздуха перед калорифером, проводят вертикаль до пересечения с заданной изотермой  $t_1 = \text{const}$  — точка  $B$ . В уравнении (4.18а) координаты конечной точки  $(x_2, I_2)$  можно заменить на текущие координаты  $(x, I)$  для некоторой произвольно выбранной точки  $e$ , лежащей на прямой линии процесса в сушильной камере действительной сушилки. Тогда

$$\frac{I - I_1}{x - x_1} = \Delta. \quad (5.3)$$

В уравнении (5.3) неизвестными являются лишь величины  $I$  и  $x$ . Задаваясь любым значением  $x_e$  (или  $I_e$ ), по уравнению (5.3) можно вычислить значение величины  $I_e$  (или  $x_e$ ) и таким образом найти координаты точки  $e$  ( $x_e, I_e$ ). Соединяя точки  $e$  и  $B$  и продолжая отрезок  $eB$  до пересечения с заданным параметром отработанного воздуха (например, с линией  $\varphi_2 = \text{const}$ ), находят точку  $C$ , выражающую состояние отработанного воздуха. Для этой точки находят величину  $x_2$ , которая необходима для определения удельного расхода воздуха по уравнению (5.1).

При известных параметрах наружного воздуха (обычно  $t_0$  и  $\varphi_0$ ) расчет возможен и в том случае, если температура нагрева воздуха  $t_1$  не задана в явном виде, а известны какие-либо два параметра отработанного воздуха (например,  $t_2$  и  $\varphi_2$ ). В этом случае построение процесса начинают от заданной точки  $C$ .

Для теоретической сушилки (см. рис. 15, а) из заданной точки  $C$  проводят линию  $I_1 = I_2 = I = \text{const}$  до пересечения с вертикалью  $x_0 = \text{const}$  в точке  $B$ , через которую проходит искомая изотерма  $t_1 = \text{const}$ .

Построение процесса для действительной сушилки также начинают от заданной точки  $C$ , от которой откладывают вверх (в масштабе энтальпий) отрезок  $CK = \Delta/l = \Delta(x_2 - x_0)$  (рис. 15 б) и через полученную точку  $K$  проводят линию  $I = \text{const}$  до пересечения с линией  $x_0 = \text{const}$  в точке  $B$ . Через эту точку будет проходить искомая изотерма  $t_1 = \text{const}$ . Точку  $B$ , характеризующую состояние воздуха при поступлении в сушильную камеру, соединяют с точкой  $C$ . Линия  $ABC$  изображает процесс в действительной сушилке при  $\Delta < 0$ , когда изменение состояния воздуха в сушильной камере происходит с понижением энтальпии ( $I_1 > I_2$ ).

Удельные расходы сухого воздуха  $l$  и тепла на калорифер  $q_k$  определяют так же, как это указывалось выше.

**Сушка с частичным подогревом воздуха в сушильной камере.** В этом процессе (рис. 16, а) во внешнем калорифере воздуху сообщается лишь часть тепла, а другая часть передается с помощью дополнительного калорифера, установленного в сушильной камере.

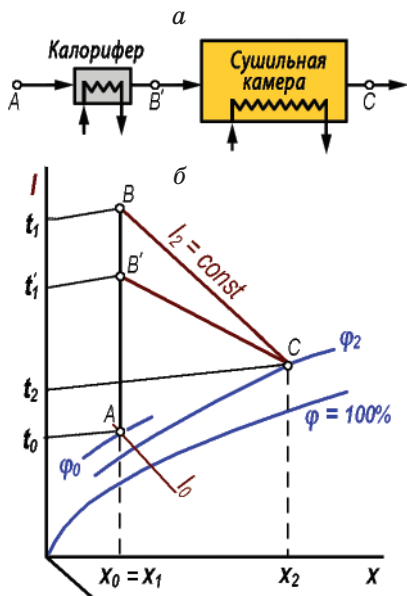


Рис. 16. Сушилка с частичным подогревом воздуха в сушильной камере: а — принципиальная схема; б — изображение на диаграмме

Если бы все тепло, необходимое для сушки, подводилось только во внешнем калорифере, то процесс протекал бы по линии ABC и начальная температура в сушильной камере была бы недопустимо высокой для данного вида материала. При установке дополнительного калорифера непосредственно в сушильной камере изменение свойств воздуха в сушильной камере изображается линией B'C. Весь процесс в сушилке представлен на диаграмме ломаной AB'C. Из диаграммы видно, что воздух нагревается во внешнем калорифере до более низкой температуры  $t'_1$ , допускаемой свойствами материала (вертикаль AB').

Общее количество тепла на нагрев воздуха складывается в данном случае из тепла, подводимого в основном (внешнем) калорифере  $q_k$ , и тепла, подводимого в дополнительном калорифере  $q_d$ :

$$q_k + q_d = \frac{I_1 - I_0}{x_2 - x_0} + \frac{I_2 - I_1}{x_2 - x_0} = \frac{I_2 - I_0}{x_2 - x_0}. \quad (5.4)$$

При данном суммарном удельном расходе тепла ( $q_k + q_d$ ) отношение между значениями  $q_k$  и  $q_d$  может меняться, что будет соответствовать перемещению точки B' между точками A и B по линии  $x_0 = x_1 = \text{const}$ . Однако, как видно из выражения (5.4) и рис. 16, общие расходы воздуха и тепла в сушилке будут те же, что и в сушилке основной схемы, работающей при тех же начальных и конечных параметрах воздуха (ломаная ABC). Эти расходы составляют соответственно

$$L = \frac{W}{x_2 - x_0} \text{ и } Q = W \cdot \frac{I_2 - I_0}{x_2 - x_0}. \quad (5.5)$$

Достоинство описанного варианта сушки состоит в том, что в камеру сушилки подводится воздух, нагретый до более низкой температуры,

чем по основной схеме сушки. Это позволяет проводить процесс при перепаде температур  $t'_1 - t_2$  — меньшем, чем в сушилке основной схемы, где указанный перепад был бы равен  $t_1 - t_2$ , так что потребовалось бы нагреть воздух во внешнем калорифере до температуры  $t_1$  (точка  $B$ ), превышающей допустимую температуру для данного материала ( $t'_1$ ).

Для действительной сушилки линия изменения энтальпии пойдет не так полого, как в теоретической. Построение процесса сушки для действительной сушилки на  $I-x$  диаграмме выполняют аналогично способу, описанному для сушилки, работающей по основной схеме (см. рис. 15, б).

**Сушка с промежуточным подогревом воздуха по зонам.** Сушилка, работающая по этой схеме (рис. 17), состоит из ряда зон, в каждой из которых установлен дополнительный калорифер (на рисунке для простоты показаны только две зоны). Такой многократный, или ступенчатый, подогрев воздуха в сушильной камере позволяет не только вести сушку в мягких условиях, при небольшом перепаде температур в камере, но и обеспечивает более гибкие условия сушки.

Воздух, нагретый во внешнем калорифере, проходит зону  $I$ , где извлекает из материала часть влаги и несколько охлаждается, после чего поступает в зону  $II$ , на входе в которую нагревается в калорифере  $K_1$ , сушит материал, после чего вновь подогревается в калорифере  $K_2$ , затем поступает в следующую зону и т. д.

Таким образом, воздух проходит последовательно все зоны, в каждой из которых осуществляется процесс сушки по основной схеме. Поэтому изменение состояния воздуха носит ступенчатый характер и изображается на диаграмме  $I-x$  ломаной линией  $AB'C'B''C''B'''C$  (для теоретической сушилки).

Согласно схеме (см. рис. 17), отработанный воздух каждой предыдущей ступени является исходным для последующей и нагревается в ней при  $x = \text{const}$ . Следовательно,  $x_0 = x'_0 = x'_1$ ;  $x'_2 = x''_0 = x''_1$ ,  $x''_2 = x'''_0 = x'''_1$ , причем нижние индексы относятся соответственно к исходному, нагретому и отработанному воздуху, а верхние индексы указывают порядковый номер зоны.

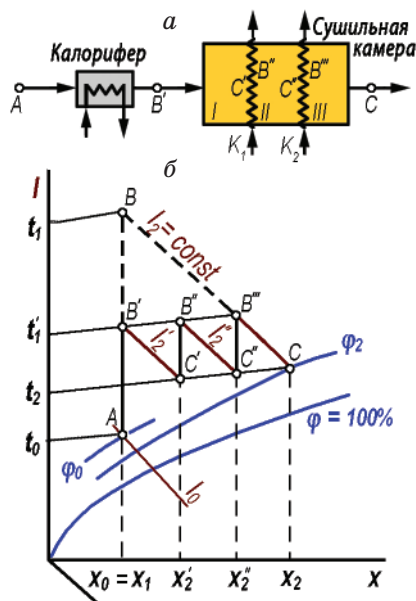


Рис 17. Сушилка с промежуточным подогревом воздуха по зонам:

$a$  — принципиальная схема;  $b$  — изображение на диаграмме



Вместе с тем расход абсолютно сухого воздуха одинаков для всех зон и равен его расходу для всей сушилки.

Таким образом, влагосодержание воздуха увеличивается от зоны к зоне; при этом перепад влагосодержаний в каждой зоне пропорционален относительному количеству испаренной в ней влаги. Расход сушильного агента в каждой зоне:

$$l'W' = l''W'' = l'''W''' = L = \frac{W}{x_2 - x_0}, \quad (5.6)$$

или

$$\frac{W'}{x'_2 - x_0} = \frac{W''}{x''_2 - x'_2} = \frac{W'''}{x_2 - x''_2} = \frac{W}{x_2 - x_0}, \quad (5.7)$$

откуда

$$x'_2 - x_0 = (x_2 - x_0) \cdot \frac{W'}{W}; \quad (5.8)$$

$$x''_2 - x'_2 = (x_2 - x_0) \cdot \frac{W''}{W}; \quad (5.9)$$

$$x_2 - x''_2 = (x_2 - x_0) \cdot \frac{W'''}{W}. \quad (5.10)$$

Суммарный удельный расход тепла во всех зонах:

$$q = l(I'_2 - I_0) + (I''_2 - I') + (I_2 - I'') = l \cdot (I_2 - I_0). \quad (5.11)$$

Общий расход тепла в сушилке:

$$Q = L \cdot (I_2 - I_0) = \frac{(I_2 - I_0)}{(x_2 - x_0)} \cdot W. \quad (5.12)$$

Следовательно, общий расход воздуха и тепла в данном случае тот же, что и в сушилке основной схемы, работающей при тех же начальных (точка А) и конечных (точка С) параметрах воздуха. Однако, как видно из рис. 17, температура нагрева воздуха в рассматриваемом варианте значительно ниже, чем в сушилке основной схемы ( $t'_1 < t_1$ ).

Действительную сушилку, работающую по этому варианту, рассчитывают последовательно от зоны к зоне, производя построение процесса для каждой зоны так же, как для сушилки основной схемы (с однократным использованием воздуха).

Для каждой зоны, в соответствии с количеством испаренной в ней влаги ( $W, W'', \dots$  и т. д.), определяют значение  $\Delta$  ( $\Delta', \Delta'', \dots$  и т. д.), причем  $\Delta$  для различных зон могут иметь как положительные, так и отрицательные значения. При расчете задаются двумя параметрами отработанного воздуха на выходе из сушилки (обычно  $t_2$  и  $\varphi_2$ ) и двумя параметрами

( $t$  и  $\varphi$ ) нагретого или отработанного воздуха для каждой зоны, которые должны соответствовать намеченному режиму сушки по зонам.

На диаграмме  $I-x$  (рис. 18) сначала строят процесс в теоретической сушилке, работающей при тех же начальном и конечном параметрах воздуха, т. е. по точкам  $A(x_0, \varphi_0)$  и  $C(t_2, \varphi_2)$ , и получают ломаную  $ABC$ . Отрезок на оси абсцисс диаграммы, отвечающий  $(x_2 - x_0)$  делят на части, пропорциональные количествам испаренной по зонам влаги  $W', W'', W''', \dots$  и получают точки, характеризующие влагосодержание отработанного воздуха по зонам  $(x_2', x_2'', \dots)$ . Из этих точек проводят линии  $x = \text{const}$ , ограничивающие пределы изменения состояния воздуха в каждой зоне. Дальнейшее построение осуществляют последовательно для всех зон начиная с первой, как для сушилок основной схемы (см. рис. 15, б).

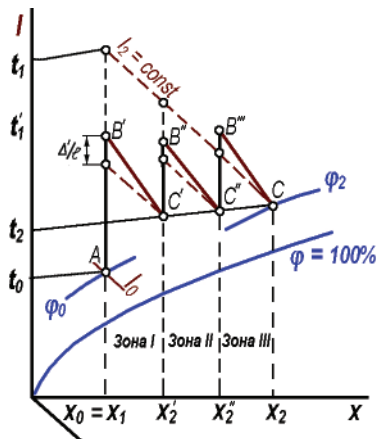


Рис. 18. Изображение процесса реальной сушки с промежуточным подогревом воздуха по зонам

**Сушка с частичной рециркуляцией отработанного воздуха.** При сушке по этой схеме (рис. 19) часть отработанного воздуха возвращается и смешивается перед наружным калорифером со свежим воздухом. В некоторых схемах смешение отработанного воздуха со свежим воздухом может происходить после наружного калорифера.

Параметры смеси, получаемой при смешении  $L_0$  кг/с свежего и  $L_2$  кг/с отработанного воздуха (в пересчете на абсолютно сухой воздух) с различными параметрами ( $x_0, I_0$  и  $x_2, I_2$ ), можно определить, пользуясь правилом аддитивности:

$$x_{\text{см}} = \frac{L_0 x_0 + L_2 x_2}{L_0 + L_2}; \quad (5.13)$$

$$I_{\text{см}} = \frac{L_0 I_0 + L_2 I_2}{L_0 + L_2}. \quad (5.14)$$

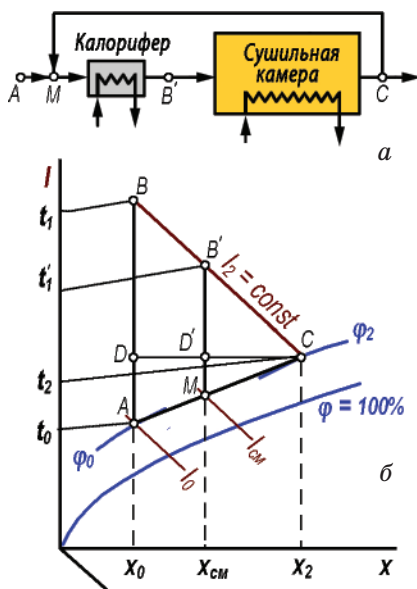


Рис. 19. Сушилка с частичной рециркуляцией отработанного воздуха:

$a$  — принципиальная схема;  $b$  — изображение теоретического процесса на диаграмме

Разделив все члены правой части полученных уравнений на  $L_0$  и обозначив отношение  $L_2 / L_0 = n$  (кратность смешения), находим:

$$x_{\text{см}} = \frac{x_0 + nx_2}{1 + n}; \quad (5.15)$$

$$I_{\text{см}} = \frac{I_0 + nI_2}{1 + n}. \quad (5.16)$$

Решая уравнения (5.15), (5.16) относительно  $n$  и приравнявая полученные выражения, найдем уравнение связи между параметрами компонентов и смеси:

$$\frac{x_{\text{см}} - x_0}{x_2 - x_{\text{см}}} = \frac{I_{\text{см}} - I_0}{I_2 - I_{\text{см}}}. \quad (5.17)$$

Уравнение (5.17) изобразится на диаграмме  $I$ – $x$  прямой, проходящей через точки, характеризующие состояние компонентов смеси (свежего и отработанного воздуха). Точка  $M$ , отвечающая составу смеси, делит эту прямую на отрезки, находящиеся в отношении  $L_2 / L_0 = n$ . В соответствии с этим построение процесса на  $I$ – $x$  диаграмме для теоретической сушилки с частичной рециркуляцией воздуха (см. рис. 19) проводят следующим образом. Пусть заданы составы свежего воздуха (точка  $A$ ), отработанного воздуха (точка  $C$ ), а также кратность смешения  $n$ . Соединяя точки  $A$  и  $C$  прямой, находят положение точки  $M$ , которая делит прямую  $AC$  в отношении  $AM/MC = L_2 / L_0 = n$ . Из точки  $M$  проводят линию  $x_{\text{см}} = \text{const}$  до пересечения с линией  $I_2 = I_1 = \text{const}$ , проводимой из точки  $C$ . Точка пересечения  $B'$  характеризует состав воздуха на входе в сушильную камеру, а изотерма  $t'_1$ , проходящая через точку  $B'$  — температуру нагрева этого воздуха (смеси свежего и рециркулирующего воздуха).

Если же заданы составы свежего и отработанного воздуха (точки  $A$  и  $C$ ) и допустимая температура нагрева смеси свежего и рециркулирующего воздуха  $t'_1$ , то положение точки  $B'$  находят по пересечению линии  $I_2 = I_1 = \text{const}$ , проведенной из точки  $C$ , с заданной изотермой  $t'_1 = \text{const}$ . Опуская из точки  $B_1$  вертикаль до пересечения с прямой  $AC$ , находят положение точки  $M$ , характеризующей параметры смеси свежего и рециркулирующего воздуха ( $t_{\text{см}}$ ,  $x_{\text{см}}$ ,  $\varphi_{\text{см}}$ ).

Отрезок  $AM$  изображает процесс смешения свежего и отработанного воздуха, отрезок  $MB'$  — нагрев смешанного воздуха в наружном калорифере, а линия  $B'C$  — изменение состояния воздуха в сушильной камере. Таким образом, весь процесс в целом изображается ломаной  $AMB'C$ .

Построение процесса в действительной сушилке производится после построения его в теоретической сушилке (работающей в тех же пределах изменения состояния воздуха) так же, как было описано выше для основной схемы.

Из  $I$ - $x$  диаграммы (см. рис. 19) видно, что удельный расход свежего воздуха составляет (кг сухого воздуха на 1 кг влаги):

$$l_{\text{св}} = \frac{1}{x_2 - x_0} \quad (5.18)$$

Следовательно, расход свежего воздуха в пересчете на сухой воздух будет одинаков для данной сушилки и сушилки основной схемы, работающей при тех же значениях  $t_0$ ,  $\phi_0$ , и  $t_2$ ,  $\phi_2$ , процесс в которой изображается ломаной  $ABC$  на рис. 15,  $a$ .

Удельный расход смеси свежего и рециркулирующего воздуха составит (кг сухого воздуха на 1 кг влаги):

$$l_{\text{см}} = \frac{1}{x_2 - x_{\text{см}}} \quad (5.19)$$

Удельный расход тепла на калорифер:

$$q_{\text{к}} = l_{\text{см}} (I_1 - I_{\text{см}}) = \frac{I_1 - I_{\text{см}}}{x_2 - x_{\text{см}}} \quad (5.20)$$

Как видно на рис. 19, из подобия треугольников  $MB'C$  и  $ABC$  вытекает, что  $MB'/CD' = AB/CD$ , т. е. расходы тепла в данной сушилке и сушилке основной схемы (при тех же пределах изменения состояния воздуха) будут одинаковы.

При сушке с частичной рециркуляцией воздуха материал сушится при более низких температурах, чем в сушилке основной схемы ( $t'_1 < t_1$ ). Вместе с тем сушка происходит в среде более влажного воздуха, так как влагосодержание смеси  $x_{\text{см}}$  больше влагосодержания свежего воздуха  $x_0$ . Такой режим сушки желателен для материалов, которые при неравномерной сушке воздухом с низкой влажностью при высоких температурах могут подвергнуться разрушению (как например керамические изделия). Воздух с высоким влагосодержанием  $x_{\text{см}}$  получается по этой схеме без затрат пара на его искусственное увлажнение. При добавлении части отработанного воздуха к свежему воздуху увеличивается объем циркулирующего воздуха, а следовательно, и скорость его движения через сушилку, что способствует более интенсивному тепло- и влагообмену.

Надо иметь в виду, что для сушилки с рециркуляцией требуется больший расход энергии на вентилятор и большие капитальные затраты, чем для сушилки основной схемы. В связи с этим выбор кратности циркуляции воздуха следует производить на основе технико-экономического расчета.

Разновидностью сушилок с рециркуляцией являются так называемые конденсационные сушилки с замкнутой циркуляцией сушильного агента. Из такой сушилки весь отработанный воздух (или газ) направляется в конденсатор, где охлаждается и теряет часть влаги; при этом

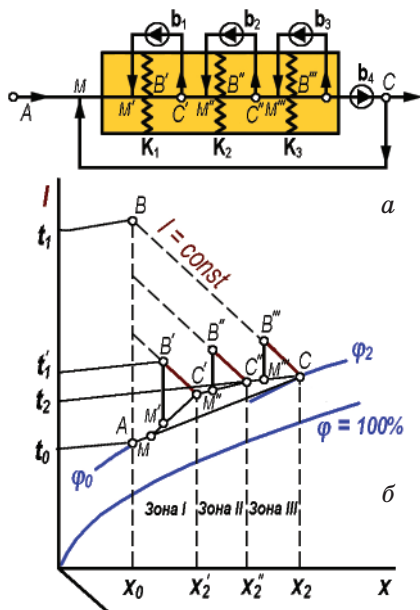


Рис. 20. Сушилка с промежуточным подогревом и рециркуляцией воздуха по зонам:

а — принципиальная схема; б — изображение теоретического процесса на диаграмме

высокие требования к равномерности сушки во влажном воздухе при относительно низких температурах. В сушилке, работающей по такой схеме (рис. 20), частичная рециркуляция воздуха осуществляется вентиляторами ( $b_1$ ,  $b_2$  и  $b_3$ ), входящими в зоны сушилки, а также вытяжным вентилятором  $b_4$ .

Перед сушилкой свежий воздух (характеризуемый точкой А на диаграмме  $I-x$ ) смешивается с частью конечного отработанного воздуха, состояние которого определяется точкой С. Этой смеси соответствует точка М. Полученная смесь в свою очередь смешивается с отработанным воздухом первой зоны, параметры которого характеризуются точкой С'. Новая смесь, имеющая состав, отвечающий точке М', подается вентилятором  $b_1$  зоны I в калорифер  $K_1$  и нагревается в нем (точка В'). Далее смесь поглощает влагу из материала в зоне I, при этом ее состояние изменяется по линии В'С' (для простоты на диаграмме изображен процесс в трехзонной теоретической сушилке).

Состав отработанного воздуха первой зоны характеризуется точкой С', а весь цикл изменения состояния воздуха в этой зоне — замкнутой ломаной ММ'В'С'. Часть отработанного воздуха зоны циркулирует в первой зоне, а другая часть поступает в следующую зону II. Здесь отработанный воздух первой зоны (точка С') смешивается с частью

его влагосодержания снижается до исходного влагосодержания ( $x_0 = x_1$ ). После конденсатора воздух нагревается в наружном калорифере до температуры  $t_1$ . Эти сушилки требуют больших расходов тепла, капитальных и эксплуатационных расходов, чем сушилки с частичной рециркуляцией.

В химической промышленности конденсационные сушилки используют при необходимости производить сушку в чистом, не содержащем пыли воздухе, а также при удалении из воздуха паров неводных растворителей. В последнем случае на линии рециркуляции воздуха вместо конденсатора могут быть установлены абсорберы с различными поглотителями.

**Сушка с промежуточным подогревом и рециркуляцией воздуха по зонам.** Этот вариант сушильного процесса совмещает достоинства обоих вариантов, из которых он состоит, и применяется в тех случаях, когда предъявляются

отработанного воздуха второй зоны (точка  $C''$ ), смесь направляется в калорифер  $K_2$ , после чего поглощает влагу из материала в зоне II. Процессы изменения состояния воздуха в зоне II ( $C'M''B''C''$ ) и зоне III ( $C''M'''B'''C$ ) протекают аналогично, причем в каждой зоне осуществляется многократная циркуляция воздуха.

Из диаграммы  $I-x$  видно, что построение процесса в каждой зоне производится как для сушилki с частичной рециркуляцией, а процесс в целом строится как для сушилki с промежуточным подогревом воздуха по зонам. Высокая степень равномерности сушки достигается в этих условиях за счет большего расхода энергии, чем в сушилках с промежуточным нагревом воздуха.

**Сушка с рекуперацией тепла отходящих газов.** Температура отходящих газов после сушильной камеры составляет, в зависимости от условий проведения процесса сушки, 90–140 °С. Температура отходящих газов должна быть на 20–30 °С выше температуры точки росы, иначе произойдет конденсация влаги и коррозия газоходов<sup>1</sup>.

Установка рекуперативного теплообменника после сушильной камеры целесообразна, если температура отходящих газов существенно выше температуры точки росы. На рис. 21 представлена схема сушки с рекуперацией тепла отходящих газов. Отработанный влажный воздух (или дымовые газы) после сушильной камеры направляются в рекуперативный теплообменник, где происходит нагрев холодного атмосферного воздуха до температуры  $t_0'$ , а отходящие газы охлаждаются до температуры  $t_2'$ , но не ниже температуры точки росы.

Такой способ позволяет сэкономить часть тепла на сушку. В соответствии с диаграммой рис. 21, при отсутствии потерь тепла в рекуперативном теплообменнике можно записать:

$$q_p = \frac{I_0 - I_0'}{x_2 - x_0} = \frac{I_2 - I_2'}{x_2 - x_0}. \quad (5.21)$$

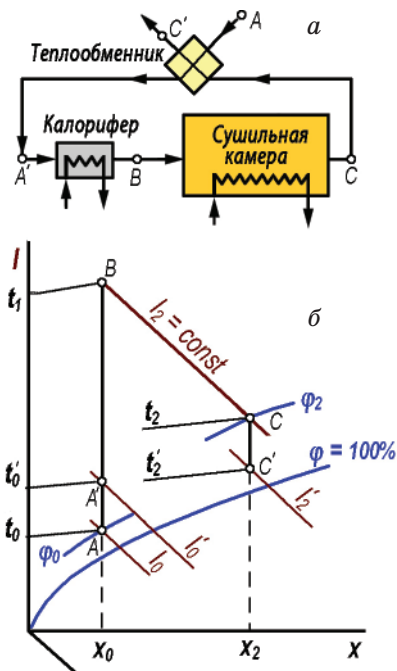


Рис. 21. Сушилка с рекуперацией тепла отходящих газов:

$a$  — принципиальная схема;  $b$  — изображение теоретического процесса на диаграмме

<sup>1</sup> Для предотвращения выпадения влаги из отработанного влажного воздуха газоходы теплоизолируют слоем минеральной ваты толщиной 20–50 мм.



Энтальпию и температуру и отходящих  $I'_2, t'_2$  газов можно рассчитать из уравнений теплопередачи и теплового баланса теплообменника, принимая во внимание, что расход отходящих газов определяется уравнением (4.10):

$$l = \frac{L}{W} = \frac{1}{x_2 - x_0}.$$

Использование в схеме сушки рекуперативного теплообменника позволяет сэкономить до 10 % тепла на сушку. Однако этот способ неприемлем для материалов склонных к пылению, которые загрязняют внутреннюю поверхность теплообменника и резко снижают эффективность его работы.

Кроме перечисленных, возможны и другие варианты сушки, полученные комбинированием в одной схеме простых вариантов, описанных выше. Такие схемы позволяют обеспечить наиболее благоприятные с технологической точки зрения и экономичные режимы сушки.

**Сушка топочными газами.** Сушка топочными газами применяется для сушки не только неорганических, но и органических материалов. Это объясняется в первую очередь тем, что температура топочных газов значительно выше температуры воздуха, нагреваемого перед сушкой в паровых калориферах и электрокалориферах. В результате влагопоглощающая способность газов во много раз больше влагопоглощающей способности воздуха и соответственно больше потенциал сушки. Кроме того, сушка топочными газами существенно дешевле, чем греющим паром или с использованием электрокалориферов.

В качестве сушильного агента применяют либо газы, полученные сжиганием в топках твердого, жидкого или газообразного топлива, либо отработанные газы котельных, промышленных печей или других установок. Используемые для сушки газы должны быть продуктами полного сгорания топлива и не должны содержать золы и сажи, загрязняющих высушиваемый материал в условиях конвективной сушки. С этой целью газы могут подвергаться сухой или мокрой очистке перед поступлением их в сушилку. Если температура топочных газов превышает предельно допустимую температуру для высушиваемого материала, их разбавляют воздухом для получения сушильного агента требуемой температуры.

Для расчета газовых сушилок необходимо знать параметры топочных газов, прежде всего их влагосодержание  $x$  и энтальпию  $I$ . Влагосодержание топочных газов  $x_r$  (кг/кг сухих газов) определяется отношением количества водяного пара  $G_n$  к количеству сухих газов  $G_{с.г.}$ , получаемых при сжигании 1 кг топлива:

$$x_r = \frac{G_n}{G_{с.г.}}. \quad (5.22)$$

Значения  $G_{\text{п}}$  и  $G_{\text{с.г}}$  рассчитываются по формулам для процесса сжигания топлива в зависимости от вида последнего.

Энтальпия топочных газов  $I_{\text{г}}$  зависит главным образом от высшей теплотворной способности топлива  $Q_{\text{в}}^{\text{p}}$  и коэффициента избытка воздуха в топке  $\alpha$ :

$$I_{\text{г}} = \frac{Q_{\text{в}}^{\text{p}} \eta_{\text{т}} + c_{\text{т}} t_{\text{т}} + \alpha L_0 I_0 + W_{\text{п}} i_{\text{п}}}{G_{\text{с.г}}}, \quad (5.23)$$

где  $\eta_{\text{т}}$  — к. п. д. топки;  $c_{\text{т}}$  — средняя удельная теплоемкость топлива;  $L_0$  — теоретическое количество абсолютно сухого воздуха, необходимого для сжигания 1 кг топлива, определяемое по элементарному составу топлива;  $I_0$  — энтальпия наружного воздуха;  $W_{\text{п}}$ ,  $i_{\text{п}}$  — количество водяного пара, используемого в топке для дутья или распыления (или содержащегося в газообразном топливе), и энтальпия этого пара соответственно.

Тепло 1 кг топлива ( $c_{\text{т}} t_{\text{т}}$ ) и тепло, вносимое в топку с паром ( $W_{\text{п}} i_{\text{п}}$ ), относительно мало влияют на величину  $I_{\text{г}}$ .

При обычных для сушки значениях коэффициентов избытка воздуха в топке  $\alpha \geq 3-5$ , плотности и теплоемкости топочных газов и воздуха очень близки. Поэтому при графоаналитическом расчете газовых сушилок можно пользоваться  $I - x$  диаграммой для влажного воздуха, построенной для более высоких температур (см. рис. 7, с. 26).

Для сушки топочными газами применяются главным образом сушилки, работающие по основной схеме, а также сушилки с частичной рециркуляцией газов. Построение процесса в сушилке основной схемы показано на рис. 22.

После определения влагосодержания  $x_{\text{г}}$  и энтальпии топочных газов  $I_{\text{г}}$  по уравнениям (5.22) и (5.23), исходя из принятых значений  $\alpha$  и к.п.д. топки, находят по диаграмме положение точки  $D$ , характеризующей состояние газов на выходе из топки. Соединяя прямой точку  $D$  с точкой  $A$ , выражающей состояние наружного воздуха, определяют, в зависимости от принятого соотношения количеств газов и воздуха (см. уравнение (5.15), положение точки  $B'$  на прямой  $AD$ . Эта точка характеризует

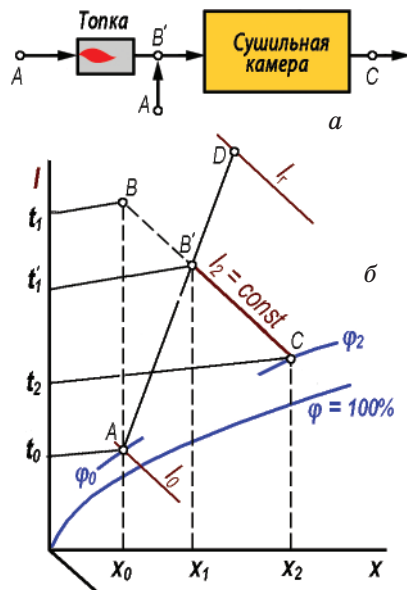


Рис. 22. Сушка топочными газами (основной вариант процесса сушки): а — принципиальная схема; б — изображение теоретического процесса на диаграмме

состояние смеси топочных газов и воздуха, т. е. сушильного агента, перед входом в сушилку; наклонная прямая  $AB'$  изображает процесс смешения газов с воздухом. Наклон прямой  $AB'$  тем меньше, чем больше влажность топлива и чем меньше его теплотворная способность. Дальнейшее построение процесса проводят так же, как для теоретической или действительной воздушной сушилки.

Удельный расход смеси топочных газов с воздухом определяется по уравнению

$$l_{\text{см}} = \frac{1}{x_2 - x_1}.$$

Расход топлива на сушку

$$G_{\text{т}} = \frac{l_{\text{см}} W}{G_{\text{с.г}}}, \quad (5.24)$$

где  $W$  — масса испаряемой из материала влаги, кг/с.

Увеличение влагосодержания смеси топочных газов и воздуха по сравнению с влагосодержанием наружного воздуха, равное  $x_1 - x_0$ , обусловлено испарением влаги, содержащейся в топливе, а также образованием воды при окислении углеводородов топлива (особенно при сжигании в топке газообразного топлива). Таким образом, увеличение влагосодержания смеси происходит вне камеры сушилки. Состояние газов без учета тепла испарения влаги и окисления некоторых компонентов топлива в топке изобразится на диаграмме вертикальной линией  $AB$  (рис. 22, б) лежащей на пересечении линий  $t_1 = \text{const}$  и  $x_0 = \text{const}$ . Соответственно, расход тепла на 1 кг испаренной влаги без учета тепла, затрачиваемого на испарение всей влаги топлива при его сжигании, а также без учета потерь тепла топкой, определяется следующим образом:

$$q_1 = l_{\text{см}} \cdot (I_1 - I_0) = \frac{(I_1 - I_0)}{x_2 - x_1}. \quad (5.25)$$

Сравнивая значение  $q_1$  с удельным расходом тепла  $q_{\text{к}}$  в воздушной сушилке, работающей при одинаковых начальных и конечных параметрах сушильного агента (линия  $ABC$  на рис 22, б и уравнение (5.1)), можно установить, что удельный расход тепла на 1 кг испаренной влаги больше в газовых сушилках, чем в воздушных ( $q_1 > q_{\text{к}}$ ). Однако критерием сравнения указанных сушилок должен быть не удельный расход тепла, а расход и стоимость топлива на 1 кг испаренной влаги, который ниже для сушилок, работающих на топочных газах (см. табл. 1-1 на с. 10). Экономия топлива, как и меньшие капитальные затраты (в связи с отсутствием воздухонагревательных устройств), также относятся к числу преимуществ сушки топочными газами перед с сушкой горячим воздухом.

# 6

## КИНЕТИКА ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ СУШКИ

Большинство влажных материалов, подвергаемых сушке, представляют собой капиллярно-пористые тела, состоящие из разветвленной системы микро- и макрокапилляров, заполненных водой. Исключения составляют лишь кристаллические вещества, однако и они содержат в своей кристаллической решетке дефекты, заполненные водой.

Удаление влаги из материала в процессе сушки происходит за счет подвода тепла к материалу, которое необходимо для испарения влаги. Поэтому сушку часто называют термической сушкой. Термическая сушка является одновременно массообменным и теплообменным процессом.

Скорость сушки определяется уменьшением влажности материала  $dw^c$  за некоторый бесконечно малый промежуток времени  $d\tau$ , т. е. выражается отношением

$$\frac{dw^c}{d\tau}. \quad (6.1)$$

Влажность материала  $w^c$  обычно выражается в %, хотя по смыслу она должна выражаться в кг/кг (кг влаги на кг сухого материала). Поэтому скорость сушки выражается в  $\text{с}^{-1}$ ,  $\text{мин}^{-1}$  или  $\text{ч}^{-1}$  в зависимости от того, в каких единицах измеряется время сушки.

Влажность материала  $w^c$  — это усредненная по всей массе концентрация влаги в материале. На самом деле влага в материале распределена неравномерно, особенно во время сушки. Поэтому следует различать среднюю влажность материала  $w^c$  и локальную (местную) влажность  $u$  в определенной точке влажного материала. Локальная влажность определяется как количество влаги, отнесенной к малому объему влажного материала. В этом случае влажность  $u$  соответствует понятию концентрации воды в материале,  $\text{кг}/\text{м}^3$ . Связь средней влажности и локальной влажности определится уравнением

$$w^c = \frac{1}{V\rho_c} \int_V u dV, \quad (6.2)$$

где  $V$  — объем, а  $\rho_c$  — плотность абсолютно сухого материала. Тогда скорость сушки определится выражением

$$\frac{dw^c}{d\tau} = \frac{1}{V\rho_c} \int_V \frac{du}{d\tau} dV. \quad (6.1a)$$

Скорость сушки определяется как внутренними факторами (свойствами материала, характером его пористой структуры), так и внешними параметрами сушильного агента (температурой, влагосодержанием, скоростью и др.).

### 6.1. МЕХАНИЗМ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ПРОЦЕССЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ СУШКИ ВЛАЖНОГО МАТЕРИАЛА

Термическая сушка представляет собой весьма сложный процесс совместного переноса массы и теплоты внутри и вне капиллярно-пористых материалов, сопровождающийся фазовым переходом влаги из жидкого и адсорбированного состояния внутри влажного материала в паровую фазу. Схема тепломассопередачи в системе «сушильный агент — влажный материал» для конвективной термической<sup>1</sup> сушки представлена на рис. 23.

Теплота, необходимая для испарения влаги, при конвективной сушке передается вначале от потока горячего сушильного агента к наружной поверхности материала. Поток тепла  $q$  от сушильного агента к поверхности влажного материала описывается обычным уравнением теплоотдачи:

$$q = \alpha \cdot (t - t_{\pi}), \quad (6.3)$$

где  $t$  и  $t_{\pi}$  — температура сушильного агента (воздуха) в потоке и у поверхности влажного материала, °С или К;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К), который рассчитывается по известным критериальным уравнениям (см. ниже).

Для теплообмена, осложненного испарением влаги с поверхности, реальный коэффициент теплоотдачи обычно на 20–40 % выше, чем коэффициент теплоотдачи для сухого материала за счет возмущения пограничного слоя потоком испаренной влаги. Величину, обратную коэффициенту теплоотдачи

$$r_T = 1 / \alpha, \quad (6.3a)$$

называют термическим сопротивлением, а разность температур

$$\Delta t = (t - t_{\pi}) \quad (6.3b)$$

называют движущей силой процесса теплопереноса (теплоотдачи).

---

<sup>1</sup> В дальнейшем мы будем опускать слово «термической» подразумевая, что процесс конвективной сушки происходит за счет подвода тепла сушильным агентом.

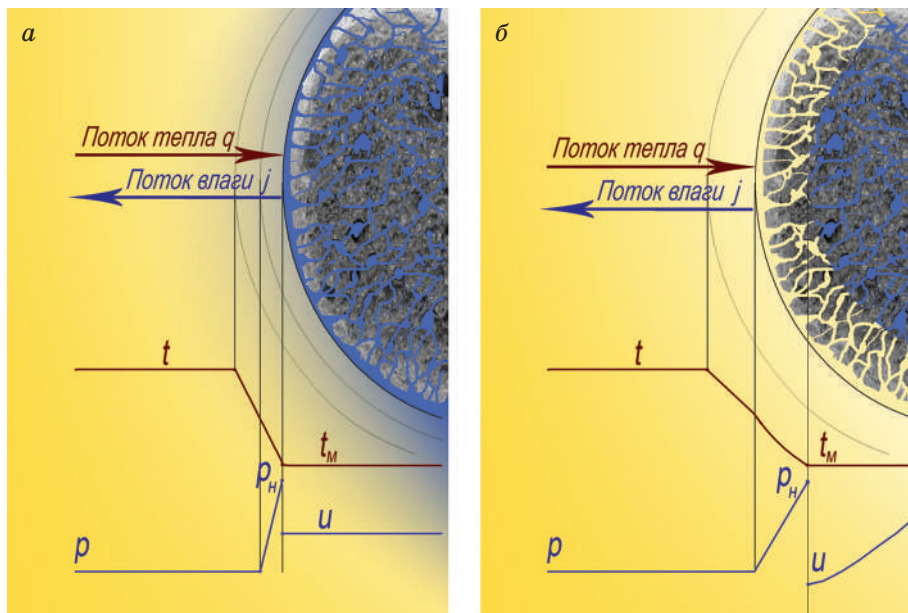


Рис. 23. Схема процесса термической сушки в первом (а) и во втором (б) периоде

Если поверхность материала смочена, то испарение влаги происходит с поверхности материала, а поток тепла внутрь материала уменьшается на количество теплоты, затраченной на испарение. Обычно почти все тепло уходит на испарение влаги, а поток тепла внутрь материала незначителен; при этом температура поверхности смоченного материала устанавливается равной температуре мокрого термометра  $t_m$ .

Если поверхность материала уже высохла (рис. 23, б), теплота переносится далее внутрь капиллярно-пористого материала за счет двух элементарных механизмов: теплопроводности и конвекции. Тепловой поток возникает за счет образующегося градиента температуры по толщине скелета материала, градиента температуры жидкости внутри пор материала и за счет возникающего в процессе сушки перемещения жидкой и паровой фаз влаги внутри пористой структуры.

Упрощенно для переноса тепла внутри материала можно использовать уравнение теплопроводности Фурье

$$q = \lambda_{\text{эф}} \cdot \text{grad}(t), \quad (6.4)$$

однако эффективный коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{эф}}$ , Вт/(м·К), будет зависеть не только от структуры скелета, температуры материала, но и от его влажности.

Таким образом, подвод тепла является необходимым условием для осуществления процесса термической сушки. Даже если сушка произ-



водится при низких температурах (как например сублимационная сушка или сушка под вакуумом), необходимо тепло для испарения влаги, которое поступает от сушильного агента (теплоносителя).

Параллельно с переносом тепла внутрь материала происходит перенос влаги (массоперенос) из материала через поверхность контакта фаз в окружающую среду сушильного агента.

Перенос влаги в капиллярно-пористых материалах может происходить за счет более чем десяти одновременно действующих физических эффектов, из которых основную роль играют обычное вязкое течение влаги и пара в капиллярах и порах, капиллярное течение жидкой фазы, вызываемое силами поверхностного натяжения, термоградиентное<sup>1</sup> течение жидкой фазы и некоторые другие.

Удаление паров влаги с поверхности материала осуществляется массоотдачей через пограничный диффузионный слой сушильного агента.

Уравнение массоотдачи для потока испаренной с поверхности смоченного материала влаги  $j$ , кг/(м<sup>2</sup>·с), записывается в виде

$$j = \beta \cdot (p_{\text{п}} - p), \quad (6.5)$$

где  $p$  — парциальное давление паров воды в потоке сушильного агента, Па;  $p_{\text{п}}$  — парциальное давление паров воды у поверхности материала, Па;  $\beta$  — коэффициент массоотдачи, кг/(м<sup>2</sup>·Па·с).

Величину, обратную коэффициенту массоотдачи

$$r_{\text{д}} = 1/\beta \quad (6.5a)$$

называют диффузионным сопротивлением, а разность парциальных давлений

$$\Delta p = (p_{\text{п}} - p) \quad (6.5b)$$

называют движущей силой процесса массопереноса (массоотдачи). Когда вся поверхность материала смочена, на границе раздела фаз устанавливается равновесие и парциальное давление у поверхности материала равно парциальному давлению насыщенных паров воды  $p_{\text{п}} = p_{\text{н}}$ .

Для переноса влаги внутри материала  $j$ , кг/(м<sup>2</sup>·с), формально можно записать закон Фика

$$j = D_{\text{эф}} \cdot \text{grad}(u), \quad (6.6)$$

---

<sup>1</sup> Термоградиентное течение вызывается сильной зависимостью величины поверхностного натяжения жидкости от температуры, в результате чего во внутренних зонах материала, где температура ниже и поверхностное натяжение больше, величина капиллярного давления превышает таковое для приповерхностных зон влажного материала, что и приводит к перемещению жидкой фазы в капилляре.

где  $u$  — локальная влажность материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , а  $D_{\text{эф}}$  — эффективный коэффициент диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ , который должен учитывать все явления массопереноса в твердом капиллярно-пористом влажном теле. Однако сложность определения численного значения такого коэффициента диффузии сопряжена с тем, что он слишком зависит от многих параметров и не может быть однозначно определен для большинства высушиваемых веществ. Поэтому уравнение (6.6) практически не используется для расчетов массообмена даже в простейших вариантах сушки.

Таким образом, удаление влаги из материала происходит за счет действия комплекса различных физических явлений, которые невозможно учесть одним или несколькими уравнениями переноса.

Фазовый переход жидкой фазы в парообразную фазу (испарение) происходит в начальный момент сушки на поверхности материала, а затем перемещается вглубь него. В результате внутри материала возникает избыточное давление и пары воды перемещаются под действием разности давлений, которое невозможно рассчитать, поскольку материал состоит из большого количества пор и каналов, сложной структуры.

В процессе конвективной термической сушки мы имеем две стадии тепло- и массопереноса:

- перенос тепла к поверхности материала и противоположно направленный поток испаренной влаги от поверхности материала;
- перенос влаги из глубины материала к его поверхности навстречу потоку тепла от поверхности материала и возможное испарение влаги внутри пор и капилляров материала.

В течение всего периода сушки скорость внешнего массопереноса (осложненного теплопереносом) и скорость внутреннего массопереноса (массопереноса внутри материала) изменяются.

В теории массопереноса большое значение имеет понятие о лимитирующей стадии массопереноса. Скорость массопереноса (поток массы  $j$ ,  $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ) пропорциональна движущей силе  $\Delta p$  и обратно пропорциональна общему диффузионному сопротивлению  $R$ :

$$j = \Delta p / R.$$

Общее диффузионное сопротивление  $R$  складывается из сопротивления внешнему массопереносу  $r_{\text{д1}}$  и сопротивления массопереносу внутри влажного материала  $r_{\text{д2}}$ :

$$R = r_{\text{д1}} + r_{\text{д2}}.$$

Или, учитывая уравнение (6.5а),

$$R = \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2},$$

где  $\beta_1$  и  $\beta_2$  — коэффициенты массопереноса в сушильном агенте (газовой фазе) и во влажном материале (твердой фазе).

Общая скорость массопереноса определяется наиболее медленной стадией переноса, которая характеризуется величиной диффузионного сопротивления  $r_{d1}$  или  $r_{d2}$ . Как правило, скоростью быстрой стадии переноса можно пренебречь и вести расчет скорости только по одной из фаз, скорость в которой определяет (лимитирует) общую среднюю скорость процесса.

Сначала лимитирующей стадией процесса сушки будет внешняя диффузия в газовой фазе, поскольку массоперенос в твердой фазе влажного материала происходит очень быстро ( $r_{d2} \cong 0$ ); затем, по мере удаления влаги из материала, скорость переноса в твердой фазе замедляется и в конце сушки лимитирующей стадией становится диффузия внутри материала ( $r_{d2} \gg r_{d1}$ ). Таким образом, при постоянных условиях сушки скорость внешнего массопереноса практически не меняется, а скорость внутреннего массопереноса (массопереноса внутри материала) постоянно замедляется. В некоторый момент обе стадии массопереноса сравнимы между собой, но длительность этого периода незначительна по сравнению с общим временем сушки.

Схема изменения диффузионного сопротивления представлена на рис. 24.

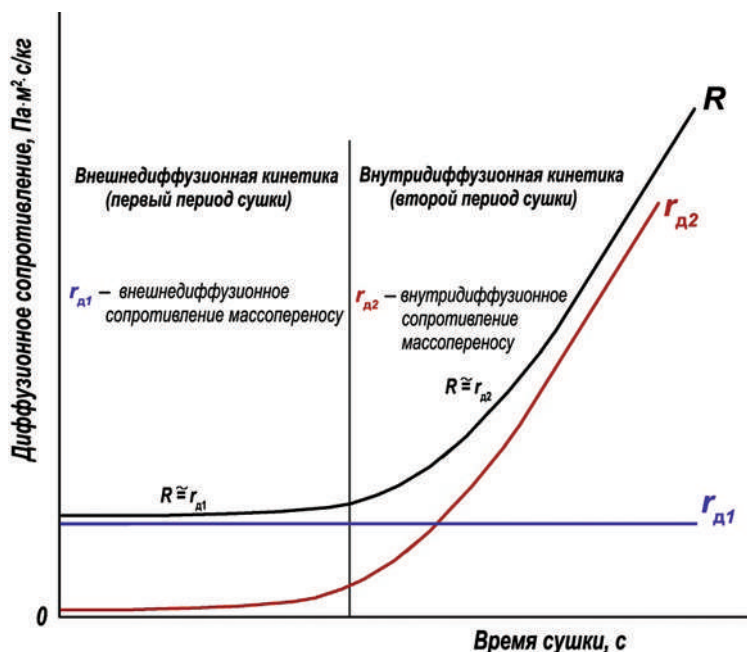


Рис. 24. Изменение диффузионных сопротивлений в процессе сушки влажного материала

Соотношение и продолжительность обеих стадий массопереноса определяется многими факторами: капиллярно-пористой структурой материала, его размерами и влажностью, температурой и влагосодержанием сушильного агента.

В связи с вышеизложенным, условно общее время сушки можно разбить на три периода:

- прогрев материала;
- период постоянной скорости сушки (внешний массоперенос) — первый период сушки;
- период падающей скорости сушки (внутренний массоперенос) — второй период сушки.

Первоначально влажный материал прогревается до температуры мокрого термометра. Это незначительный отрезок времени, который не учитывается при расчетах скорости сушки. Тем не менее, даже в этот короткий промежуток времени происходит испарение влаги с поверхности влажного материала за счет разности концентраций (парциальных давлений) паров воды в сушильном агенте и у поверхности влажного материала ( $p_n - p$ ).

Затем наступает период постоянной скорости сушки (см. рис. 23, а). В этом периоде скорость сушки определяется внешним массопереносом испаренной влаги от поверхности материала в поток сушильного агента. Вся поверхность материала смочена влагой, и убыль влаги с поверхности восполняется переносом влаги из глубины материала. Испарение влаги с поверхности материала мало отличается от испарения воды с ее поверхности.

При постоянных параметрах сушильного агента (температура, влажность, давление) возникает установившийся процесс, при котором температура смоченной поверхности материала равна температуре мокрого термометра, а парциальное давление у поверхности влажного материала равно давлению насыщенных паров воды при температуре мокрого термометра. Следовательно, скорость сушки определяется уравнением (6.5) с учетом (6.1а):

$$\frac{dw^c}{d\tau} = \frac{\beta F_{уд}}{\rho_c} (p_n - p), \quad (6.7)$$

где  $F_{уд}$  — удельная поверхность материала,  $\text{м}^2/\text{м}^3$  (поверхность, приходящаяся на  $1 \text{ м}^3$  абсолютно сухого материала);  $\rho_c$  — плотность абсолютно сухого материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Поскольку характеристики сушильного агента, в том числе его скорость, температура и условия обтекания поверхности материала, предполагаются постоянными ( $\beta = \text{const}$ ), то скорость сушки будет постоянной.

В конце первого периода сушки появляются сначала небольшие островки высохшей поверхности, а затем вся поверхность материала

высыхает и испарение влаги происходит внутри материала. Температура поверхности материала повышается. Наступает второй период — период падающей скорости сушки.

Рассчитать скорость сушки во втором периоде сушки достаточно сложно: эта скорость зависит от капиллярно-пористой структуры материала. Для расчета скорости сушки во втором периоде часто прибегают к определению экспериментальных кривых скорости сушки.

## 6.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ КРИВЫЕ СУШКИ

Для определения коэффициентов скорости сушки, необходимых для расчета сушильных аппаратов, выполняют ряд экспериментов по определению скорости сушки материала. Каждый эксперимент проводят при постоянной температуре и влажности сушильного агента. При необходимости поддерживают постоянной и скорость сушильного агента, соответствующую предполагаемым условиям процесса сушки. Процесс сушки протекает со скоростью, зависящей от формы связи влаги с материалом и механизма перемещения в нем влаги. Типичная экспериментальная кривая сушки — зависимость между влажностью материала  $w^c$  и временем  $\tau$  — представлена на рис. 25.

В общем случае кривая сушки состоит из нескольких участков, соответствующих различным периодам сушки. Как видно из рисунка, после очень небольшого промежутка времени — периода прогрева материала, в течение которого влажность снижается незначительно (по кривой  $AB$ ), — наступает период постоянной скорости сушки (I период). При этом влажность материала интенсивно уменьшается по прямолинейному закону (прямая  $BC$ ). Такое уменьшение влажности наблюдается до достижения первой критической влажности  $w_{кр1}^c$ , после чего начинается период падающей скорости сушки (II период). В этом периоде уменьшение влажности материала выражается некоторой кривой (кривая  $CE$ ), которая в общем случае состоит из двух участков

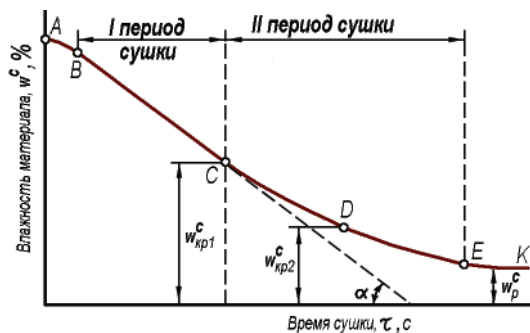


Рис. 25. Кривая сушки материала

различной кривизны (отрезки  $CD$  и  $DE$ ). Точка перегиба  $D$  соответствует второй критической влажности  $w_{кр2}^c$ . В конце второго периода сушки влажность материала асимптотически приближается к равновесной влажности. Достижение равновесной влажности  $w_p^c$  означает полное прекращение дальнейшего испарения влаги из материала (точка  $K$ ).

Скорость сушки может быть определена с помощью кривой сушки путем графического дифференцирования. Для материала данной влажности скорость сушки будет выражаться тангенсом угла наклона касательной, проведенной к точке кривой, отвечающей влажности материала. В частности, для I периода скорость сушки будет соответствовать  $\operatorname{tg} \alpha = \text{const}$  (см. рис. 25).

В каждом конкретном случае вид функции  $w^c = f(\tau)$  может отличаться от приведенной на рис. 25 в зависимости от формы и структуры материала, а также вида связи с ним влаги. Данные о скорости сушки, полученные с помощью кривых сушки, изображаются в виде кривых скорости сушки, которые строят в координатах «скорость сушки — влажность материала».

На рис. 26 показана кривая скорости сушки, соответствующая кривой сушки на рис. 25. Горизонтальный отрезок  $BC$  отвечает периоду постоянной скорости (I период), а отрезок  $CE$  — периоду падающей скорости (II период). В первый период происходит интенсивное поверхностное испарение свободной влаги, а скорость сушки лимитируется внешним массопереносом с поверхности материала. В точке  $C$  (при первой критической влажности  $w_{кр1}^c$ ) влажность на поверхности материала становится равной гигроскопической  $w_r^c$ . С этого момента начинается испарение связанной влаги (внутренний массоперенос). Точка  $D$  (вторая критическая влажность) соответствует достижению равновесной влажности  $w_p^c$  на поверхности материала (внутри материала влажность превышает равновесную). Начиная с этого момента и вплоть до установления равновесной влажности по всей толще материала, скорость сушки определяется скоростью внутренней диффузии влаги из глубины материала к его поверхности. Кривая  $CD$  характеризуется равномерно падающей скоростью сушки. Однако вследствие высыхания все меньшая поверхность материала остается доступной для испарения влаги в окружающую среду, и скорость сушки еще более замедляется. Кривая  $DE$  характеризуется непропорциональным уменьшением скорости сушки от влажности  $w^c$  материала.

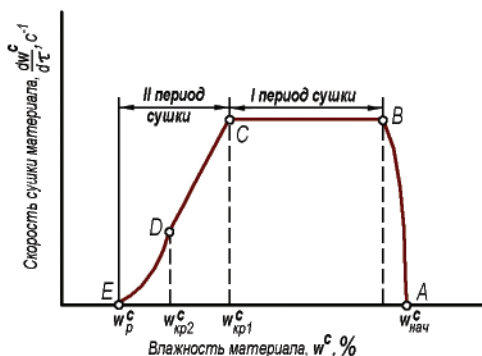


Рис. 26. Кривая скорости сушки

Вид кривых скорости сушки во втором периоде весьма разнообразен (рис. 27). Кривая 1 типична для капиллярно-пористых материалов сложной структуры, для которых верхний участок кривой соответствует удалению капиллярной влаги, а нижний — адсорбционной. Линии 2 и 3 характерны для тонколистовых материалов с большой удельной

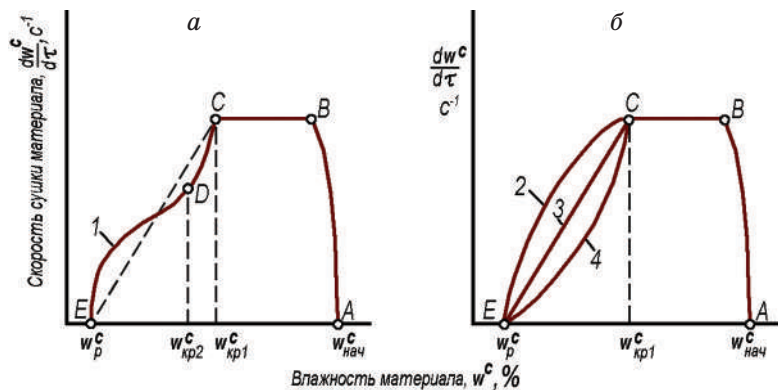


Рис. 27. Вид кривых сушки для различных материалов

поверхностью испарения влаги (бумага, ткань и т. п.). Кривая 4 характерна для керамических изделий, обладающих меньшей удельной поверхностью испарения и теряющих в процессе сушки в основном капиллярную влагу. Точка перегиба, соответствующая  $w_{кр2}^c$  (кривая 1), может быть выражена нечетко или отсутствовать совсем (линии 2, 3, 4).

**Изменение температуры материала в процессе сушки.** Для анализа процесса сушки, помимо кривых скорости, важно знать также характер изменения температуры материала  $\theta$  в зависимости от его влажности  $w^c$  (рис. 28), так как с изменением  $\theta$  могут изменяться свойства материала.

За кратковременный период прогрева материала его температура быстро повышается и достигает постоянного значения — температуры мокрого термометра  $t_m$ . В период постоянной скорости сушки (I период) все тепло, подводимое к материалу, затрачивается на интенсивное поверхностное испарение влаги и температура материала остается

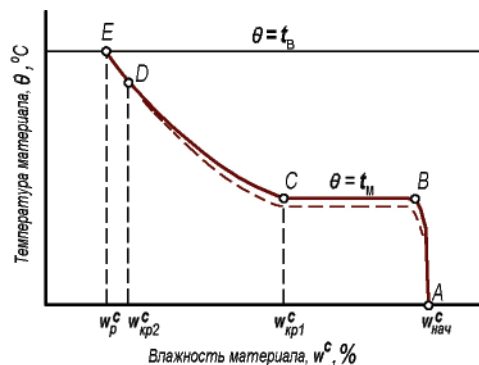


Рис. 28. Температурная кривая материала

постоянной равной температуре испарения жидкости со свободной поверхности ( $\theta = t_m$ ). В период падающей скорости сушки (II период) испарение влаги с поверхности материала замедляется и его температура начинает повышаться ( $\theta > t_m$ ). Когда влажность материала уменьшается до равновесной и скорость испарения влаги падает до нуля, температура материала достигает наибольшего значения — становится равной температуре окружающей среды ( $\theta = t_b$ ).



Температурная кривая на рис. 28 (сплошная линия) характерна для материалов, высушиваемых в виде тонких слоев. Для материалов, высушиваемых в толстом слое, при конвективной сушке температура во внутренних частях в течение почти всего процесса ниже, чем на поверхности (см. пунктирную линию на рис. 28). При сушке тонких пластин это «отставание» температуры проявляется значительно слабее и может возникать только во II периоде, в пределах от  $w_{кр1}^c$ , до  $w_{кр2}^c$ , когда происходит углубление поверхности испарения материала.

### 6.3.

#### ВНЕШНЕДИФУЗИОННАЯ КИНЕТИКА СУШКИ ВЛАЖНОГО МАТЕРИАЛА

В первом периоде сушки испарение влаги происходит с поверхности материала, поэтому скорость сушки не зависит от капиллярно-пористой структуры материала, определяясь исключительно свойствами сушильного агента (воздуха). Испарение происходит главным образом вследствие диффузии пара через пограничный слой воздуха у поверхности материала (внешняя диффузия). Таким путем осуществляется перенос до 90 % всей влаги; он обуславливается движущей силой — разностью концентраций или парциальных давлений пара у поверхности материала  $p_n$  и в окружающей среде  $p$ . Помимо диффузионного потока перенос влаги будет происходить также за счет термодиффузии<sup>1</sup> вследствие перепада температур в пограничном слое. В условиях конвективной сушки, при относительно низких температурах, перенос влаги за счет термодиффузии пренебрежимо мал.

В период постоянной скорости сушки влажность материала больше гигроскопической, пар у его поверхности является насыщенным ( $p_n - p_n$ ) и соответствует температуре мокрого термометра  $t_m$ . В этот период происходит интенсивное поступление влаги из внутренних слоев материала к его поверхности. Скорость поверхностного испарения влаги из материала может быть принята равной скорости испарения ее со свободной поверхности жидкости и определена согласно закону Дальтона. Поэтому уравнение влагоотдачи с поверхности материала имеет вид

$$j = \beta_p (p_n - p), \quad (6.8a)$$

где  $\beta_p$  — коэффициент массоотдачи (влагоотдачи), кг/(м<sup>2</sup> · Па · с);  $(p_n - p)$  — движущая сила процесса, Па.

<sup>1</sup> Термодиффузия — перенос компонента газовой смеси или растворов при наличии в них градиента температуры. В пограничном слое у поверхности влажного материала за счет разности температур возникает дополнительный к диффузионному потоку поток вещества (водяного пара), направленный в противоположную сторону. Однако величина термодиффузионного потока существенно меньше чисто диффузионного потока.

Движущая сила может быть выражена в других единицах, которые связаны между собой:

$$j = \beta_x (x_n - x). \quad (6.86)$$

Движущую силу можно определить также через температуру сушильного агента (см. 3.12)

$$j = \beta_t (t - t_m). \quad (6.8в)$$

В этих уравнениях коэффициенты  $\beta$  имеют размерность  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{кг}/\text{кг} \cdot \text{с})$  и  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{с})$  соответственно.

Для расчета коэффициентов массоотдачи в уравнениях (6.8а–6.8в) может быть применена теория подобия, где диффузионный критерий Нуссельта определяется выражением

$$\text{Nu}' = \frac{\beta \cdot L}{D_{\text{эф}}}. \quad (6.9)$$

В этом уравнении  $D_{\text{эф}}$  — эффективный коэффициент теплопроводности (для влаги, находящейся в парообразном состоянии),  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $D_{\text{эф}}$  — аналог коэффициента теплопроводности, в первом приближении его можно заменить эффективным коэффициентом диффузии паров воды в воздухе  $D_{\text{п}}$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $L$  — определяющий геометрический размер по направлению движения воздуха вдоль поверхности испарения влаги из материала. Для частиц, имеющих форму шара  $L = d$ , где  $d$  — диаметр шара, м. Коэффициент массоотдачи имеет размерность  $\text{м}/\text{с}$ , точнее  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{кг}/\text{м}^3 \cdot \text{с})$ . В этом случае влажность сушильного агента должна быть выражена в  $\text{кг}/\text{м}^3$  (или  $\text{кмоль}/\text{м}^3$ ), а коэффициент диффузии паров воды в воздухе определен при температуре мокрого термометра или при средней температуре сушильного агента. В каждом конкретном случае при определении критериальной зависимости должны быть указаны определяющий размер  $L$  материала, определяющая температура и размерность движущей силы и коэффициента массоотдачи.

Критериальные уравнения получаются путем обобщения экспериментальных данных и действуют в ограниченной области температур и скоростей. Трудность практического использования критериальных уравнений заключается в том, что  $\beta$  и соответственно  $\text{Nu}'$  зависят не только от основного фактора — скорости воздуха (газа), но и от многих других факторов, например от условий обтекания сушильным агентом поверхности материала, ее формы и размеров, температуры сушки и т. п.

Имеется ряд эмпирических зависимостей, с помощью которых можно в первом приближении рассчитать величину  $\beta$ . Так, для дисперсных материалов в потоке сушильного агента рекомендуется использовать

обобщенное уравнение, полученное обработкой многочисленных опытных данных [10, 51]:

$$\text{Nu}' = 2 + 0,51 \cdot \text{Re}^{0,52} (\text{Pr}')^{0,33}. \quad (6.10)$$

Уравнение (6.10) аппроксимирует опытные данные для шарообразных частиц с точностью до 7 % в области значений критерия Рейнольдса  $\text{Re}$  от 0 до 70 000.

Также широко используется обобщенное уравнение, в котором термодинамическое состояние влажного газа учитывает критерий Гухмана [76]:

$$\text{Nu}' = 2 + A \cdot \text{Re}^n (\text{Pr}')^{0,33} \text{Gu}^{0,133}, \quad (6.11)$$

где  $\text{Gu} = (T - T_{\text{м}})/T$  — критерий Гухмана, представляющий собой отношение потенциала сушки  $(T - T_{\text{м}})$ , к температуре среды  $T$  (К) и отражающий влияние теплообмена на массообмен;  $\text{Pr}' = \nu/D_{\text{п}}$  — диффузионный критерий Прандтля ( $D_{\text{п}}$  — коэффициент диффузии водяного пара в воздухе,  $\text{м}^2/\text{с}$ );  $\text{Re} = \nu L/\nu$  — гидродинамический критерий Рейнольдса ( $\nu$  — скорость,  $\text{м}/\text{с}$ ,  $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ). Критерии  $\text{Nu}'$ ,  $\text{Re}$  и  $\text{Pr}'$  определяются при средней температуре воздуха<sup>1</sup>.

Величины  $A$  и  $n$  определяются в зависимости от  $\text{Re}$ :

$\text{Re}$	$A$	$n$
$< 2\,500$	0,83	0,53
2500–20 000	0,49	0,61
$> 20\,000$	0,025	0,90

При  $\text{Re} \rightarrow 0$  значение критерия Нуссельта  $\text{Nu} = 2$ . Это так называемый предельный закон Нуссельта для частиц шарообразной формы.

Корреляции (6.10–6.11) определены для случая омывания сушильным агентом одиночной частицы влажного материала. В стесненном потоке концентрация частиц и их взаимодействие существенны, в этом случае в уравнение для определения коэффициента массоотдачи вводят поправку на порозность слоя частиц  $\varepsilon$  [17]:

$$\text{Nu}' = \left( \frac{\text{Re}}{\varepsilon} \right)^{0,5} (\text{Pr}')^{0,33}.$$

Для полидисперсного слоя частиц в потоке следует выполнить расчет коэффициентов теплоотдачи для каждой фракции слоя.

<sup>1</sup> Обычно для каждого критериального уравнения заранее оговариваются определяющий размер (для сферической частицы это диаметр, для частиц произвольной формы — эквивалентный диаметр) и определяющая температура, при которой определяются все физические величины. В данном случае определяющая температура — это средняя температура сушильного агента в потоке и у поверхности материала  $t_{\text{cp}} = (t_0 + t_{\text{м}})/2$ .

В качестве примера рассмотрим расчет скорости сушки для сферической частицы диаметром  $d = 2$  мм, обдуваемой сушильным агентом (воздухом) со скоростью 2,5 м/с при 150 °С. Результаты расчета приведены в табл. 6-1.

Таблица 6-1

**Расчет времени сушки сферической частицы**  
(выполнен в программе Excel-2010)

Поз.	Наименование	Обозначение	Размерность	Значение
1	Диаметр частицы	$d$	м	0,002
2	Скорость воздуха	$v$	м/с	2,5
3	Температура воздуха	$t_0$	°С	150
4	Влагосодержание воздуха	$x$	кг/кг	0,009
5	Температура «мокрого термометра»	$t_m$	°С	43
6	Средняя температура	$t_{cp}$	°С	96,5
7	Вязкость воздуха при $t_{cp}$	$\mu$	Па·с	$0,02 \cdot 10^{-3}$
8	Плотность воздуха при $t_{cp}$	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	0,957
9	Критерий Рейнольдса	Re	—	239
10	Коэффициент диффузии при 0 °С	$D_n$	м <sup>2</sup> /с	$21,9 \cdot 10^{-6}$
11	Коэффициент диффузии при $t_{cp}$	$D_n$	м <sup>2</sup> /с	$34,8 \cdot 10^{-6}$
12	Критерий Прандтля	Pr'	—	0,606
13	Критерий Гухмана	Gu	—	0,253
14	Критерий Нуссельта	Nu'	—	8,016
15	Коэффициент массоотдачи	$\beta$	м/с	0,138
16	Удельная поверхность частиц	$F_{уд}$	м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	3000
17	Парциальное давление паров воды	$p$	Па	1458
18	Парциальное давление насыщенных паров воды	$p_n$	Па	8516
19	Абсолютная влажность воздуха при $t_{cp}$	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	0,009
20	Абсолютная влажность воздуха, насыщенного парами воды при $t_m$	$\rho_n$	кг/м <sup>3</sup>	0,058
21	Плотность сухого материала	$\rho_t$	кг/м <sup>3</sup>	2400
22	Скорость сушки*	$dw^c/d\tau$	1/с	$8,6 \cdot 10^{-3}$

\* Количество килограммов влаги, испаренное с поверхности 1 кг дисперсной фазы материала.

Размерность коэффициента массоотдачи  $\beta$ , который определяется из критерия Нуссельта м/с:

$$\frac{\text{м}}{\text{с}} = \frac{\text{кг}}{\text{кг/м}^3 \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}}.$$

Это значит, что влажность воздуха в уравнение (6.7) мы должны подставлять в размерности  $\text{кг}/\text{м}^3$ . Следовательно, движущую силу следует выразить через абсолютную влажность воздуха, которая характеризует концентрацию паров воды в  $1 \text{ м}^3$  воздуха ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ). Для этого парциальные давления паров воды (уравнение 6.8а)  $p$  и  $p_n$  мы должны перевести в плотность  $\rho_n$  водяного пара по уравнению (3.4):

$$\rho_n = \frac{M_n p_n}{RT}, \quad \rho = \frac{M_p p}{RT}.$$

Парциальное давление насыщенных паров воды определяем по диаграмме Рамзина или рассчитываем по уравнению (3.2) при температуре мокрого термометра. Парциальное давление паров воды в воздухе определяем по диаграмме Рамзина или рассчитываем по уравнению (3.7).

$$\lg p_n = A - \frac{a}{T_m}, \quad p = \frac{P \cdot x}{0,622 - x},$$

где  $T_m$  — температура мокрого термометра, К;  $A$  и  $a$  — константы уравнения (3.2).

Учитывая, что удельная поверхность  $1 \text{ м}^3$  частиц диаметром 2 мм составит  $F_{\text{уд}} = 6/d = 3000 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , то количество влаги, испаренной с поверхности 1 кг материала в единицу времени, рассчитанное по уравнению массоотдачи

$$\frac{dw^c}{d\tau} = \beta_p F_{\text{уд}} / \rho_c \cdot (p_n - p), \quad (6.7a)$$

составит  $8,6 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{с}$ , т. е. за секунду влажность материала уменьшится на 0,86 %.

То есть, в первом периоде сушки при температуре сушильного агента  $150^\circ\text{C}$  для удаления поверхностной влаги из кварцевого песка (или любого другого материала) с размером частиц 2 мм и с начальной влажностью 10 % до конечной влажности 6 % потребуется менее 5 с. Такой процесс можно выполнить в пневматической трубе-сушилке, где время пребывания частиц составляет 10–15 с.

Однако следует помнить, что при влажности меньше критической наступает второй период — период падающей скорости сушки, поэтому общее время сушки может быть существенно больше. Для кристаллических материалов, таких как кварцевый песок и другие аналогичные материалы, критическая влажность обычно составляет 4–8 %. Методика расчета скорости сушки во втором периоде изложена в следующем разделе.

Для листовых материалов должны применяться другие эмпирические зависимости. Для формованных материалов, таких как керамические

изделия, широко применяются экспериментальные кинетические кривые, так как их сушка происходит в основном во втором периоде.

Расчет времени сушки в первом периоде можно также выполнить, используя уравнение теплоотдачи

$$q = \alpha(t - t_m), \quad (6.12)$$

где  $q$  — тепловой поток от сушильного агента к поверхности влажного материала, Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $t$  — температура сушильного агента, °С;  $t_m$  — температура сушильного агента у поверхности материала (температура мокрого термометра), °С.

При этом допускается, что все тепло, поступающее к поверхности материала, идет на испарение влаги с поверхности, а материал не нагревается и имеет температуру мокрого термометра. В этом случае скорость сушки можно определить по уравнению

$$\frac{dw^c}{d\tau} = \alpha F_{уд} / \rho_c (t - t_m) / r_n, \quad (6.13)$$

где  $F_{уд}$  — удельная поверхность зернистого материала, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;  $r_n$  — удельная теплота парообразования при температуре мокрого термометра, кДж/кг;  $\rho_c$  — плотность абсолютно сухого материала, кг/м<sup>3</sup>.

Критериальное уравнение для расчета теплового критерия Нуссельта имеет вид [71]:

$$Nu = 2 + A \cdot Re^n Pr^{0,33} Gu^{0,175}, \quad (6.14)$$

где  $Gu = (T - T_m)/T$  — критерий Гухмана;  $Pr$  — тепловой критерий Прандтля  $Pr = \nu / a$ , где  $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости, м<sup>2</sup>/с;  $a$  — коэффициент температуропроводности сушильного агента (воздуха), м<sup>2</sup>/с;  $a = \lambda / c_v \rho_v$ ;  $Re$  — гидродинамический критерий Рейнольдса  $Re = vd / \nu$ .

Величины  $A$  и  $n$  определяются в зависимости от  $Re$ :

$Re$	$A$	$n$
< 2 500	1,07	0,48
2 500—20 000	0,51	0,61
> 20 000	0,027	0,90

Для расчета коэффициента теплоотдачи также применимо уравнение Кацнельсона и Тимофеевой [66]:

$$Nu = 2 + 0,03Re^{0,54}Pr^{0,33} + 0,35Re^{0,58}Pr^{0,36}. \quad (6.15)$$

Для тех же условий, что приведены в примере выше (табл. 6-1) рассчитаем скорость сушки в первом периоде сушки, используя критериальное уравнение (6.14). Результаты расчета приведены в табл. 6-2.

Таблица 6-2

**Расчет времени сушки сферической частицы**  
(выполнен в программе Excel-2010)

Поз.	Наименование	Обозначение	Размерность	Значение
1	Диаметр частицы	$d$	м	0,002
2	Скорость воздуха	$v$	м/с	2,5
3	Температура воздуха	$t_0$	°C	150
4	Влагосодержание воздуха	$x$	кг/кг	0,009
5	Температура «мокрого термометра»	$t_m$	°C	43
6	Средняя температура	$t_{cp}$	°C	96,5
7	Вязкость воздуха при $t_{cp}$	$\mu$	Па·с	$0,02 \cdot 10^{-3}$
8	Плотность воздуха при $t_{cp}$	$\rho$	кг/м³	0,957
9	Критерий Рейнольдса	$Re$	—	239
10	Коэффициент теплопроводности при $t_{cp}$	$\lambda$	Вт/(м·К)	0,02
11	Критерий Прандтля	$Pr$	—	0,800
12	Критерий Гухмана	$Gu$	—	0,253
13	Критерий Нуссельта	$Nu$	—	12,83
14	Коэффициент теплоотдачи	$\alpha$	Вт/(м²·К)	128,3
15	Удельная поверхность частиц	$F_{уд}$	м²/м³	3000
16	Теплота парообразования при $t_m$	$r_n$	кДж/кг	2300
17	Плотность сухого материала	$\rho_t$	кг/м³	2400
18	Скорость сушки*	$dw^c/d\tau$	1/с	$7,46 \cdot 10^{-3}$

\* Количество кг влаги, испаренное с поверхности 1 кг дисперсной фазы материала

Как видим, значения скорости для обоих расчетов практически совпадают: разница составляет не более 15 %, что вполне допустимо для технических расчетов. Второй расчет удобен тем, что не требуется перевод коэффициентов теплоотдачи из одних единиц измерения в другие.

Данный расчет позволяет определить время, необходимое на сушку материала в первом периоде. Общее время сушки складывается из первого и второго периода сушки. Если известна начальная и критическая влажность материала, то легко определить время сушки в первом периоде. Например, для кварцевого песка критическая влажность<sup>1</sup> состав-

<sup>1</sup> Критическая влажность определяется экспериментально для выбранных условий сушки. Критическая влажность зависит не только от капиллярно-пористой структуры материала, но и от условий сушки: температуры, влагосодержания и скорости сушильного агента.



ляет 4–8 %. Следовательно, при начальной влажности песка 8 % время сушки в первом периоде составит  $(8-4)/0,746 = 5,4$  с. Для расчета общей продолжительности сушки, нужно определить время сушки второго периода, о чем будет сказано ниже.

Приведенные выше расчеты были выполнены для случая доступности всей поверхности материала для сушильного агента. Такой режим сушки соблюдается в пневматических, распылительных сушилках и сушилках взвешенного и виброкипящего слоя. Однако в ленточных, барабанных, гребковых и некоторых других типах сушилок часть материала недоступна для контакта с сушильным агентом, и это необходимо учитывать при расчете таких аппаратов.

В большинстве случаев температура и другие свойства теплоносителя меняются в процессе сушки. В этом случае расчет ведут или по усредненным параметрам, или, разбивая весь период сушки на отдельные участки, где можно принять постоянные условия сушки (см. примеры расчета аппаратов в главе 10).

#### 6.4. ВНУТРИДИФФУЗИОННАЯ КИНЕТИКА СУШКИ ВЛАЖНОГО МАТЕРИАЛА

В первом периоде сушки при испарении влаги с поверхности материала внутри него возникает градиент влажности, что и обеспечивает дальнейшее перемещение влаги из внутренних слоев материала к его поверхности (внутреннюю диффузию влаги). Вначале перепад влажности внутри материала столь велик, что лимитирующее влияние на скорость сушки имеет скорость поверхностного испарения (внешняя диффузия). Однако после того как влажность на поверхности снижается до гигроскопической и продолжает уменьшаться, т. е. во втором периоде сушки, определяющее значение для скорости процесса приобретает внутренняя диффузия влаги.

В первом периоде сушки влага внутри материала перемещается в виде жидкости (капиллярная и осмотически связанная влага). С началом второго периода начинается неравномерная усадка материала. На стадии равномерно падающей скорости наблюдаются местные углубления поверхности испарения и начинается испарение влаги внутри материала. При этом капиллярная влага и некоторая часть адсорбционно связанной влаги перемещаются внутри материала уже в виде пара.

В дальнейшем поверхностный слой материала постепенно полностью высыхает и, соответственно, возрастает значение внутренней диффузии влаги. На стадии неравномерно падающей скорости второго периода наиболее прочно связанная с материалом адсорбционная влага перемещается внутри него только в виде пара.

Явление переноса влаги внутри материала носит название *влагопроводности* [65]. Интенсивность, или плотность потока влаги  $j_m$  (кг/м<sup>2</sup>·с), перемещающейся внутри материала, пропорциональна градиенту концентрации влаги ( $\partial u / \partial n$ ):

$$j_m = -D_m \frac{\partial u}{\partial n}, \quad (6.16)$$

где  $u$  — локальная концентрация влаги в материале  $u(x, y, z)$ , кг/м<sup>3</sup>;  $D_m$  — аналог коэффициента диффузии влаги в материале, м<sup>2</sup>/с.

Знак «минус» в правой части этого выражения показывает, что влага движется от слоя с большей к слою с меньшей концентрацией влаги, т. е. в направлении, противоположном градиенту концентрации.

Коэффициент пропорциональности  $D_m$  называется коэффициентом *влагопроводности*. По физическому смыслу он представляет собой коэффициент внутренней диффузии влаги в материале и выражается в м<sup>2</sup>/с. Коэффициент влагопроводности является аналогом коэффициента температуропроводности в процессах теплопередачи. Коэффициент влагопроводности зависит от формы связи влаги с материалом, влажности материала и температуры сушки, т. е. различен на разных стадиях процесса, и может быть определен только опытным путем.

Большое разнообразие высушиваемых материалов, а также зависимость коэффициента влагопроводности от влажности не позволяют собрать достаточное количество данных для практических расчетов. В справочной литературе отсутствуют данные по величинам коэффициентов переноса для большого числа материалов, подлежащих промышленной сушке.

Помимо градиента влажности, возникает также значительный температурный градиент, влияющий на перемещение влаги внутри материала. Это явление, которое носит название *термовлагопроводности*, создает поток влаги, параллельный потоку тепла, но направленный вглубь материала. Интенсивность переноса влаги за счет термовлагопроводности пропорциональна коэффициенту термовлагопроводности  $\delta$ , который характеризует взаимосвязь потенциалов переноса влаги и теплоты в капиллярно-пористом материале. Соответственно, плотность потока влаги внутри материала, обусловленного перепадом температуры, определится выражением

$$j_t = -D_m \rho_c \delta \frac{\partial t}{\partial n}, \quad (6.17)$$

где коэффициент термовлагопроводности  $\delta$  имеет размерность К<sup>-1</sup>, а  $\rho_c$  — плотность сухого материала, кг/м<sup>3</sup>.

В условиях конвективной сушки явление термовлагопроводности может оказывать некоторое противодействие перемещению влаги из

глубины к поверхности материала, где температура выше, чем во внутренних слоях.

Кроме того, движение жидкости в пористом теле в направлении потока тепла может быть вызвано наличием «защемленного» воздуха. При повышении температуры давление «защемленного» воздуха увеличивается и воздушные пузырьки расширяются. Вследствие этого жидкость в капиллярной поре движется в направлении потока тепла.

При интенсивном нагреве влажного тела внутри его пористой структуры происходит превращение конденсированной жидкой фазы в паровую фазу, что сопровождается значительным увеличением удельного объема. Возникающее при этом избыточное давление не успевает мгновенно релаксироваться через пористую структуру материала, так как часть пор тела заполнена жидкостью, а свободные от конденсированной фазы капилляры создают некоторое гидравлическое сопротивление. Поскольку процесс парообразования происходит наиболее интенсивно при температуре, превосходящей 100 °С, то существенное избыточное давление внутри влажного тела образуется при интенсивных, высокотемпературных режимах сушки.

Наличие градиента давления внутри капиллярно-пористого тела вызывает перемещение влаги, причем общее направление этого потока может быть как внутрь тела, так и наружу в зависимости от направления градиента избыточного давления. Этот конвективный перенос не учитывается уравнением массопереноса (6.16). Поэтому в основу более общего уравнения для потока влаги во влажном материале необходимо внести слагаемое, отражающее фильтрационный поток влаги под действием возникающего в теле избыточного давления.

Согласно закону Дарси, фильтрационный поток влажного воздуха через пористое тело пропорционален градиенту давления. Таким образом, уравнение переноса влаги за счет фильтрации пара в порах материала имеет вид

$$j_p = -k \frac{\partial p}{\partial n}, \quad (6.18)$$

где  $k$  — коэффициент газопроницаемости (точнее, паропроницаемости), кг/(м·Па·с).

Для вывода дифференциального уравнения переноса влаги запишем закон сохранения массы для произвольного конечного объема внутри влажного материала (рис. 29).

Согласно закону сохранения массы, скорость изменения количества влаги в объеме  $V$  равна алгебраической сумме входящих и выходящих через поверхность  $F$  потоков влаги:

$$\int_V \frac{\partial u}{\partial \tau} dV = -\oint j_n dF, \quad (6.19)$$

где  $j_n$  — результирующий поток влаги, возникающий за счет всех механизмов переноса массы.

Интеграл по замкнутой поверхности автоматически учитывает разные знаки проекций  $j_n$  потоков влаги на нормаль  $n$  к элементарной площадке  $dF$  всех входящих и выходящих потоков. Отрицательный знак перед интегралом по поверхности связан с тем, что в математике принято считать положительными потоки, направленные по нормали из объема наружу, тогда как по физическому смыслу закона сохранения положительное значение накопления влаги ( $du/dt > 0$ ) соответствует потоку этой влаги внутрь рассматриваемого объема.

Далее используем теорему Гаусса–Остроградского, согласно которой интеграл по замкнутой поверхности от нормальной составляющей вектора (в данном случае вектора потока влаги) равен объемному интегралу от дивергенции этого вектора:

$$\oint \sum j_n dF = \int_V \operatorname{div} \vec{j} dV, \quad (6.20)$$

где в декартовой прямоугольной системе координат скалярная величина дивергенции (расходимости) вектора имеет вид

$$\operatorname{div} \vec{j} = \frac{\partial j_x}{\partial x} + \frac{\partial j_y}{\partial y} + \frac{\partial j_z}{\partial z},$$

где  $j_x, j_y, j_z$  — проекции вектора  $\vec{j}$  на соответствующие координаты.

Необходимо отметить, что дивергенция суммы потоков равна сумме дивергенций; в нашем случае это потоки<sup>1</sup> уравнений (6.16–6.17)  $\vec{j}_m, \vec{j}_t$ .

Подставляя объемный интеграл (6.20) в уравнение (6.19) и объединяя все слагаемые в один объемный интеграл, получим:

$$\int_V \left( \frac{\partial u}{\partial \tau} + \operatorname{div} \vec{j}_m + \operatorname{div} \vec{j}_t \right) dV = 0. \quad (6.21)$$

Равенство нулю объемного интеграла для произвольно выбранного объема  $V$  в соотношении (6.21) соответствует равенству нулю подынтегрального выражения:

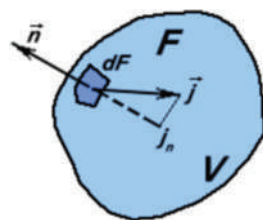


Рис. 29. К выводу уравнения переноса влаги внутри влажного материала

<sup>1</sup> Фильтрационный поток (6.18) мы опускаем, так как вывод уравнения (6.20) предполагает существование в порах влажного материала только жидкой фазы. Фазовый переход внутри материала отсутствует.

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + \operatorname{div} \vec{j}_m + \operatorname{div} \vec{j}_t = 0. \quad (6.22)$$

Подставляя выражения для потока влаги (6.16–6.17) получаем дифференциальное уравнение переноса влаги внутри влажного материала, которое справедливо в любой системе координат:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \operatorname{div}(D_m \operatorname{grad} u) + \operatorname{div}(D_m \rho_c \delta \operatorname{grad} t). \quad (6.23)$$

В этом уравнении коэффициенты  $D_m$ ,  $\delta$ ,  $\rho_c$  в общем случае являются переменными величинами и зависят от пространственных координат, температуры и собственно влажности материала. Это значительно усложняет расчет.

Кроме того, это уравнение необходимо дополнить уравнением баланса тепла, граничными и начальными условиями. Уравнение баланса тепла позволяет определить профиль температур в материале:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\operatorname{grad} at), \quad (6.24)$$

где  $a = \lambda / c_t \rho_c$  — коэффициент температуропроводности материала,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $c_t$  — теплоемкость материала,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $\rho_c$  — плотность сухого материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Начальные условия предполагают определенное распределение температуры и влажности внутри материала. Часто принимается равномерная влажность и температура:

$$u(x, y, z, \tau)|_{\tau=0} = u_0, \quad t(x, y, z, \tau)|_{\tau=0} = t_0.$$

Граничные условия определяются равенством потоков тепла и массы на поверхности материала:

$$\beta_p (p_{\text{п}} - p) = -D_m \frac{\partial u}{\partial n} - D_m \rho_c \delta \cdot \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_{t_n, u_n}, \quad (6.25)$$

где  $p$  — парциальное давление в потоке сушильного агента, Па;  $p_{\text{п}}$  — парциальное давление у поверхности материала, Па.

Граничное условие для потока тепла должно учитывать сток тепла за счет испарения с поверхности материала влаги:

$$\alpha(t - t_{\text{п}}) - q_{\text{исп}} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_{t_{\text{п}}}, \quad (6.26)$$

где  $t$ ,  $t_{\pi}$  — температура ( $^{\circ}\text{C}$ ) в потоке сушильного агента и у поверхности материала, а  $q_{\text{исп}}$  — количество тепла, затраченное на испарение влаги с поверхности материала ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), которое можно записать через количество испаренной влаги:

$$q_{\text{исп}} = \beta_p (p_{\pi} - p) \cdot r_{\text{исп}}. \quad (6.27)$$

Уравнения (6.22)–(6.23) справедливы в случае, если внутри материала нет фазовых превращений, т. е. испарение влаги происходит только с его поверхности. Однако при интенсивной сушке либо в конце периода падающей скорости сушки при температуре сушильного агента выше  $100^{\circ}\text{C}$  возможно испарение влаги внутри материала (см., например, рис. 23, б). В этом случае в граничных условиях необходимо учитывать перемещение поверхности испарения вглубь материала.

Аналитическое решение полной системы уравнений взаимосвязанных процессов тепло- и массопереноса внутри влажного тела в общем виде оказывается невозможным.

Расчеты при тех или иных допущениях осложняются тем, что кинетические коэффициенты влагопереноса определяются влажностью и температурой внутри материала. Кроме того, численные значения этих коэффициентов сильно зависят от пористой структуры конкретного материала.

Частные случаи решения уравнений (6.22–6.27) для тел правильной формы (шар, цилиндр, пластина) приведены в монографиях [41, 45]. Имеющиеся данные по значениям кинетических коэффициентов переноса для капиллярно-пористых материалов представлены в специальной литературе [53].

На практике не вся поверхность материала доступна для контакта с теплоносителем, форма частиц неправильная, материал полидисперсный. В процессе сушки происходят усадка скелета материала, изменение размера и конфигурации пор и другие изменения, которые невозможно учесть при математическом описании процесса.

В промышленных условиях параметры сушильного агента меняются вследствие взаимодействия с влажным материалом, поэтому необходимо учитывать изменение свойств как материала, так и сушильного агента.

Все указанные обстоятельства приводят к тому, что для расчета промышленных аппаратов используются более простые модели сушки, основанные либо на экспериментальных кривых сушки, либо на существенных упрощениях механизма процесса.

Тем не менее, теоретическое описание процесса позволяет понять сложную картину тепловлагопереноса процесса сушки и при определенных упрощениях аналитически или численно решить систему уравнений.

Наличие уравнений, описывающих процесс, вне зависимости от возможности их решения позволяет получать критерии подобия, которые имеют определенный физический смысл. Почленным делением отдельных слагаемых уравнений системы (6.22–6.27) могут быть получены безразмерные группы и критерии подобия, которые используются для обобщения экспериментальных данных процесса сушки:

$Fo = a\tau / R^2$  — тепловой критерий Фурье;

$Fo' = D_m\tau / R^2$  — массообменный критерий Фурье, характеризующие нестационарный режим тепло- и массопереноса в процессе сушки;

$Nu = \alpha d / \lambda$  — тепловой критерий Нуссельта, характеризующий соотношение конвективного и кондуктивного потоков тепла;

$Nu' = \alpha d / D_m$  — диффузионный критерий Нуссельта, характеризующие соотношение конвективного и диффузионного потоков массы;

$Pr = \nu / a$  — тепловой критерий Прандтля, характеризующий соотношение вязкостных и температуропроводных свойств теплоносителя;

$Pr' = \nu / D_m$  — диффузионный критерий Прандтля, характеризующий соотношение вязкостных и диффузионных свойств сушильного агента;

$Lu = D_m / a$  — критерий Лыкова, определяющий соотношение поля влажности и поля температуры во влажном материале;

$Ko = r_{исп} \Delta u / c \Delta \theta$  — критерий Коссовича — мера отношения количеств теплоты, расходуемых на испарение влаги и на нагрев влажного материала, и некоторые другие [76].

## 6.5.

### КИНЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПЕРЕНОСА ВЛАГИ В КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

Как правило, вычисление времени сушки для периода постоянной скорости сушки не вызывает затруднений. Несмотря на то, что в промышленных условиях параметры сушильного агента обычно меняются вследствие взаимодействия с влажным материалом, интегрирование уравнений для первого периода сушки дает несложный результат при условии постоянства коэффициентов переноса.

Для второго периода сушки, когда лимитирующей стадией является массоперенос внутри влажного материала, дело обстоит намного сложнее.

Если пренебречь термовлагопроводностью  $\delta$  и считать эффективный коэффициент влагопроводности в материале  $D_m$  постоянной величиной, получаем на первый взгляд простое уравнение в частных производных второго порядка



$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = D_m \nabla^2 u, \quad (6.29)$$

которое может быть решено аналитически для тел простых классических форм (безграничная плоская пластина, шар, бесконечный цилиндр, полубезграничный массив).

Рассмотрим некоторые примеры решения этого уравнения.

Для материала в виде плоских пластин можно принять, что влага перемещается в нем только в одном направлении (например, по оси  $x$ ), т. е. свести уравнение к одномерной задаче. С целью дальнейшего упрощения решения можно принять также, что коэффициент влагопроводности не зависит от влажности материала ( $D_m = \text{const}$ ), и пренебречь термовлагопроводностью. Тогда уравнение (6.23) значительно упростится:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = D_m \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \quad (6.30)$$

Дифференциальное уравнение (6.30) можно решить, зная закон распределения влажности в материале в начале сушки (начальное условие) и выражение для плотности потока влаги с поверхности материала в окружающую среду (граничное условие). Примем

$$u(x, \tau)|_{\tau=0} = u_0, \quad (6.30a)$$

$$\beta_p (p_n - p_1) = -D_m \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=\pm R}. \quad (6.30б)$$

Кроме того, для пластины мы можем записать условие симметрии, расположив начало оси  $x$  в центре пластины перпендикулярно ее поверхности (рис. 30):

$$-D_m \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0. \quad (6.30в)$$

Предположим, что вдали от пластины парциальное давление паров воды постоянно и равно  $p_1$ , а на границе пластины устанавливается равновесие

$$p_n = f^*(u, t), \quad (6.30г)$$

где  $t$  — температура у поверхности материала, °C;  $u$  — влажность на поверхности материала, кг/м<sup>3</sup>.

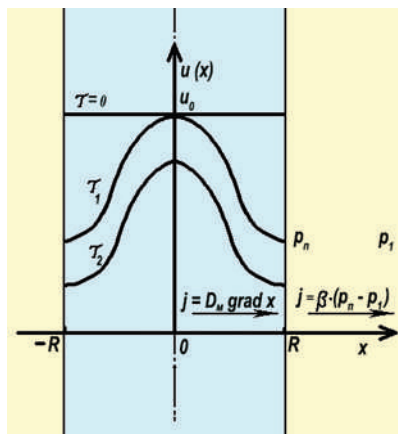


Рис. 30. Зависимость влажности от координаты  $x$  и  $\tau$  при сушке пластины

Для конкретизации вида зависимости (6.30г) необходимо знать температуру и влажность на поверхности материала. Если пренебречь временем прогрева материала, то в начальный момент сушки температура на поверхности будет равна температуре мокрого термометра. Однако по мере высыхания материала температура на поверхности будет повышаться.

Упростим задачу, приняв температуру на поверхности равной температуре мокрого термометра, а изотерму сушки аппроксимируем линейной зависимостью<sup>1</sup>:

$$u^* = a \cdot p,$$

где  $a$  — коэффициент равновесия, кг/м<sup>3</sup>/Па.

Тогда парциальное давление паров воды на поверхности материала определится как  $p_{\pi} = u(R, \tau) / a$ , а в потоке —  $p_1 = u_1 / a^2$ .

С целью получения решения в обобщенном виде в качестве искомой функции полезно использовать безразмерную влажность  $u$ :

$$u = \frac{u(x, \tau) - u_1}{u_0 - u_1}. \quad (6.30д)$$

Тогда математическое описание примет вид:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = D_m \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}; \quad (6.30)$$

$$-D_m \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=\pm R} = \frac{\beta_p}{a} u \Big|_{x=\pm R}; \quad (6.30б)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0; \quad (6.30в)$$

$$u|_{\tau=0} = 1. \quad (6.30а)$$

Согласно методу разделения переменных [41], предполагается, что искомая функция  $u(x, \tau)$  двух переменных может быть представлена в форме произведения двух функций  $U$  и  $X$ , каждая из которых зависит только от одной из переменных рассматриваемой задачи:

$$u(x, \tau) = U(\tau) X(x). \quad (6.31)$$

<sup>1</sup> Для нелинейной изотермы сушки аналитическое решение невозможно.

<sup>2</sup>  $u_1$  характеризует минимальную равновесную влажность материала, которая может быть достигнута в конце сушки при заданной температуре сушки.

Проект решения (6.31) подставляется в дифференциальное уравнение математического описания:

$$X \cdot U' = D_m \cdot U \cdot X'', \quad (6.32)$$

где  $U'$  — первая производная по времени;  $X''$  — вторая производная по координате.

Почленное деление уравнения (6.32) на проект решения (6.31) действительно приводит к разделению переменных:

$$\frac{U'}{U} = D_m \frac{X''}{X}, \quad (6.33)$$

поскольку в равенстве (6.33) левая и правая его части зависят каждая только от своей переменной (от  $\tau$  и от  $x$  соответственно).

Существование равенства, в котором левая и правая части являются функциями различных независимых переменных, возможно лишь в том случае, когда обе части равенства равны некоей постоянной величине. Поэтому, приравнявая левую и правую части равенства (6.33) постоянной величине  $-D_m k^2$  (знак минус соответствует смыслу задачи уменьшения влажности), имеем вместо одного дифференциального уравнения в частных производных систему двух уравнений, но уже в полных производных:

$$U' + D_m k^2 U = 0 ; \quad (6.34)$$

$$X'' + k^2 X = 0,$$

где  $k$  — некая, еще неизвестная константа; вторая степень при  $k$  берется для удобства последующих записей.

Решения дифференциальных уравнений (6.34) хорошо известны [29], так как этими уравнениями описываются процессы апериодических и затухающих гармонических колебаний:

$$U(\tau) = C_1 e^{-D_m k^2 \tau}; \quad (6.35)$$

$$X(x) = A \sin(kx) + B \cos(kx).$$

Таким образом, решение дифференциального уравнения (6.30) можно представить в виде

$$u(x, \tau) = [A \sin(kx) + B \cos(kx)] \exp(-D_m k^2 \tau), \quad (6.36)$$

где  $A, B$  и  $k$  — константы<sup>1</sup>; подлежащие нахождению из условий однозначности уравнения (6.30а–6.30в).

Для нахождения констант используем начальные и граничные условия.

1. Условие симметрии (6.30в):

$$\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=0} = Ak \cdot \cos(k \cdot 0) + Bk(-\sin(k \cdot 0)) = 0. \quad (6.37)$$

Второе слагаемое здесь тождественно равно нулю, а  $\cos(k \cdot 0) = 1$ , поэтому условие (6.36) может выполняться только в том случае, когда  $A = 0$ <sup>2</sup>. Таким образом, решение (6.35) заметно упрощается:

$$u(x, \tau) = B \cos(kx) \cdot \exp(-D_m \cdot k^2 \tau). \quad (6.37a)$$

2. Граничное условие на поверхности пластины (6.30б):

$$\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=R} = -Bk \sin(kR) \cdot \exp(-D_m k^2 \tau);$$

$$u|_{x=R} = B \cos(kR) \cdot \exp(-D_m k^2 \tau).$$

Подставляя полученные выражения в граничное условие (6.30 б), после сокращений получаем:

$$D_m k \sin(kR) = \frac{\beta}{a} \cos(kR). \quad (6.38)$$

Введем новую константу  $\mu = kR$ , после преобразования получаем

$$\operatorname{ctg} \mu = \frac{a\mu}{\operatorname{Bi}'}, \quad (6.39)$$

где

$$\operatorname{Bi}' = \frac{\beta R}{D_m} \quad (6.40)$$

— диффузионный критерий Био. Физический смысл критерия Био соответствует мере отношения интенсивности наружного массопереноса

<sup>1</sup> Здесь введены новые константы  $A = A \cdot C_1$ ,  $B = B \cdot C_1$ .

<sup>2</sup> Если положить  $k = 0$ , то из уравнения (6.34) следует  $u(x, \tau) = 0$ , т. е. неизменность искомой функции во времени, что противоречит физическому смыслу задачи.

к интенсивности переноса влаги внутри капиллярно-пористого материала, т. е. отношению величин, обратных соответствующим сопротивлениям.

Условие (6.39) называется характеристическим уравнением задачи, описываемой уравнением (6.30), и определяет те значения  $\mu$ , при которых выполняется граничное условие. Такие значения  $\mu$  составляют дискретный спектр и определяются решением трансцендентного уравнения (6.39). На рис. 31 показано множество значений  $\mu_i$ , которые являются решением данного уравнения.

Таким образом, общее решение линейного дифференциального уравнения системы (6.30) является суммой частных линейно независимых решений при каждом значении корня  $\mu_i$  характеристического уравнения (6.39):

$$u(x, \tau) = \sum_{i=1}^{\infty} B \cos\left(\mu_i \frac{x}{R}\right) \exp\left(-\mu_i^2 \frac{D_m \tau}{R^2}\right). \quad (6.41)$$

Нетрудно заметить, что этот ряд довольно быстро сходится.

А выражение  $Fo' = D_m \tau / R^2$  — не что иное, как безразмерный критерий Фурье.

3. Последняя константа  $B$  находится из начальных условий  $u|_{\tau=0} = 1$ :

$$u(x, 0) = \sum_{i=1}^{\infty} B_i \cos\left(\mu_i \frac{x}{R}\right) \exp\left(-\mu_i^2 \frac{D_m 0}{R^2}\right) = \sum_{i=1}^{\infty} B_i \cos(k_i x) = 1. \quad (6.42)$$

Равенство (6.42) формально является разложением единицы в ряд Фурье по косинусам.

Согласно известной методике определения коэффициентов разложения функций в гармонический ряд Фурье, левая и правая части выражения (6.42) умножаются на  $\cos(k_n x) dx$ , где индекс  $n$  — любое целое число, и затем проводится вычисление определенного интеграла в пределах  $0-R$ :

$$\int_0^R 1 \cdot \cos(k_n x) dx = \sum_{i=1}^{\infty} B_i \int_0^R \cos(k_i x) \cos(k_n x) dx, \quad (6.43)$$

где правая часть представлена в форме почленного интегрирования бесконечного сходящегося ряда Фурье.

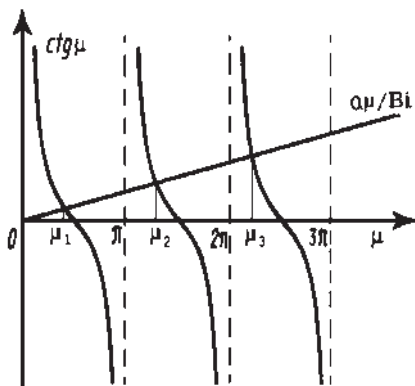


Рис. 31. Корни  $\mu$  характеристического уравнения (6.39)

Интегрирование левой части производится непосредственно и приводит к очевидному результату:  $(1/k_n)\sin(k_n R)$ , а в правой части также непосредственным вычислением интегралов показывается, что при  $n \neq i$  все члены ряда являются тождественными нулями, а ненулевым слагаемым остается единственный член бесконечного ряда при  $i = n$ , в котором вычисление интеграла приводит к следующему результату:

$$B_i \frac{R}{2\mu_i} (\mu_i + \sin \mu_i \cos \mu_i).$$

Приравнявая левую и правую части последнего равенства (с учетом условия  $i = n$ ), получим возможность определить последний коэффициент в решении (6.36):

$$B_i = \frac{2 \sin \mu_i}{\mu_i + \sin \mu_i \cos \mu_i}$$

Подстановка этого коэффициента в (6.36) приводит к окончательному виду решения задачи сушки плоской бесконечной пластины:

$$u(x, \tau) = 2 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_i}{\mu_i + \sin \mu_i \cos \mu_i} \cos\left(\mu_i \frac{x}{R}\right) \exp(-\mu_i^2 \text{Fo}'), \quad (6.44)$$

где  $\text{Fo}' = D_m \tau / R^2$  — диффузионный критерий Фурье.

По соотношению (6.44) можно рассчитать нестационарные поля влажности внутри пластины в различные моменты времени. Ряд (6.44) сходится тем быстрее, чем больше значение безразмерного времени — критерия Фурье.

Решение (6.44) получилось в безразмерной форме, где безразмерными являются не только влажность, но также время ( $\text{Fo}'$ ) и координата внутри тела ( $x/R$ ).

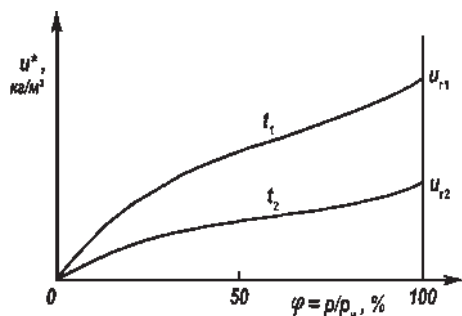


Рис. 32. Изотермы равновесия влажного материала

Уравнение (6.44) справедливо для линейной изотермы, постоянной температуры сушки, постоянного коэффициента теплопроводности и когда испарение влаги происходит с поверхности (весь материал смочен).

В действительности изотерма сушки имеет S-образную форму (см. рис. 32 и рис. 5). Поэтому аналитическое решение задачи имеет весьма ограниченный характер.

Сложно также определить момент, когда испарение влаги перей-

дет вглубь материала. В этом случае граничное условие (6.30б) потеряет свой физический смысл и расчеты будут неверными.

Интегрирование нестационарного профиля температуры (6.44) по толщине пластины  $x/R$  дает зависимость средней влажности тела от безразмерного времени  $Fo'$ :

$$\bar{u}(\tau) = \frac{1}{R} \int_0^R u(x, \tau) dx = 2 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \mu_i}{\mu_i + \sin \mu_i \cos \mu_i} \exp(-\mu_i^2 Fo'). \quad (6.45)$$

Представляют интерес частные случаи, когда интенсивность внешнего массопереноса очень высокая ( $Bi \rightarrow \infty$ ) и когда интенсивность внешнего массообмена очень мала ( $Bi \rightarrow 0$ ).

В первом случае характеристическое уравнение упрощается до равенства  $\cos(k_i R) = 0$ , характеристические числа становятся равными  $k_i R = \mu_i = \pi/2, 3\pi/2, \dots, (2i-1)\pi/2$ , а коэффициенты ряда — равными  $D_i = 2(-1)^{i+1}/\mu_i$ . Во втором случае мы имеем чисто внешнедиффузионную кинетику сушки, когда процесс сушки определяется отводом испаренной влаги с поверхности материала.

Аналогично, уравнение (6.29) можно решить для шара. Такой вариант сушки реализуется в аппаратах с кипящим (псевдооживленным) слоем материала, в пневматических и распылительных сушилках, когда частицы имеют форму, близкую к сферической.

В этом случае уравнение записывают в сферических координатах:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = D_m \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right). \quad (6.46)$$

Дифференциальное уравнение можно записать так [41]:

$$\frac{\partial(ur)}{\partial \tau} = D_m \left[ \frac{\partial^2(ur)}{\partial r^2} \right], \quad (6.46a)$$

т. е. свести его к уравнению вида (6.30).

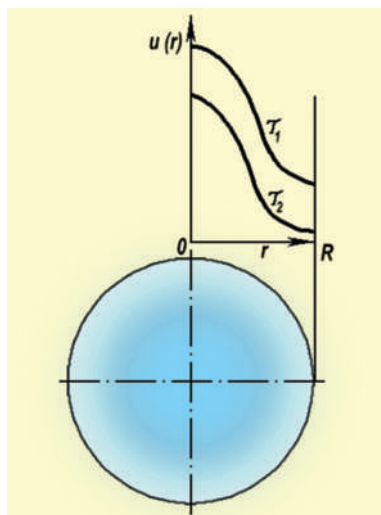


Рис. 33. Зависимость влажности от координаты  $r$  и  $\tau$  при сушке шара



Решение этого уравнения известно:

$$u(r, \tau) r = [A \sin(kr) + B \cos(kr)] \exp(-D_m k^2 \tau). \quad (6.47)$$

Аналогично (6.30д) введем безразмерную влажность:

$$u = \frac{u(x, \tau) - u_1}{u_0 - u_1}. \quad (6.48)$$

Граничные, начальные условия, и условие симметрии в центре шара запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} -D_m \frac{\partial u}{\partial r} \Big|_{x=R} &= \frac{\beta_p}{a} u \Big|_{x=R}; \\ \frac{\partial u}{\partial r} \Big|_{r=0} &= 0 \quad u|_{\tau=0} = 1. \end{aligned}$$

Таким образом, частное решение будет следующим:

$$u(r, \tau) = \left[ A \frac{\sin(kr)}{r} + B \frac{\cos(kr)}{r} \right] \exp(-D_m k^2 \tau). \quad (6.49)$$

Так как распределение влажности материала симметрично относительно центра, а влажность в центре шара ( $r = 0$ ) не может быть бесконечно большой, то постоянная  $B$  равна нулю; последнее необходимо, так как при  $r \rightarrow 0$   $\sin(kr)/r \rightarrow k$ , а  $\cos(kr)/r \rightarrow \infty$ .

Следовательно:

$$u(r, \tau) = A \frac{\sin(kr)}{r} \exp(-D_m k^2 \tau). \quad (6.49a)$$

Тогда, удовлетворяя частное уравнение (6.49a) граничному условию на поверхности шара, будем иметь:

$$\begin{aligned} -A \frac{kR \cos(kR) - \sin(kR)}{R^2} \exp(-D_m k^2 \tau) &= \\ &= \frac{\beta_p}{aD_m} A \cdot \cos(kR) \exp(-D_m k^2 \tau). \end{aligned} \quad (6.49b)$$

Выполняя преобразования:

$$-\frac{kR \cos(kR) - \sin(kR)}{R^2} = \frac{\beta_p R}{aD_m} \sin(kR), \quad (6.49b)$$

и вводя новые обозначения  $\mu = kR$ ,  $Bi' = \beta_p R / D_m$ , получаем характеристическое уравнение

$$\operatorname{tg} \mu = \frac{\mu}{1 - \operatorname{Bi}'/a}, \quad (6.50)$$

где  $\operatorname{Bi}'$  — диффузионный критерий Био,  $a$  — коэффициент равновесия.

Левая часть характеристического уравнения представляет собой тангенсоиду, а правая часть — прямую. Уравнение (6.50) имеет бесчисленное множество корней  $\mu_i = k_i R$ . При значениях  $\operatorname{Bi}'/a > 1$  прямая расположена в четвертом октанте, а при значениях  $\operatorname{Bi}'/a < 1$  — в первом.

Точки пересечения тангенсоиды и прямой дают значение корней  $\mu_i$ . На рис. 34 видно, что имеется бесчисленное множество корней, причем каждый последующий больше предыдущего.

При  $\operatorname{Bi}'/a = \infty$  тангенс угла наклона прямой равен нулю и прямая совпадает с осью абсцисс; тогда характеристические числа будут пропорциональны  $\pi$ , т. е.  $\mu_n = \pi n$ . В этом случае мы имеем чисто внутридиффузионную кинетику сушки.

Если  $\operatorname{Bi}'/a = 1$ , то прямая совпадает с осью ординат. В этом случае  $\mu_n = (2n - 1)\pi/2$ .

Если  $\operatorname{Bi}'/a \rightarrow 0$ , то тангенс угла наклона прямой равен единице  $\mu_1 \rightarrow \sqrt{3\operatorname{Bi}'/a}$ , так как из характеристического уравнения следует

$$\operatorname{ctg} \mu = -\frac{\operatorname{Bi}'/a - 1}{\mu_1} = \frac{1}{\mu_1} - \frac{\mu_1}{3} - \frac{\mu_1^2}{3^2 5} - \dots$$

Ограничиваясь двумя членами ряда в разложении  $\operatorname{ctg} \mu$ , получаем  $\mu_1^2 = 3\operatorname{Bi}'/a$ .

Остальные корни определяются из уравнения  $\operatorname{tg} \mu = \mu$  при  $\operatorname{Bi}' \rightarrow 0$ .

Так как имеется бесчисленное множество постоянных  $\mu_n$ , определяемых из характеристического уравнения (6.50), общее решение задачи может быть записано как сумма всех частных решений:

$$u(r, \tau) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{A_i \sin\left(\mu_i \frac{r}{R}\right)}{r} \exp\left(-\mu_i^2 \frac{D_M \tau}{R^2}\right). \quad (6.51)$$

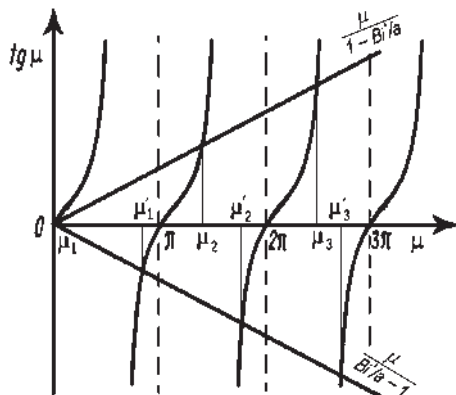


Рис. 34. Корни  $\mu$  характеристического уравнения (6.50)

Постоянные  $A_i$  определяем из начального условия  $u(r, 0) = 1$ . Имеем

$$u(r, 0) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{A_i \sin\left(\mu_i \frac{r}{R}\right)}{r} = 1. \quad (6.52)$$

Для определения констант  $A_i$  используем метод Фурье. Умножим обе части равенства (6.52) на  $r \cdot \sin\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) dr$ , где  $\mu_n$  —  $n$ -й корень характеристического уравнения (6.50), и проинтегрируем от 0 до  $R$ :

$$\int_0^R r \cdot \sin\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) dr = \sum_{i=1}^{\infty} A_i \int_0^R \sin\left(\mu_i \frac{r}{R}\right) \cdot \sin\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) dr. \quad (6.53)$$

Интеграл левой части равенства (6.53) вычисляется как

$$\int_0^R r \cdot \sin\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) dr = \frac{R^2}{\mu_n^2} (\sin \mu_n - \mu_n \cos \mu_n), \quad (6.54)$$

поскольку  $\int x \sin x = \sin x - x \cos x$ .

Интеграл правой части равенства (6.53) может быть представлен так [41]:

$$\int_0^R \sin\left(\mu_i \frac{r}{R}\right) dr \cdot \sin\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) dr = \frac{R}{\mu_i^2 \mu_n^2} \left( \frac{\mu_i}{\mu_n} \operatorname{tg} \mu_n \operatorname{ctg} \mu_i - 1 \right). \quad (6.55)$$

Из характеристического уравнения (6.50) можно написать:

$$\frac{\mu_i}{\mu_n} \operatorname{tg} \mu_n \cdot \operatorname{ctg} \mu_i = \frac{\mu_i}{\mu_n} \cdot \frac{\mu_n}{\mu_i} = 1.$$

Следовательно, интеграл (6.54) равен нулю при  $n \neq i$ . Если  $n = i$ , интеграл (6.54) будет равен

$$\int_0^R \sin^2\left(\mu_i \frac{r}{R}\right) dr = \frac{R}{\mu_i} (\mu_i - \sin \mu_i \cdot \cos \mu_i). \quad (6.56)$$

Таким образом, все интегралы в соотношении (6.53) равны нулю за исключением одного, когда  $n = i$ . Следовательно, постоянная  $A_i$  равна:

$$A_i = \frac{2R(\sin \mu_i - \mu_i \cos \mu_i)}{\mu_i (\mu_i - \sin \mu_i \cdot \cos \mu_i)}, \quad (6.57)$$

где  $\mu_i$  — корни характеристического уравнения (6.50).

В окончательной форме решение задачи влагопереноса в теле сферической формы можно записать следующим образом:

$$u(r, \tau) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2(\sin \mu_i - \mu_i \cos \mu_i)}{\mu_i (\mu_i - \sin \mu_i \cdot \cos \mu_i)} \frac{R \sin\left(\mu_i \frac{r}{R}\right)}{r} \cdot \exp\left(-\mu_i^2 \frac{D_m \tau}{R^2}\right). \quad (6.58)$$

Интегрируя полученное уравнение по радиусу шара, находим зависимость средней влажности материала от времени:

$$\bar{u}(\tau) = 6 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(\sin \mu_i - \mu_i \cos \mu_i)^2}{\mu_i^3 (\mu_i - \sin \mu_i \cdot \cos \mu_i)} \exp\left(-\mu_i^2 \frac{D_m \tau}{R^2}\right). \quad (6.58a)$$

Как видим, решение дифференциальных уравнений влагопереноса в капиллярно-пористых телах правильной формы, при условии постоянства коэффициента теплопроводности  $D_m$ , ничем не отличается от решений уравнений нестационарной теплопроводности, изложенных в книге Лыкова [40]. Основное отличие переноса влаги от теплопроводности — это значительная зависимость коэффициентов влагопереноса от влажности, температуры и свойств материала, и усложнение задачи при перемещении поверхности испарения влаги внутрь материала.

Приведенные выше решения получены при допущении постоянства коэффициентов переноса. Это справедливо либо при медленной сушке с малыми значениями градиентов влажности материала и температуры, либо в пределах достаточно малых зон, на которые разбивается объем влажного материала. Первое условие не выполняется при интенсивных процессах сушки, а второе требует большого количества вычислений.

Рассмотрим другую модель сушки влажного пористого материала, которая более подходит для случая интенсивной сушки материала, когда поверхность испарения углубляется внутрь последнего. В некотором смысле этот случай аналогичен кинетике послойной отработки материала в процессах экстрагирования и адсорбции. Предполагается [65], что капиллярно-пористая структура влажного материала и начальное распределение влаги в нем изотропны. Скорость удаления влаги считается зависящей от двух факторов: теплопереноса и фильтрации паров влаги. По мере сушки происходит углубление локализованного фронта испарения. К фронту испарения тепло поступает за счет теплопроводности сухой части материала, где оно расходуется на превращение жидкости в пар. В результате испарения внутри пористой структуры создается некоторое избыточное давление, под действием которого пары фильтруются от фронта испарения к наружной поверхности.

Скорость удаления влаги из материала оказывается зависящей от двух последовательных сопротивлений: термического и фильтрационного.

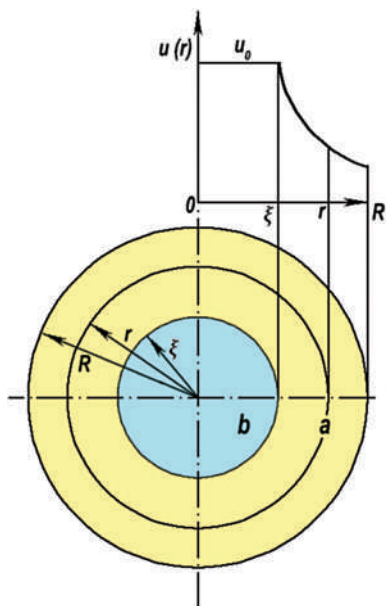


Рис. 35. Схема послойного продвижения фронта испарения при сушке шара:

$a$  — сухая зона;  $b$  — влажная зона

Стыковка потенциалов переноса тепла и парообразной влаги производится на основании предположения о том, что давление паров в месте их генерации (фронт испарения) является насыщенным и зависит от температуры, которая устанавливается в данном месте в процессе сушки.

Рассмотрим сушку сферической частицы (рис. 35). Поля температуры и избыточного давления в сухом слое материала будем считать квазистационарными. Следовательно, для сферического тела поля потенциалов переноса в сухой части материала описываются уравнением стационарной теплопроводности и уравнением стационарного переноса паров воды под действием градиента давления:

$$\frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dt}{dr} = 0, \quad \frac{d^2 p}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dp}{dr} = 0. \quad (6.59)$$

Несмотря на то, что поля температуры и давления стационарны, сам фронт испарения продвигается к центру шарообразной частицы  $\xi = \xi(\tau)$ .

При граничном условии первого рода на внешней поверхности частицы будем иметь  $t|_{x=R} = t_0$ . Давление на внешней границе тела равно общему давлению окружающей среды:  $p|_{x=R} = p_0$ . На самом фронте испарения вследствие сделанных выше предположений должны соблюдаться соотношения  $t|_{x=\xi} = t^*$  и  $p|_{x=\xi} = p^*$ , в которых функциональная связь давления паров  $p^*$  с температурой  $t^*$  определяется известным соотношением (3.2) для насыщенного пара  $p^* = f(t)$ .

Оба уравнения (6.59) легко решаются. После первого интегрирования получим

$$\frac{dt}{dr} = \frac{C_1}{r^2}.$$

После второго интегрирования получаем

$$t = C_2 - \frac{C_1}{r},$$

где константы интегрирования определяются из граничных условий.

Окончательный вид решения уравнений (6.59):

$$\frac{t_0 - t}{t_0 - t^*} = \frac{\xi}{r} \frac{R - r}{R - \xi}, \quad (6.60)$$

$$\frac{p - p_0}{p^* - p_0} = \frac{\xi}{r} \frac{R - r}{R - \xi}, \quad (6.61)$$

где  $r$  — текущий радиус в пределах сухого слоя материала  $(R - \xi) \leq r \leq R$ .

Условие того, что все тепло, подводимое к фронту испарения теплопроводностью, полностью расходуется на испарение влаги, имеет вид

$$4\pi\xi^2\lambda_t \left. \frac{dt}{dr} \right|_{\xi} = \rho_{\tau} u_0 r_0 \frac{d\xi}{d\tau} 4\pi\xi^2. \quad (6.62)$$

Все количество пара, генерируемое на линии испарения, удаляется из материала за счет процесса фильтрования через слой высушенного материала:

$$4\pi\xi^2\rho_{\pi} \frac{k}{\mu_{\pi}} \frac{dp}{dr} \cdot \xi = \rho_{\tau} u_0 \frac{d\xi}{d\tau} 4\pi\xi^2. \quad (6.63)$$

В уравнениях (6.62)–(6.63)  $\rho_{\tau}$ ,  $\rho_{\pi}$  — плотность сухого материала и пара соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $u_0$  — начальная влажность материала, кг/кг;  $\lambda_t$  — теплопроводность материала, Вт/(м·К);  $k$  — паропроницаемость сухого материала, м<sup>2</sup>;  $\mu_{\pi}$  — динамический коэффициент вязкости пара, Па·с;  $r_0$  — теплота испарения влаги, Дж/кг.

Из уравнений (6.59)–(6.63) выявляется связь между температурой и избыточным давлением на фронте испарения:

$$t_0 - t^* = \rho_{\pi} \frac{k r_0}{\mu_{\pi} \lambda_t (p^* - p_0)}. \quad (6.64)$$

Используя решение (6.60) для подстановки в уравнение (6.62), получим дифференциальное уравнение, определяющее скорость продвижения фронта в глубь частицы:

$$\xi r_0 \rho_{\tau} u_0 \frac{d\xi}{d\tau} = \frac{\lambda_t R (t_0 - t^*)}{R - \xi}. \quad (6.65)$$

При равномерном начальном распределении влаги исходное положение фронта испарения совпадает с наружной поверхностью частицы, что определяет начальное условие для уравнения (6.65):  $\xi|_{\tau=0} = R$ .

Интегрирование соотношения (6.65) приводит к следующему результату:

$$\frac{R\xi^2}{2} - \frac{\xi^3}{3} = \frac{R^2}{6} - \frac{\lambda_t R(t_0 - t^*)}{r_0 \rho_\tau u_0} \tau. \quad (6.66)$$

Введя в уравнение (6.66) относительную степень отработки (высыхания) сферической частицы  $\gamma = (\xi/R)^3$ , получим:

$$\frac{\gamma^{2/3}}{2} - \frac{\gamma}{3} = \frac{1}{6} - \frac{\lambda_t (t_0 - t^*)}{r_0 \rho_\tau u_0 R^2} \tau. \quad (6.67)$$

Время полного высыхания частицы  $\tau_m$  определяется из условия  $\gamma = 0$ :

$$\tau_m = \frac{r_0 \rho_\tau u_0 R^2}{6\lambda_t (t_0 - t^*)}. \quad (6.68)$$

Скорость относительной отработки вычисляется дифференцированием уравнения (6.67):

$$\frac{d\gamma}{d\tau} = \frac{3\lambda_t (t_0 - t^*) \gamma^{1/3}}{r_0 \rho_\tau u_0 R^2 (\gamma^{1/3} - 1)}. \quad (6.69)$$

Следует полагать, что выполнение сформулированных выше условий данной модели наиболее вероятно для крупнопористых высоковлажных материалов при жестких режимах сушки (высокие температуры сушильного агента), когда количества тепла, расходуемые на нагревание как сухой, так и влажной зон материала, пренебрежимо малы по сравнению с теплотой испарения.

Сложность использования данной модели заключается в отсутствии в справочной литературе коэффициентов проницаемости пара<sup>1</sup> в капиллярно-пористых телах, подвергаемых сушке.

Кроме того, сложно определить границу, где заканчивается обычный градиентный механизм сушки влажной частицы и начинается послойное испарение влаги внутри материала.

Так при атмосферном давлении при температуре воздуха выше 100 °С испарение влаги начинается с поверхности частицы материала уже при температуре мокрого термометра при 50 °С. Углубление зоны испарения происходит позже, когда скорость влагопереноса к поверхности частицы снизится до критического уровня. В соответствии с данной моделью на границе раздела фаз сразу устанавливается температура 99,8 °С — температура насыщенного пара при атмосферном давлении. То есть испарение влаги происходит не при температуре

<sup>1</sup> Коэффициент паропроницаемости  $\mu$ , мг/(м·ч·Па), используемый в строительной практике, имеет совсем другой физический смысл, чем коэффициент проницаемости пара  $k$ , м/с, в законе Дарси, применяемый здесь для капиллярно-пористого тела.



мокрого термометра, а при температуре насыщенных паров влаги, что противоречит общепринятым представлениям о процессе сушки.

Таким образом, применимость данной модели очень ограничена и возможна лишь при температуре сушильного агента выше 150–200 °С при атмосферном давлении и 100–150 °С под вакуумом.

### 6.6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЛАГОПЕРЕНОСА

Экспериментальное определение кинетических коэффициентов влагопереноса в принципе аналогично определению коэффициентов теплопереноса, подробно описанных в [54]. Помимо тепловых коэффициентов (теплопроводность, теплоемкость) определению подлежат коэффициенты влагопроводности  $D_m$  и термовлагопроводности  $\delta$ , которые входят в уравнения (6.16)–(6.17):

$$j = j_m + j_t = -D_m \left( \frac{\partial u}{\partial n} + \rho_c \delta \frac{\partial t}{\partial n} \right). \quad (6.76)$$

Экспериментальное определение кинетических характеристик капиллярно-пористых материалов проводится двумя основными методами: стационарным и нестационарным [44].

*Стационарные методы определения коэффициентов влагопроводности.* В этом случае используется уравнение переноса влаги в форме (6.16) при изотермических условиях:

$$j_m = -D_m \frac{\partial u}{\partial n}. \quad (6.76a)$$

Исследованию подлежат объекты правильной формы (пластина, цилиндр, шар). Коэффициент влагопроводности<sup>1</sup> определяется после установления стационарного режима при заданных условиях опыта.

Схема лабораторного метода представлена на рис. 36. Образец материала 3 в виде цилиндра устанавливается герметично на цилиндрическом стакане 1, который наполнен водой. Боковая поверхность и место соединения материала со стаканом покрыты влагоизоляцией. Стакан с образцом ставится в эксикатор 2 над раствором серной кислоты определенной концентрации, а эксикатор помещается в термостат.

---

<sup>1</sup> Коэффициент влагопроводности также называют коэффициентом эффективной диффузии, коэффициентом потенциалопроводности. Коэффициент влагопроводности имеет размерность коэффициента диффузии ( $m^2/c$ ).

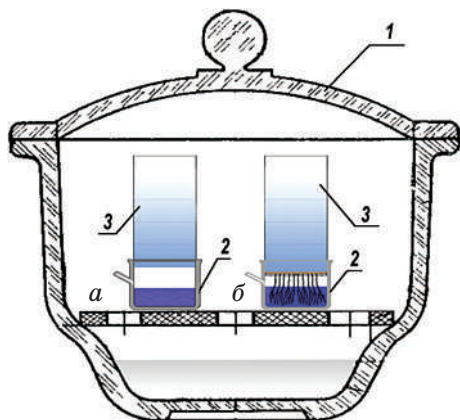


Рис. 36. Схема экспериментального определения влагопроводности при влажности материала:

*a* — ниже гигроскопической; *б* — выше максимальной гигроскопической; 1 — эксикатор; 2 — стеклянный стакан; 3 — цилиндрический образец материала

Таким образом, нижняя поверхность образца контактирует с воздухом, насыщенным парами воды (влажность 100 %), а верхняя часть контактирует с осушенным воздухом, влажность которого определяется в зависимости от концентрации серной кислоты.

Периодическое взвешивание образца со стаканом позволяет рассчитать убыль массы воды и соответственно поток  $j_m = \Delta M / (\tau \cdot S)$ , где  $\Delta M$  — убыль массы воды за время  $\tau$ , а  $S$  — площадь сечения торца цилиндрического образца.

По истечении некоторого времени (от 20 до 1500 ч) количество влаги, прошедшей через образец в единицу времени, будет сохраняться постоянным. После достижения стационарного

состояния фиксируют поток массы  $j_m$ , а образец быстро разрезают на слои и определяют влажность каждого слоя. Обычно количество слоев не менее десяти, их толщина 10–50 мм. По полученным данным влажности строят кривую распределения влажности по оси цилиндрического образца. Из кривой распределения влажности определяется градиент влажности в направлении оси цилиндра, а по убыли веса — интенсивность испарения, т. е. количество влаги, испарившейся в единицу времени через единицу поверхности.

Коэффициент влагопроводности определяется из уравнения (6.76а)

Если распределение влажности по оси цилиндра имеет вид прямой, то коэффициент влагопроводности не будет зависеть от влажности материала в этом интервале. Если распределение влажности имеет вид кривой, то методом графического дифференцирования можно определить градиент влажности для различных значений влажности материала, а затем по формуле (6.76а) рассчитать коэффициент  $D_m$  для этих значений. В результате получаем зависимость коэффициента влагопроводности от влажности материала.

При контакте нижней поверхности образца материала с насыщенным парами воды воздухом влажность материала равна максимальной гигроскопической<sup>1</sup> влажности (рис. 36, *a*). Поэтому интервал измене-

<sup>1</sup> Напомним, гигроскопическая влажность — это влажность материала, находящаяся в равновесии с влажным воздухом, а максимальная гигроскопическая влажность материала устанавливается при контакте его с воздухом, насыщенным парами воды при определенной температуре.

ния влажности по высоте цилиндра ограничен его размерами и лежит в гигроскопической области.

Для получения значений коэффициентов влагопроводности при значениях влажности материала больше гигроскопической используют капиллярный метод увлажнения материала, представленный на рис. 36, б). Для этого к нижней поверхности цилиндра при помощи металлической сетки плотно прижимается суконный диск, который непрерывно смачивается водой посредством фитилей.

Сократить время достижения стационарного состояния позволяет экспериментальная установка, изображенная на рис. 37. Образец материала 3 помещается в металлический цилиндр 2, который сверху герметично закрывается крышкой 1. Снизу образец материала контактирует с водой, находящейся в резервуаре 4, через фитили 6, по которым вода поднимается за счет капиллярных сил и смачивает войлочную подкладку 5. Для уравнивания давления в резервуаре и верхней части образца используют резиновую трубку 7 с осушителем 8.

Над образцом через трубки 9 продувается воздух с определенной влажностью. Поток массы  $j_m$  определяют по количеству влаги, которую конденсируют из потока воздуха, прошедшего над образцом, а профиль влажности находят после установления стационарного состояния, разрезая образец на слои и определяя влажность для каждого слоя.

В настоящее время имеются современные приборы, описанные в главе 2.1, которые позволяют быстро определить коэффициенты влагопроводности, не разрушая образец за счет использования не прямых методов измерения влажности.

Для получения зависимости влагопроводности  $D_m$  от влажности и температуры проводят опыты при различных значениях средней влажности и температуры образца.

Обычно значения коэффициентов влагопроводности повышаются при увеличении температуры. Зависимость влагопроводности от влаж-

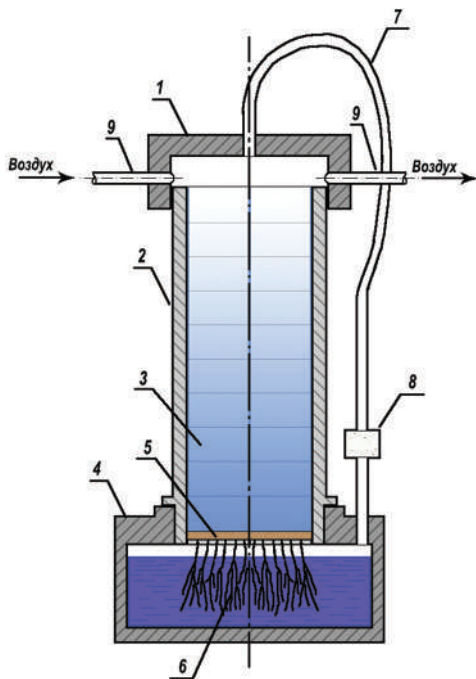


Рис. 37. Схема экспериментальной установки для определения влагопроводности стационарным методом:

1 — крышка, 2 — цилиндрический корпус, 3 — образец материала, 4 — корпус водяного резервуара, 5 — войлочная прокладка на металлической сетке, 6 — фитили для капиллярного подъема воды, 7 — трубка для уравнивания давления, 8 — осушитель, 9 — трубки для прокачки воздуха

ности имеет более сложную форму и зависит от структуры капиллярно-пористого материала.

Стационарные методы могут быть применимы к любым материалам (твердым, волокнистым, пастообразным, сыпучим). Недостаток этих методов состоит в значительной продолжительности выхода образца на стационарный режим.

*Нестационарные методы* определения кинетических коэффициентов влажных материалов предусматривают проведение процесса сушки с материалом правильной формы при условиях, для которых имеется аналитическое решение.

В частности, для пластины, цилиндра и шара имеются аналитические решения (см. главу 6.5). Сопоставляя эти решения с экспериментальными данными, можно вычислить коэффициент влагопроводности  $D_m$ .

Удобно использовать найденные решения для средней влажности материала  $\bar{u}(\tau)$  в виде зависимости

$$\bar{u} = f(\text{Fo}', \text{Bi}'). \quad (6.77)$$

Для того чтобы упростить расчет коэффициента влагопроводности, используют метод регулярного режима, описанный в [65]. Суть метода заключается в том, что при достаточно больших значениях критерия  $\text{Fo}'$  можно пренебречь всеми членами ряда, входящими в решение уравнений диффузии, оставив только первый член.

Тогда для средней влажности в шаре решение уравнения диффузии можно представить в виде

$$\bar{u}(\tau) \cong 6 \frac{\exp\left(-\mu_1^2 \frac{D_m \tau}{R^2}\right)}{\mu_1^2} \quad (6.78)$$

или в логарифмическом виде

$$\ln(\bar{u}) = A - \left(\frac{\mu_1}{R}\right)^2 D_m \tau, \quad (6.79)$$

где  $A$  — константа.

Экспериментально определенные величины средней концентрации влаги в теле сферической формы изображают графически в полулогарифмических координатах  $\ln(\bar{u}) - \tau$ . Тангенс угла наклона прямой линии (в области регулярного режима), согласно уравнению (6.79), связан с коэффициентом влагопроводности (см. рис. 38):

$$\text{tg}\theta = \left(\frac{\mu_1}{R}\right)^2 D_m. \quad (6.80)$$

Определив величину  $\operatorname{tg} \theta$ , по формуле (6.80) можно рассчитать значение  $D_m$ .

В опытах по определению коэффициента эффективной диффузии стремятся осуществить граничные условия первого рода, что практически обеспечивается условием  $Bi > 50$ , и соответствует протеканию процесса во внутريدиффузионной<sup>1</sup> области сушки (влияние внешнего массообмена ничтожно мало).

Прямая линия на экспериментальном графике в полулогарифмических координатах  $\ln(\bar{u}) - \tau$  свидетельствует о постоянстве коэффициента влагопроводности  $D_m$ .

Схема экспериментальной установки [61] для определения коэффициента влагопроводности в образце сферической формы представлена на рис. 39.

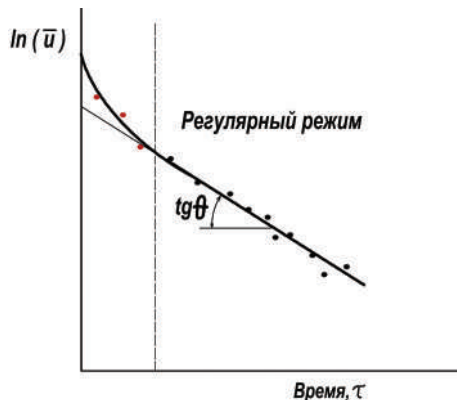


Рис. 38. Определение коэффициента влагопроводности в теле сферической формы по экспериментальным точкам средней влажности образца в зависимости от времени

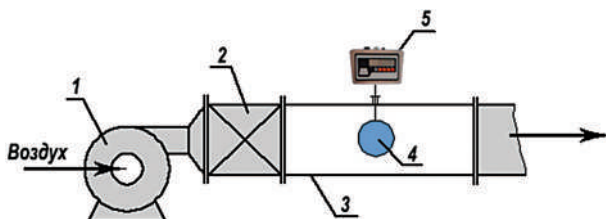


Рис. 39. Схема устройства для измерения коэффициента влагопроводности в образце сферической формы:

1 — вентилятор; 2 — кондиционер; 3 — воздуховод; 4 — образец влажного материала; 5 — весы

Центробежный вентилятор 1 подает очищенный от пыли воздух в кондиционер 2, который обеспечивает поддержание постоянных во времени относительной влажности и температуры воздуха. Воздух подается с постоянной скоростью через воздуховод 3, в котором размещен образец 4 сферической формы, изготовленный из исследуемого материала. Образец 4 подвешен на весоизмерительном устройстве 5, который фиксирует вес образца и передает данные на компьютер.

<sup>1</sup> Внутريدиффузионная кинетика характеризуется медленной диффузией внутри тела и быстрым отводом влаги с поверхности (см. рис. 23 на с. 59). Для создания таких условий необходимо выполнять эксперимент при невысоких скоростях сушильного агента, небольшом отклонении парциального давления паров воды от равновесного значения и, по возможности, при невысокой температуре.

Перед проведением измерений образец материала сферической формы в течение достаточно большого промежутка времени выдерживают в эксикаторе для получения практически однородного начального распределения влагосодержания во внутренних точках образца.

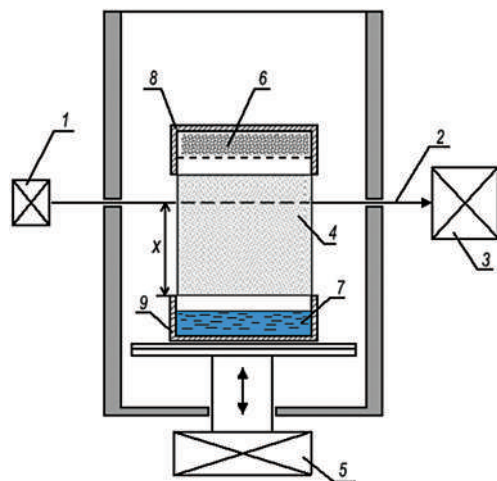
После завершения опыта исследуемый образец досушивают до постоянного веса и определяют массу абсолютно сухого образца. Полученные экспериментальные данные обрабатывают по расчетным соотношениям, приведенным выше.

Использование современных методов косвенного измерения влажности, таких как гамма-излучение и ЯМР, позволяет измерять профиль влажности, не разрушая образец.

На рис. 40 показана установка, позволяющая определить профиль влажности в материале гамма-методом [14, 91, 92].

Гамма-метод определения влажности основан на ослаблении интенсивности гамма-излучения влажного материала. Ослабление интенсивности гамма-излучения во влажном материале зависит от его плотности в сухом состоянии и содержания влаги в материале.

Экспериментальный стенд представляет собой металлический корпус, внутри которого помещается исследуемый образец 4. При этом верхняя 8 и нижняя 9 части образца находятся в герметичных камерах, а боковые поверхности влагоизолированы. Образец просвечивается узким



**Рис. 40.** Схема экспериментального стенда для определения профиля влажности материала в образце капиллярно-пористого материала:

1 — источник гамма-излучения; 2 — пучок гамма-лучей; 3 — сцинтилляционный детектор гамма-квантов; 4 — образец материала; 5 — координатное устройство; 6 — сорбент; 7 — вода; 8 — верхняя камера; 9 — нижняя камера

пучком гамма-излучения, интенсивность которого на выходе регистрируется сцинтилляционным детектором гамма-квантов 3. Возможность вертикального перемещения образца относительно гамма-пучка позволяет получить распределение влажности по его высоте.

Исследования процессов влагопереноса могут проводиться при двух различных режимах влагонасыщения: капиллярной пропитке и сорбционном увлажнении. Эксперименты проводятся в изотермических условиях. В режиме капиллярной пропитки нижняя поверхность образца соприкасается с водой, а при сорбционном увлажнении — с воздухом, насыщенным парами воды.

Для расчета коэффициентов материалов диффузии использу-



ется уравнение нестационарной диффузии в полубезграничное тело [41]. Поскольку коэффициент теплопроводности зависит от координаты  $x$ , а следовательно, от влажности материала, уравнение диффузии для одномерного случая записывают в виде

$$\frac{du}{d\tau} = -\frac{d}{dx} \left( D_m \frac{du}{dx} \right). \quad (6.81)$$

Начальные условия:  $\tau = 0, 0 < x < \infty : u = u_0 = 0$ .

Граничные условия:  $\tau > 0, x = 0 : u = u_1$ .

$$\tau > 0, x = \infty : u = u_0, \frac{\partial u}{\partial x} = 0.$$

Последнее граничное условие свидетельствует о том, что влагоперенос осуществляется в полубесконечном теле, поэтому в экспериментах протяженность образца по координате  $x$  должна быть достаточной, чтобы исключить изменение влажности на верхней границе образца.

Для решения уравнения (6.81) используется метод Больцмана–Матано [14]. Математический смысл метода заключается в том, что если начальные и граничные условия, которым удовлетворяет уравнение диффузии, можно выразить через  $s = x / \sqrt{\tau}$ , то полученное решение также представляет собой функцию только  $x / \sqrt{\tau}$  и является единственным.

При подстановке переменной Больцмана  $s = x / \sqrt{\tau}$  в уравнение (6.81) получаем уравнение в полных производных:

$$-\frac{s}{2} \frac{du}{ds} = -\frac{d}{ds} \left( D_m \frac{du}{ds} \right). \quad (6.82)$$

Граничные и начальные условия:

$$s = 0 : u = u_0 = 0; s = \infty : u = u_0, \frac{du}{ds} = 0.$$

После преобразования уравнения (6.82) можно получить выражение для определения коэффициента диффузии влаги:

$$D_m = -\frac{1}{2} \frac{1}{du/ds} \int_{u_0}^u s du. \quad (6.83)$$

Таким образом, если полученные экспериментальные данные представить в координатах  $u - x / \sqrt{\tau}$ , можно численно рассчитать коэффициенты теплопроводности в зависимости от выбранного диапазона влажности материала.

Экспериментальные данные [34, 40] показывают, что коэффициенты теплопроводности могут значительно, на несколько порядков, изменяться при изменении влажности материала. Особенно это касается



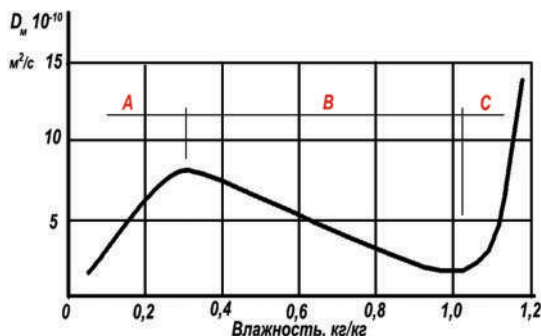


Рис. 41. Изменение коэффициента влагопроводности  $D_m$  (м<sup>2</sup>/с) древесины (сосна) от ее влажности при температуре 30 °С

таких материалов, как древесина, керамика, пористые блочные конструкции.

Характер изменения коэффициента влагопроводности при различной влажности материала определяется формой связи влаги с телом и видом влагопереноса. Для типичных капиллярнопористых тел с повышением влажности коэффициент возрастает, а при больших значениях влажности становится постоянным (рис. 41).

На рис. 42 приведены зависимости коэффициента влагопроводности от влажности некоторых строительных материалов при температуре 20 °С.

Как видно из графиков, в любом случае при уменьшении влажности материала коэффициент влагопроводности существенно снижается. Следовательно, чем меньше требуемая конечная влажность материала, тем больше времени необходимо для сушки материала<sup>1</sup>.

Зависимость коэффициента влагопроводности от температуры имеет ярко выраженный характер и аппроксимируется эмпирическим выражением

$$D_m = D_m \left( \frac{T}{T_0} \right)^n,$$

где по данным разных авторов  $n = 10-14$ , а  $T_0 = 273-290$ .

При повышении температуры характер зависимости коэффициента влагопроводности от влажности сохраняется в области невысоких температур. При повышенных температурах изменяется механизм переноса влаги, увеличивается доля влаги, перенос которой происходит в виде пара, и зависимость коэффициента влагопроводности от влажности изменяет свой вид.

Помимо переноса тепла из внутренних слоев материала к его поверхности, возникает обратный, так называемый термоградиентный поток

<sup>1</sup> Для многих материалов конечную влажность принимают равную равновесной с окружающим воздухом, где будет храниться продукция. Если требуется меньшая влажность, продукт должен быть герметично упакован.

влаги, направленный в противоположную сторону. Этот поток вызван градиентом температур внутри материала. Интенсивность термоградиентного потока характеризуется коэффициентом термовлагопроводности  $\delta$ , который был определен в главе 6.2, уравнение (6.17).

Экспериментальное определение коэффициента термовлагопроводности  $\delta$  позволяет более точно рассчитать потоки влаги при сушке крупноблочных материалов.

Сущность экспериментального метода заключается в создании в образце влажного материала градиента температуры. Экспериментальные установки подробно описаны А. В. Лыковым в [44]. Экспериментальная установка аналогична представленной на рис. 37, однако внутри образца и на его поверхности установлены датчики температуры.

Сначала проводится опыт при изотермических условиях, когда температура воздуха в верхней и нижней камерах остается одинаковой. Из этого опыта определяется коэффициент влагопроводности.

Затем проводится опыт при наличии перепада температуры в образце. В этом случае в верхнюю камеру поступает предварительно нагретый в специальном термостате воздух, а в нижней камере поддерживается более низкая температура. Измеряются интенсивность испарения, температурный градиент внутри образца и распределение влажности по высоте образца в стационарном состоянии.

По величине интенсивности испарения, коэффициента влагопроводности и соответствующих градиентов влажности и температуры вычисляется термоградиентный коэффициент  $\delta$  по формуле (6.17), считая коэффициент  $D_m$  известным из первого опыта.

Существуют также нестационарные методы определения термоградиентного коэффициента, описанные в литературе [34, 43].

Численные значения коэффициентов  $D_m$  и  $\delta$  мало представлены в справочной литературе по причине многообразия капиллярно-пористых материалов и разнообразия их внутренней структуры. Поэтому расчет процесса сушки чаще всего выполняют другими, более простыми методами.

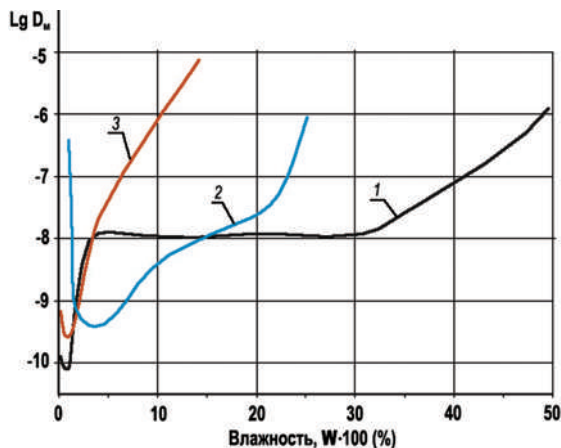


Рис. 42. Зависимость коэффициента влагопроводности  $D_m$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ) от влажности:  
1 — газобетон; 2 — керамический кирпич; 3 — гипс

### 6.7. МОДЕЛИ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА СУШКИ В СУШИЛЬНЫХ АППАРАТАХ

В сушильных аппаратах могут быть реализованы различные схемы движения теплоносителя. Наиболее распространенные схемы, предусматривают, что влажный материал и сушильный агент движутся прямотоком или противотоком (барабанные, ленточные, вихревые, распылительные и другие типы сушилок), а также, что сушильная камера работает в режиме полного перемешивания материала (сушилки кипящего слоя). В любом случае при контакте с материалом сушильный агент изменяет свои свойства (насыщается влагой, остывает), что в свою очередь отражается на скорости сушки. Для расчета скорости и времени сушки в сушильных аппаратах необходимо использовать балансовые соотношения, которые позволят определить изменение свойств сушильного агента и соответственно рассчитать скорость сушки в зависимости от свойств сушильного агента.

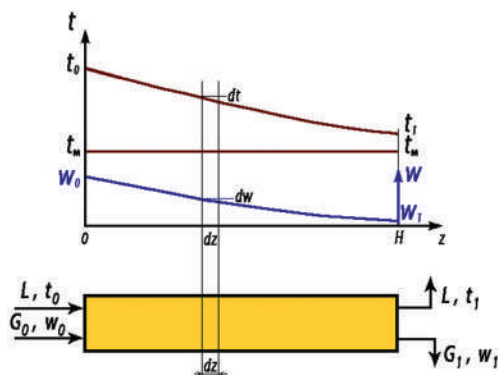


Рис. 43. Изменение температуры сушильного агента  $t$ , влажности материала  $w$  для непрерывной прямоточной сушилки

Рассмотрим аппарат с прямоточным движением потоков сушильного агента и материала [10]. Такой вариант может быть реализован в барабанных, пневматических, распылительных и некоторых других сушилках.

Примем допущение, что потери тепла отсутствуют, а все тепло, которое отдает сушильный агент, идет на испарение влаги<sup>1</sup>. Схема движения теплоносителей (сушильного агента и влажного материала) представлена на рис. 43. Поскольку сушка протекает в первом периоде, температура влажного материала остается неизменной и равной температуре мокрого термометра.

Для элементарного участка аппарата  $dz$  можно записать уравнение баланса тепла:

$$dQ = L c t_z - L c (t - dt)_{z+dz} = L c dt, \text{ Вт}, \quad (6.84)$$

где  $L$  — расход сушильного агента, кг/с;  $c$  — теплоемкость сушильного агента, Дж/(кг·К).

<sup>1</sup> Такой вариант возможен, когда процесс протекает в первом периоде сушки. Скорость испарения влаги лимитируется подводом теплоты к поверхности материала.

Это тепло идет полностью на испарение влаги  $dW$  (кг/с) из материала, находящегося в сечении аппарата  $dz$ :

$$dQ = r dW = r G_m \frac{dw^c}{d\tau}, \text{ Вт} \quad (6.84a)$$

где  $G_m$  — масса абс. сухого материала, которая находится в сечении аппарата  $dz$ , кг;  $r$  — удельная теплота испарения влаги с поверхности материала, Дж/кг;  $w^c$  — влажность материала кг/кг.

Влага испаряется с поверхности материала за счет поступления тепла из потока сушильного агента к поверхности материала, в соответствии с уравнением теплоотдачи:

$$dQ = \alpha \frac{G_m}{\rho} F_{уд} (t - t_m), \text{ Вт} \quad (6.85)$$

где  $F_{уд}$  — удельная поверхность материала, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;  $\rho$  — плотность абс. сухого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Если известна порозность зернистого слоя движущегося в потоке влажного материала  $\varepsilon$ , то массу материала, находящегося в сечении аппарата можно записать как:

$$G_m = S_{ап} dz \rho (1 - \varepsilon), \quad (6.85a)$$

где  $S_{ап}$  — сечение аппарата, м<sup>2</sup>.

Приравнивая выражения (6.84) и (6.85), получаем:

$$\alpha \frac{G_m}{\rho} F_{уд} (t - t_m) d\tau = G_m r \frac{dw^c}{d\tau}. \quad (6.86)$$

Интегрирование уравнения (6.86) при постоянных значениях коэффициентов теплоотдачи и теплоты испарения дает выражение

$$w^c = w_0^c - \frac{\alpha F_{уд}}{\rho r} \int_0^{\tau} (t - t_m) d\tau. \quad (6.87)$$

Скорость сушки  $dw^c / d\tau$ , которая входит в выражение (6.86), не является постоянной величиной, так как константа скорости сушки даже в первом периоде сушки зависит от температуры.

Поэтому о соотношениях (6.84–6.87) при переменной температуре сушильного агента  $t$  можно говорить как о соответствующих первому периоду сушки только в том смысле, что перенос теплоты к поверхности материала здесь зависит от одних только внешних условий.

Для сушки равномерно движущегося вдоль оси  $z$  потока материала профиль температуры сушильного агента может быть получен

из равенства количества отдаваемой сушильным агентом теплоты на элементарном пути  $dz$  той теплоте, которая конвективно передается по поверхности частиц материала на том же участке (см. рис. 43):

$$L c dt = \alpha \frac{G_m}{\rho} F_{уд} (t - t_m) = \alpha (1 - \varepsilon) F_{уд} S_{ап} (t - t_m) dz. \quad (6.88)$$

Произведение  $(1 - \varepsilon) F_{уд} S_{ап} dz$  — это поверхность дисперсного материала в элементарном объеме аппарата,  $m^3$ .

Интегрирование дифференциального уравнения (6.88) при граничном условии  $t = t_0$  при  $z = 0$  приводит к экспоненциальному распределению температуры сушильного агента по длине сушильного аппарата:

$$t = t_m + (t_0 - t_m) \exp(-Bz), \quad (6.89)$$

в котором показатель экспоненты  $B$ , определяющий степень уменьшения температуры сушильного агента вдоль оси аппарата  $z$ , имеет вид

$$B = \alpha \cdot (1 - \varepsilon) \cdot F_{уд} S_{ап} / (cL).$$

Приравнявая теперь правую часть равенства (6.88) теплоте, расходуемой на испарение влаги из потока материала  $G$  (кг/с), получим связь между влажностью материала и температурой сушильного агента вдоль координаты  $z$ :

$$dQ = -rGdw^c = cLB(t - t_m) dz, \quad (6.90)$$

где  $G$  — расход абсолютно сухого материала, кг/с;  $dw^c$  — изменение влажности материала на участке  $dz$ .

В это равенство подставляется распределение (6.89) температуры сушильного агента, что дает

$$dQ = -rG \cdot dw^c = cLB(t_0 - t_m) \exp(-Bz) dz. \quad (6.91)$$

Интегрирование уравнения (6.90) с очевидным для прямотока граничным условием  $w = w_0$  при  $z = 0$  дает распределение влажности материала вдоль сушильного аппарата:

$$w^c = w_0^c - \frac{Lc}{Gr} (t_0 - t_m) [1 - \exp(-Bz)]. \quad (6.92)$$

Для противоточного движения материала по отношению к сушильному агенту изменится только знак левой части равенства (6.91), поскольку дифференциал влажности материала будет положительным ( $dw^c > 0$ ) в направлении  $z$ . Кроме того, изменится и граничное условие  $w^c = w_0^c$  при  $z = H$ . Получаем следующее решение:

$$w^c = w_0^c - \frac{Lc}{Gr}(t_0 - t_m)[\exp(-Bz) - \exp(-BH)]. \quad (6.92a)$$

Наиболее часто интерес представляет только конечная влажность материала на выходе из аппарата. Конечная влажность получается подстановкой в выражение (6.92) или (6.92a) значения  $z = H$  или  $z = 0$  соответственно. При этом оказывается, что значения конечной влажности материала одинаковы для прямо- и противоточной схем движения:

$$w_1^c = w_0^c - \frac{Lc}{Gr} \cdot (t_0 - t_m)[1 - \exp(-BH)], \quad (6.93)$$

так же, как и конечная температура воздуха, выходящего из сушильного аппарата:

$$t_1 = t_m + (t_0 - t_m)\exp(-BH). \quad (6.94)$$

Расчет конечной влажности материала можно выполнить другим, более простым способом<sup>1</sup>.

Если считать, что процесс сушки лимитируется только подводом тепла к поверхности материала и пренебречь потерями тепла в окружающую среду и на нагрев материала, то упрощенно конечную влажность материала для схемы сушки, изображенной на рис. 43 (с. 104), можно рассчитать по уравнению теплопередачи:

$$Q = KF \cdot t_{cp},$$

$$Q = Lc(t_0 - t_1) = Gr(w_0^c - w_1^c), \quad (6.95)$$

где  $K = \alpha$  может быть рассчитан по критериальным уравнениям (см. главу 6.3),

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln(\Delta t_1 / \Delta t_2)};$$

$$\Delta t_1 = t_0 - t_m, \quad \Delta t_2 = t_1 - t_m;$$

$$F = HS(1 - \varepsilon)F_{уд}.$$

Три уравнения (6.95) содержат три неизвестных  $Q, t_1$  и  $w_1^c$ . Уравнения легко решаются методом подбора параметра.

Стоит обратить внимание, что в некоторых аппаратах не вся поверхность доступна для контакта с теплоносителем. Например, в барабанных сушилках теплообмен с сушильным агентом возможен только

<sup>1</sup> Оба расчета дают одинаковый результат.

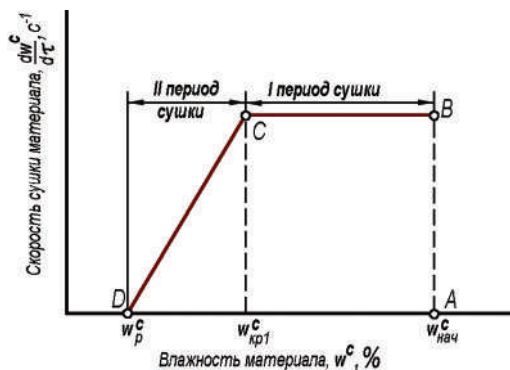


Рис. 44. Упрощенное представление кривой сушки

тогда, когда материал ссыпается с лопастей сушилки, однако большую часть времени материал находится в «завале» и не контактирует с теплоносителем. В этом случае имеет смысл ввести коэффициент, учитывающий степень доступности поверхности.

Первый период сушки наблюдается, когда влажность материала больше критической. Критическая влажность не является постоянной величиной и зависит от многих параметров, которые

невозможно учесть даже для конкретного материала. Так отмечено, что критическая влажность зависит не только от свойств материала, но и от скорости сушильного агента, его температуры, влагосодержания. Критическая влажность для различных материалов колеблется в диапазоне от 10 до 40 % и обычно существенно больше, чем требуемая конечная влажность материала. Поэтому приведенный выше расчет имеет ограниченное применение.

Более точный расчет возможен с привлечением экспериментальных методов определения кинетических параметров процесса сушки.

Упрощенная модель сушки для тел любой формы может быть получена на основании экспериментальных кривых сушки, рассмотренных в главе 6.2. В этом случае кинетическую кривую скорости сушки представляют в виде двух прямых (рис. 44), которые характеризуют первый и второй периоды сушки. Первый период — период постоянной скорости сушки — определяется уравнением

$$\frac{dw^c}{d\tau} = K_1, \quad (6.96)$$

где  $K_1$  — кинетический коэффициент первого периода сушки,  $1/c$ ;  $w^c$  — текущая влажность материала,  $кг/кг$ ;  $\tau$  — время,  $с$ .

Кинетический коэффициент  $K_1$  зависит от температуры, скорости сушильного агента, от удельной поверхности и плотности материала. Его можно получить из экспериментальной кинетической кривой. Также его можно рассчитать<sup>1</sup>, используя критериальные уравнения (6.10)–(6.11) для внешнEDIффузионной кинетики сушки (см. главу 6.2).

<sup>1</sup> Сравнивая выражения (6.7) и (6.96) получаем  $K_1 = \beta F_{уд}/\rho(p_n - p)$ .



После интегрирования при начальном условии  $w^c|_{\tau=0} = w_n^c$  получаем линейную зависимость текущих значений влажности материала  $w^c$  от времени сушки

$$w^c = w_n^c - K_1 \tau. \quad (6.97)$$

Второй период сушки, как было сказано ранее, состоит из участка равномерно падающей скорости сушки и участка непропорционального уменьшения влажности материала. Заменяя оба участка прямой линией (рис. 44), получаем выражение для скорости сушки во втором периоде:

$$\frac{dw^c}{d\tau} = K_2 (w^c - w_p^c), \quad (6.98)$$

где  $K_2$  — коэффициент скорости сушки для второго периода, 1/с;  $w_p^c$  — равновесная влажность материала, кг/кг.

Интегрирование уравнения (6.98) при начальном условии  $w^c|_{\tau=0} = w_{кр}^c$  дает экспоненциальную связь влажности материала и времени в пределах периода падающей скорости сушки:

$$w^c = w_p^c + (w_{кр}^c - w_p^c) \exp(-K_2 \tau), \quad (6.73)$$

где  $w_{кр}^c$  — значение влажности, при котором для данного материала при конкретных внешних условиях заканчивается период постоянной скорости сушки.

Коэффициент скорости второго периода сушки  $K_2$  зависит в основном от свойств капиллярно-пористого влажного материала. Его численное значение определяется графическим методом после того, как из тех же опытных кривых устанавливаются значение критической влажности  $w_{кр}^c$  и величина равновесной влажности материала  $w_p^c$ .

Однако критическая влажность не является свойством влажного материала, а определяется соотношением диффузионных сопротивлений внутри и снаружи материала. Другими словами, если меняются условия сушки (температура, влажность материала и сушильного агента) — изменяется значение критической влажности. Поэтому численное значение критической влажности можно определить только экспериментально при конкретных условиях сушки.

Коэффициент  $K_2$  для периода падающей скорости связан с величиной  $K_1$  простым линейным соотношением:

$$K_2 = \frac{K_1}{(w_{кр}^c - w_p^c)}. \quad (6.99)$$

Полное время сушки от начальной до конечной влажности при постоянной температуре и влагосодержании сушильного агента определяется суммой времени сушки в первом и втором периоде:

$$\tau = \frac{(w_n^c - w_{кр}^c)}{K_1} + \frac{1}{K_2} \ln \frac{(w_{кр}^c - w_p^c)}{(w_k^c - w_p^c)}, \quad (6.100)$$

где  $w_k^c$  — конечная влажность материала, кг/кг.

Однако выражение (6.100) справедливо только при постоянной температуре сушильного агента. Для процесса, изображенного на рис. 43, температура и влагосодержание сушильного агента изменяются. Задачу можно решить численным методом, разбив сушильную камеру на ряд конечных участков  $\Delta z_i$ .

Для каждого участка записываем уравнения баланса и кинетики, которые определяют значения температуры сушильного агента и влажности материала для следующего участка сушильной камеры:

$$\begin{aligned} dW_i &= G(w_i^c - w_{i+1}^c) = L(x_{i+1} - x_i), \\ LI_i &= LI_{i+1} + Q_{\text{пот}} + Q_m, \\ \frac{w_i^c - w_{i+1}^c}{\Delta \tau} &= \begin{cases} K_1, & \text{если } w_i^c > w_{кр}^c \\ K_2(w_i^c - w_p^c), & \text{если } w_i^c > w_{кр}^c \end{cases}, \end{aligned} \quad (6.101)$$

где  $\Delta \tau$  — время пребывания материала в объеме сушильной камеры  $\Delta z_i$ .

$$\Delta \tau = \frac{S \cdot \Delta z (1 - \varepsilon) \rho_c}{G},$$

Энтальпия определяется выражением (3.10) (см. главу 3):

$$\begin{aligned} I_i &= (c_{с.в} + c_n x_i) t_i + r_0 x_i, \\ I_{i+1} &= (c_{с.в} + c_n x_{i+1}) t_{i+1} + r_0 x_{i+1}. \end{aligned} \quad (6.102)$$

Потери тепла  $Q_{\text{пот}}$  определяются по уравнению теплоотдачи от стенки сушильной камеры в окружающую среду с учетом толщины теплоизоляции стенки. Расход тепла на нагрев материала  $Q_m$  учитывается в первых участках сушильной камеры как нагрев от исходной температуры до температуры мокрого термометра. При достижении критической влажности вводится поправка на нагрев материала от температуры мокрого термометра до температуры отходящих газов.

В уравнениях (6.101) для каждого участка мы имеем три неизвестных  $t_{i+1}$ ,  $x_{i+1}$  и  $w_{i+1}^c$ . Решая последовательно уравнения для каждого участка

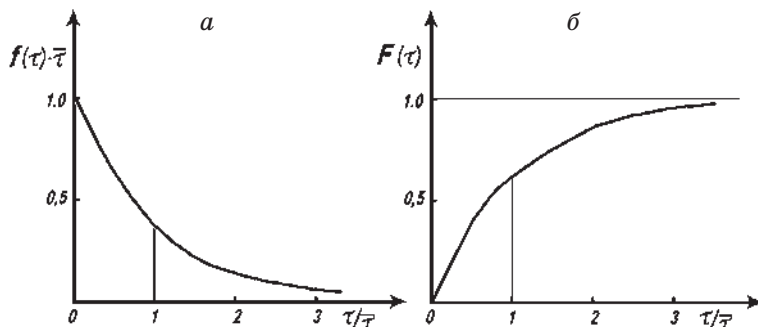


Рис. 45. Дифференциальная (а) и интегральная (б) функции распределения по времени пребывания частиц во взвешенном слое сушилки при режиме полного смешения

сушилки, в конечном итоге мы получаем конечную влажность и температуру сушильного агента на выходе из аппарата.

В главе 10 приведен пример расчета рассмотренным методом сушки древесной стружки в шестиярусной прямоточной сушилке с ленточным ситом.

Для аппаратов полного смешения используется несколько иной способ расчета.

Так, для сушилки кипящего слоя непрерывного действия, изображенной на рис. 46, в сушильной камере происходит полное перемешивание материала. Время нахождения частиц материала в сушильной камере различное. На рис. 45 изображены графики функции распределения частиц по времени пребывания в сушильной камере [10].

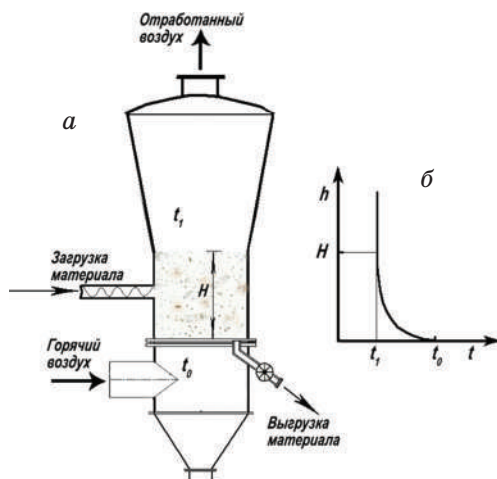


Рис. 46. Сушильный аппарат со взвешенным слоем частиц (а) и профиль изменения температуры сушильного агента по высоте слоя (б)

Функция дифференциального распределения:

$$f(\tau) = \frac{1}{\bar{\tau}} \exp(-\tau / \bar{\tau}). \quad (6.103)$$

Интегральная функция распределения:

$$F(\tau) = 1 - \exp(-\tau / \bar{\tau}). \quad (6.104)$$

Поскольку время пребывания частиц разное, на выходе из сушильного аппарата выгружаются как недосушенные, так и пересушенные частицы материала. В дальнейшем при складировании материала в бункере влажность частиц через некоторое время выравнивается.

Среднее время пребывания частиц в аппарате определяется выражением

$$\bar{\tau} = \frac{V_{\text{сл}}(1 - \varepsilon)\rho_c}{G}, \quad (6.105)$$

где  $V_{\text{сл}}$  — объем взвешенного слоя в аппарате,  $\text{м}^3$ ,  $\varepsilon$  — порозность слоя;  $\rho_c$  — плотность материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $G$  — расход материала,  $\text{кг}/\text{с}$ .

При интенсивном псевдооживлении 63 % частиц покинут аппарат через промежуток времени, меньший среднего времени пребывания  $\bar{\tau}$ , а 37 % частиц будут сушиться дольше, чем  $\bar{\tau}$ .

Если влажность всех пересушенных частиц больше критической, то среднюю конечную влажность материала можно рассчитать по среднему времени пребывания:

$$w_K^c = w_H^c - K_1 \bar{\tau}. \quad (6.106)$$

Однако, если сушка пересушенных частиц происходит во втором периоде сушки, то расчет влажности по формуле (6.100) для среднего времени пребывания даст усредненную конечную влажность ниже реальной.

Существенное влияние на скорость сушки оказывает температура теплоносителя. На рис. 46, б показано изменение температуры теплоносителя (воздуха) по высоте слоя.

В большинстве случаев температура сушильного агента над решеткой быстро падает и становится равной температуре отходящих газов. Характер изменения температуры (см. рис. 46, б) определяется совокупностью всех параметров процесса тепломассообмена (величина наружной поверхности материала, коэффициент теплоотдачи, массовый расход сушильного агента, его теплоемкость и т. п.). Расчет профиля изменения температуры сушильного агента по высоте слоя достаточно затруднителен. Поэтому для расчета скорости сушки часто принимают среднюю температуру сушильного агента либо его температуру на выходе из слоя. В первом случае получают заниженное время сушки, во втором — завышенное.

Численный расчет позволяет более точно определить среднюю влажность материала, выходящего из сушильного аппарата. Для этого по уравнению (6.101) при средней температуре в слое рассчитывают

влажность  $w_i^c$  для группы частиц, имеющих время пребывания от  $\tau_i$  до  $\tau_{i+1} = \tau_i + \Delta\tau$ , а затем суммируют влажность всех частиц, пропорционально их доле в общей массе частиц:

$$w_k^c = \sum_{i=1}^{\infty} w_i^c f(\tau_i) \Delta\tau = \sum_{i=1}^{\infty} w_i^c \frac{1}{\bar{\tau}} \exp\left(-\frac{\tau_i}{\bar{\tau}}\right) \Delta\tau. \quad (6.107)$$

Еще раз необходимо отметить, что критическая влажность  $w_{кр}^c$  в уравнении (6.100) не является постоянной величиной, а зависит от температуры, скорости теплоносителя и других параметров сушильного агента и материала.

Действительно, при изменении внешних условий меняется величина наружного сопротивления переносу влаги от поверхности влажного материала к сушильному агенту, а следовательно, и значение интенсивности сушки в первом периоде. При этом величина критической влажности, зависящая от соотношения внешнего и внутреннего сопротивлений, также изменяется.

Таким образом, аналитический расчет сушильных аппаратов возможен для простейших случаев, когда сушка происходит в первом периоде, коэффициенты тепло- и массопереноса постоянны, температура материала не изменяется и равна температуре мокрого термометра.

Более точный расчет возможен численными методами при использовании экспериментальных кривых скорости сушки.

# 7

## КОНСТРУКЦИИ СУШИЛОК

Конструкции сушилок очень разнообразны и отличаются по ряду признаков: по способу подвода тепла (конвективные, контактные и др.), по виду используемого теплоносителя (воздушные, газовые, паровые), по величине давления в сушильной камере (атмосферные и вакуумные), по способу организации процесса (периодические и непрерывные), а также по взаимному направлению движения материала и сушильного агента в конвективных сушилках (прямоток, противоток, перекрестный ток).

На рис. 47 приведена классификация сушильных аппаратов.

Обширный класс сушильных аппаратов представляют конвективные сушилки. В таких сушилках для удаления влаги из материала используется сушильный агент — как правило, горячий воздух или дымовые газы. Для некоторых материалов в качестве сушильного агента служит инертный газ азот, перегретый пар и некоторые другие теплоносители. Для сушки материалов, содержащих органические растворители

Классификация сушильных аппаратов

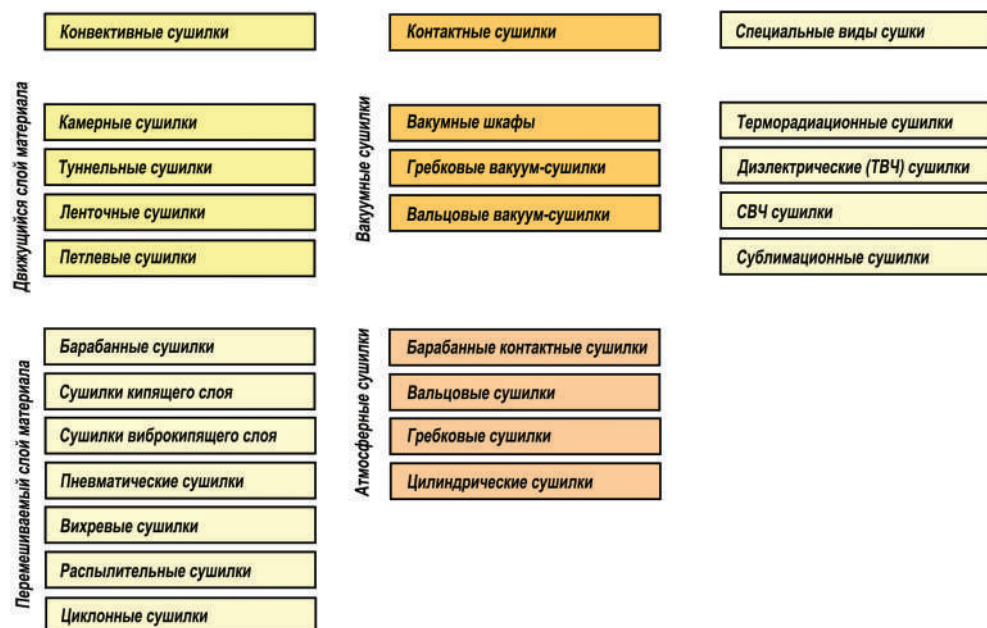


Рис. 47. Классификация сушильных аппаратов

тели (спирт, ацетон и др.), сушильный агент направляют в конденсатор для удаления растворителя и затем возвращают снова на сушку.

Достоинством конвективных сушилок является простота конструкции, доступность сушильного агента. К недостатку следует отнести большое количество запыленных газов, которые требуют очистки на циклонах, фильтрах или в абсорберах. В конвективных сушилках сушат минеральные материалы (песок, крошку, порошки, красители, полимерные материалы, пищевые продукты и др.).

Отличительным признаком контактных сушилок является наличие горячих контактных поверхностей. Материал тонким слоем распределяется по контактной поверхности, нагревается, высушивается и затем удаляется с поверхности. Подвод тепла происходит за счет конденсации греющего пара или путем подвода любой другой горячей жидкости (вода, минеральное масло, др.). Контактные сушилки удобны для сушки липких материалов, суспензий, паст. Отсутствие пыления высушенного материала является их преимуществом. Также контактные сушилки применяются для сушки бумаги, тканей и других тонких материалов.

Специальные виды сушки используются для сушки некоторых материалов, которые требуют особых условий сушки. Так, лиофильная сушка — сушка в замороженном состоянии — используется для сушки некоторых фармацевтических препаратов (антибиотики, кровь, бактерии), а также некоторых пищевых продуктов. В диэлектрических, СВЧ<sup>1</sup> сушилках материал нагревается во всем объеме (градиент температуры отсутствует), поэтому они применяются для материалов, которые коробятся, теряют форму при других вариантах сушки.

Ниже рассмотрены группы сушилок, объединенных по способу подвода тепла и состоянию слоя высушиваемого материала (неподвижный, перемешиваемый и т. д.).

### 7.1.

#### КОНВЕКТИВНЫЕ СУШИЛКИ С НЕПОДВИЖНЫМ ИЛИ ДВИЖУЩИМСЯ ПЛОТНЫМ СЛОЕМ МАТЕРИАЛА

**Камерные сушилки.** Эти сушилки являются аппаратами периодического действия, работающими при атмосферном давлении. Они используются в производствах небольшого масштаба для материалов, допускающих невысокую (до 250–300 °С) температуру сушки (например, красителей, пищевых продуктов,



<sup>1</sup> СВЧ-сушилка — сушка полем сверхвысокой частоты (по такому принципу работают бытовые микроволновые печи).



лекарственных растительных препаратов). В деревообрабатывающей промышленности сушильные камеры используют для сушки пиломатериалов. Материал в таких сушилках сушится на стеллажах или вагонетках, находящихся внутри сушильной камеры. Схема камерной сушки представлена на рис. 48. На каркасе сушильной камеры 1 между вагонетками 2 установлены козырьки 3, которые делят пространство камеры на три расположенные друг над другом зоны, вдоль которых последовательно движется сушильный агент. Свежий воздух, нагретый в наружном калорифере 4, засасывается вентилятором 5 и подается вниз камеры сушки. Здесь он движется (путь воздуха показан на рисунке стрелками), два раза меняя направление и дважды нагреваясь в промежуточных калориферах 6 и 7. Часть отработанного воздуха с помощью шибер 8 направляется на смешение со свежим воздухом. Таким образом, сушилка работает с промежуточным подогревом и частичной рециркуляцией воздуха, т. е. по варианту, обеспечивающему низкую температуру и более мягкие условия сушки.

Однако, вследствие сушки в неподвижном толстом слое, сушки этого типа обладают низкой производительностью и продолжительность сушки в них велика. Кроме того, сушка в них неравномерна из-за неравномерности температур в камере, возникающей за счет частичного прохода воздуха в вышерасположенные зоны кратчайшим путем через зазоры. Для создания более равномерной циркуляции воздуха в некоторых современных конструкциях камерных сушилок наружный вентилятор заменяют внутренними реверсивными осевыми вентиляторами или применяют эжекторы. В эжекционных камерных сушилках рециркулирующий отработанный воздух подсасывается свежим

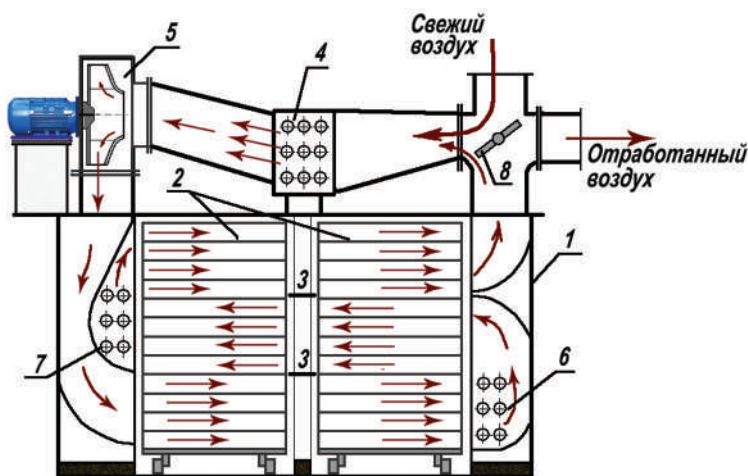


Рис. 48. Камерная сушилка:

1 — сушильная камера; 2 — вагонетки; 3 — козырьки; 4, 6, 7 — калориферы;  
5 — вентилятор; 8 — шибер

воздухом, что позволяет уменьшить расход электроэнергии на циркуляцию. Обслуживание камерных сушилок требует больших затрат ручного труда, что также является существенным недостатком.

**Туннельные сушилки.** Эти сушилки (рис. 49) отличаются от камерных тем, что в них соединенные друг с другом вагонетки медленно перемещаются на рельсах вдоль очень длинной камеры прямоугольного сечения (коридора). На входе и выходе коридор имеет герметичные двери, которые одновременно периодически открываются для загрузки и выгрузки материала: вагонетка с высушенным материалом удаляется из камеры, а с противоположного конца в нее поступает новая вагонетка с влажным материалом. Перемещение вагонеток производится с помощью троса и механической лебедки. Сушильный агент движется прямотоком или противотоком к высушиваемому материалу.



Туннельные сушилки обычно работают с частичной рециркуляцией сушильного агента, они используются для сушки больших количеств штучных материалов, например керамических изделий. По интенсивности сушки туннельные сушилки мало отличаются от камерных: им присущи основные недостатки последних (длительная и неравномерная сушка, ручное обслуживание).

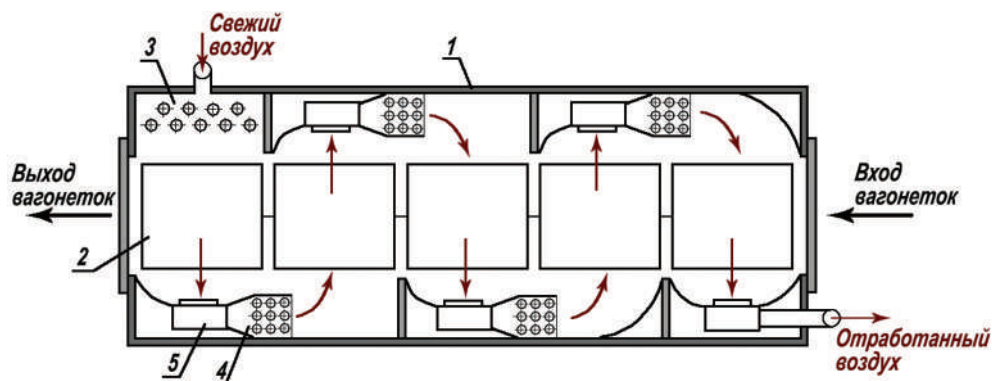


Рис. 49. Туннельная сушилка:

1 — сушильная камера; 2 — вагонетки; 3 — основной калорифер; 4 — дополнительные калориферы; 5 — вентиляторы



### Ленточные сушилки.

В этих сушилках сушка материалов производится непрерывно при атмосферном давлении. В камере 1 сушилки (рис. 50) слой высушиваемого материала движется на бесконечной сетчатой ленте 2, натянутой между ведущим и ведомым барабанами. Влажный материал подается на один конец ленты,

а подсушенный удаляется с другого конца. Сушка осуществляется горячим воздухом, который нагревается в калориферах 4. Нагретый воздух проходит через сетку и через слой материала. После сушки отработанный воздух удаляется вытяжным вентилятором 6. В сушильной камере могут быть установлены циркуляционные вентиляторы 5.

Наиболее эффективно применение многоленточных сушилок с лентами из металлической или полимерной сетки. В таких сушилках воздух может подаваться через специальные воздухопроводы либо сверху перпендикулярно плоскости ленты, либо снизу под ленту. Если подавать воздух под металлическую сетчатую ленту, слой зернистого материала на ленте будет находиться в частично взвешенном состоянии, что увеличивает доступную поверхность массообмена и повышает эффективность сушки.

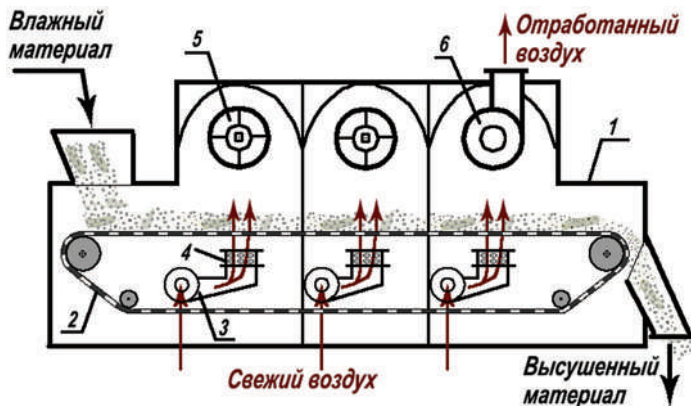


Рис. 50. Ленточная сушилка:

1 — сушильная камера; 2 — бесконечная сетчатая лента; 3 — дутьевые вентиляторы; 4 — калориферы; 5 — циркуляционные вентиляторы; 6 — вытяжной вентилятор

При пересыпании материала с ленты на ленту материал перемешивается, что способствует возрастанию скорости и равномерности сушки.

В современных конструкциях ленточных сушилок применяется металлическая или полимерная лента высокой воздухопроницаемости, устанавливаются устройства для очистки ленты; сушилки оснащены современными датчиками контроля температуры, расхода (КИП), программируемым логическим контроллером (ПЛК); управление сушкой осуществляется с сенсорного экрана.

В таких сушилках может быть установлено до шести ярусов ленты, расположенных друг над другом. Сушильное пространство в сушилках изготавливается по возможности герметичным, чтобы сушильный агент (горячий воздух) проходил только через сетку и слой материала. Вид надсеточного пространства сушилки показан на рис. 51. Внутри сушилки над лентой в слое материала установлен датчик влажности.

В сушилках с ленточным ситом сушатся следующие виды материалов:

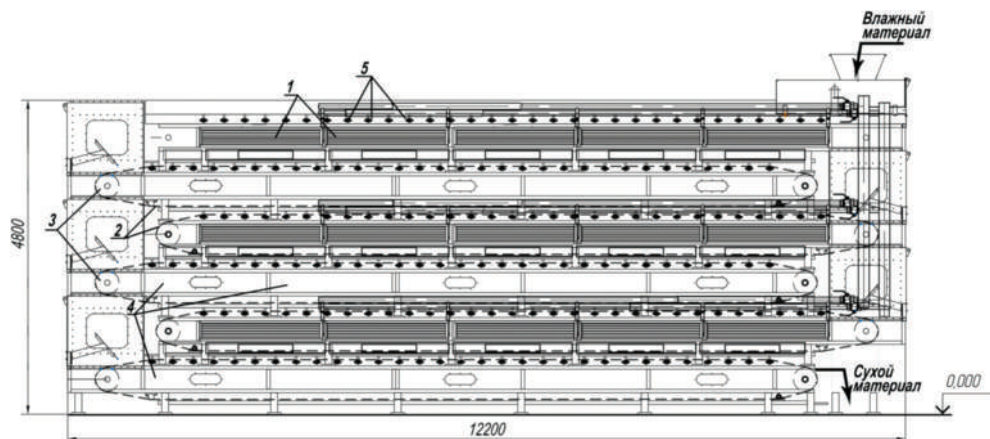
- древесная стружка в производстве стружечных плит ОСП;
- топливо из твердых бытовых отходов;
- свекловичный жом в сахарной промышленности;
- осадок сточных вод и остатки брожения;
- целлюлоза и бумажный шлам в производстве бумаги;
- остаточные продукты пищевой промышленности (оливковые выжимки, пивная гуща).

Многоярусные ленточные сушилки имеют ширину ленты от 0,5 до 2 м, длину до 40 м, высоту 4–6 м. Ленточные сита с барабанами размещены в герметичном кожухе. В качестве сушильного агента обычно используется воздух, который нагревается в паровых или водяных калориферах, встроенных в сушильную установку.

На рис. 52 представлена шестиярусная ленточная сушилка производительностью 0,6–0,8 тонны в час по сухому продукту. Сушилка состоит из шести ярусов транспортной ленты шириной 2 м и предназначена для сушки древесных стружек. Загрузка влажного материала осуществляется на верхний ярус, толщина слоя стружки на ленте составляет 10–50 мм.



Рис. 51. Сушка древесной стружки на ленточном сите ленточной сушилки



**Рис. 52.** Шестиярусная сушилка с сетчатыми лентами для сушки древесных стружек:  
1 — теплообменники; 2 — сетчатая лента; 3 — барабаны; 4 — вытяжные воздуховоды; 5 — ролики

На каждом ярусе сушилки установлено по пять поверхностных оребренных теплообменников 1, нагревающие подаваемый дутьевыми вентиляторами воздух. В трубное пространство теплообменников подается горячая вода или греющий пар.

Сетчатая лента натянута на барабанах 3 и движется со скоростью 4–6 м/мин. Ролики 5 предотвращают провисание ленты. Свежий воздух дутьевыми вентиляторами подается через теплообменники под сетчатую ленту, продувая слой стружки, тем самым испаряя и унося с собой влагу из материала. Отработанный воздух удаляется вытяжными вентиляторами через воздуховоды 4 с противоположной стороны яруса.

Сушилка работает с частичной рециркуляцией отработанного воздуха. Задвижки, установленные на воздуховодах, позволяют регулировать расход воздуха на каждый ярус. Движение воздуха может быть осуществлено различными вариантами, для чего предусмотрены две заслонки: через одну отработанный воздух можно выбрасывать в атмосферу, через другую — направлять через фильтр обратно в работу. Использование отработанного воздуха, имеющего температуру 50–70 °С, позволяет уменьшить потребление тепла вдвое.

Скорость движения ленты регулируется частотным преобразователем, подключенным к двигателям транспортера, что позволяет изменять скорость движения ленты в пределах 2–8 м/мин. Влажность сырой стружки<sup>1</sup> составляет 75 %, после сушилки 2–3 %. Для материала с влажностью свыше 75 % рекомендуется либо увеличить подачу

<sup>1</sup> В деревообрабатывающей промышленности влажность древесины принято относить к абсолютно сухому материалу.



воздуха, либо уменьшить скорость ленты, тем самым увеличив время контакта.

Таким образом, в сушилку с одной стороны яруса дутьевыми вентиляторами под сетчатую ленту подается горячий воздух, который проходит через слой стружки, испаряя влагу и охлаждаясь, и выводится с другой стороны яруса через воздухопроводы вытяжными вентиляторами.

Схема контроля над процессом сушки приведена на рис. 53. На каждом ярусе сушилки установлены датчики температуры  $T$  под лентой и над ней, по которым можно судить об эффективности сушки на каждом ярусе сушилки. Задвижки на воздухопроводах позволяют направлять большее количество воздуха на верхние ярусы сушилки, где находится более влажный материал, скорость сушки которого выше, чем для материала на нижних ярусах сушилки. На нижних ярусах сушилки скорость сушки определяется удалением влаги из внутренних слоев материала (второй период сушки), поэтому для сушки требуется меньше воздуха, но температура его должна быть выше.

В магистрали горячей воды (красные линии) контролируются расход, давление и температура теплоносителя.

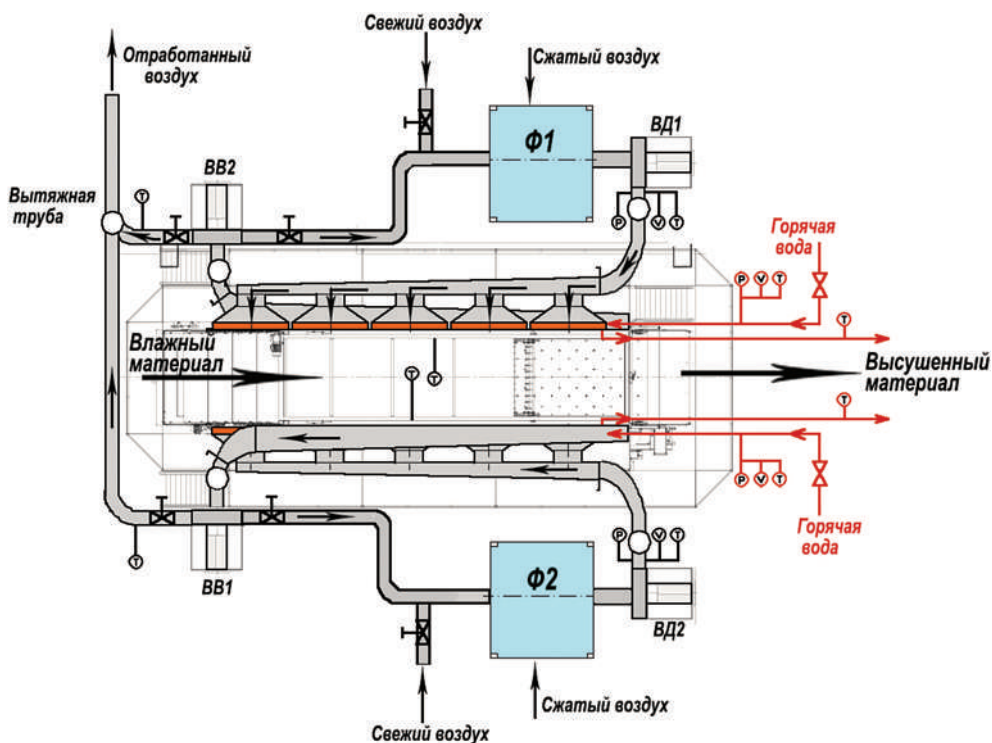


Рис. 53. Схема установки контрольных приборов на шестиярусной ленточной сушилке:  
ВД — дутьевые вентиляторы; ВВ — вытяжные вентиляторы;  $\Phi$  — рукавные фильтры

Общий расход приточного воздуха на каждом дутьевом вентиляторе измеряется трубками Пито–Прандтля, установленными в воздуховодах.

Расход свежего воздуха на сушилку составляет 30–60 тыс. м<sup>3</sup>/ч. Воздух в сушилку поступает из помещения, для восполнения теплого воздуха в котором установлена приточная вентиляция.

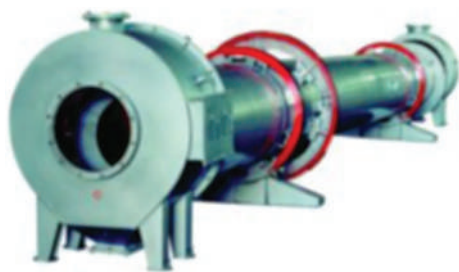
Для эффективной работы сушилки очень важно создать равномерную подачу материала на сетчатую ленту. Если материал поступает неравномерно, образуя просветы на ленте, то сушильный агент, двигаясь по линии наименьшего сопротивления, проходит через ленту, не контактируя с влажным материалом. При правильной организации подачи материал распределяется по ленте ровным слоем, в результате чего весь сушильный агент имеет достаточное время контакта для сушки материала.

Многоярусные сушилки с ленточным ситом используются также для сушки листовых материалов, таких как гипсоволокнистые плиты, гипсокартон, фанера ОСП и др. Ленточные сушилки имеют преимущество перед роликовыми, поскольку предотвращается провисание листов, плюс лента обеспечивает плавное движение материала. Пример расчета ленточных сушилок дан в приложении.

К недостатку сушилок с ленточным ситом следует отнести большие габариты, невысокую эффективность сушки, сложность в обслуживании главным образом из-за перекосов и растяжения лент. Температура сушильного агента невысокая, поэтому удельная производительность ленточных сушилок невелика, а удельные расходы тепла довольно высоки. Так, удельная производительность шестиярусной сушилки при сушке древесной стружки при температуре сушильного агента 80 °С составляет 6–8 кг испаренной воды на 1 м<sup>2</sup> поверхности ленты. Напряженность сушильной камеры по влаге составляет всего 15–20 кг/(м<sup>3</sup>·ч).

## 7.2.

### КОНВЕКТИВНЫЕ СУШИЛКИ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ СЛОЯ МАТЕРИАЛА



**Барабанные сушилки.** Эти сушилки широко применяются для непрерывной сушки при атмосферном давлении кусковых, зернистых и сыпучих материалов (минеральных материалов, известняка, фосфоритов, солей и др.).

Барабанная сушилка (рис. 54) имеет цилиндрический барабан 1, установленный горизонтально или с небольшим наклоном к горизонту (1/15–1/50) и опирающийся с помощью бандажей 2 на ролики 3. Барабан приводится во вращение электродвигателем через зубчатую



передачу 4 и редуктор. Число оборотов барабана обычно не превышает  $5-8 \text{ мин}^{-1}$ ; положение его в осевом направлении фиксируется упорными роликами 5. Материал подается в барабан через питатель 6, предварительно подсушивается, перемешиваясь лопастями 7 приемно-винтовой насадки, а затем поступает на внутреннюю насадку, расположенную вдоль почти всей длины барабана. Насадка обеспечивает равномерное распределение и хорошее перемешивание материала по сечению барабана, а также его тесное соприкосновение при пересыпании с сушильным агентом — топочными газами. В простейшем случае насадка — это лопасти, приваренные к внутренней части корпуса барабана.

Газы и материал особенно часто движутся прямотоком, что помогает избежать перегрева материала, так как в этом случае наиболее горячие газы соприкасаются с материалом, имеющим наибольшую влажность. Чтобы избежать усиленного уноса пыли с газами, последние просасываются через барабан вентилятором 14 со средней скоростью  $2-5 \text{ м/с}$ . Скорость газов выбирают в зависимости от крупности и плотности материала (табл. 7-1.).

Сушильный агент получают путем сжигания природного газа или другого топлива в горелке 8 и разбавления продуктов сгорания в топке 9 до необходимой температуры.

Перед выбросом в атмосферу отработанные газы очищаются от пыли в циклоне 10 и сбрасываются в дымовую трубу вентилятором 14. Для очистки газов от пыли до санитарных норм ( $20 \text{ мг/м}^3$ ) газы дополнительно очищают в рукавном фильтре. На концах барабана часто устанавливают уплотнительные устройства (например, лабиринтные), предотвращающие подсос холодного воздуха в барабан.

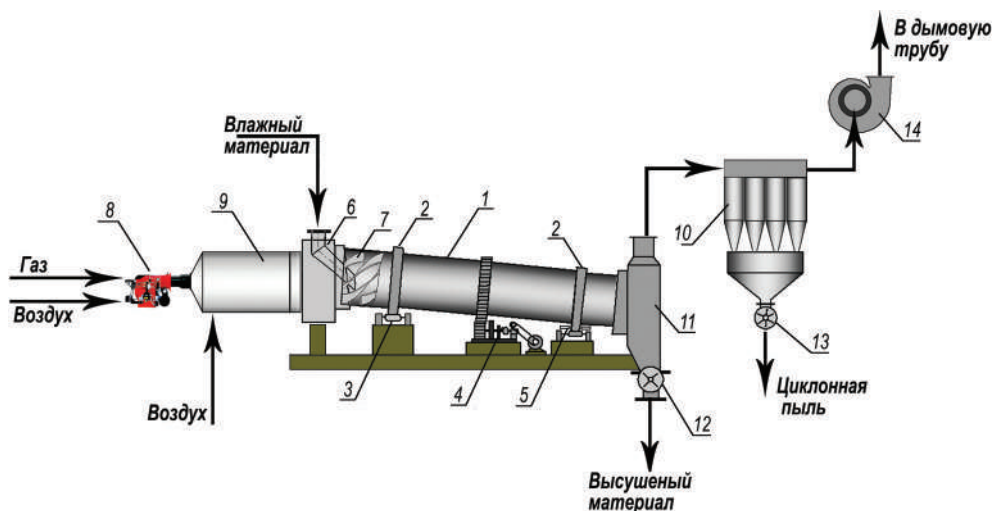


Рис. 54. Барабанная сушилка:

1 — барабан; 2 — бандаж; 3 — опорные ролики; 4 — приводной механизм; 5 — опорно-упорные ролики; 6 — загрузочное устройство; 7 — винтовая насадка; 8 — горелка; 9 — топка; 10 — циклон; 11 — разгрузочная камера; 12, 13 — разгрузочные устройства; 14 — вентилятор

Т а б л и ц а 7-1

## Максимально допустимая скорость газов в барабане

Размер частиц, мм	Кажущаяся плотность материала, кг/м <sup>3</sup>				
	600	1500	2000	2500	> 2500
< 0,3	0,5	2,0	3,0	4,0	5,0
0,3–2,0	0,5–1,0	2,0–5,0	3,0–7,5	4,0–10,0	5,0–12,0
> 2,0	1,0–3,0	5,0–8,0	8,0	10,0	13,0

У разгрузочного конца барабана имеется подпорное устройство в виде сплошного кольца или кольца, образованного кольцеобразно расположенными поворотными лопатками (в виде жалюзи). Назначение этого кольца — поддерживать определенную степень заполнения барабана материалом; как правило, последняя не превышает 20 %. Время пребывания обычно регулируется скоростью вращения барабана и реже — изменением угла его наклона. Высушенный материал удаляется из камеры 11 через разгрузочное устройство 12, с помощью которого герметизируется камера 11 и предотвращается поступление в нее воздуха извне. Подсосы воздуха привели бы к бесполезному увеличению расхода воздуха и энергии, потребляемой вентилятором 14.

В качестве сушильного агента в барабанной сушилке часто используются топочные газы, полученные при сжигании природного газа, мазута или другого жидкого топлива (солярка, масло). Подача дымовых газов может осуществляться как непосредственно из горелки в барабан, так и с помощью топки 9, которая позволяет регулировать степень разбавления дымовых газов воздухом. Топка используется, когда надо сушить материалы, разрушающиеся при высокой температуре.

Барабан сваривают из царг, вальцованных из листовой стали ВСтЗпс или ВСтЗсп (ГОСТ 380-81) толщиной 8–20 мм, диаметром от 800 до 3600 мм и длиной от 4 до 30 м. В местах установки бандажей и зубчатого венца барабан усиливают обечайками.

Насадки изготавливают в виде секций длиной 1–2 м, привариваемых к внутренней поверхности барабана. Тип насадки выбирают в зависимости от вида высушиваемого материала и диаметра барабана (рис. 55).

Подъемно-лопастная насадка используется для сушки крупнокусковых и склонных к налипанию материалов, а секторная насадка — для малосыпучих и крупнокусковых материалов с большой плотностью. Для мелкокусковых, сильно сыпучих материалов широко применяются распределительные насадки. Сушка тонкоизмельченных, пылящих материалов производится в барабанах, имеющих перевалочную насадку с закрытыми ячейками. Иногда используют комбинированные насадки: например, подъемно-лопастную (в передней части аппарата) и распределительную. Пересыпание материала на подъемно-лопастной

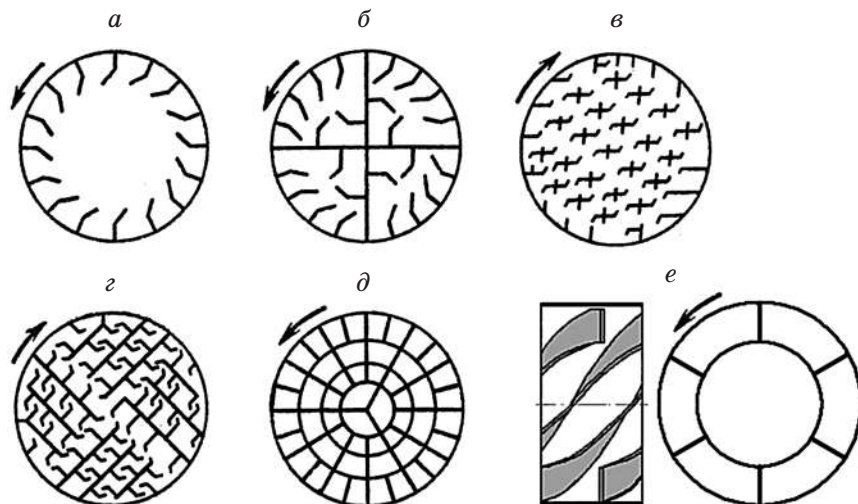


Рис. 55. Типы насадок барабанных сушилок:

*a* — подъемно-лопастная; *б* — секторная; *в, г* — распределительная; *д* — перевалочная, *е* — винтовая

и секторной насадке показано на рис. 56. Со стороны загрузки материала на длине 1,0–1,5 м устанавливают приемно-винтовую насадку.

Бандажи 2 (см. рис. 54 и 57) изготавливают из стали 40 или 45Л (как правило, прямоугольной формы в поперечном сечении). Посадка их на барабан свободная с кольцевым зазором. Бандажи крепят сваркой или с помощью башмаков. Башмак 2 (рис. 57) присоединяют болтами 5 или приваривают к усилительной обечайке 3 барабана 6. Под башмаки подкладывают регулировочные подкладки 4. Выступы башмаков через один повернуты в разные стороны, что предотвращает осевое смещение бандажа вдоль барабана.

На рис. 58 изображены опорная и упорно-опорная станции. При вращении барабана бандажи 1 катятся по опорным роликам 2, установленным в подшипниковых узлах на опорной раме 3. Для предотвращения осевого сдвига барабана на упорно-опорной станции предусмотрена пара упорных роликов 4. Бандаж упирается своими торцовыми поверхностями в упорные ролики.

Для точной установки опорных роликов служат регулировочные винты 5. Угол между осевыми линиями опорных роликов, проходящими через центр барабана, составляет  $60^\circ$ .

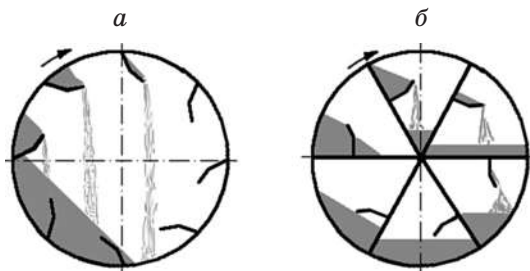


Рис. 56. Схема пересыпания материала:

*a* — на подъемно-лопастной; *б* — на секторной насадке

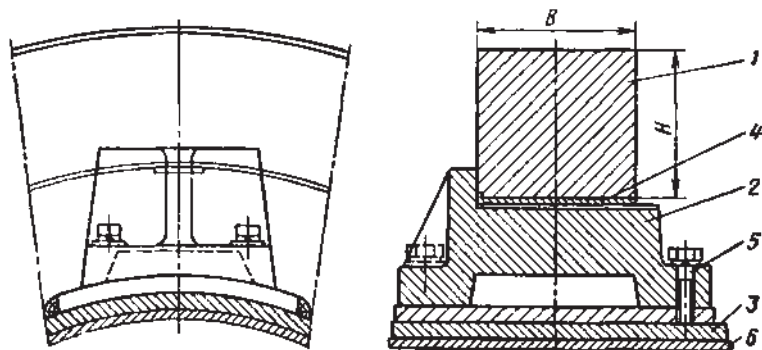


Рис. 57. Башмак для крепления бандажа:

1 — бандаж; 2 — башмак; 3 — усиление обечайки; 4 — прокладка; 5 — болты; 6 — обечайка барабана

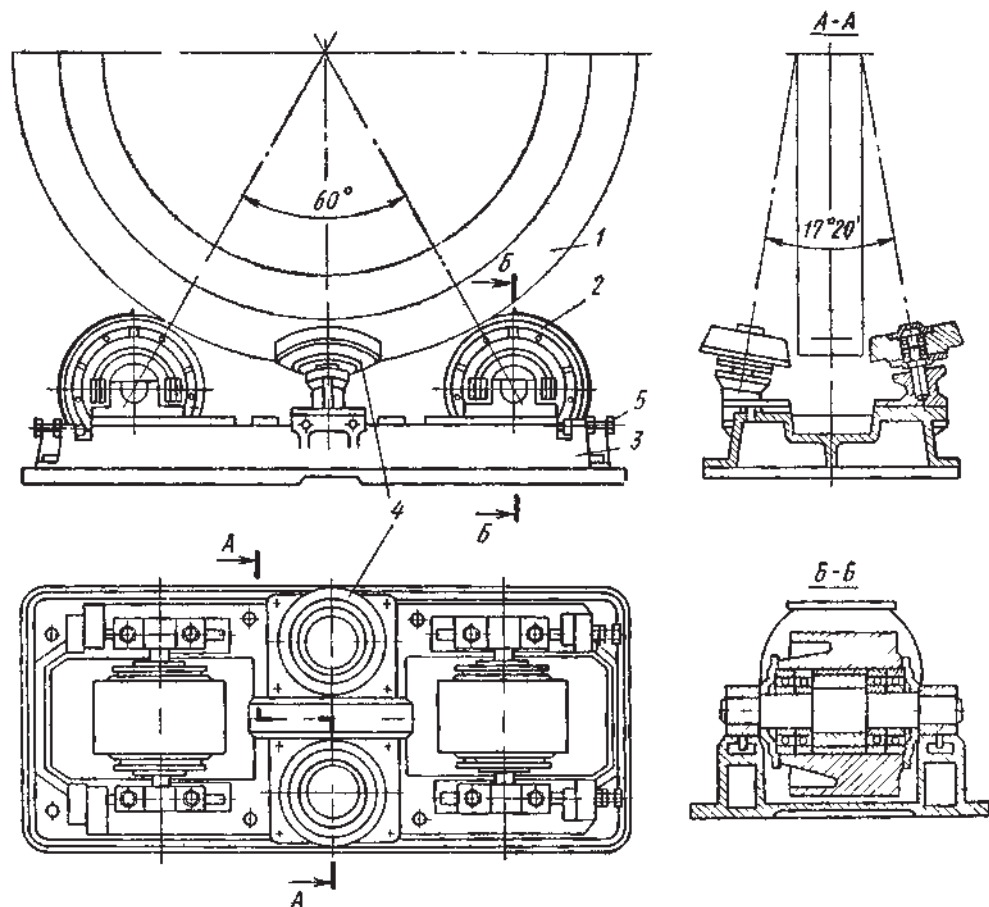


Рис. 58. Упорно-опорная станция:

1 — бандаж; 2 — опорные ролики; 3 — опорная рама; 4 — упорные ролики; 5 — регулировочные винты

Упорные и опорные ролики отливают из чугуна СЧ18-36 или СЧ21-40. Неравнопрочность роликов и бандажа приводит к более ускоренному износу роликов, которые проще и дешевле изготовить, чем бандажи.

Опорную раму 3 отливают из чугуна СЧ18-36 или сваривают из стали ВСтЗкп.

Венец, или венцовую шестерню (рис. 59) изготавливают из чугуна СЧ 21-40 или стали 35Л, обычно составной из двух полувенцов 1, соединяемых между собой коническими болтами 2.

Венцовую шестерню крепят к барабану чаще всего с помощью башмаков.

Подвенцовые шестерни изготавливают из стали 45 или 45Л.

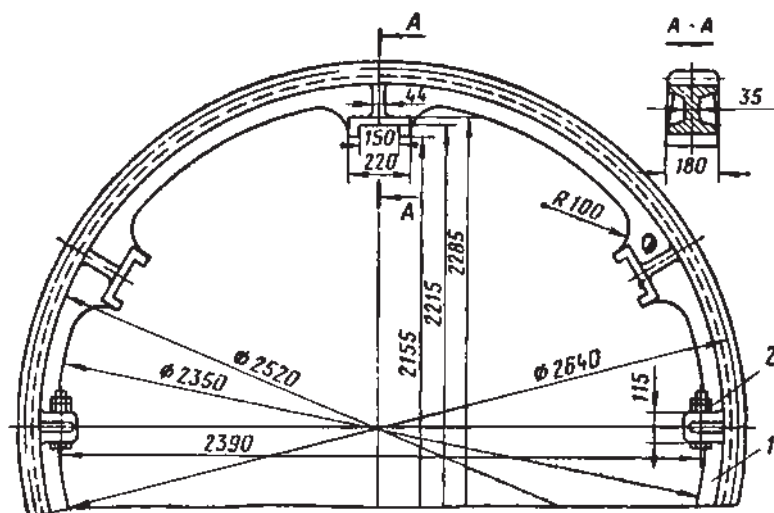


Рис. 59. Венцовая шестерня:

1 — полувенцы; 2 — болтовое соединение (размеры указаны для барабана диаметром 2000 мм)

Уплотнения (рис. 60) устанавливают в местах соединения неподвижных камер с вращающимся барабаном. В зависимости от рабочих условий применяют уплотнения торцовые, лабиринтные и плавающие сальниковые.

Торцовые уплотнения (рис. 60, а) состоят из двух фланцев, установленных на барабане и бункере сушилки, которые скользят друг относительно друга. Гайка 5 и шпилька 6 предназначены для регулировки степени прижатия кольца. Уплотнение достигается за счет малого зазора между бандажом и подвижным кольцом.

Лабиринтное уплотнение (см. рис. 60, б) состоит из дисков 1 и 4, к которым приварены концентрические кольца 2 и 3, образующие между

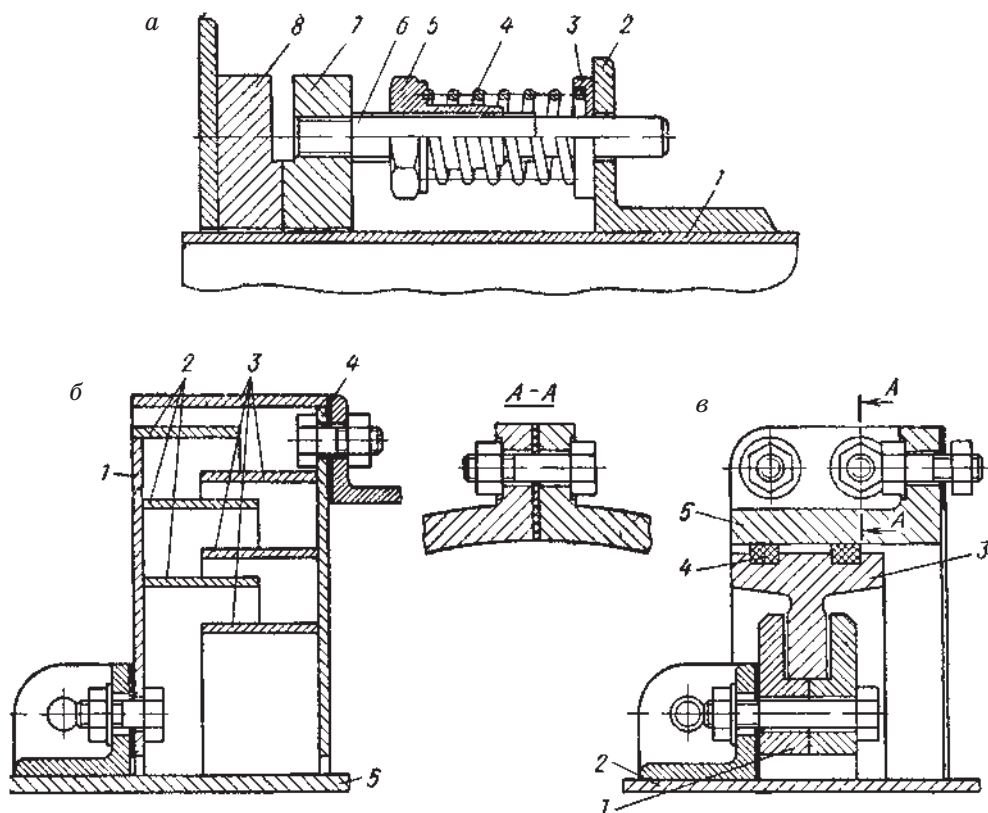


Рис. 60. Уплотнения барабана:

*a* — торцовое: 1 — барабан, 2 — фланец; 3 — упор, 4 — пружина, 5 — гайка, 6 — шпилька, 7 — фланец барабана, 8 — фланец загрузочной (разгрузочной) камеры; *б* — лабиринтное: 1, 4 — диски, 2, 3 — кольца (лабиринты), 4 — бункер, 5 — загрузочная (разгрузочная) камера; *в* — сальниковое: 1 — полукольца, 2 — барабан, 3 — промежуточное кольцо, 4 — сальники, 5 — полукольца

собой небольшие зазоры (лабиринты). Диск 1 прикреплен с помощью уголка к барабану 5, а диск 4 — к камере. Узкий зигзагообразный зазор между ними обеспечивает значительное сопротивление движению сушильного агента, направляемого в сушилку под небольшим давлением (или разрежением).

Плавающее сальниковое уплотнение (см. рис. 60, *в*) также состоит из подвижных полуколец 1, закрепленных винтами на барабане 2, и неподвижных полуколец 5, установленных на камере. Полукольца соединяются винтами (см. разрез А-А). В пазах полуколец 1 установлено промежуточное кольцо 3, в проточках которого уложены сальниковые кольца 4. При вращении барабана промежуточное кольцо 3 как бы «плавает» в пазу, компенсируя неточности сборки и биение барабана.

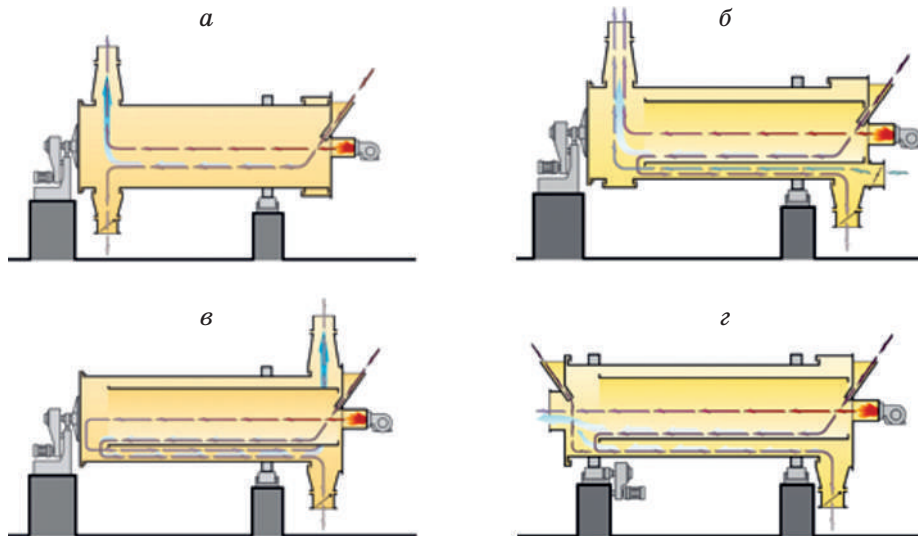
Широкое распространение получили также горизонтальные барабанные сушилки. Их преимуществом является то, что отсутствует



осевая нагрузка на упорные ролики, вследствие чего уменьшается их износ. Кроме того, горизонтальное расположение барабана позволяет совмещать ряд дополнительных операций, таких как охлаждение, измельчение, обеспыливание и др. Транспортировку материала в этом случае осуществляют винтовой насадкой, которую устанавливают вместе с пересыпными лопастями (см. фото ниже).

Ниже рассмотрены основные варианты сушилок с горизонтальным расположением сушильного барабана.

**Барабанная сушилка с двойным (тройным) барабаном.** На рис. 61 даны схемы различных вариантов сушилок данного типа. Монобарабанная сушилка (*а*) имеет горизонтально расположенный барабан. Внутри барабана установлены (приварены) два типа лопастей: винтовые лопасти транспортируют материал к выгрузке, а подъемно-лопастная насадка (пересыпные лопасти) создают подъем и пересыпание материала внутри барабана. Сушилки с двойным барабаном (рис. 61, *б–г*) позволяют уменьшить длину барабана и сократить потери тепла через кожух. Материал сначала



**Рис. 61.** Варианты движения теплоносителя в горизонтальных барабанных сушилках:

*а* — монобарабан; *б* — двойной барабан; *в, г* — двойной барабан с охлаждением продукта воздухом, влажным материалом



высушивается во внутреннем барабане, а затем поступает во внешний барабан, где, передвигаясь при помощи винтовых лопастей, подвергается дополнительной сушке до требуемой влажности. Такая конструкция может быть использована также для охлаждения материала во внешнем барабане двумя способами (см. варианты *в* и *г* на рис. 61).

В первом случае (*в*) во внешний барабан подается холодный воздух, который, двигаясь противотоком, охлаждает высушенный материал и затем удаляется вместе с отходящими газами.

Во втором случае (*г*) в барабан с противоположной от загрузки стороны, подается дополнительное количество влажного материала. Влажный материал, смешиваясь с пересушенным горячим материалом, частично высушивается и охлаждает конечный сухой продукт.

На рис. 61, 62 поток материала показан коричневыми стрелками, топочные газы — красными, воздух и остывшие топочные газы — голубыми.

Для сушки материалов, склонных к образованию корки, препятствующей удалению влаги из внутренних слоев материала (таких как фильтр-кек, пастообразные материалы), используют сушилки с мелющими телами (рис. 62, *а*). Мелющие тела (металлические или фарфоровые шары) располагают в средней части сушильного барабана в отдельной изолированной секции (см. рис. слева).



В некоторых случаях сушка кусковых минералов (таких как известняк, кварц, полевой шпат

и др.) может быть совмещена с удалением пыли. Влажные кусковые минералы, поступающие с карьера, содержат значительное количество примесей песка и глины, которые налипают на куски основного минерала и не могут удалиться простым грохочением. В этом случае используется сушилка с расширением барабана, которое улучшает обеспыливание конечного продукта (рис. 62, *б*).

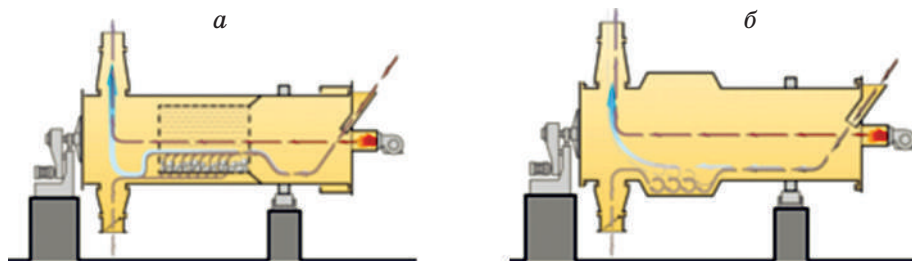


Рис. 62. Барабанные сушилки:

*а* — с мелющими телами; *б* — с камерой для обеспыливания материала

В технологическую схему сушки помимо сушильного барабана входит другое технологическое оборудование. В зависимости от вида материала и типа теплоносителя в схему сушки может входить:

- горелка, топка, теплообменники, калориферы;
- транспортеры, питатели;
- циклоны, бункеры, фильтры;
- грохоты, сита, классификаторы;
- емкости для хранения и оборудование для затарки продукта.

На рис. 63 приведена схема сушки карьерного песка в барабанной сушилке производительностью 50 т/ч. Кварцевый песок с влажностью 6 % после очистки от посторонних примесей на грохоте выгружается в приемный бункер 1, откуда винтовым питателем или вибропитателем направляется в барабанную сушилку 2.

В сушильную камеру (барабан) подаются дымовые газы, полученные при сгорании природного газа в газовой горелке 3. Дымовые газы частично разбавляются холодным воздухом, который подсасывается через неплотности сушильного барабана. Температура дымовых газов на входе в сушилку составляет около 720 °С.

В сушильном барабане при пересыпании дисперсного материала на лопастях сушилки происходит его сушка. Высушенный материал разгружается в бункер 9, откуда пневмонасосом 10 направляется в силос 6. На силосе установлен картриджный фильтр 7.

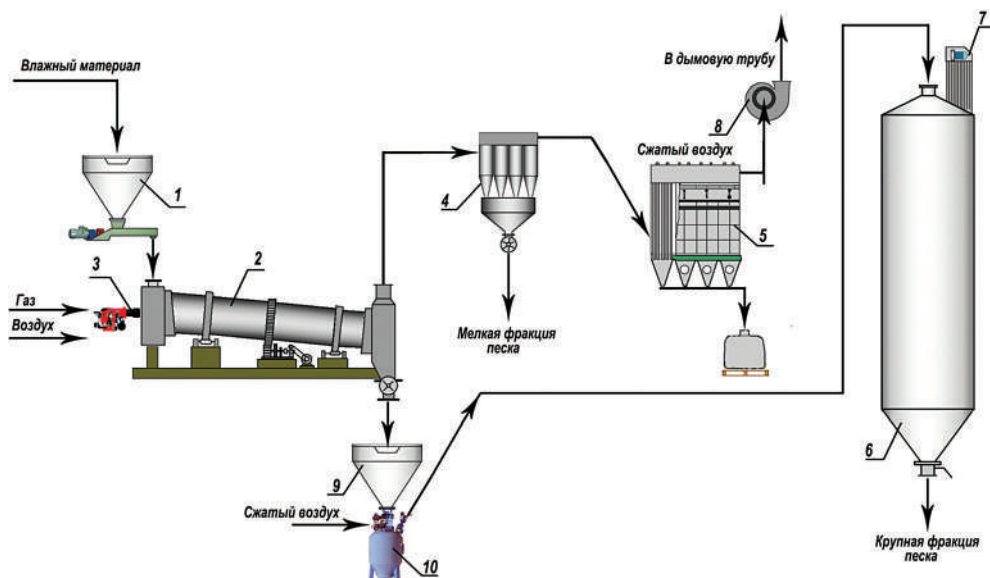


Рис. 63. Технологическая схема сушки карьерного песка в барабанной сушилке:

1 — бункер; 2 — барабанная сушилка; 3 — горелка; 4 — циклон батарейный; 5 — фильтр рукавный; 6 — силосный бункер; 7 — фильтр картриджный; 8 — вентилятор; 9 — бункер приемный; 10 — пневмонасос

Запыленные газы из барабанной сушилки 3 направляются в группу циклонов 4, где мелкодисперсная пыль разгружается в приемный бункер циклонов и шлюзовым питателем пересыпается в бункер, а очищенные от пыли газы направляются в рукавный фильтр 5 или группу мультициклонов для дальнейшей очистки и вентилятором 8 сбрасываются в атмосферу. Самая мелкая фракция из бункера рукавного фильтра выгружается в мягкие контейнеры МКР («биг-бэги»). Запыленность газов после рукавного фильтра менее  $20 \text{ мг/м}^3$ , после мультициклонов  $50 \text{ мг/м}^3$ .

При сушке мелкого песка марки  $2\text{K}_2\text{O}_3025$  (ГОСТ 2138–91), который имеет 95 % фракции менее 0,4 мм, образуется 50 т/ч высушенного материала с влажностью  $<0,1 \%$ , в том числе 45 т/ч основной фракции, около 5 т/ч циклонной пыли и менее 0,1 т/ч пыли с рукавного фильтра. Таким образом, пылевынос из барабана составляет около 10 %.

Существуют различные методы расчета барабанных сушилок, некоторые из которых приведены в главе 10. Более подробно методики расчета изложены в специальной литературе [11, 36, 47, 80].

Диаметр барабана  $D_6$  обычно находится исходя из скорости сушильного агента (дымовых газов, воздуха), которая выбирается в зависимости от дисперсности и плотности частиц материала (см. табл. 7-1). Учитывая, что оптимальная степень заполнения барабана материалом составляет 20 %, рассчитаем сечение барабана  $S_6$  и его диаметр по формулам

$$S_6 = \frac{L(1 + x_{\text{ср}})}{\rho_{\text{вл}} 0,8v}, \quad D_6 = \sqrt{\frac{S_6}{0,785}}, \quad (7.1)$$

где  $L$  — расход сушильного агента, кг/с;  $x_{\text{ср}}$  — средняя влагосодержание сушильного агента, кг/кг;  $\rho_{\text{вл}}$  — средняя плотность сушильного агента, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  — скорость сушильного агента, принятая по табл. 7-1, м/с.

Объем барабана  $V_6$  можно определить с помощью значения напряжения барабана сушилки по влаге  $A$ , определяемого по опытным данным.

Объем барабана

$$V_6 = \frac{\pi D_6^2}{4} L_6 = \frac{W}{A}. \quad (7.2)$$

Зная массу влаги  $W$  (кг/с), испаряемой из материала, по уравнению (7.2) определяют  $L_6$ .

Длина барабана  $L_6$  находится в пределах (3,5–7)  $D_6$ .

Напряженность барабана по влаге (влагонапряженность)  $A$  зависит от многих факторов — в частности, от типа сушилки, степени заполнения ее объема, скорости вращения барабана, — а также от свойств, влажности и размеров частиц материала, от температуры, влажности и скорости сушильного агента внутри барабана. Значения  $A$  для некоторых

материалов приведены в табл. 7-2 [36]. В определенных условиях значения  $A$  для барабанных сушилок достигают 100–120 кг/(м<sup>3</sup>·ч).

Таблица 7-2

## Значения напряжения по влаге в барабанных сушилках

Материал	Влажность материала, %		Температура, °С		Размер частиц, мм	$A$ , кг/(м <sup>3</sup> ·ч)
	нач.	кон.	нач.	кон.		
Глина для керамики	22	5	600–700	81–100	–	50–60
Глина огнеупорная	9	0,7	800–900	70–80	–	60
Известняк	10–15	1,5	1000	80	0,15	45–65
	8–10	0,5	800	120	0–20	30–40
Опилки древесные	40	15	350	–	–	30–40
Руда железистая	6	0,5	730	–	0,5	70
Руда марганцевая	15	2	120	60	2,5	12
Песок карьерный	4,3–7,7	0,1	840	100	–	80–88
Сахарный песок	3	0,1	100	40	–	8–9
Соль поваренная	4–6	0,2	150–200	–	–	7,2
Уголь каменный	9	0,6	800	60	–	32–40
Торф фрезерный	50	20	450	100	–	75

Таким образом, чем выше температура сушки и начальная влажность материала, тем больше может быть значение напряженности барабана по влаге.

Ориентировочное значение влагонапряженности  $A_v$  (кг/(м<sup>3</sup>·ч)) можно рассчитать по эмпирической зависимости [11]

$$A_v = 80,3 \left( \frac{w_n}{w_k} \right)^{0,28} \left( \frac{T_n}{T_k} \right)^{0,9} \left( \frac{L_6}{D_6} \right)^{-1,7}, \quad (7.3)$$

где  $w_n$ ,  $w_k$  — влажность материала, начальная и конечная соответственно, %;  $T_n$ ,  $T_k$  температура сушильного агента, начальная и конечная, соответственно, К;  $L_6$  — длина барабана, м;  $D_6$  — диаметр барабана, м.

Однако эта зависимость имеет очень ограниченное применение и зачастую дает неверные результаты, поскольку не учитывает свойства высушиваемого материала.

Более точно рабочий объем барабана сушилки может быть определен с помощью объемного коэффициента теплоотдачи от сушильного агента к материалу  $\alpha_v$ , Вт/(м<sup>3</sup>·К), по уравнению

$$V_6 = 1,2 \frac{Q}{\alpha_v \Delta t}, \quad (7.4)$$

где  $Q$  — тепловая нагрузка, Вт;  $\Delta t$  — среднелогарифмическая разность температур между материалом и сушильным агентом, К.

Методика расчета  $\alpha_v$  приводится в специальной литературе [47, 80]. Коэффициентом 1,2 учитывается, что материалом занята только часть барабана. Суммарный коэффициент теплоотдачи складывается из трех составляющих:

1) коэффициента переноса тепла через поверхность падающих с лопаток частиц;

2) коэффициента переноса тепла через наружную поверхность материала, находящегося в завале и на лопатках;

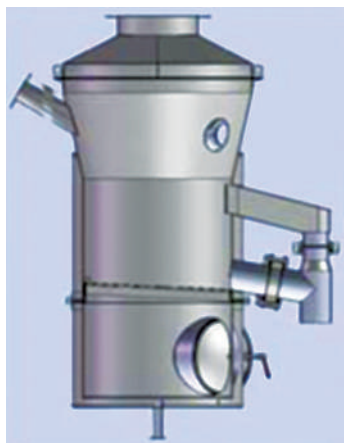
3) коэффициента переноса тепла за счет теплопроводности при контакте материала с более нагретыми деталями внутреннего устройства и обечайкой барабана.

Наиболее значимым по вкладу является первый коэффициент.

Следует отметить, что расчет с помощью объемного коэффициента очень громоздкий. Для практических целей обычно принимается схема расчета по напряжению барабана по влаге.

Время пребывания частиц в сушильном барабане зависит от длины и диаметра сушилки, скорости вращения, угла наклона барабана, типа насадки, характеристик материала и может быть рассчитана по эмпирическим зависимостям, приведенным в литературе [47, 80]. Обычно время пребывания в сушильном барабане составляет 10–30 мин.

### 7.3. КОНВЕКТИВНЫЕ СУШИЛКИ С ВЗВЕШЕННЫМ СЛОЕМ МАТЕРИАЛА



Сушилки с кипящим (псевдооживленным) слоем. Эти сушилки являются одним из прогрессивных типов аппаратов для сушки. Процесс в кипящем слое позволяет значительно увеличить поверхность контакта между частицами материала и сушильным агентом, интенсифицировать испарение влаги из материала и сократить (до нескольких минут) продолжительность сушки. Сушилки с кипящим слоем (сушилки КС) в настоящее время успешно применяются для сушки не только сыпучих зернистых материалов, но и материалов, подверженных комкованию, а также пастообразных материалов, растворов, расплавов и суспензий.

Наиболее распространены однокамерные сушилки непрерывного действия (рис. 64). Высушиваемый материал подается из бункера 1 питателем 2 в слой материала, «кипящего» на газораспределительной решетке 3 в камере 4 сушилки. Сушильный агент — горячий воздух или

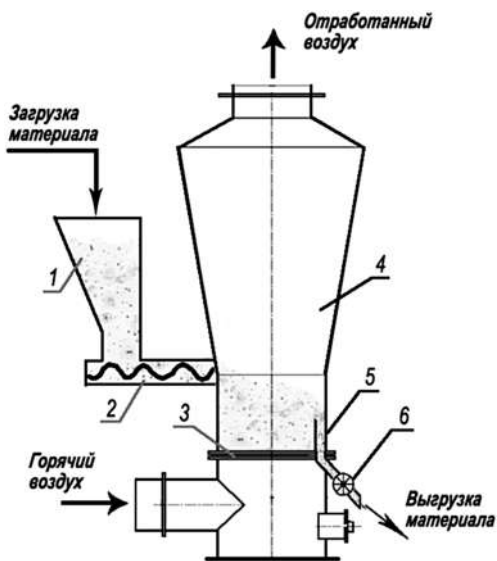
топочные газы, разбавленные воздухом, — подается под решетку 3, проходит с заданной скоростью через отверстия решетки и поддерживает на ней материал в кипящем (псевдоожигенном) состоянии. Высушенный материал ссыпается через штуцер 5, расположенный несколько выше решетки 3, и удаляется через шлюзовый затвор 6. Сушильная камера имеет расширение кверху, служащее для уменьшения уноса частиц из сушилки. Отработанные газы очищаются от унесенной пыли в циклоне и рукавном фильтре, после чего выбрасываются в атмосферу.

Сушилки круглого сечения имеют диаметр распределительной решетки от 0,8 до 2 м. Высота сушилок КС составляет от 3 до 10 м.

В однокамерных сушилках наблюдается значительная неравномерность сушки, обусловленная тем, что при интенсивном перемешивании в слое, время пребывания отдельных частиц существенно отличается от его среднего значения. Поэтому применяют сушилки с расширяющимся кверху сечением, например коническим, как показано на рис. 64. Скорость газа внизу камеры должна превышать скорость осаждения самых крупных частиц, а вверху — быть меньше скорости осаждения самых мелких частиц. При такой форме камеры достигается более организованная циркуляция твердых частиц, которые поднимаются в центре и опускаются (в виде менее разреженной фазы) у периферии аппарата. Благодаря снижению скорости газов по мере их подъема улучшается распределение частиц по крупности и уменьшается унос пыли. Это, в свою очередь, повышает равномерность нагрева (более мелкие частицы, поднимающиеся выше, находятся в области более низких температур) и позволяет уменьшить высоту камеры.

Температура сушильного агента, подаваемого в сушилку такого типа, ограничена предельной температурой материала распределительной решетки и составляет примерно 350–400 °С. Изготовление распределительной решетки из специальных материалов позволяет повысить температуру сушильного агента до 600–800 °С.

Однокамерные сушилки наиболее просты по устройству и в эксплуатации, обладают высокими экономическими показателями.



**Рис. 64. Сушилка с кипящим слоем материала:**

1 — бункер; 2 — питатель; 3 — газораспределительная решетка; 4 — камера сушиллки; 5 — штуцер для выгрузки высушенного материала; 6 — шлюзовый затвор



легко поддаются автоматизации. Это наиболее распространенный тип промышленных сушилок. Недостатком некоторых конструкций является неравномерная обработка материала, обусловленная широким спектром времен пребывания отдельных частиц в зоне сушки. Этот недостаток можно предотвратить, организовав направленное движение слоя материала и разделяя камеры на зоны, различающиеся гидро- и термодинамическими условиями проведения процесса.

Для сушилок большей производительности рекомендуется секционировать сушильную камеру, поскольку на распределительных решетках большого сечения увеличивается неравномерность псевдоожижения материала, возникают трудности загрузки влажного материала на кипящий слой. На рис. 65 показана сушилка КС прямоугольного сечения для сушки мелкодисперсных материалов (песок, фракционированный мрамор, известняк). Горячий воздух подается под решетку вентиляторами через отдельные штуцеры в четыре секции, что позволяет создать равномерный по высоте слой и обеспечить продвижение материала к выгрузке.

Сушилка КС (см. рис. 65) состоит из корпуса 1, распределительной решетки 2 и патрубков 3 ввода и вывода 4 газов. Горячие газы вводятся в нижнюю часть короба сушилки через несколько патрубков 3 для равномерного распределения газов в подрешеточном пространстве. Сушильная камера секционирована, что позволяет равномерно распределить материал в псевдоожиженном слое. Влажный материал подается на решетку через несколько вводов 5, высушенный материал выходит с другого конца решетки через патрубок 6, высота слоя материала регулируется порогом 7. В последний патрубок 3 сушилки может подаваться

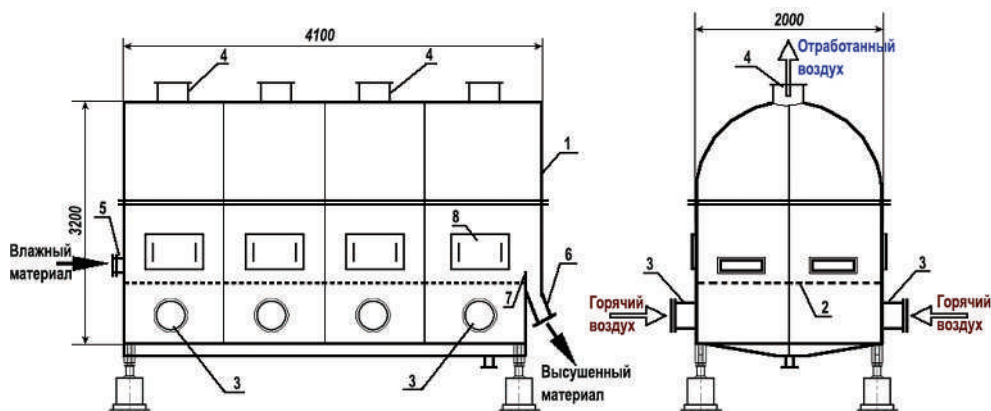


Рис. 65. Четырехсекционная сушилка с кипящим слоем материала:

1 — корпус; 2 — газораспределительная решетка; 3 — патрубки для ввода горячих газов; 4 — патрубки для удаления отработанных газов; 5 — штуцеры для загрузки влажного материала; 6 — штуцеры для выгрузки высушенного материала; 7 — выгрузочный порог; 8 — люки



холодный воздух для охлаждения высушенного материала. Корпус сушилки, топка и газоходы теплоизолированы.

Распределительная решетка выполнена из жаропрочной нержавеющей стали. Нижняя часть корпуса сушилки выполнена также из жаропрочной стали, а верхняя часть корпуса — из обычной стали. Конструкция распределительной решетки предусматривает компенсацию температурных расширений при ее нагревании.

В сушилке такого типа получается более равномерный по влажности продукт. Преимуществом таких сушилок является возможность обеспыливать зернистый продукт за счет уноса мелких частиц и осаждения их в циклонах и фильтрах.

Для многотоннажных производств применяются многокамерные сушилки КС.

Многокамерные сушилки состоят из двух и более камер, через которые последовательно движется высушиваемый материал. Камеры располагаются либо рядом, либо одна над другой. Решетки в сушильных камерах иногда выполняют наклонными в сторону выгрузки продукта. Во взвешенный слой могут быть установлены теплообменники и механические устройства, разрыхляющие слой.

На рис. 66 показана двухкамерная сушилка, применяемая для высушивания полимерных материалов. Горячий воздух с большой скоростью (60–70 м/с) подается через отверстия решетки, расположенной в нижней части каждой камеры. Материал поступает в верхнюю камеру 1, подсушивается в ней и пересыпается в нижнюю камеру 2, из которой удаляется в высушенном виде. Воздух подается в каждую камеру отдельно и отводится из камер в общий коллектор для очистки от пыли, после чего выбрасывается в атмосферу. Над решеткой верхней камеры

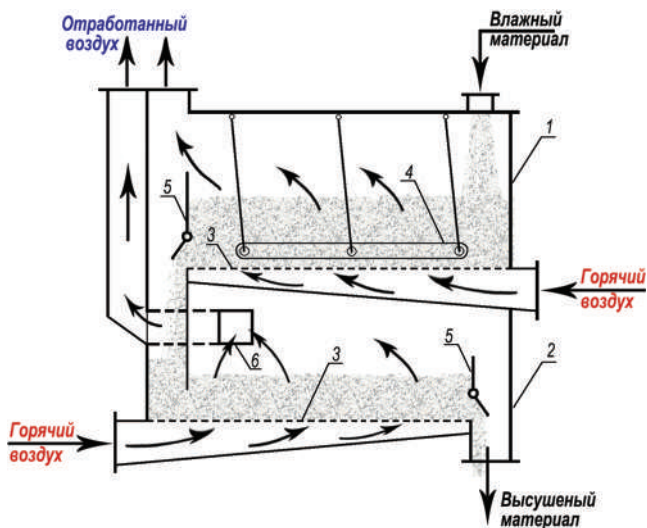


Рис. 66. Двухкамерная сушилка КС:

1 — верхняя камера; 2 — нижняя камера; 3 — решетка; 4 — разрыхлитель; 5 — порог; 6 — газоход

установлен механический разрыхлитель 4 для комкующегося высушиваемого материала.

Многокамерные сушилки более сложны по конструкции (и, соответственно, в эксплуатации), чем однокамерные, требуют больших удельных расходов сушильного агента и электроэнергии.

Применение многокамерных сушилок целесообразно лишь для материалов со значительным сопротивлением внутренней диффузии влаги, требующих длительной сушки, а также для материалов, нуждающихся в регулировании температурного режима сушки (во избежание перегрева). В них удобно совмещать процессы сушки и охлаждения материала.

Сушилки с ворошителями лопастного, рамного или другого типа используются в аппаратах псевдооживленного слоя для предотвращения агломерации частиц и разрушения каналов в слое.

Механические измельчители и побудители позволяют значительно расширить область применения взвешенного слоя. Они способствуют равномерному и устойчивому псевдооживлению, ликвидируют каналообразование и комкование материала, увеличивают поверхность контакта фаз.

К недостатку сушилок КС следует отнести высокое гидравлическое сопротивление этих аппаратов. Распределительная решетка в зависимости от конструкции имеет сопротивление до 1 кПа, а сопротивление слоя, при его высоте 400–700 мм, составляет 5–7 кПа. Кроме того, после сушильного аппарата следует установить циклоны (1,2–1,8 кПа) и рукавный фильтр (0,7–0,9 кПа). Таким образом, общее сопротивление трассы может достигать более 10 кПа. Поэтому в схему сушки КС ставят как минимум два вентилятора — один дутьевой и второй вытяжной, а иногда приходится ставить воздухоудовку.

Конструкции распределительных решеток, применяемых в сушилках КС, представлены на рис. 67, 68.

Различают два основных типа решеток: провального типа и беспровальные [67, 71]. Провальные решетки (рис. 67) могут быть изготовлены из листа железа с отверстиями (а); такие решетки применяются для цилиндро-конических аппаратов. Для аппаратов прямоугольного сечения чаще применяют секционированные колосниковые решетки (см. рис. 67, б). Для легких мелкодисперсных материалов могут быть использованы сетчатые решетки: на основу в виде балок укладывают металлическую или полимерную сетку с ячейей 0,5–5 мм.

Живое сечение решеток обычно принимают 8–10 %, что позволяет создать относительно высокую скорость газа в отверстиях при невысоком гидравлическом сопротивлении 800–1000 Па. Размер отверстий решетки выбирается из условия, чтобы при остановке подачи газа под решетку не происходило полное высыпание слоя; обычно размер отверстий выбирают на 0,5–1 мм больше размера частиц основной фракции.

На рис. 68 представлены конструкции беспровальных решеток. На таких решетках не происходит просыпание материала под решетку

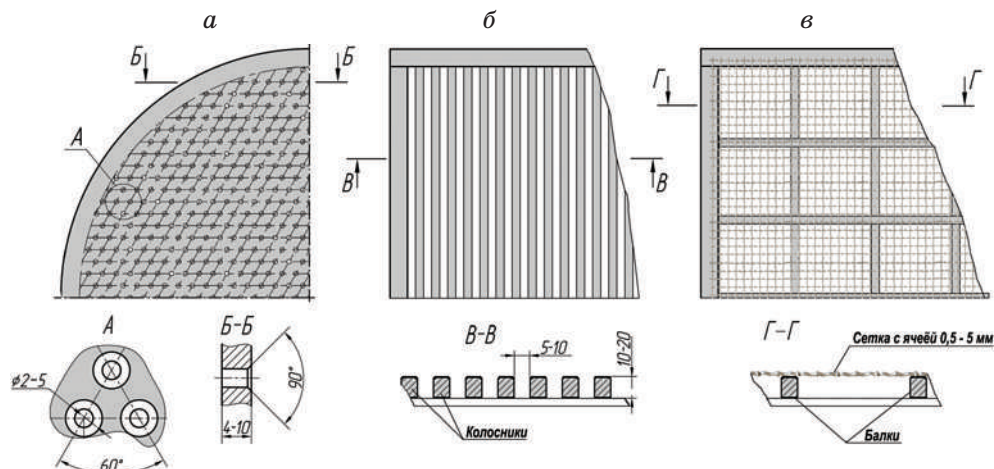


Рис. 67. Конструкция газораспределительных решеток:

*a* — дырчатая; *б* — решетчатая; *в* — сетчатая

при остановке сушилки, поэтому остановка и пуск сушильного аппарата не вызывает затруднений.

Беспровальные решетки бывают трех типов: колпачковые (*a*), дырчатые двухслойные (*б*) и решетки с тангенциальным вводом газа (*в*). Колпачковые решетки изготавливают из жаропрочной плиты 1, в отверстия которой вставлены сменные сопла в виде колпачков 2, которые крепятся винтами 3. Двухслойные решетки (*б*) представляют собой два параллельно расположенных листа 4, оси отверстий которых смещены

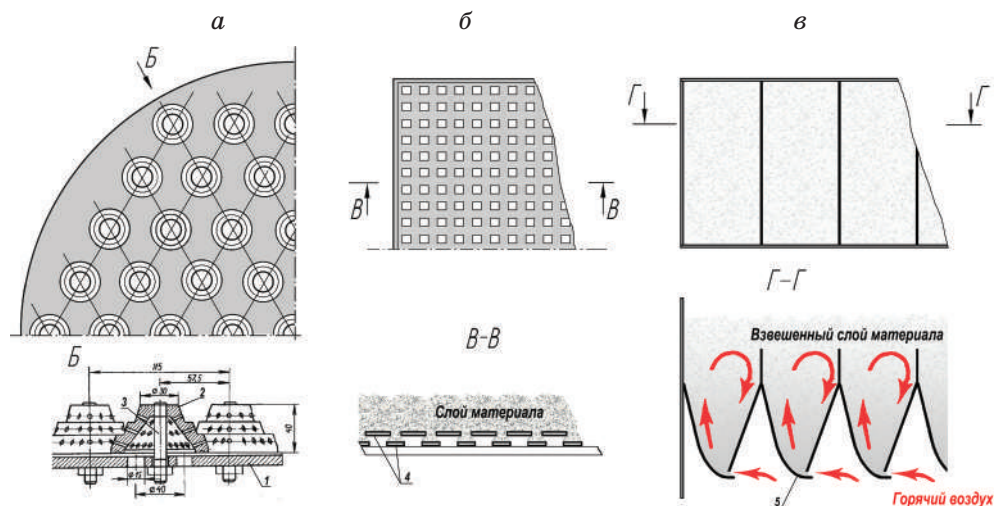


Рис. 68. Конструкция беспровальных газораспределительных решеток:

*a* — колпачковая; *б* — двухслойная; *в* — вихревая: 1 — плита, 2 — колпачок, 3 — винт, 4 — дырчатый лист, 5 — вихревая секция решетки

одна относительно другой. Решетки с тангенциальным вводом газа представлены на рис. 68, *в*. Такие решетки устанавливают на сушилках прямоугольного сечения. В каждой секции 5 такой решетки образуется вихревое движение материала, а в объеме всей сушилки имеет место взвешенный слой. Высота взвешенного слоя обычно больше высоты секции.

Для сушки растворов, суспензий и паст исходный влажный материал (раствор, пасту) подают на взвешенный слой материала.

Обезвоживание растворов в сушилках КС позволяет не только высушить продукт, но и проводить сушку с его одновременной грануляцией. Для этого часть высушенного продукта возвращают в сушильный аппарат, в результате чего происходят агломерация кристаллов и укрупнение конечного продукта. Таким образом сушат большинство минеральных солей, таких как хлорид калия, натрия, кальция; сульфат натрия, цинка; сода и др. [27]. Сушку минеральных солей производят топочными газами с начальной температурой 700–900 °С, температуру в слое поддерживают 90–140 °С. При обезвоживании растворов сульфатов натрия, цинка, сточных вод растворы распыляют через форсунки на слой материала; при этом часть высушенного материала (ретур) возвращается в сушилку. Количеством ретура можно регулировать дисперсный состав конечного продукта, выгружаемого из сушилки. Обычно размер гранул, полученных в сушилках кипящего слоя, составляет 2–3 мм. В табл. 7-3 приведены результаты работы промышленных сушилок для сушки различных сыпучих материалов, растворов и паст.

Для сушки растворов и суспензий применяют также сушилки со взвешенным слоем инертного материала [58, 67]. В качестве инертного слоя может применяться стеклянные шарики, гранулы глинозема, фракционированный кварц, песок, гранулы фторопласта и некоторые другие материалы. Основными требованиями к инертному материалу являются низкая истираемость, термическая стойкость и низкая адгезия — отсутствие налипания высушиваемого материала на поверхности инертного слоя.

Сушилки с инертным слоем материала работают на полный вынос продукта из сушильного аппарата. Это значит, что высохший на поверхности инерта продукт отрывается от поверхности и выносится потоком воздуха из сушильной камеры аппарата КС.

При сушке пастообразных материалов, растворов и суспензий во взвешенном слое инертных тел материал образует на поверхности инертных частиц сухие оболочки, которые раскалываются при соударении инертных тел и выносятся отработанным теплоносителем в пылеулавливающую аппаратуру. При увеличении размеров инертных частиц до 6–12 мм высушенный продукт состоит в основном из частиц размером около 300 мкм и представляет собой чешуйки или крупинки. В этом случае значительно повышается производительность сушилки, поскольку увеличивается допустимая скорость теплоносителя. Кроме

того, при таком способе сушки отсутствует перегрев материала, а время его пребывания в сушильной камере исчисляется секундами, поэтому он может быть применен и для термочувствительных продуктов.

В некоторых случаях сушилки с инертным слоем материала могут заменить распылительные сушилки, которые более громоздки и энергоемки. При сушке суспензий и растворов на взвешенном слое инертных тел размеры аппаратов сокращаются на 1–2 порядка по сравнению с распылительными сушилками. Так же как и распылительные сушилки, сушилки с инертным слоем могут применяться для получения порошкообразных продуктов. В данном случае инертный материал выполняет роль мелющих тел, которые размалывают продукт до размеров 100–300 мкм.

Основными параметрами работы сушилок с инертными телами являются удельная производительность установки и слоя инертных тел по сухому продукту и по испаренной влаге, а также влажность высушенного материала. Причем влагонапряженность сушильной камеры можно отнести как к объему сушильной камеры, к площади сечения распределительной решетки, так и к массе инертных тел.

В табл. 7-4 приведены характеристики таких сушилок для некоторых материалов.

При сушке вязких паст подаваемая паста не покрывает пленкой инертные частицы, а находится между ними. Поверхность высушиваемого материала в десятки раз превышает поверхность инертных тел, и процесс протекает более интенсивно, инертные тела перемалывают частицы пасты и предотвращают образование комков, обеспечивая подвижность слоя.

Несмотря на высокую эффективность сушилок с инертным слоем, они имеют недостатки: износ корпуса сушилки вследствие абразивного действия инертных частиц, износ самих частиц, а также вынос частиц инертного слоя из аппарата. Для устранения уноса устанавливают расширитель, а после сушильного аппарата ставят вибросито.

Из данных о работающих в промышленности сушилках с инертным слоем известно, что при разнообразной форме все аппараты вполне работоспособны. Это объясняется большой устойчивостью процесса: масса слоя практически всегда постоянна и приблизительно равна массе загруженного инертного материала. При нагрузке по влаге, не превышающей максимально допустимую нагрузку, слой является сыпучим, поэтому не имеет большого значения способ подачи влажного материала — на слой или в слой. Кроме того, нет необходимости в его тонком диспергировании. При наличии перемешивающих устройств паста может загружаться периодически достаточно большими порциями.

Рабочая нагрузка аппаратов с инертным слоем по испаренной влаге при сушке суспензий составляет 1,5–2 кг/(кг·ч), при сушке паст — 3 кг/(кг·ч), а в случае их механического перемешивания возрастает до

Таблица 7-3

Основные характеристики сушки различных продуктов в сушилках кипящего слоя

№	Материал	Производительность, т/ч	Диаметр (площ. сеч.) решетки, мм	Размер высуш. гранул, мм	Влажность материала, %		Темп. суш. агента, °С		Удельный расход		Влагонапряженность		Темп. к.п.д., %
					нач.	кон.	нач.	кон.	воздуха, кг/кг	тепла, МДж/кг	кг/ (м³·ч)	кг/ (м²·ч)	
I. Сыпучие материалы, соли													
1	Уголь	100	2100	0–6	18–22	2	650	80				2900	
2	Песок	30	0,6 м²	0–1,2	5–6	<0,1	700–800	100–110					
3	Сульфат аммония	20	5 м²	0,8	2,0	0,2	150	100		11,6	61,4	72,0	19,2
4	Хлорид калия	90			5–8	0,2–0,3	650	150			120–140	500–750	25–47
5	Карбонат бария	40	0,07 м²		45	1,0	350	100			70	3130	35
II. Растворы солей													
1	Трихлорацетат натрия (ТХАН)		900/260*	2–5	50	3,3	175	57	35	5,45	85	167	50
2	Сульфат марганца (П)		900/275	3–6	66	10	340	110	12	3,94	234	463	62
3	Хлорид кальция		2800×140**	–	65	2	520	180	7,8	3,58	26	176	61
4	Натриевая соль бензол-м-дисульфокислоты		1600***	<5	50	<0,1	510	167	21	7,56	63	90	30
5	Нитрофоска, суспензия			1–4	78,5		250						
6	Нитрат кальция, магнезия		960/400				350	150					

\* Верхний диаметр сушилки фонтанирующего слоя / нижний диаметр.

\*\* Решетка вихревого типа.

\*\*\* Сушилка фонтанирующего слоя с внутренним конусом [66, с. 167].

Для сушилок КС показателем является параметр влагонепроницаемости, отнесенный к 1 м<sup>2</sup> распределительной решетки, который принято называть «съем влаги», или влагосъемом.



Таблица 7-4

## Основные характеристики сушилки различных продуктов в сушилках с инертным слоем материала

№	Материал	Диаметр решет- ки, мм	Инертный слой	Влаж- ность м-ла, %		Темп. суш. агента, °С		Хар-ки слоя		Удельный расход		Влагонапряженность			Темп. к.п.д., %
				нач.	кон.	нач.	кон.	высо- та <sup>вс</sup> , мм	г.с., кПа	возду- ха, кг/кг	тепла, МДж/ кг	кг/ (м³·ч)	кг/ (м²·ч)	кг/ (кг·ч)	
I. Суспенз, пасты															
1	Красители (кислотный синий, фиолетовый, коричневый)	240	Стеклянные шарики 2 мм	56- 75	3-7	170- 240	70-90	150- 260	1,8- 4,7	18-40	4,0- 6,8	40-100	30-120	0,18- 0,39	40-69
2	Лаки (основной синий, розовый, оранжевый)	240	Кварцевый песок 1-2 мм	58- 72	1,2- 2,6	180- 230	70-93	190	3,2- 3,4	22-30	3,8- 6,3	122-155	74-94	0,13- 0,22	36-59
3	Карбонаты магния, свинца, марганца, кадмия, бария	—	Фторопласт, крошка 2,6 мм	25- 50	0,1- 0,6	190- 250	100- 120	—	—	22-40	3,7- 6,2	240-470	240- 470	—	—
4	Хлорэтансульфонат	200/50*	Стеклянные шарики 2 мм	78	0,9	350- 460	135- 155	200	1,8	16-18	6,1- 7,2	396- 500	234- 295	0,84- 1,05	—
5	Дубитель	200/50*	Стеклянные шарики 2 мм	50	1,5	450- 535	120- 170	200	2,1	—	—	174-314	121-220	0,43- 0,79	—
6	Альгинат натрия	400/70*	Стеклянные шарики 6 мм	96,5	9,5	153- 188	83-90	230- 260	6,0- 6,8	26-34	4,6- 5,0	123-155	74-94	0,23- 0,26	—
7	Ванадиевый катализатор	—	Электрокорунд Ø 1,6 мм	80	7	600	100- 150	—	—	—	—	190	980	1,1	86
II. Растворы															
8	Полимер нафталин- сульфонат натрия (пластификатор для бетонов). Данные автора	1500	Фторопласт, крошка 5-6 мм	48	7	220	105	500	7,3	21,6	5,28	133	906	1,65	43

\* Верхний диаметр сушилки фонтанирующего слоя / нижний диаметр  
 \*\* Высота слоя в неподвижном состоянии

г. с. — гидравлическое сопротивление  
 Влагонапряженность — удельный влагосъем (испарение) влаги с 1 м<sup>3</sup> объема аппарата, с 1 м<sup>2</sup> площади распределительной решетки аппарата и с 1 кг инертного слоя соответственно



8 кг/(кг·ч). Эти цифры могут быть использованы при расчете процесса сушки паст и суспензий во взвешенном слое инертного носителя.

Так же как и для большинства конвективных сушилок, влагонапряженность сушилок КС зависит от температуры сушильного агента. Для сушилок с инертным слоем не выведено формулы, аналогичной формуле (7.3), однако имеются графические зависимости, представленные в специальной литературе [67].

Промышленные сушилки с инертным слоем успешно применяют для сушки красителей, пигментов, полимеров, катализаторов и других материалов. Однако существуют некоторые липкие вещества, которые при сушке склеивают частицы инертного материала, нарушая процесс «кипения» взвешенного слоя<sup>1</sup>.

Следует отметить, что сушилки с инертным слоем материала плохо поддаются масштабированию. При увеличении диаметра аппарата уменьшается допустимая нагрузка по влаге на инертный слой (влагонапряженность падает).

Разновидностью сушилок КС являются сушилки с фонтанирующим слоем. Они имеют конический или цилиндрикоконический вид с углом конусности 40–60°.

В таких аппаратах псевдооживление носит своеобразный характер. Сушильный агент, проходя преимущественно по оси аппарата, увлекает твердые частицы и фонтаном выбрасывает их к периферии, после чего они сползают вниз вдоль боковой поверхности конуса. В аппаратах такого типа хорошо псевдооживляются высоковлажные и волокнистые материалы. Разновидностью аппаратов фонтанирующего слоя является аппарат с тангенциальным вводом газа (см. рис. 67, в).

Если промышленные сушилки кипящего слоя работают в интервале порозности  $\varepsilon = 0,55–0,75$ , что соответствует размерам частиц от 30–40 мкм до 6–7 мм, то для фонтанирующего слоя размер частиц может быть увеличен до 25–30 мм.

Недостатком сушилок фонтанирующего слоя является их низкая производительность, которая, впрочем, может быть увеличена за счет секционирования распределительной решетки (подобно изображенной на рис. 67, в).

Таким образом, сушилки с кипящим слоем по влагонапряженности, тепловому к.п.д. превосходят барабанные и распылительные сушилки, и имеют меньшие габариты. К недостаткам таких сушилок следует отне-

---

<sup>1</sup> К таким материалам следует отнести гидролизированный полиакриламид и некоторые другие водно-растворимые полимеры. Даже при небольшой подаче раствора таких веществ на инертный слой происходят склеивание частиц и нарушение структуры взвешенного слоя. Такие материалы необходимо сушить на сушилках контактного типа (вальцовые, дисковые), где высушенный материал снимается специальными скребками (ножами).

сти большое гидравлическое сопротивление и соответственно большой расход электроэнергии, потребляемый тягодутьевым оборудованием.

Для сушки высоковлажных материалов целесообразно комбинировать сушилки кипящего слоя с другими типами сушилок. Так, в работе [71] для сушки таких материалов, как поливинилбутираль или фосфогипс, предлагается на первой стадии предварительно удалять поверхностную влагу в сушилках, которые обеспечивают дезагрегацию слипающихся и комкующихся материалов и удаление поверхностной влаги, а на второй — досушивать материал в сушилках кипящего, фонтанирующего слоя, либо в циклонных сушилках.

Предварительная сушка может быть осуществлена в флэш-сушилке (flash-dryer) — цилиндрическом аппарате с быстроходной мешалкой, которая работает при повышенных скоростях воздуха. Мешалка обеспечивает дезагрегацию, а воздушный поток подсушивает и выносит материал на вторую стадию сушки. Конструкция такой сушилки рассмотрена в главе 7.4.

Для сушки небольших количеств различных продуктов применяют периодически действующие сушилки с кипящим слоем. В этих аппаратах эффективно используют подачу сушильного агента импульсами, вызывающими кратковременное псевдоожижение материала. Таким способом удастся достичь равномерной сушки материалов, склонных к слипанию, и кристаллических материалов без значительного истирания их частиц. В определенных условиях значения влагонапряженности  $A$  при сушке некоторых продуктов в промышленных непрерывно действующих сушилках с кипящим слоем достигают  $1250 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$ .

С помощью сушилок с кипящим слоем при рациональном аппаратурном оформлении процесса достигается экономичная сушка с высоким влагосъемом с единицы объема сушильной камеры. Поэтому при сушке некоторых продуктов (например, солей) сушилки с кипящим слоем вытесняют барабанные и менее эффективные сушилки других типов.

На рис. 69 представлена схема сушки поваренной соли (хлорида натрия), полученной в результате упаривания рассола и отделения влажной соли на центрифуге. Производительность установки составляет  $25 \text{ т/ч}$  по готовому продукту, который соответствует ГОСТ Р 51574–2000 «Соль поваренная пищевая». Размер кристаллов соли  $0\text{--}0,63 \text{ мм}$ , исходная влажность после центрифуги  $2,5 \%$ , на выходе из сушилки  $<0,1 \%$ .

Для пищевых продуктов должен использоваться чистый горячий воздух, который можно получить либо в топке непрямого нагрева, либо в воздухоподогревателе. Поскольку на производстве вырабатывается греющий пар, принята схема с подогревом воздуха в кожухотрубчатом подогревателе — конденсаторе пара.

Влажная поваренная соль после отделения на центрифуге поступает в расходный бункер 1, откуда шнековым питателем или вибропитателем 2 подается в сушилку кипящего слоя 3. Воздух, очищен-

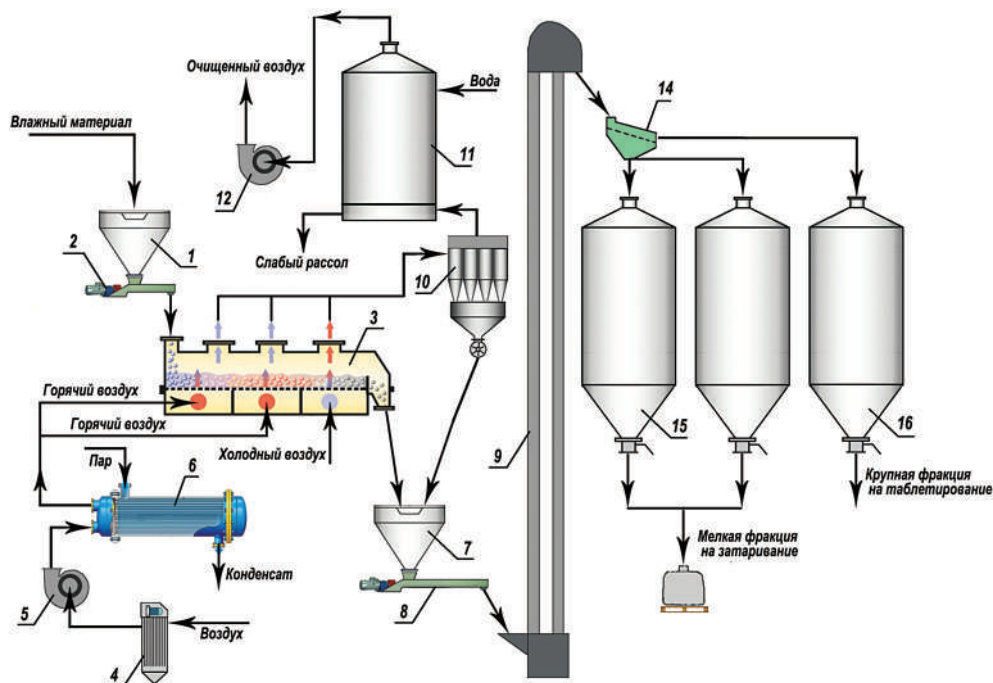


Рис. 69. Схема сушки поваренной соли в сушилке взвешенного слоя:

1, 7 — бункеры; 2, 8 — винтовые питатели; 3 — сушилка кипящего слоя; 4 — фильтр; 5, 12 — вентиляторы; 6 — воздухоподогреватель; 9 — элеватор; 10 — батарейный циклон; 11 — скруббер; 14 — сито; 15, 16 — производственные бункеры

ный на фильтрах 4, вентилятором 5 подается в кожухотрубчатый теплообменник-подогреватель 6. В межтрубное пространство теплообменника подается насыщенный греющий пар (0,11 МПа, 183 °С).

Преимуществом данной схемы является то, что в сушилке данного типа происходит не только сушка, но и охлаждение высушенного продукта. Сушилка многосекционная, имеет минимум три секции. В паровом конденсаторе 5 воздух нагревается до температуры 160–170 °С и направляется в подрешеточное пространство первых двух секций сушилки. Над решеткой установлены дополнительные нагревательные элементы, в которые также подается греющий пар. Такая организация процесса позволяет поддерживать температуру воздуха внутри слоя на уровне 120–130 °С, что достаточно для сушки влажного материала на решетке. Нагревательные элементы внутри сушилки не показаны.

В третью секцию подается холодный воздух, который охлаждает высушенный продукт до 40–60 °С.

Высушенный и охлажденный продукт через пересыпной порог сушилки поступает в бункер 7 и винтовым (шнековым) питателем 8 перегружается в ленточный элеватор 9, после чего поднимается на высоту 8–10 м, где установлено вибросито 14. На сите происходят раз-

деление продукта на фракции и загрузка в производционные силосы (бункеры) 15, 16. Из силосов мелкая фракция соли поступает на затарку, а крупная возвращается в производство.

Отработанные газы проходят очистку от пыли на циклонах 10, затем в скруббере 11, и вентилятором 12 сбрасываются в атмосферу.

Методика расчета сушилок с кипящим слоем зависит от свойств материала и формы связи с ним влаги. Подробное изложение этих методик приводится в главе 10.

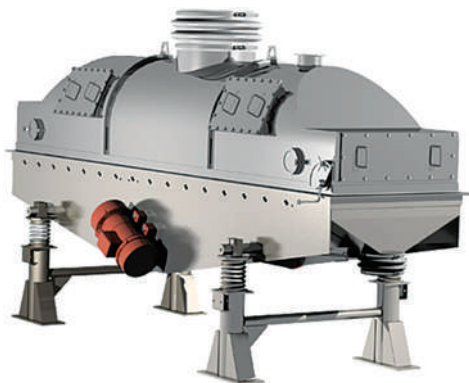
**Сушилки с виброкипящим слоем.** Наложение вибрации на взвешенный (кипящий) слой материала позволяет улучшить его характеристики и повысить интенсивность тепломассообмена в сушилках такого типа. Виброкипящий слой может быть создан в аппаратах самых разнообразных конструкций путем воздействия на сыпучий материал вибрирующих дна, стенок или дополнительных перегородок, а также с помощью специальных вибропобудителей, введенных непосредственно в сушильную камеру. Применение вибропобудителей в сушилках виброкипящего слоя позволяет улучшить перемешивание материала и тем самым в несколько раз повысить величину коэффициентов тепло- и массообмена.

Вибрационное воздействие, в сочетании с подачей газа через пористое дно аппарата под слой сыпучего материала, позволяет снизить скорость газа до значения ниже критического. Тогда роль газа как оживляющего агента перестает являться определяющей.

Сушилки виброкипящего слоя, движение частиц материала в которых происходит в основном за счет механических воздействий, обладают лучшими показателями, чем установки кипящего слоя. Преимущество виброкипящего слоя заключается в значительном уменьшении количества проходящего через аппарат газа, а следовательно, в упрощении и удешевлении очистки этого газа от пыли.

Эти особенности виброкипящего слоя выгодно отличают его от аэродинамического кипящего слоя и открывают широкие возможности для разнообразных режимов работы независимо от скорости газа и гранулометрического состава частиц. Эти сушилки являются одним из прогрессивных типов аппаратов для сушки.

На рис. 70 приведена схема простейшего сушильного аппарата с виброкипящим слоем материала. Влажный материал подается на пер-



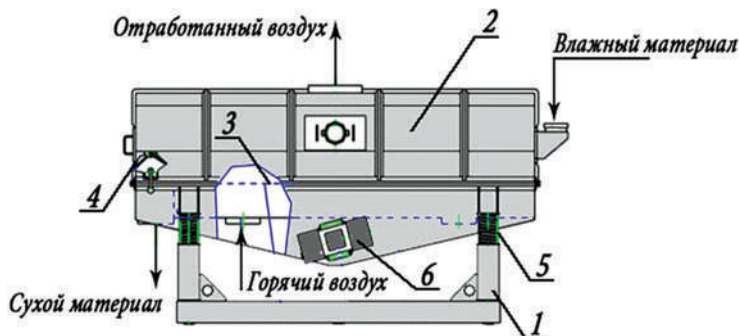


Рис. 70. Вибрационная конвективная сушилка.

1 — рама; 2 — крышка; 3 — перфорированный лист (решетка); 4 — заслонка;  
5 — пружины; 6 — вибропривод

форированный виброжелоб 3, расположенный на раме 1 и установленный на пружинах 5. Вибропривод 6 создает колебания (вибрации) всей конструкции. На виброжелоб подается влажный материал, который оживается поступающим снизу горячим воздухом. Воздух для равномерного псевдооживления может подаваться в несколько патрубков одновременно и выходит также через несколько патрубков (на рисунке не показано). Расход высушенного материала регулируется заслонкой 4. В зависимости от частоты вибраций сушилка может работать в различных газодинамических режимах, которые подбираются для каждого конкретного материала.

Вибросушилки применяются для сушки различных сыпучих зернистых материалов (песка, минеральных веществ, солей, пищевых продуктов и лекарственных препаратов).

В сушилках данной конструкции можно совмещать процессы сушки и охлаждения высушенного материала. Так, на рис. 71 показана

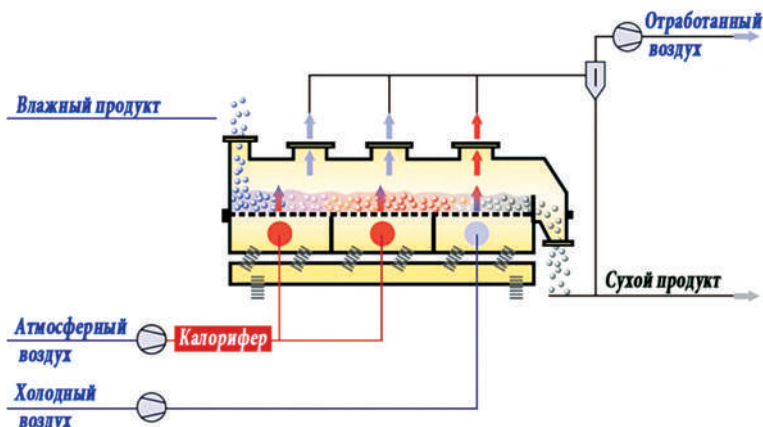


Рис. 71. Вибросушилка с охлаждением продукта на конечной стадии сушки



сушилка, где на конечной стадии сушки производится охлаждение материала — в последний патрубок подается холодный воздух.

**Распылительные сушилки.** В этих сушилках достигается высокая интенсивность испарения влаги за счет тонкого распыления высушиваемого материала в сушильной камере, через которую движется сушильный агент (нагретый воздух или топочные газы). При сушке в распыленном состоянии удельная поверхность испарения становится столь большой, что процесс высушивания завершается чрезвычайно быстро (примерно за 15–30 с). В условиях почти мгновенной сушки температура поверхности частиц материала, несмотря на высокую температуру сушильного агента, лишь немного превышает температуру адиабатического испарения чистой жидкости [26]. Таким образом достигается быстрая сушка в мягких температурных условиях, позволяющая получить качественный порошкообразный продукт, сыпучий и хорошо растворимый, не требующий дальнейшего измельчения. Распылительные сушилки получили широкое распространение в пищевой, фармацевтической и микробиологической промышленности.

Распылительные сушилки работают по принципам прямотока, противотока и смешанного тока. Однако прямоток особенно распространен, так как позволяет производить сушку при высоких температурах без перегрева материала, причем скорость осаждения частиц складывается в этом случае из скорости их осаждения и скорости сушильного агента.

При противотоке скорость осаждения меньше и, соответственно, время пребывания частиц в сушильной камере больше. Это позволяет получать высушенный материал с большей плотностью.

Наиболее распространена прямоточная схема движения материала и теплоносителя, которая изображена на рис. 72. В сушильной башне распылительной сушилки материал подается сверху через форсунки или центробежным распылителем. Сушильный агент движется параллельным током с материалом вниз. Мелкие твердые частицы высушенного материала (размером до нескольких микрон) осаждаются на дно камеры и отводятся через разгрузочный люк. Отработанный сушильный агент после очистки от пыли в циклоне и рукавном фильтре выбрасывается в атмосферу.



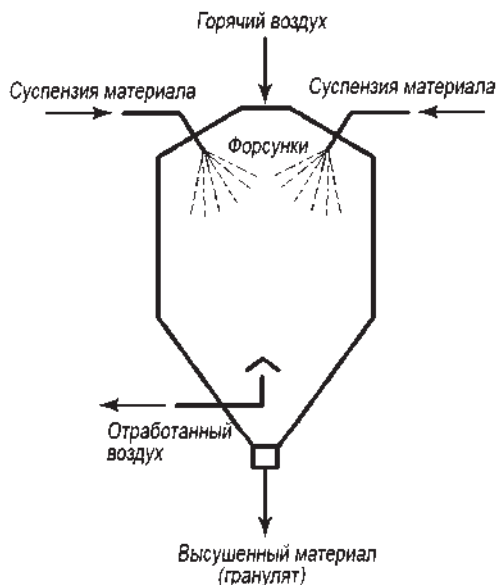


Рис. 72. Схема движения материала и теплоносителя в прямоточной распылительной сушилке

Для осаждения мелких частиц (средний размер капель обычно составляет 20–60 мкм) и уменьшения уноса скорость газов в камере, считая на ее полное сечение, обычно не превышает 0,3–0,5 м/с. Но даже при таких скоростях унос значителен и требуется хорошее обеспыливание отработанных газов. Для более равномерного распределения сушильного агента по сечению камеры и хорошего смешивания с каплями высушиваемой жидкости используют ввод газа через штуцер, расположенный касательно к корпусу камеры, или через ряд щелей, по ее окружности.

Значения  $A$  для распылительных сушилок невелики. В определенных условиях они достигают 10–14 кг/(м<sup>3</sup>·ч). Вследствие от-

носительно низкого напряжения камеры по влаге распылительные сушилки представляют собой довольно громоздкие аппараты. Кроме того, оборудование сушилок (распыливающие и пылеулавливающие устройства) является довольно сложным и дорогим в эксплуатации.

На рис. 73 изображена противоточная сушильная установка.

Суспензия или раствор из емкостей 1 высоконапорными насосами подается на центробежные форсунки 2, установленные в нижней части сушильной башни 3. Форсунки распыляют суспензию вверх навстречу потоку сушильного агента, который подается сверху. Сушилка работает по принципу противотока-прямотока: капли суспензии движутся вверх на высоту 1,5–2,5 м за счет первоначальной скорости струи факела, а затем вместе с потоком горячего воздуха опускаются вниз и осаждаются в конической части аппарата.

В качестве сушильного агента используются дымовые газы, полученные при сжигании природного газа в теплогенераторе смешительного типа АГОС, состоящего из горелки, дутьевого вентилятора и камеры смешения. Температура дымовых газов на входе в сушилку составляет 450–550 °С. При контакте сушильного агента с каплями суспензии происходит испарение влаги, высушенные частицы падают на дно сушильной башни и удаляются через шлюзовый затвор. Отработанный воздух с температурой примерно 120–160 °С удаляется снизу, проходит очистку от пыли в циклонах 5 и вентилятором 6 отправляется в рукавный



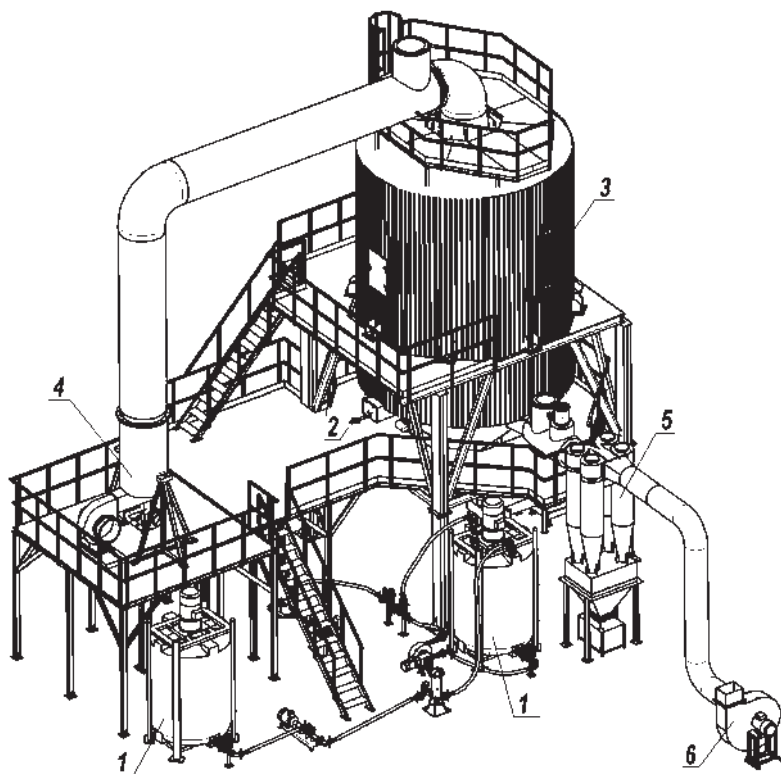


Рис. 73. Башенная распылительная сушильная установка:

1 — емкости для раствора; 2 — форсунки; 3 — сушильная башня; 4 — воздухонагреватель; 5 — батарея циклонов; 6 — вентилятор

фильтр на дальнейшую очистку от пыли. Сушилка работает под разрежением 3–16 Па.

Преимущество данной сушилки — возможность получения гранулированного продукта с высокой плотностью. Недостатком противоточной сушилки является сложность настройки режима. При некоторых режимах крупные капли не успевают высохнуть и осаждаются на коническом днище сушильной башни в виде корки. Центробежные форсунки часто засоряются крупными частицами суспензии, что ведет к неустойчивой работе сушилки и низкой производительности<sup>1</sup>.

Важное значение для успешной работы распылительной сушилки имеет качество распыления суспензии или раствора влажного материала.

Существует большое количество форсунок для распыления жидкого топлива, жидкостей, растворов и суспензий [16, 24, 55–57, 77]. Для

<sup>1</sup> Испытания сушилки проводили на суспензии диатомита влажностью 65 %.

подачи растворов и суспензий в сушильную башню распылительных сушилок применяют три основных типа форсунок:

- механические (прямоструйные и центробежные);
- пневматические;
- центробежные дисковые распылители.

Факел распыла у форсунок может быть в виде полного конуса, полого конуса, щелевидный. В распылительных сушилках наиболее часто используются форсунки с полноконусным факелом распыла, угол распыла составляет  $70\text{--}120^\circ$ .

Поскольку от качества распыливания во многом зависит работоспособность распылительных сушилок, остановимся подробнее на конструкции распылителей.

Для распыления растворов большое распространение получили центробежные форсунки, в которых энергия закрученного потока используется для дробления струи жидкости на мелкие капли. С помощью центробежных механических форсунок распыляют жидкости и тонкодисперсные суспензии. Форсунки должны обеспечивать тонкий распыл ( $20\text{--}100\text{ мкм}$ ) и равномерность распределения жидкости по сечению аппарата. Давление, с которым раствор подается к форсункам в сушилках, может меняться в пределах от 5 до 20 МПа ( $50\text{--}200\text{ кгс/см}^2$ ).

Качество распыла при прочих равных условиях определяется главным образом турбулентностью струи распыляемой жидкости. Турбулизация струи жидкости увеличивается, если при выходе из форсунки ей придается вращательное движение. На этом принципе сконструировано большинство типов механических форсунок. На рис. 74 показана конструкция центробежной форсунки.

Центробежная форсунка состоит из корпуса 1, завихрителя 2 и вихревой камеры 3. Раствор поступает в распределительный канал, откуда через тангенциальные канавки завихрителя входит в вихревую камеру 3. Канавки обычно выполняются круглого или прямоугольного сечения. Количество канавок изменяется от двух до четырех. На рисунке

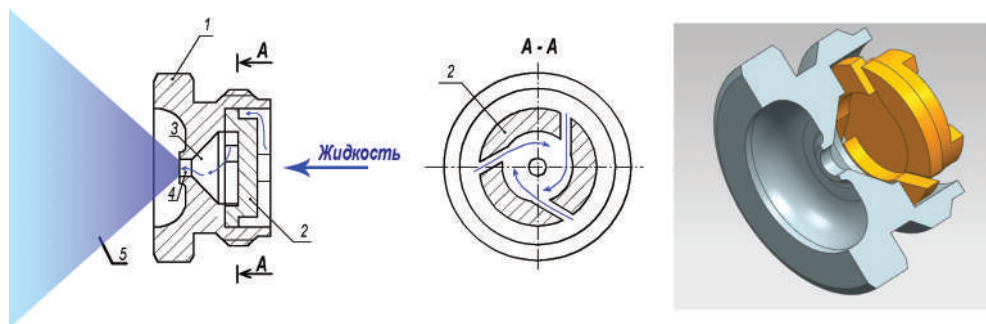


Рис. 74. Центробежная форсунка:

1 — корпус; 2 — завихритель; 3 — вихревая камера; 4 — сопло; 5 — факел распыла

показана форсунка с тремя тангенциальными каналами. Из вихревой камеры раствор далее проходит через сопло 4 форсунки, создавая конический факел 5, состоящий из мельчайших капель жидкости.

Принцип работы центробежной форсунки состоит в том, что жидкость, получившая интенсивное вращение в камере закручивания, состоящей из завихрителя 2 и вихревой камеры 3, вытекает из сопла в виде тонкой пленки, образующей полый конус. Пленка под влиянием окружающей газовой среды и других возмущений распадается на капли.

Дисперсионный состав распыла зависит в общем случае от конструкции форсунки, скорости истечения раствора (давления), физических свойств раствора и среды (поверхностного натяжения, вязкости, плотности). Вязкость в меньшей степени влияет на распад струи, чем поверхностное натяжение. Однако в применяемых при сушке растворах она изменяется в гораздо больших пределах, чем поверхностное натяжение, поэтому влияние вязкости на дисперсность распыла значительное.

Угол факела распыла центробежных форсунок составляет  $40\text{--}80^\circ$  в зависимости от соотношения осевой и тангенциальных составляющих скоростей жидкости.

Преимущества и недостатки механического распыления.

Распыление с помощью центробежных механических форсунок имеет следующие преимущества:

- а) форсунки очень просты и компактны, работают бесшумно;
- б) небольшие расходы электроэнергии на распыление, которые составляют от 2–4 кВт на тонну раствора в зависимости от физических свойств раствора и требуемой степени дисперсности;
- в) можно легко получить желаемую конфигурацию факела изменением внутреннего устройства форсунки;
- г) большая производительность: на одной форсунке можно распыливать до 4500 кг/ч раствора, получая при этом необходимую степень дисперсности. На практике для сушилок принимают производительность одной форсунки не более 300–600 кг/ч, чтобы уменьшить дальность факела и обеспечить равномерное распределение жидкости по сечению камеры.

Однако механические форсунки имеют ряд недостатков, а именно:

- а) практически невозможно регулировать производительность форсунки в процессе работы. Это объясняется следующим. Производительность форсунки определяется выходным сечением и давлением. Поэтому при регулировании производительности вентилем перед форсункой давление в распылителе значительно падает, вследствие чего резко понижается дисперсность распыла. Регулирование можно производить, только переставляя форсунки других размеров;

- б) так как размеры выходного отверстия (0,5–1,0 мм) малы, то форсунки чувствительны к засорению посторонними примесями растворов, при наличии которых они быстро забиваются;

в) центробежными форсунками нельзя распыливать пастообразные растворы и густые суспензии: при распылении суспензий происходит быстрое забивание форсунки вследствие выделения твердой фазы в камерах.

Пневматические форсунки реже используются в распылительных сушилках. К пневматическим форсункам подаются два потока: распыливающий агент (сжатый газ) и распыляемый раствор (жидкость). При этом диспергирование является следствием динамического взаимодействия этих потоков. Существенную роль играют форма и степень турбулентности жидкой струи. Очевидно, что последние определяются конструктивными особенностями форсунки, давлением и физическими свойствами жидкости. В зависимости от величины давления пневматические форсунки подразделяют на две группы:

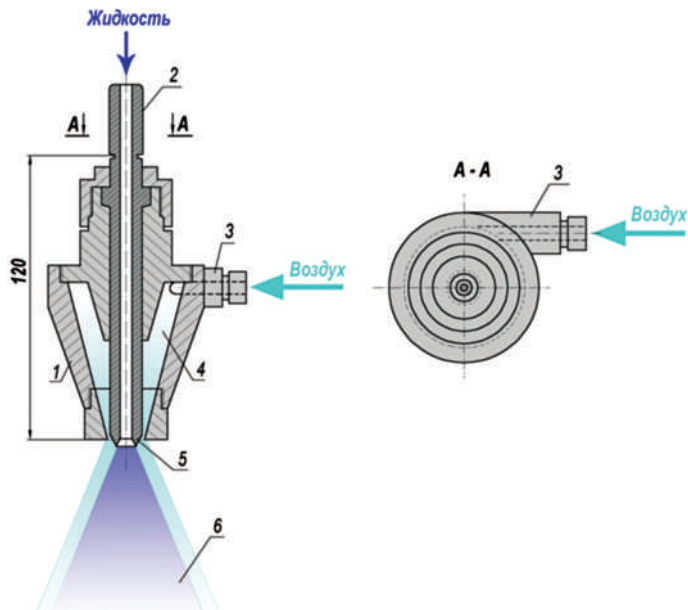
- 1) высоконапорные, при давлении 3–6 кгс/см<sup>2</sup> с относительным расходом распыливающего газа 0,3–1,0 кг/кг жидкости;
- 2) низконапорные, при давлении менее 0,1 кгс/см<sup>2</sup> с относительным расходом газа 4–10 кг/кг жидкости.

В качестве распыливающего газа обычно применяют воздух или водяной пар, причем конструктивные различия форсунок незначительны. В технике распылительной сушки преимущественно используются высоконапорные пневматические форсунки. По конструктивным признакам эти форсунки различают в зависимости от того, происходит ли встреча подведенных к ним потоков внутри корпуса (форсунки внутреннего смешения) или вне его (форсунки внешнего смешения). Несмотря на то, что форсунки внутреннего смешения позволяют обеспечить более глубокое и качественное диспергирование, они не получили широкого распространения в сушильной технике, так как менее надежны в работе, часто засоряются, образуя в сечении выходного отверстия комки и наросты из подсушенных частиц.

В распылительных сушилках используют форсунки внешнего смешения с коротким и широким факелом распыла.

Механизм распада струи на капли при пневматическом распылении отличается от механизма распада струи, который имеет место при распылении с помощью механических форсунок. При пневматическом распылении воздух или пар выходит с большой скоростью из форсунки, в то время как скорость истечения струи раствора небольшая. При высокой относительной скорости возникает трение между струями воздуха и раствора, вследствие чего струя раствора, будучи как бы закрепленной с одной стороны, вытягивается в тонкие отдельные нити. Эти нити быстро распадаются в местах утоньшения и образуют сферические капли.

Пневматическая форсунка внешнего смешения представлена на рис. 75. Она состоит из корпуса 1, патрубков для подачи жидкости 2 и воздуха 3, вихревой камеры 4 и сопла 5. Сжатый воздух в форсунку



**Рис. 75.**  
Пневматическая форсунка:

1 — корпус; 2 — патрубок для подачи жидкости; 3 — патрубок для подачи воздуха; 4 — вихревая камера; 5 — сопло; 6 — факел распыла

подается тангенциально, в результате чего он получает вращательное движение. Скорость вращения увеличивается по мере приближения к выходному отверстию и зависит от угла конусности корпуса форсунки, входной скорости воздуха и некоторых других параметров.

Вращающийся с большой скоростью конусообразный воздушный вихрь имеет вершину вне сопла. Эта вершина одновременно является острием конуса распыла. Благодаря большой вращательной скорости факел распыла получается широким и коротким, что особенно важно при сушке распылением. Производительность форсунки по раствору может быть до 150 кг/ч. Для распыления применяется сжатый воздух давлением 4–7 кгс/см<sup>2</sup>, расход воздуха<sup>1</sup> составляет 0,4–0,8 нм<sup>3</sup> на 1 кг раствора в зависимости от физических свойств раствора и производительности форсунки. С увеличением производительности одной форсунки удельный расход воздуха должен быть больше, чтобы получить достаточно равномерный распыл. Пневматические форсунки обладают большой инжекционной способностью. При давлении воздуха 5 кгс/см<sup>2</sup> максимальное разрежение в линии подачи раствора достигает 40–45 Па.

С целью повышения эффективности сушки для распыления можно использовать горячий воздух соответствующего давления.

Подача раствора в форсунку обычно осуществляется за счет разрежения, создаваемого самой форсункой. Для равномерной подачи необходимо поддерживать в питающей емкости постоянный уровень раствора.

<sup>1</sup> Расход дан в пересчете на нормальные условия (0 °С, 760 мм рт. ст.)

Производительность форсунки и конусность факела распыла можно регулировать изменением размеров форсунки, диаметра входного отверстия сжатого воздуха, отношения радиусов большего к меньшему конической внутренней камеры.

Преимущества и недостатки пневматического распыления.

С помощью пневматических форсунок можно распыливать растворы практически с любой вязкостью. Пневматические форсунки надежны в эксплуатации, просты по устройству; можно легко изменять форму факела распыла в нужном направлении.

К недостаткам этого метода распыления необходимо отнести в первую очередь большой расход электроэнергии (50–60 кВт на 1 т раствора), а также трудность получения удовлетворительного распыла при большой производительности форсунки. Поэтому при необходимости распыливать большое количество раствора приходится устанавливать до 35 форсунок в одной сушильной камере.

Сам распыл более неоднороден по сравнению с другими методами распыления; неоднородность распыла объясняется неравномерным распределением энергии сжатого воздуха или пара по сечению струи раствора.

Наиболее широкое распространение в сушильной практике получения распыления растворов и суспензий с помощью центробежных дисков. Этот метод отличается от метода распыления растворов механическими форсунками тем, что раствор получает высокие скорости без большого избыточного давления, характерного для механических форсунок. На таких форсунках можно распылять грубые суспензии и вязкие жидкости без опасения засорения распылителя. Кроме того, подачу раствора на распылитель можно плавно менять в определенных пределах без ухудшения качества распыла.

Механизм распыления раствора зависит от условий работы центробежного диска. При больших скоростях вращения диска образуются отдельные тонкие струйки, которые, как статически неустойчивые, распадаются на капли. Также как при распылении механическими форсунками, распад статически неустойчивой формы происходит за счет турбулентности потока, так и сил давления на поверхность раствора, возникающего вследствие трения о воздух.

Величина капель и однородность распыла зависят от окружной скорости диска и толщины пленки раствора, которая, в свою очередь, определяется производительностью. Для получения однородного тонкодисперсного распыла необходимо, чтобы скорость вращения диска была как можно выше, поэтому окружная скорость 60 м/с является минимальной, имеющей промышленное значение. Чаще всего распыление дисками различных конструкций производится при окружных скоростях в интервале 90–140 м/с, в зависимости от свойств раствора и температурного режима суши. Диаметр диска обычно составляет 80–300 мм,



поэтому частота вращения диска должна составлять 15 000–45 000 оборотов в минуту.

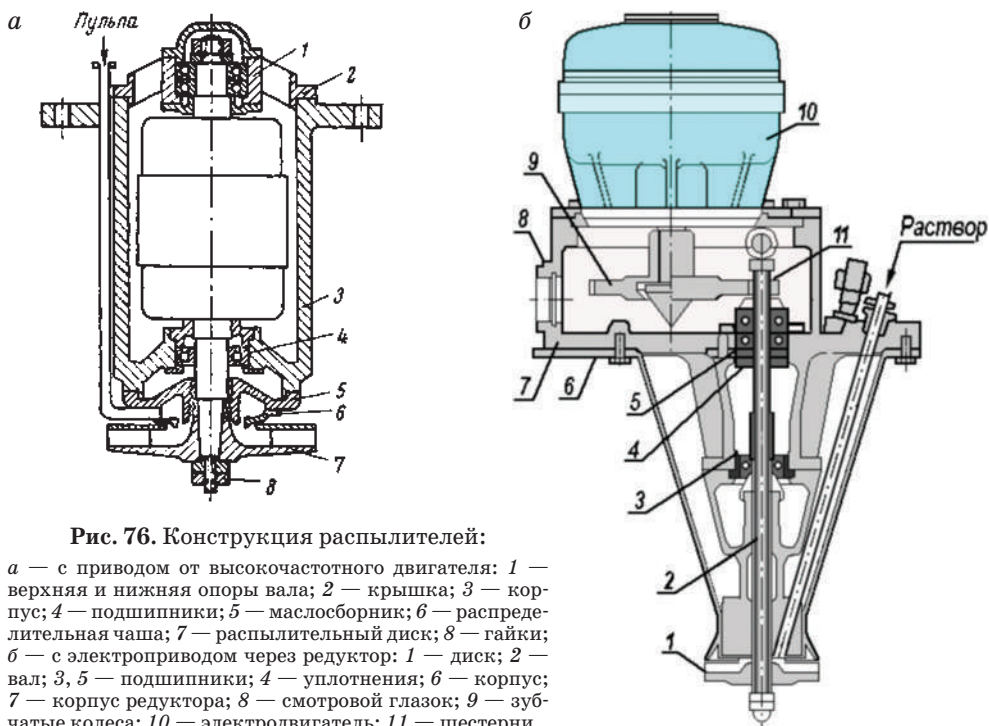
Для получения более однородного распыла необходимо, чтобы диск вращался без вибрации, а подача раствора была равномерной.

Таким образом, дисперсность распыла зависит от окружной скорости диска, производительности по раствору, отнесенной к смачиваемому периметру, физических свойств раствора и некоторых других факторов, влияние которых менее значимо.

Для оценки среднего диаметра капель при диспергировании центробежными дисковыми распылителями существует ряд эмпирических зависимостей, которые приведены в [46]. Там же даны зависимости для расчета диаметра факела распыла и распределение плотности орошения по сечению сушильной камеры.

Конструкция дисков существенно влияет на качество распыла; наибольшее распространение получили диски с соплами [56]. Для сушки абразивных, высоковязких материалов и для распылителей большой производительности изготавливают диски специальной конструкции.

На рис. 76, а, представлена схема распылительного механизма с высокочастотным электродвигателем (400–600 Гц). Распылительный диск закрепляется непосредственно на валу электродвигателя. Для предохранения электродвигателя от перегрева, от паров влаги и воздействия





температуры предусмотрена защита в виде уплотнений и охлаждающей рубашки на корпусе. Данная конструкция весьма компактна, однако не применима для сушильных аппаратов большой производительности, так как работоспособность быстроходных опор (подшипников) резко снижается.

Конструкция дискового распылителя с промежуточным валом с использованием повышающего редуктора представлена на рис 76, б. Раствор через специальную распределительную коробку или трубу с отверстиями под небольшим избыточным давлением подается на диск и получает вращательное движение. Благодаря действию центробежной силы раствор в виде пленки перемещается с непрерывно возрастающей скоростью к лопаткам или соплам, далее по ним к периферии диска и сбрасывается. При этом происходит распыление раствора.

Современные распылители имеют встроенный циркуляционный масляный насос для смазки и охлаждения подшипников, систему воздушного или водяного охлаждения двигателя. На некоторых моделях устанавливают масляный фильтр и датчик давления масла, который автоматически выключает распылитель при засорении системы смазки.

Помимо электропривода, для вращения диска может применяться газотурбинный привод [56].

Таким образом, дисковые распылители имеют ряд преимуществ перед другими видами распыления. К ним следует отнести высокое качество распыла, возможность регулировки расхода жидкости. Единственным недостатком является сложность конструкции дискового распылителя с приводом и, как следствие, высокая цена дисковых распылителей.

Распыление центробежными дисками (без давления) пригодно для диспергирования суспензий и вязких жидкостей, но требует большего расхода энергии, чем механическое распыливание. Распыливание механическими форсунками, в которые жидкость подается насосом под давлением 30–200 атм, более экономично, но применяется только для жидкостей, не содержащих твердых взвесей, вследствие чувствительности этих форсунок к засорению. Распыление пневматическими форсунками, работающими с помощью сжатого воздуха под давлением около 6 атм, хотя и пригодно для загрязненных жидкостей, но наиболее дорого из-за высокого расхода энергии; кроме того, его недостатком является неоднородность распыления.

При выборе рационального способа распыления в первую очередь исходят из физико-химических свойств раствора и технико-экономических соображений. Наиболее экономичным является механическое распыление, наиболее дорогим — пневматическое. Однако не все растворы можно распыливать с помощью механических форсунок (например, нельзя распыливать гидрофобные суспензии и растворы с большой вязкостью).

При механическом распылении термостойких растворов в некоторых случаях рационально перед распылением раствор нагреть до

максимально возможной температуры. Это позволит получить высокую степень дисперсности распыла и очень интенсивное испарение. Например, если раствор распыливается при давлении 100–150 кгс/см<sup>2</sup>, температура кипения раствора при этом давлении равна 300–340 °С, поэтому большая часть предварительно нагретого до 250–300 °С раствора при распылении мгновенно превратится в пар.

В некоторых случаях при центробежном распылении или распылении с помощью пневматических форсунок готовый продукт получается не в виде порошка, а в виде ваты. При этом ухудшаются потребительские свойства готового продукта, затрудняются его транспортировка из сушильной камеры и очистка отходящих газов. В таком случае рекомендуется изменить режим сушки или свойства исходного раствора (суспензии).

Подводя итог, необходимо отметить, что наиболее перспективным в технике распылительной сушки является распыление дисковыми распылителями. Однако, учитывая многообразие растворов и суспензий, высушиваемых в сушилках такого типа, часто возникает целесообразность использования пневматических или механических распылителей.

Выбор режима сушки обуславливается технологическими требованиями к получаемому продукту и экономическими показателями работы установки.

Основная задача при наладке режима работы распылительной сушилки — добиться узкой фракции высушенного продукта с минимальным количеством пыли и крупных частиц, с максимальной насыпной плотностью и прочностью полученных гранул. В большинстве случаев удается получить сыпучий мелкодисперсный (до 100 мкм) несслеживающийся продукт высокого качества. Это основное преимущество распылительных сушилок. К недостатку сушилок такого типа следует отнести большие габариты: так, при производительности по исходному материалу 1 т/ч высота аппарата составляет 17 м, а диаметр 7 м. Учитывая, что сушке распылением подвергаются текучие растворы и суспензии с влажностью 70–85 %, производительность по высушенному продукту составит всего 160–200 кг/ч.

Современные разработки конструкции распылительных сушилок позволяют добиться меньшей высоты распылительных башен, но за счет ухудшения характеристик таких аппаратов. В некоторых производствах применяют сушильную камеру с плоским днищем, изготавливают сушилки с боковым распылом и др. [26].

Существует значительное количество материалов, которые не рекомендуется сушить в распылительной сушилке. В основном это материалы, которые даже в сухом состоянии налипают на стенках сушильной камеры, имеют низкую сыпучесть, вследствие чего возникают большие проблемы с их выгрузкой. Иногда требуется модификация исходного

продукта с целью изменения его физико-химических свойств (использование стабилизирующих, структурирующих добавок, наполнителей).

При сушке большинства материалов на стенках сушильной камеры и ее днище оседают пыль и липкие частицы недосушенного продукта. Для очистки стенок и днища используется периодическая или непрерывная пневмоочистка («пневмощетка»), которая позволяет избежать наростов и коркообразования продукта, ухудшающих качество продукта. Определенным преимуществом распылительных сушилок является легкость очистки сушильной камеры. Обычно через определенное время работы в сушилку прекращают подачу материала и подают моющий раствор, который быстро очищает стенки сушильной камеры. Затем сушилку сушат горячим воздухом и возобновляют процесс сушки материала.

Распылительные сушилки наиболее распространены в пищевой, медицинской, химической и микробиологической промышленности.

Технологическая схема сушки растворов и суспензий изображена на рис. 77. Из бака, где находится суспензия или раствор, плунжерным насосом влажный материал подается на распылитель. Расход суспензии регулируется в зависимости от заданной температуры на выходе из сушилки. Воздух проходит очистку на фильтре и дутьевым вентилятором подается в топку смесительного типа, где нагревается до температуры 350–450 °С. Расход газа на горелку регулируется в зависимости от необходимой температуры в газохоте перед сушильной камерой.

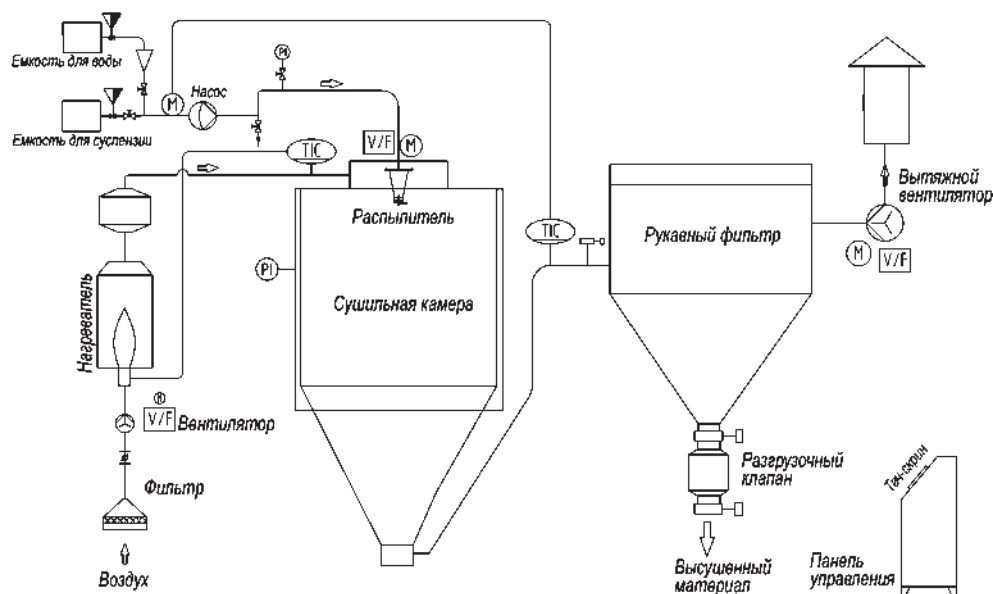


Рис. 77. Технологическая схема сушки

Сушильный агент движется параллельным током с материалом, который выходит из распылителя в виде тумана. Мелкие твердые частицы высушенного материала осаждаются на дно камеры и вместе с воздухом поступают на рукавный фильтр. Отработанный сушильный агент после очистки вытяжным вентилятором сбрасывается в атмосферу, а тонкодисперсный продукт выгружается из нижней части рукавного фильтра через разгрузочный клапан.

#### 7.4. КОНВЕКТИВНЫЕ СУШИЛКИ С ПНЕВОТРАНСПОРТОМ МАТЕРИАЛА

**Пневматические сушилки.** Для сушки во взвешенном состоянии зернистых (неслипающихся) и кристаллических материалов применяют пневматические сушилки. Сушка осуществляется в вертикальной трубе длиной до 20 м. Частицы материала движутся в потоке нагретого воздуха (или топочных газов), скорость которого превышает скорость осаждения частиц и составляет 10–30 м/с. В подобных трубах-сушилках процесс сушки длится секунды и за такое короткое время из материала удается испарить только часть свободной влаги.

В пневматической сушилке (рис. 78) материал из бункера 1 подается питателем 2 в трубу 3 и увлекается потоком воздуха, который нагревается в калорифере 4. Воздух выносит высохший материал в сборник-амортизатор 5 и затем поступает в циклон 6, где отделяется от частиц материала. Высушенный материал накапливается в бункере 7 и выгружается шлюзовым разгрузочным устройством. Отработанный воздух для окончательной очистки от пыли проходит через фильтр 8, после чего удаляется в атмосферу вытяжным вентилятором 9.

Расход энергии в пневматических сушилках значителен, причем он снижается с уменьшением размера частиц материала, который не должен превышать 8–10 мм. Часть крупных частиц может осаждаться в нижней части трубы-сушилки. Для их удаления может быть установлен винтовой разгрузитель. Для сушки материалов с крупными частицами, а также для удаления из материала связанной влаги пневматические сушилки комбинируют с сушилками других типов. Таким образом, несмотря на компактность и простоту устройства, область применения пневматических сушилок ограничена условиями, указанными выше.



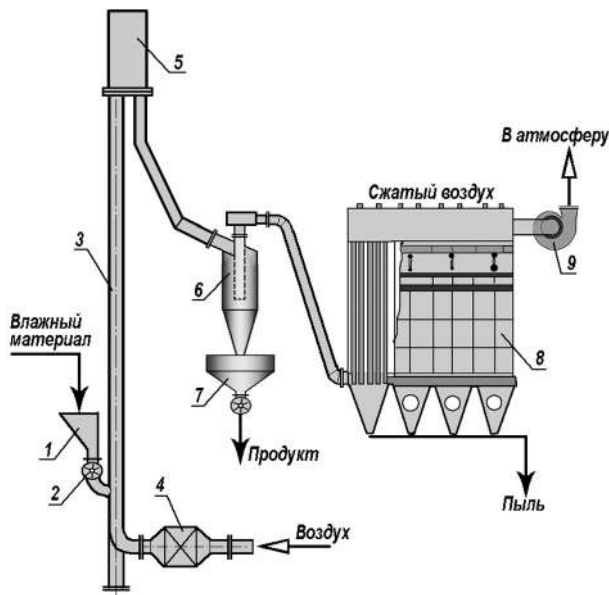


Рис. 78. Пневматическая сушилка:

1 — бункер, 2 — питатель, 3 — труба; 4 — калорифер, 5 — сборник-амортизатор, 6 — циклон, 7 — бункер, 8 — фильтр, 9 — вентилятор

В трубах-сушилках сушат песок, опилки, минеральные порошки и другие сыпучие материалы с небольшой влажностью, которые не требуют глубокой осушки.

Разновидностью пневматической сушки является конструкция так называемой флеш-сушилки (Jiangsu Xianfeng Drying Engineering, Китай), изображенной на рис. 79.

Влажный материал специальным двухвальным шнеком 2 подается в камеру 1 сушилки. Шнек имеет специальный ворошитель, который разбивает агломераты влажного материала и равномерно загружает материал в сушильную камеру. Диаметр сушильной камеры зависит от производительности сушилки и составляет 0,4–2,0 м, высота — 4,6–9,6 м. Комки материала, которые упали вниз сушильной камеры разбиваются роторным измельчителем 4, изображенным на рис. 79, б, и подхватываются потоком горячего воздуха, который получается в топке 3. Для чистых продуктов, не допускающих контакта топочных газов с высушиваемым материалом, применяется топка непрямого действия, в которой воздух нагревается топочными газами через стенку. Для сушки промышленных продуктов может быть использована топка смешения.

После сушильной камеры материал с воздухом поступает в камеру досушивания 5, где происходит дальнейший контакт воздуха с материалом. Затем поток воздуха и материала поступает в циклон 6, где осажается основная часть высушенного материала, а воздух поступает на

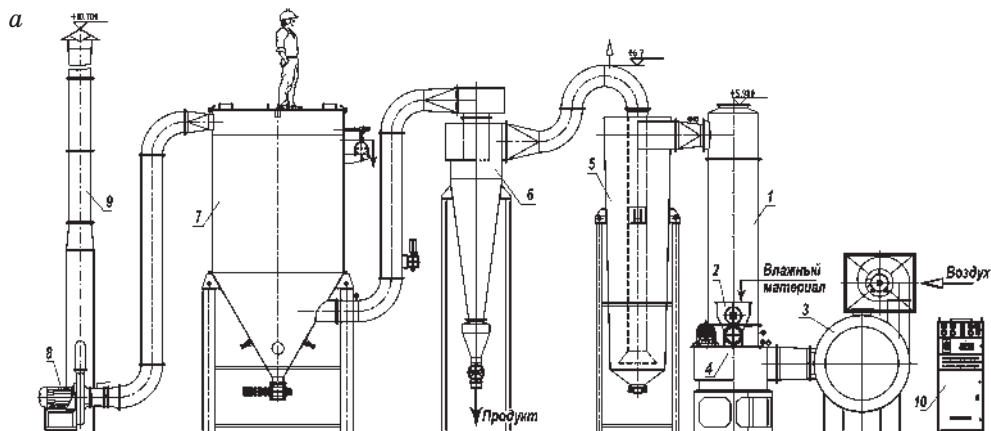


Рис. 79. Флеш-сушилка:

а: 1 — сушильная камера; 2 — питатель; 3 — топка с горелкой и вентилятором; 4 — измельчитель; 5 — досушиватель; 6 — циклон; 7 — фильтр; 8 — вентилятор; 9 — дымовая труба; 10 — панель управления; б — лопасти измельчителя

дальнейшую очистку от пыли в рукавном фильтре 7. Очищенный воздух вентилятором 8 удаляется в атмосферу через дымовую трубу 9. Панель управления 10 позволяет задавать и поддерживать необходимый режим сушки. Температура горячего воздуха на входе в сушилку составляет 180–240 °С, на выходе 80–90 °С. На рисунке показаны габариты сушильной установки XSG-8 производительностью 150–240 кг/ч испаренной влаги. Внутренний диаметр сушильной камеры 800 мм [87].

Флеш-сушилка с досушивателем позволяет высушить минеральные порошкообразные материалы от 20–25 до 1–2 % с меньшими затратами тепла, чем в обычной трубе-сушилке. Такие сушилки требуют небольших площадей (до 150 м<sup>2</sup>) и имеют небольшую высоту (до 10 м).

На рис. 80 изображена вихревая сушилка (ALLGIER, Германия).

Исходный влажный материал подается сверху через трубу вниз на распределительную решетку. Внизу под сушилкой установлен электродвигатель, который приводит во вращение быстроходный диск. Диск разбрасывает поступающий на него влажный материал над распределительной решеткой сушилки. Применяемые диски изображены на рис. 80, б.

Если материал абразивный, что диск изготовлен из износостойкого материала; если липкий — диск покрыт тефлоном.



Горячий воздух подается тангенциально снизу под решетку, закрученный поток воздуха (вихрь) подхватывает влажный материал и поднимается вверх по спирали. В потоке горячего воздуха происходит испарение влаги из материала, и высушенный продукт выводится из сушильной камеры вместе с воздухом, после чего в циклоне или рукавном фильтре происходят отделение материала и очистка воздуха от пыли.

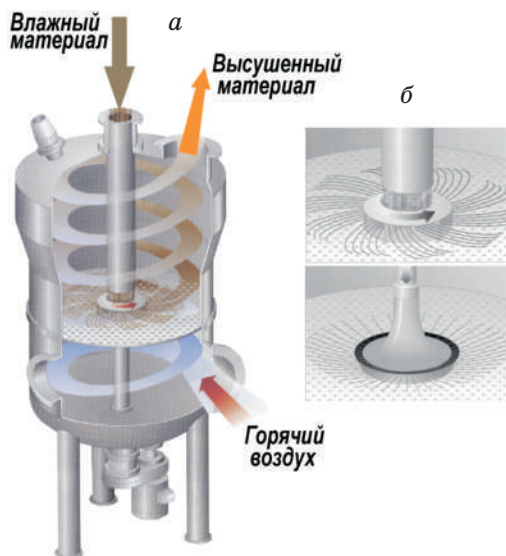


Рис. 80. Сушилка с вихревым слоем (а) и конструкция распределительных дисков (б)

другие. В ней также сушат фармацевтические субстанции, наполнители, соду, глюкозу, пресс-кеки, шлам.

### 7.5.

### КОНТАКТНЫЕ СУШИЛКИ



**Вакуум-сушильные шкафы.** Простейшими контактными сушилками периодического действия являются вакуум-сушильные шкафы, которые в настоящее время используются для сушки малотоннажных продуктов в производствах с разнообразным ассортиментом продукции, где применение высокопроизводительных механизированных сушилок непрерывного действия экономически неоправданно.

Вакуум-сушильный шкаф (рис. 81) представляет собой цилиндрическую (или прямоугольную) камеру 1, в которой размещены полые плиты 2, обогреваемые изнутри паром или горячей водой.



Высушиваемый материал находится в лотках (противнях), установленных на плитах. Во время работы камера герметически закрыта и соединена с установкой для создания вакуума (например, с поверхностным конденсатором) и вакуум-насосом. Загрузка и выгрузка материала производятся вручную.

Как и другие вакуум-сушилки, вакуум-сушильные шкафы пригодны для сушки легко окисляющихся, взрывоопасных и выделяющих вредные или ценные пары веществ. Однако они малопроизводительны и малоэффективны, поскольку сушка в них происходит в неподвижном слое при наличии плохо проводящих тепло зазоров между противнями и греющими плитами. Напряжение рабочей поверхности плит (со стороны материала) обычно не превышает  $0,5\text{--}3,5 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  влаги.

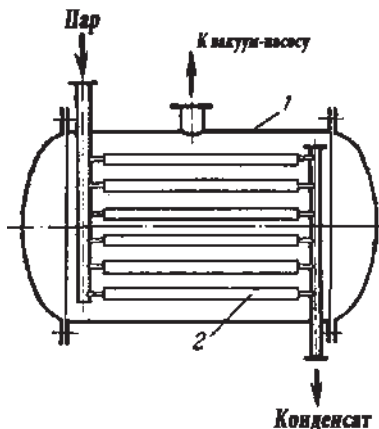


Рис. 81. Вакуум-сушильный шкаф:

1 — камера сушилки; 2 — полые плиты

**Гребковые (лопастные) сушилки.** В этих контактных сушилках периодического действия скорость сушки несколько увеличивается за счет перемешивания материала медленно вращающейся горизонтальной мешалкой с гребками. Кроме того, гребковые сушилки не требуют ручной загрузки и выгрузки материала подобно вакуум-сушильным шкафам.



Гребковая сушилка (рис. 82) состоит из цилиндрического корпуса с паровой рубашкой 2 и мешалки 3. Гребки мешалки закреплены на валу взаимно-перпендикулярно; на одной половине длины барабана гребки мешалки изогнуты в одну сторону, на другой — в противоположную. Кроме того, мешалка имеет реверсивный привод, автоматически меняющий каждые 5–8 мин направление ее вращения. Поэтому при работе мешалки материал (загруженный через люк 4) периодически перемещается от периферии к середине барабана и в обратном направлении. Вал мешалки может быть полым, и через него можно также осуществлять нагрев высушиваемого материала. Свободно перекаатывающиеся между гребками трубы 5 способствуют разрушению комков и дополнительно перемешивают материал. Разгрузка высушенного материала производится через люк 6. Корпус сушилки соединен с поверхностным или барометрическим конденсатором и вакуум-насосом.

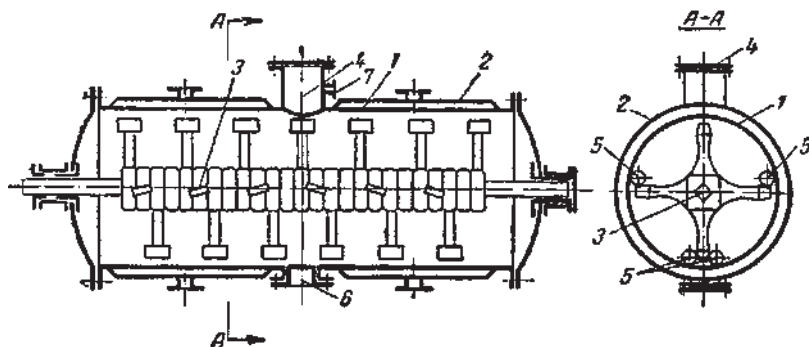


Рис. 82. Гребковая вакуум-сушилка:

1 — корпус сушилки; 2 — паровая рубашка; 3 — мешалка; 4 — загрузочный люк; 5 — трубы, способствующие перемешиванию материала; 6 — разгрузочный люк; 7 — штуцер для присоединения к вакууму

Производительность сушилки зависит от температуры греющего пара, величины разрежения и начальной влажности материала. В анилинокрасочной промышленности, где главным образом применяются эти сушилки, напряжение их поверхности по влаге колеблется в пределах  $6-8 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , т. е. выше, чем для вакуум-сушильных шкафов, но сушильный агрегат более сложен и требует больших эксплуатационных расходов. Следует отметить, что применение вакуумных сушилок в химической промышленности, несмотря на их более высокую стоимость и сложность по сравнению с атмосферными сушилками, диктуется технологическими соображениями: они пригодны для сушки чувствительных к высоким температурам, а также токсичных и взрывоопасных веществ, для получения высушенных продуктов повышенной чистоты, а также в тех случаях, когда необходимо улавливание (конденсация) паров неводных растворителей, удаляемых из материалов.

С целью увеличения поверхности теплопередачи в контактных сушилках используют не только рубашку, но и обогреваемые паром лопасти. На рис. 83 представлена сушилка с клиновыми полыми лопастями<sup>1</sup>, в которые подается греющий пар.

Корпус сушилки состоит из W-образного кожуха 1 с рубашкой 2, в которую подается греющий пар. Внутри кожуха установлены два полых вала 4 с лопастями 3.

Форма лопасти представляет собой клиновидный полый полукруг. Лопасты перемещают материал внутри сушильной камеры. Внутрь вала и в лопасти подается греющий пар. Таким образом, общая поверхность теплопередачи представляет собой поверхность рубашки и поверхность лопастей, причем площадь теплопередачи лопастей существенно больше, чем площадь теплопередачи рубашки. Влажный материал

<sup>1</sup> Сушильный аппарат с клиновыми полыми лопастями (hollow paddle dryer). Изготовитель Jiangsu Xianfeng Drying Engineering, Китай.

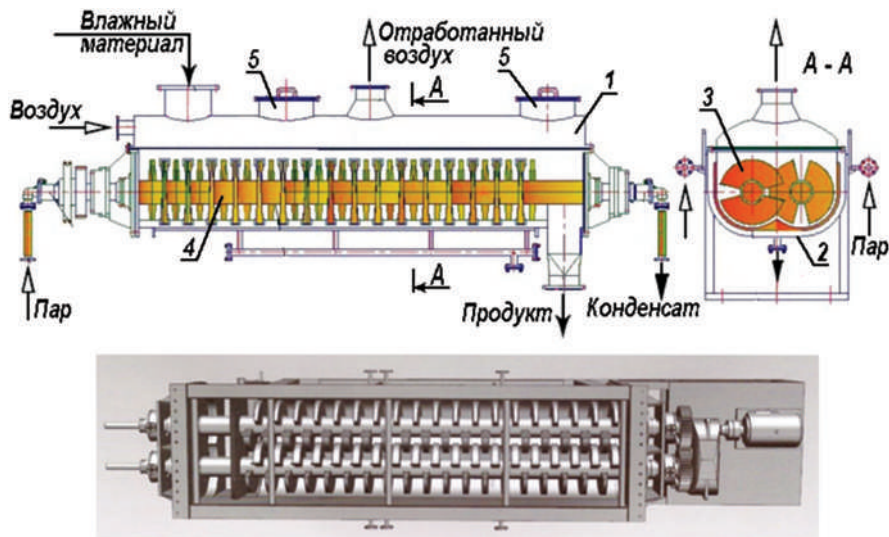


Рис. 83. Сушилка с клиновыми полыми лопастями:

1 — корпус сушилки; 2 — паровая рубашка; 3 — полые лопасти; 4 — полый вал; 5 — инспекционные люки

перемещается лопастями от загрузочного люка к разгрузке, при этом коэффициент теплопередачи от лопастей достаточно высокий.

Для удаления влаги в сушилку подается горячий воздух, причем расход воздуха намного меньше, чем в конвективных сушилках. Запыленность воздуха низкая. Это позволяет существенно сократить размеры пылеочистного оборудования и удешевить схему суши.

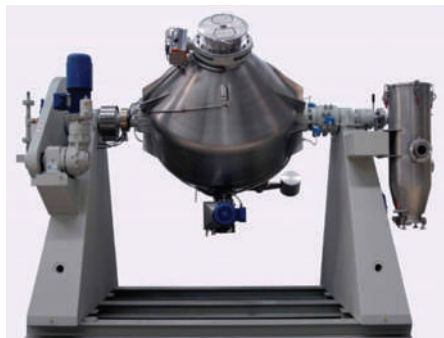
Для процесса сушки, который требует извлечения растворителя, это обстоятельство имеет важное значение. Сушилка может работать и без подачи воздуха, в этом случае из сушилки удаляются пары растворителя.

Объем заполнения сушильного аппарата материалом может достигать 80–90 %. Время пребывания материалов можно регулировать, изменяя скорость вращения перемешивающего вала. Перемещение материала от места подачи до выхода материала из сушилки в основном представляет собой движение поршня, поэтому распределение времени пребывания является узким и содержание влаги в конечном продукте является однородным.

В зоне разгрузки помимо лопастей имеются вспомогательные лезвия для удаления налипшего материала.

Влагосъем при обогреве греющим паром 0,6–1,0 МПа составляет 160–240 кг/(м<sup>3</sup>·ч).

Данный тип сушилки является хорошим решением для сушки пастообразных материалов. Этот аппарат может быть использован также для сушки порошков, гранул, фильтрационного кека и других материалов. Однако сложность конструкции является его недостатком.



**Двухконусные вакуумные сушилки.** В этих контактных сушилках периодического действия перемешивание материала происходит за счет вращения цилиндрического двухконусного барабана, а теплоноситель подается в рубашку через полый вал.

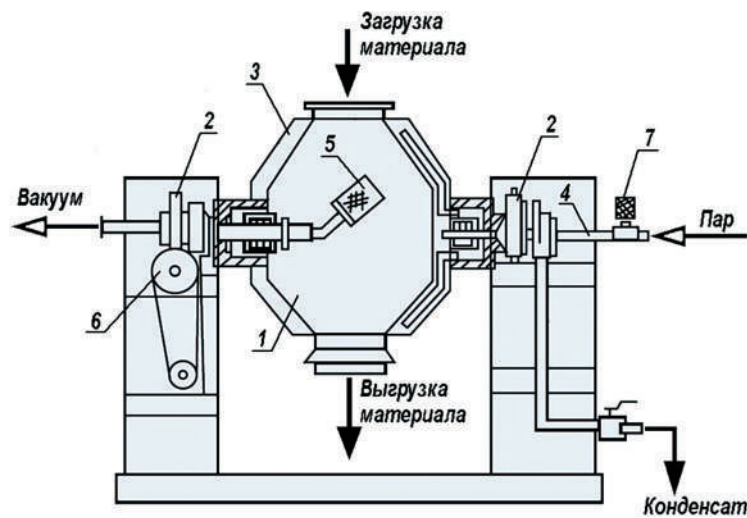
Двухконусная вакуум-сушилка изображена на рис. 84. Сушильная камера в виде двух конусов 1 установлена на подшипниковых опорах коннекторах 2 и вращается со скоростью

4–6 оборотов в минуту. Сушильная камера имеет рубашку 3, в которую через полый вал 4 справа подается горячий теплоноситель. Отвод теплоносителя или конденсата производится также через правый коннектор. Рубашка снаружи может быть теплоизолирована.

Левый коннектор подсоединен к вакуум-наосу. Внутри сушильной камеры установлен вакуум-заборник 5, который расположен несколько выше уровня загрузки материала. За счет вращения двухконусной сушильной камеры происходят перемешивание и сушка материала под вакуумом.

Загрузка материала производится через верхний патрубок, а выгрузка — через противоположный патрубок самотеком снизу.

В качестве теплоносителя могут использоваться греющий пар (0,6 МПа, 150–160 °С), нагретое минеральное масло (180–200 °С) либо горячая вода. Объем сушильной камеры составляет от 100 л до 5 м<sup>3</sup>, степень заполнения — 40 %, поверхность теплопередачи рубашки в зависимости от размера сушилки — от 1,1 до 18 м<sup>2</sup>.



**Рис. 84.**  
Двухконусная  
вращающаяся  
вакуум-сушилка:

1 — корпус сушилки;  
2 — подшипники;  
3 — паровая рубашка;  
4 — полый вал; 5 —  
вакуум-заборник; 6 —  
привод; 7 — клапан

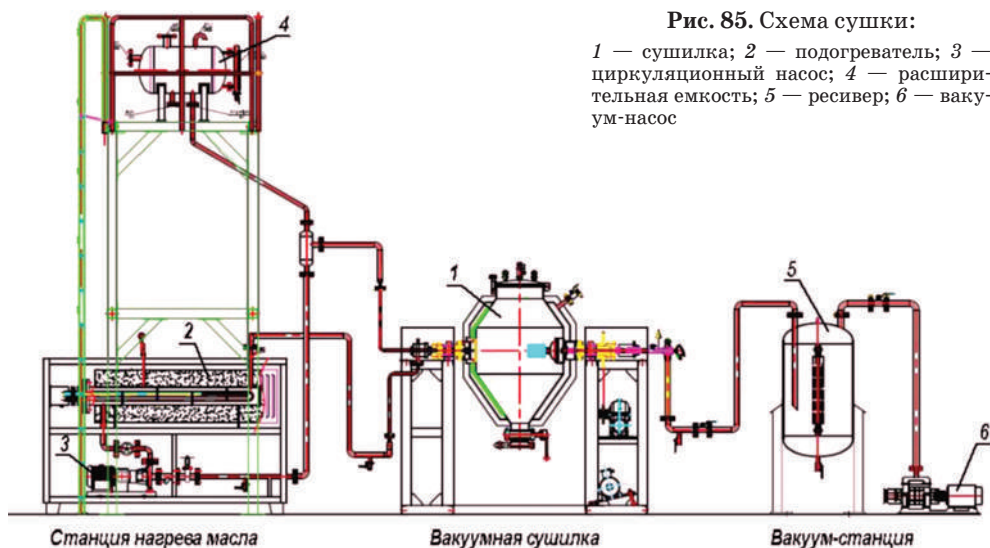


Рис. 85. Схема сушилки:

1 — сушилка; 2 — подогреватель; 3 — циркуляционный насос; 4 — расширительная емкость; 5 — ресивер; 6 — вакуум-насос

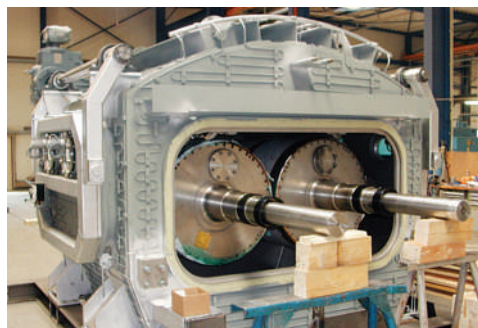
Если сушке подвергаются вязкие и/или липкие материалы, внутри двухконусного цилиндра могут быть установлены специальные скребки или перемешивающие лопасти, которые приводятся в движение навесным двигателем.

Обычно продолжительность прогрева и сушки материала под вакуумом составляет 40–60 мин, а время загрузки и выгрузки занимает 10–15 мин. Для обеспечения непрерывного производства устанавливают 2–3 сушильных аппарата.

На рис. 85 приведена схема сушки влажного материала в двухконусной вакуум-сушилке.

В рубашку вакуум-сушилки 1 поступает минеральное масло, которое нагревается в газовом или электрическом подогревателе 2. Масло циркулирует в замкнутом цикле: циркуляционный насос 3 направляет масло в подогреватель 2, далее — по трубопроводу в сушилку и затем обратно в подогреватель. Вакуумная линия подсоединена к ресиверу 5, вакуум создается вакуум-насосом 6.

**Вальцовые сушилки.** В этих сушилках осуществляется непрерывная сушка жидких и текучих пастообразных материалов при атмосферном давлении или при разрежении. Конструктивно различают одно- и двухвальцовые сушилки, которые могут работать как при атмосферном давлении, так и под вакуумом.





На рис. 86 изображена схема двухвальцовой атмосферной сушилки. Основной частью этой сушилки являются вальцы 2 и 3, медленно вращающиеся со скоростью 2–10 об/мин в кожухе 1. Сверху между вальцами непрерывно подается высушиваемый материал. Греющий пар поступает через полую цапфу внутрь каждого из вальцов, паровой 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.

Материал покрывает поверхность вальцов тонкой пленкой, толщина которой определяется величиной зазора между вальцами. Из тонкой пленки происходит активное удаление влаги, после чего сухой продукт снимается с помощью фиксированно установленных ножей.

Направление вращения барабанов определяется типом обрабатываемого продукта. На рисунке показаны барабаны, которые вращаются навстречу друг другу.

Обычно ширина зазора не превышает 0,5–1 мм и регулируется путем перемещения ведомого вальца 2, имеющего подвижные подшипники, относительно неподвижно установленного ведущего вальца 3. Высушивание материала происходит интенсивно в тонком слое в течение одного неполного оборота вальцов. Пленка подсушенного материала снимается ножами 6, расположенными вдоль образующей каждого вальца. Чем тоньше слой материала на вальцах, тем быстрее и равномернее он сушится.

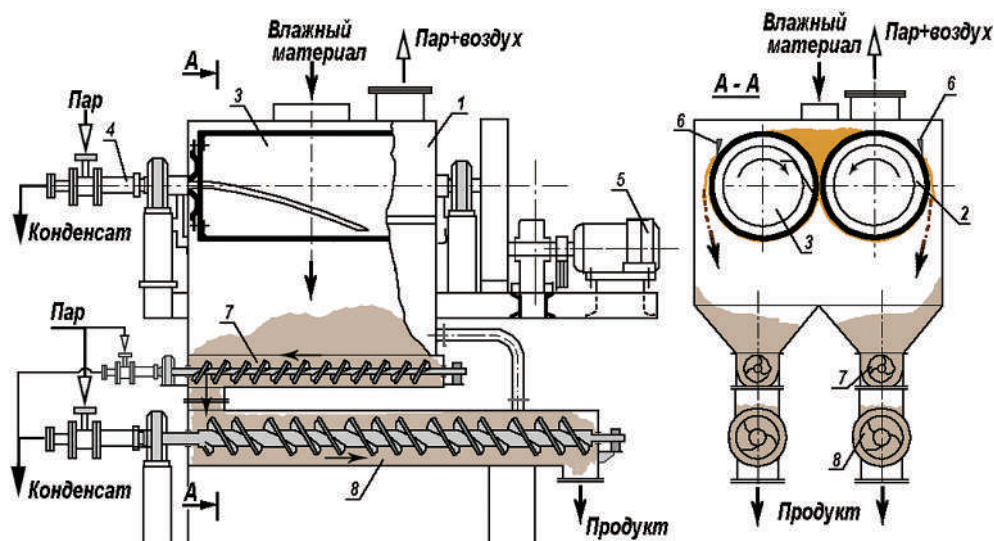


Рис. 86. Двухвальцовая сушилка:

1 — кожух; 2 — ведомый полый валец на подвижных подшипниках; 3 — ведущий полый валец (установлен неподвижно); 4 — сифонные трубки для отвода конденсата; 5 — привод; 6 — ножи, расположенные вдоль образующей вальцов; 7 — верхние досушиватели; 8 — нижние досушиватели

Однако вследствие малой продолжительности сушки часто требуется досушка материала, осуществляемая в горизонтальных лотках с паровым обогревом (досушивателях), в которых вращаются валы с гребками. В сушилке на рис. 86 материал после валцов последовательно проходит сначала верхний досушиватель 7, затем нижний досушиватель 8.

В двухвальцовых сушилках напряжение поверхности валцов по влаге колеблется от 13–15 кг/(м<sup>2</sup>·ч) (атмосферные сушилки) до 20–30 кг/(м<sup>2</sup>·ч) (вакуумные сушилки).

Двухвальцовые сушилки используются для сушки материалов средней вязкости, таких как крахмал, клей, сухая сыворотка, сухое молоко, обезвоженные дрожжи, рыбная мука и т. д.

Широкое применение получили одновальцовые сушилки непрерывного действия различных конструктивных модификаций, зависящих от состояния исходного материала и способа его подачи на валцы. Одновальцовые сушильные аппараты предназначены в основном для сушки паст и суспензий средней и высокой вязкости.

На рис. 87 показана схема одновальцовой сушилки. В ее корпусе вращается закрытый с обоих концов цилиндрический полый валец 2, обогреваемый изнутри конденсирующимся водяным паром. Вход пара и выход конденсата осуществляются через левую полуцапфу 1. Исходный жидкий материал непрерывно поступает в нижнюю корытообразную часть корпуса 5 и смачивает погруженную часть вальца. На сушилке могут быть установлены специальные распределительные устройства, на которые циркуляционным насосом раствор подается на валец. Толщина слоя материала регулируется скоростью подачи материала на распределитель, свойствами материала, скоростью вращения вала и составляет 0,5–2 мм. За один неполный оборот вала материал высушивается, снимается ножом и выводится при помощи шнека. Если аппарат работает при атмосферном давлении, то образовавшиеся пары уносятся небольшим потоком воздуха при помощи вытяжного вентилятора.

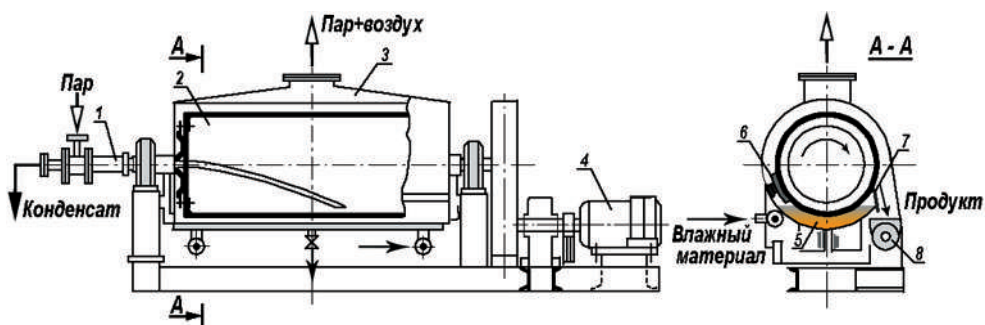


Рис. 87. Одновальцовая сушилка:

1 — полая цапфа; 2 — валец; 3 — вытяжной зонт; 4 — привод; 5 — корыто; 6 — калибрующее устройство; 7 — скребковое устройство; 8 — шнек



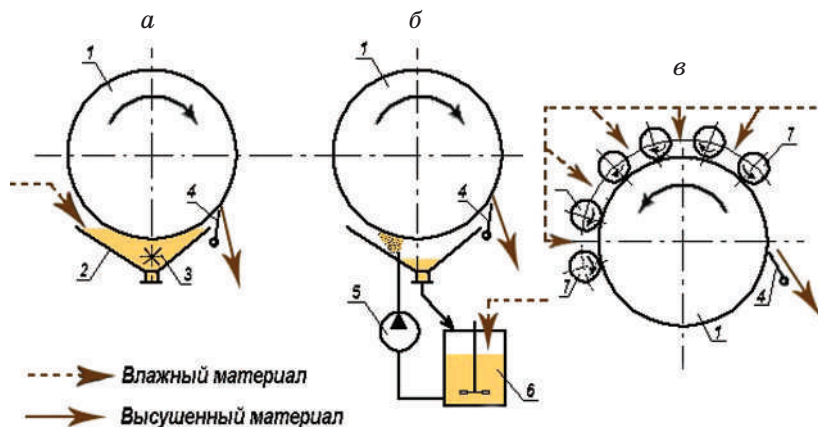


Рис. 88. Способы подачи высушиваемого материала на поверхность вальца:

*a* — из корыта с мешалкой, *б* — насосом с распылением на валец, *в* — через смачивающие валики; 1 — валец; 2 — корыто; 3 — мешалка; 4 — нож; 5 — насос; 6 — емкость с мешалкой; 7 — смачивающие валики

Толщина высушенного слоя материала регулируется расстоянием ножа от поверхности вальца. В случае сушки под вакуумом корпус аппарата и место выгрузки высушенного материала герметизируются. Скорость вращения барабана обычно составляет 12–24 об/мин.

В зависимости от производительности диаметр вальца составляет от 500 мм до 1,5–2 м. Длина вальца может достигать до 3 м.

Имеющиеся конструктивные модификации одновальцовых аппаратов отличаются главным образом способом подачи исходного материала на валец. На рис. 88 показаны варианты подачи материала. В случае жидкой консистенции исходный материал попадает на валец 1 путем смачивания его поверхности, в корыте 2 предусмотрена мешалка 3 для гомогенизации исходного материала (см. рис. 88, *a*). Высушенный материал снимается с вальца ножом 4.

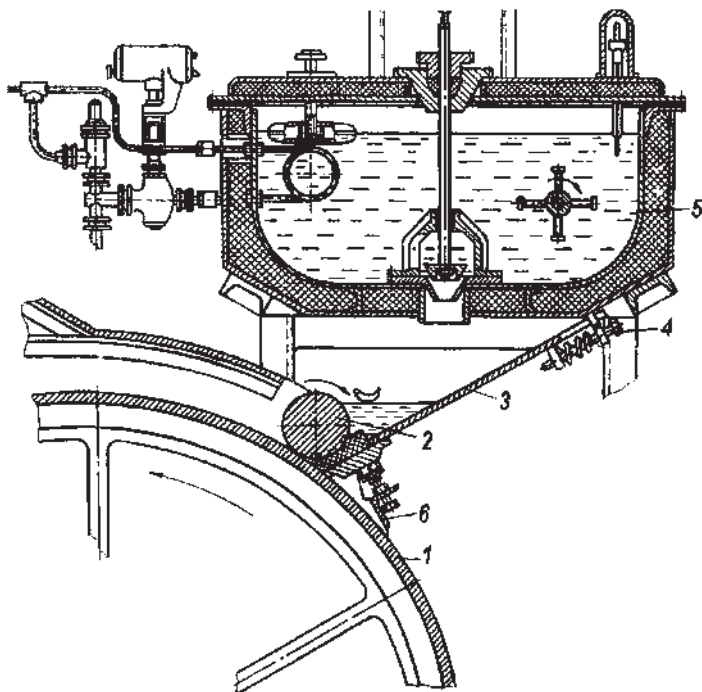
Вязкие жидкофазные материалы (см. рис. 88, *б*) подают на поверхность вальца винтовым насосом 5, причем избыток материала стекает обратно в корыто, а затем в бак 6 для питания. Смачивание поверхности вальца иногда производится при помощи быстро вращающегося валика с насечкой, погруженного в корыто. В случае тонкодисперсных суспензий поверхность вальца может смачиваться их потоком по лотку, откуда избыток стекает в сосуд с мешалкой и вновь возвращается на лоток.

В сушилках некоторых конструкций материал наносится на барабан при помощи устройства, распыливающего жидкость, или нескольких валиков, намазывающих слой пасты на барабан.

Современные вальцовые сушилки оснащены несколькими питательными валиками 7 (см. рис. 88, *в*). На валик подается жидкий продукт тонкой пленкой; при вращении вальца 1 первый слой материала успевает высохнуть, а следующий валик наносит второй слой материала, и так

**Рис. 89.** Схема подачи жидкого материала на поверхность вальца:

1 — валец; 2 — питательный валик; 3 — дека; 4 — винт; 5 — ванна; 6 — нож

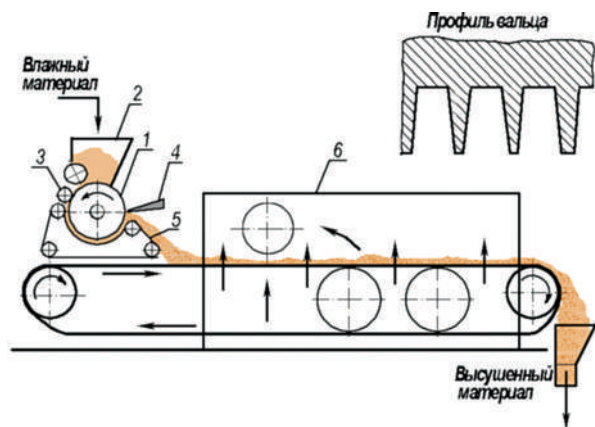


далее. В зависимости от диаметра вальца на сушилке может быть установлено до шести смачивающих валиков.

На рис. 89 показана схема подачи жидкого материала на валец сушилки смачивающим валиком. Жидкий продукт, поступающий из ванны 5, наносится питательным валиком 2, подпружиненной декой 3 с регулирующим винтом 4, на поверхность вальца 1. За один оборот вальца пленка продукта высушивается при контакте с горячей поверхностью вальца 1, а сухой продукт снимается с его поверхности плавающим ножом 6.

Вакуумные вальцовые сушилки работают по тому же принципу, что и описанные выше атмосферные, но в них все рабочие части находятся внутри герметичного кожуха, соединенного с установкой для создания вакуума. В вальцовых сушилках возможна эффективная сушка в тонком слое (пленке) материалов, не выдерживающих длительного воздействия высоких температур, например красителей. Продолжительность сушки регулируется скоростью вращения вальца. Напряжение по влаге зависит от свойств высушиваемого материала и может достигать  $70 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

Максимальная температура греющего пара в вальцовых сушилках определяется допустимым давлением внутри вальца (до 1 МПа) и не превышает  $160^\circ\text{C}$ . Повышение температуры греющей поверхности возможно в случае использования для нагрева высокотемпературных теплоносителей, например минерального масла или дифенильной смеси.



**Рис. 90.** Одновальцовая формующая сушилка:  
1 — формующий барабан; 2 — загрузочная воронка; 3 — прижимной валик; 4 — гребенчатый нож, 5 — транспортер, 6 — ленточная сушилка

При низких температурах сушки для обогрева может быть применена горячая вода.

Для сушки пастообразных материалов получили распространение одновальцовые формующие сушилки (рис. 90), работающие при атмосферном давлении. Валец 1 сушилки имеет рифленую поверхность с кольцевыми канавками глубиной 6–10 мм. Паста из загрузочной воронки 2 вмазывается в канавки с помощью прижимного валика 3. За один оборот вальца в его канавках образуются отформованные палочки пористой структуры, которые легко выламываются небольшими кусочками посредством гребенчатого ножа 4. Досушка материала производится в барабанной или ленточной сушилке, в которую отформованный материал поступает по транспортерной ленте 5. Такие комбинированные сушилки называются соответственно вальцово-барабанными, или вальцово-ленточными.



В дисковых сушилках контактной поверхностью является боковая поверхность диска.

На одном валу дискового сушильного аппарата может устанавливаться до 16 дисков, поэтому при одинаковых габаритных размерах теплообменная поверхность у дисковых сушилок больше, чем у вальцовых.

Схема работы дисковой сушилки показана на рис. 91.

Из бака раствор насосом заливается в циркуляционный резервуар, расположенный под дисками. Затем циркуляционным насосом раствор

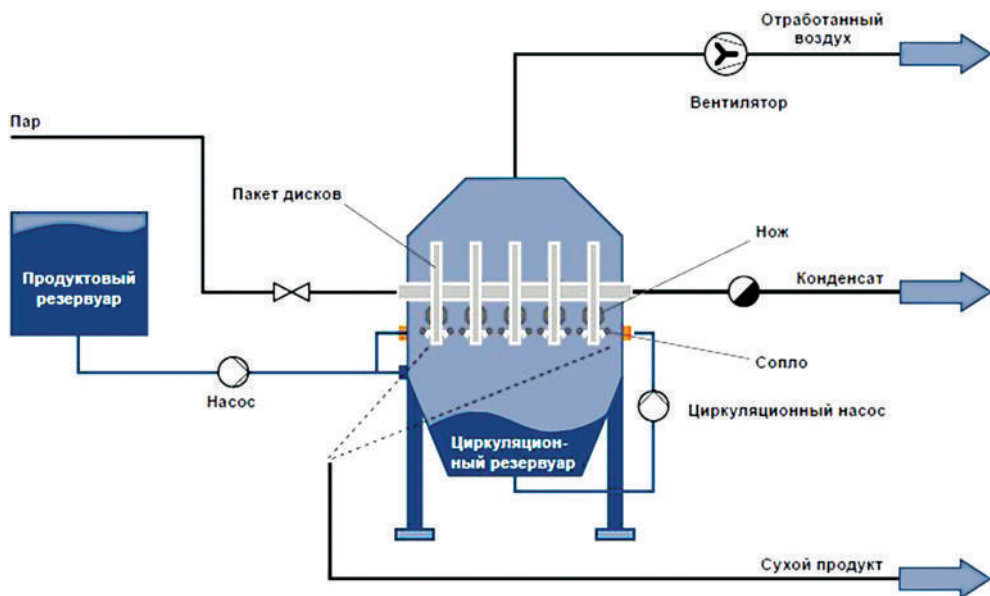


Рис. 91. Дисковая сушилка

подается через специальные распределительные трубки (сопла) на поверхность дисков; излишки раствора стекают в циркуляционный резервуар, а оставшийся на диске материал сушится и снимается ножами с противоположной поверхности дисков.

Внутри дисков через полый вал подводится греющий пар, а конденсат отводится с противоположной стороны. Пары воды с воздухом отводятся через вытяжной зонт вентилятором.

**Барабанные контактные сушилки.** Такие сушилки применяются в тех случаях, когда, во избежание загрязнения высушиваемого материала, его соприкосновение с топочными газами недопустимо. В этом случае внутрь барабана подается только небольшое количество горячего или теплого воздуха или инертного газа, необходимого для удаления паров воды. Основной перенос тепла происходит через стенку барабана. На рис. 92 приведена схема сушки влажного материала в сушилке такого типа.

Сушильный барабан 1 установлен на опорах 2, 3 и вращается со скоростью 3–6 об/мин при помощи привода 6. Внутри сушильного барабана установлены лопасти, которые перемещают материал от загрузочной



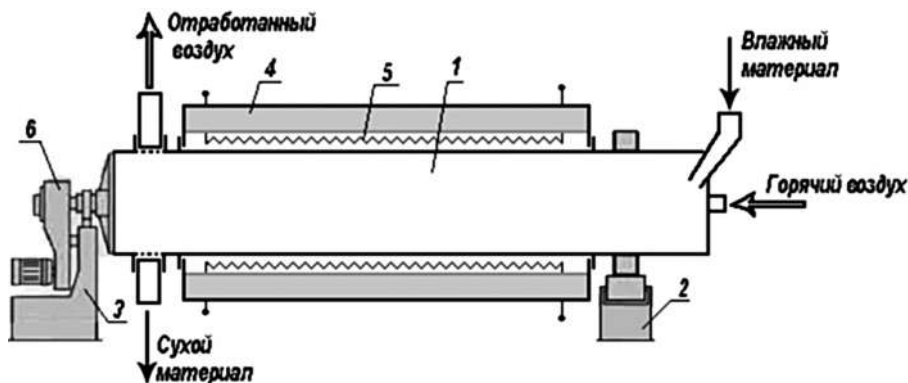


Рис. 92. Барабанная контактная сушилка:

1 — барабан; 2, 3 — опоры; 4 — неподвижный кожух с теплоизоляцией; 5 — теплоэлектронагреватели; 6 — привод

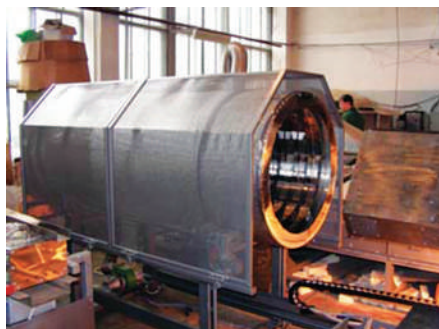
воронки в сторону выгрузки. Сушильный барабан вращается внутри неподвижного кожуха, в котором установлена теплоизоляция 4 и ТЭНы 5. Материал через стенку барабана нагревается до температуры 300–350 °С, влага испаряется и удаляется с горячим воздухом. При максимальной производительности работают все ТЭНы, при меньшей производительности часть ТЭНов отключается.

Для обогрева могут быть использованы также топочные газы, которые подаются в пространство между барабаном и кожухом и затем удаляются вентилятором.

## 7.6.

### СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ СУШКИ И ТИПЫ СУШИЛОК

К специальным видам сушки, как указывалось ранее, относятся радиационная, диэлектрическая и сублимационная сушка. Соответственно этим видам различают терморadiационные, высокочастотные и сублимационные сушилки.



#### Терморadiационные сушилки.

В этих сушилках необходимое для сушки тепло сообщается инфракрасными лучами. Таким способом к материалу можно подводить удельные потоки тепла (приходящиеся на 1 м<sup>2</sup> его поверхности), в десятки раз превышающие соответствующие потоки при конвективной или контактной сушке. Поэтому при сушке инфра-



красными лучами значительно увеличивается интенсивность испарения влаги из материала.

В основе теории применения инфракрасных лучей для сушки лежит способность воды и некоторых других растворителей поглощать энергию инфракрасного излучения. Максимально поглощаются водой лучи с длиной волны 2,7 мкм. При этом глубина проникновения волн внутрь слоя влажного материала не превышает 2,0–2,5 мм.

Наиболее эффективно терморadiационная сушка используется для высушивания тонколистовых материалов или лакокрасочных покрытий. При конвективной сушке поверхность лакокрасочных материалов зачастую приобретает эффект «апельсиновой корки» и наплыва из-за смещения покрытия потоком воздуха и вследствие налипания на поверхность частиц пыли, содержащихся в воздухе. Инфракрасная сушка лишена этих недостатков.

Для инфракрасной сушки характерно короткое время нагрева изделия до заданной температуры. Такой эффект объясняется тем, что инфракрасная сушка практически безынерционна: в процессе нагрева отсутствует промежуточный теплоноситель и энергия от излучателей передается непосредственно материалу.

ИК-сушилки применяют также для сушки толстых слоев зернистых материалов, пластмасс. Однако при высушивании толстослойных материалов скорость сушки может определяться не скоростью подвода тепла, а скоростью внутренней диффузии влаги или требованиями, предъявляемыми к качеству высушиваемого материала (недопустимость коробления, нарушения структуры и т. п.). Кроме того, в начальный период радиационной сушки под действием высокого температурного градиента влага может перемещаться вглубь материала до тех пор, пока под действием большей, противоположно направленной движущей силы (за счет градиента влажности), не начнется испарение влаги из материала.

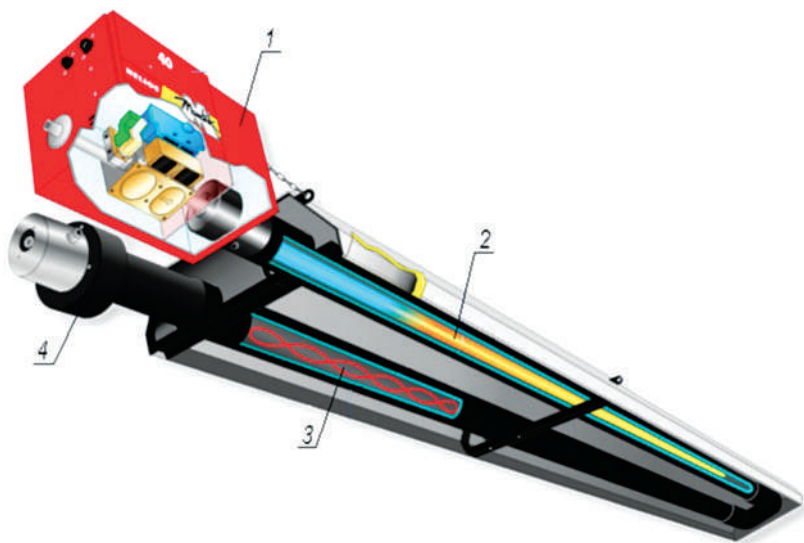
Применяются терморadiационные сушилки с электрическим и газовым обогревом.

Конструкция излучателей, независимо от способа их разогрева, должна обеспечивать равномерное поле нагрева со значительной плотностью мощности. Максимально реализованная на сегодня плотность составляет 50 кВт/м<sup>2</sup>.

В качестве электрических излучателей используют зеркальные лампы или элементы сопротивления (панельные или трубчатые), а также керамические нагреватели — электрические спирали, запрессованные в керамической массе.

Газовый обогрев обычно проще и экономичнее электрического. При газовом обогреве излучателями являются керамические плиты, которые нагреваются газовыми горелками.





**Рис. 93.** Газовый ИК-излучатель:

1 — газовая горелка; 2 — теплоизлучатель; 3 — завихритель; 4 — вентилятор

На рис. 93 представлен газовый инфракрасный излучатель трубного типа, который состоит из газовой горелки 1, смесительной камеры, блока безопасности, автоматики, излучающей трубной системы 2, отражателя (рефлектора), вентилятора-дымососа 4 и системы отвода дымовых газов 3.

В газогорелочном блоке ИК-излучателя происходит сгорание природного либо сжиженного газа (пропан, бутан). Образующиеся при этом продукты сгорания с помощью вентилятора непрерывно циркулируют внутри замкнутой теплоизлучающей трубной системы 2. За счет этого нагревается наружная поверхность излучающей трубы обогревателя, которая направляет инфракрасное излучение на высушиваемый материал. Отработанные газы удаляются вентилятором 4.

На рис. 94 изображена схема ленточной терморрадиационной сушильной установки. Газовые ИК-излучатели 2 устанавливаются над высушиваемым материалом, который находится на транспортной ленте 1. Внутри сушильной камеры 3 подается свежий воздух, который, проходя над материалом, уносит пары испаренной влаги. Тепло излучателей в основном расходуется на нагрев материала и испарение из него влаги, и практически не нагревает воздух. Воздух используется лишь как влагоноситель — агент, удаляющий пары влаги из сушильной камеры.

В современных терморрадиационных сушилках сочетание ИК-нагрева материала и правильно организованного движения влагоносителя позволяет повысить эффективность сушки.

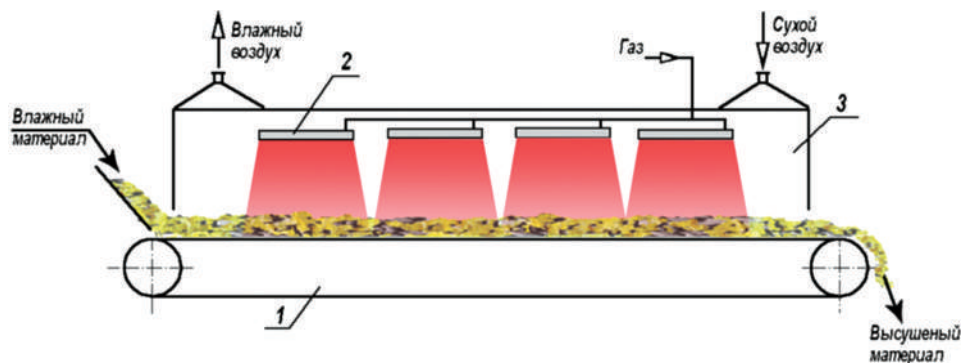


Рис. 94. Терморadiaционная сушилка с газовыми ИК-излучателями:  
1 — транспортерная лента; 2 — газовые излучатели; 3 — кожух сушильной камеры

В ИК-сушилках с газовым обогревом эффективно используют также излучающие насадки с беспламенным горением. Сущность этого способа нагрева заключается в пропускании смеси газов с воздухом через пористую плиту из огнеупорного материала со скоростью, превышающей скорость воспламенения смеси. При этом горение сосредотачивается на внешней поверхности раскаленной плиты, испускающей мощные потоки тепловой радиации.

Терморadiaционные сушилки компактны и эффективны, но отличаются относительно высоким расходом энергии — 1,5–2,5 кВт·ч на 1 кг испаренной влаги<sup>1</sup>, — что ограничивает область их применения.

Большое распространение такие сушилки получили для сушки лакокрасочных материалов после нанесения их на поверхности (ДСП, ламинат, и другие листовые материалы и плиты). Оборудование инфракрасной сушки обеспечивает высокое качество сушки лакокрасочных покрытий.

Для высушивания толстослойных материалов ИК-сушку используют, когда необходимо регулировать температуру и влажность не только на поверхности, но и в глубине материала. Таким способом можно, в частности, сушить пластические массы и другие материалы, обладающие диэлектрическими свойствами.

**Сушка в токах высокой частоты (ТВЧ) и сверхвысокой частоты (СВЧ) (диэлектрические сушилки).** Для высушивания толстослойных материалов, когда необходимо регулировать температуру и влажность не только на поверхности, но и в глубине материала, в ряде случаев эффективно применение сушки в поле токов высокой и сверхвысокой частоты. Таким способом можно, в частности, сушить пластические массы и другие материалы, обладающие диэлектрическими свойствами.

<sup>1</sup> Для сравнения: расход тепла для большинства конвективных сушилок составляет 1,0–1,5 кВт·ч/кг.

Высокочастотная сушилка (ТВЧ-сушка — рис. 95) состоит из высокочастотного генератора 4 и сушильной камеры 3. Переменный ток из сети поступает в выпрямитель, а затем в генератор, где преобразуется в переменный ток высокой частоты. Этот ток подводится к пластинам конденсаторов 2, между которыми движется на ленте высушиваемый материал. Под действием электрического поля высокой частоты (до 25 МГц) ионы и электроны в материале (содержащем обычно некоторое количество электролита, например, раствора солей) меняют направление движения синхронно с изменением знака заряда пластин конденсатора; дипольные молекулы приобретают вращательное движение, а неполярные молекулы поляризуются за счет смещения их зарядов. Эти процессы, сопровождаемые трением, приводят к выделению тепла и нагреванию высушиваемого материала.

Изменяя напряженность электрического поля, можно регулировать температурный градиент между внутренними слоями материала и его поверхностью, т. е. регулировать скорость сушки, а также избирательно нагревать лишь одну из составных частей неоднородного материала.

В поле токов высокой частоты возможна быстрая (за счет усиленной термодиффузии влаги) и равномерная сушка толстослойных материалов. Однако сушка этим способом требует таких удельных расходов энергии, которые в несколько раз превышают соответствующие расходы при конвективной и контактной сушке (2,5–5,0 кВт·ч на 1 кг испаренной влаги). Кроме того, оборудование сушилок является более сложным и дорогим в эксплуатации. Поэтому применение высокочастотной сушилки рентабельно только в определенных условиях (например, для сушки дорогостоящих диэлектрических материалов) и требует технико-экономического обоснования в каждом конкретном случае.

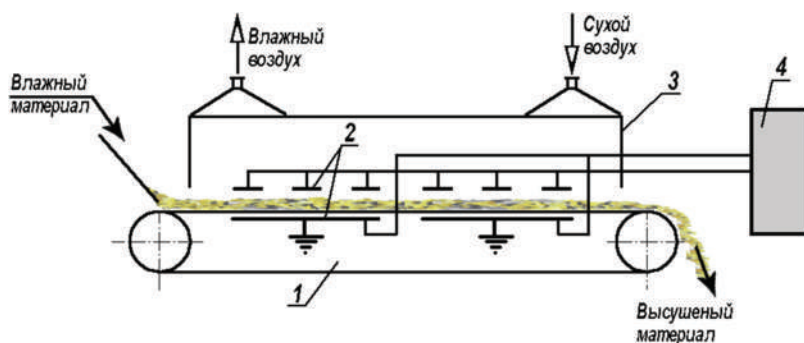


Рис. 95. Высокочастотная (диэлектрическая) сушилка:

1 — транспортная лента; 2 — пластины конденсаторов; 3 — сушильная камера; 4 — высокочастотный генератор

Развитие мощных магнетронов и научные исследования воздействия микроволновой энергии на различные материалы открыли перспективы для промышленного применения СВЧ-техники в сушильной практике.

Принцип действия СВЧ-сушилки аналогичен ТВЧ-сушке и состоит в разогреве материала с помощью энергии электромагнитного поля сверхвысоких частот за счет частого изменения направления движения молекул в материале и их столкновения, что вызывает межмолекулярное трение. Однако если для ТВЧ-сушки используются частота до 25 МГц, то СВЧ нагрев и сушка происходят в области частот до 2500 МГц.

СВЧ-сушка начинается с первых же мгновений включения установки. Разогрев происходит изнутри материала; следовательно, скорость сушки и качество материала повышаются (нет пересыхания верхних слоев, а значит, и внутренних напряжений).

СВЧ-сушка проводится на высоких частотах 915–2500 МГц. Энергия СВЧ-поля передается в материал путем излучения свободных, не связанных линией передачи энергии (контуром) колебаний в пространство герметичной металлической камеры. В этом случае взаимодействие электромагнитного поля с материалом максимально и не зависит от характеристик материала и нагрузочных способностей генераторов. Генераторы пространственно разнесены с высушиваемым материалом.

Оборудование СВЧ-установки включает:

- генераторы СВЧ — магнетроны (крепятся снаружи камеры и являются основой СВЧ-сушки);
- блоки питания магнетронов (располагаются снаружи установки с задней стороны на специальной стойке);
- СВЧ-волноводы (изготавливаются из латуни, располагаются внутри установки, служат для ввода СВЧ-энергии внутрь камеры и передачи ее посредством излучающей системы материалу);
- излучающую систему (обеспечивает выбор режима возбуждаемых волн, что позволяет достичь равномерности излучения по объему установки);
- реверсивные осевые вентиляторы с двигателями в тропическом исполнении (находятся внутри камеры, необходимы для удаления влаги с поверхности материала);
- вытяжную систему (которая в свою очередь включает электромагнитный клапан для выпуска пара и дополнительный вентилятор, расположенный снаружи установки);
- систему охлаждения и рекуперации тепла;
- систему автоматического регулирования сушки.

К достоинствам СВЧ-сушки следует отнести высокую скорость сушки и равномерный прогрев по всему объему материала, что позволяет

сушить материал во всем его объеме. Последнее особенно важно для сушки изделий определенной формы, склонных к растрескиванию или изменению формы при сушке.

К недостаткам относятся в первую очередь высокие энергетические затраты, высокая стоимость и малый ресурс работы магнетронов<sup>1</sup>. Расход электроэнергии примерно такой же, как и для ТВЧ-сушки, однако стоимость магнетронов и вспомогательного оборудования существенно выше.

СВЧ-сушилki используют для сушки достаточно дорогих и требующих бережного обращения материалов, таких как лекарственные травы, ягоды, фрукты, овощи, керамика, ценные породы древесины и т. д.

Ограничения для применения микроволнового излучения связаны главным образом с отсутствием оборудования промышленного назначения. Очевидная трудность при разработке и конструировании техно-

логических СВЧ-установок заключается в обеспечении равномерности СВЧ-облучения материала. По этой причине не существуют СВЧ-сушилki большой производительности.

На рис. 96 показан промышленный магнетрон М-116-100, 100 кВт, работающий на частоте 915 МГц (производитель Магратеп, Россия). Вес изделия 8–10 кг.

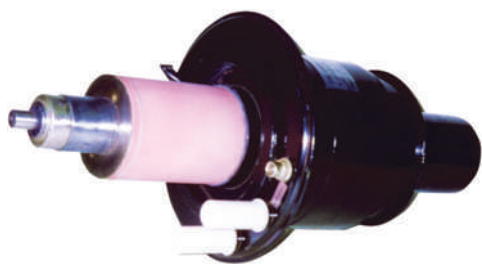


Рис. 96. Промышленный магнетрон М-116-100



**Сублимационные сушилки.** Сушка материалов в замороженном состоянии, при которой находящаяся в них в виде льда влага переходит в пар, минуя жидкое состояние, называется сублимационной, или молекулярной.

Сублимационная сушка проводится в глубоком вакууме (остаточное давление 1,0–0,1 мм рт. ст., или 133–13 Па) и соответственно, при низких температурах.

Принципиальная схема устройства сублимационной сушилки показана на рис. 97. В сушильной камере 1, называемой сублиматором, находятся пустотелые плиты 2, внутри которых циркулирует теплая вода. На плитах устанавливаются противни 3 с высушиваемым материалом,

<sup>1</sup> Ресурс работы магнетрона составляет примерно 2000–4000 ч, стоимость магнетрона мощностью 50 кВт — примерно \$3800–4200.

**Рис. 97.** Принципиальная схема сублимационной сушилки:

1 — сушильная камера (сублиматор); 2 — пустотелая плита; 3 — противень; 4 — конденсатор-вымораживатель



имеющие снизу небольшие бортики. Поэтому противни не соприкасаются поверхностью дна с плитами 2 и тепло от последних передается материалу, преимущественно радиацией. Паровоздушная смесь из сублиматора 1 поступает в трубы конденсатора-вымораживателя 4, в межтрубном пространстве которого циркулирует хладагент, например аммиак. Конденсатор включается в один циркуляционный контур с испарителем аммиачной холодильной установки и соединяется с вакуум-насосом для отсасывания неконденсирующихся газов и воздуха. В трубах конденсатора происходят конденсация и замораживание водяных паров. Для более удобного удаления льда обычно используют два конденсатора (на рис. 97 условно показан один), которые попеременно работают и размораживаются.

Процесс удаления влаги из материала протекает в три стадии. При снижении давления в сушильной камере происходит быстрое самозамораживание влаги и сублимация льда за счет тепла, отдаваемого самим материалом (при этом удаляется до 15 % всей влаги). Затем осуществляется удаление основной части влаги сублимацией, что соответствует периоду постоянной скорости сушки. На третьей стадии происходит удаление остаточной влаги тепловой сушкой.

Механизм переноса влаги (в виде пара) от поверхности испарения при сублимационной, или молекулярной, сушке специфичен: он происходит путем эффузии, т. е. свободного движения молекул пара без взаимных столкновений их друг с другом.

Сушка проводится при осторожном и мягком обогреве замороженного материала водой, потому что количество передаваемого тепла не должно превышать его расхода на сублимацию льда без его плавления.

Вакуумную сублимационную сушку иногда называют лиофильной. Этот вид сушки является периодическим процессом, требующим ручного труда. Длительность сушки может достигать 10–20 ч.



Последовательно выполняются следующие операции:

1. После очистки и дезинфекции материала его укладывают на лоток, после чего помещают в камеру сублимационной сушилки.
2. Создают вакуум в камере сублимационной сушилки с помощью вакуум-насоса. Влажный материал замораживается до твердого состояния.
3. Затем замороженный материал медленно нагревается до заданной температуры для сублимационного обезвоживания. После обезвоживания вакуум отключается, готовый продукт вынимается из сублиматора и помещается в герметичную упаковку.

Непосредственно на сушку сублимацией расходуется умеренное количество тепла низкого потенциала (при температуре 40–50 °С), но суммарный расход энергии и эксплуатационные расходы больше, чем при любом другом способе сушки, исключая сушку в поле токов высокой частоты.

Применение этого дорогостоящего способа сушки целесообразно лишь в тех случаях, когда к высушенному продукту предъявляются высокие требования в отношении сохранения его свойств при длительном хранении. В настоящее время путем сублимации сушат главным образом ценные продукты, обычно не выдерживающие тепловой сушки и требующие продолжительного сохранения собственных биологических свойств. Это антибиотики, плазма крови, биологически активные вещества и некоторые другие медицинские препараты, а также высококачественные пищевые продукты.

Мы рассмотрели основные виды сушильных аппаратов. Следует отметить, что практика сушки постоянно совершенствуется: появляются новые виды аппаратов, улучшаются существующие конструкции. Компании, производящие сушильное оборудование, поставляют на рынок не только сушильные аппараты, но и вспомогательное оборудование, поскольку от способа подачи материала, его выгрузки, способа очистки газов зависят экономические показатели всей сушильной установки и потребительские свойства конечного продукта.

Для большинства продуктов, требующих сушки, накоплен большой опыт и разработаны определенные конструкции сушильных аппаратов. Для новых продуктов, практика сушки которых еще не отработана, требуются выбор подходящего метода сушки и проведение пилотных испытаний сушки на моделях сушильных аппаратов небольшого размера.

В следующей главе рассмотрены сушильные аппараты, которые используются для сушки материалов в различных отраслях промышленности.

# 8

## СУШКА В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Для большинства производств уже разработаны основные режимы и аппаратное оформление процессов сушки. Требуется лишь изучить производственный опыт и выбрать вариант, соответствующий местным условиям производства. Это касается выбора топлива и места расположения оборудования.

Например, сушку сыпучих минеральных веществ, таких как карьерный или кварцевый песок, измельченная руда, минеральные удобрения и соли, целесообразно проводить в барабанных сушилках дымовыми газами с использованием газовых горелок. Такие сушилки могут быть размещены на открытой площадке, а высушенный материал обычно выгружается из сушилки пневмотранспортом или элеваторами в силосные емкости.

Для сушки пищевых и лекарственных препаратов используются другие типы сушилок. Например, для сушки молока применяют распылительные сушилки, а для сушки дрожжей и отходов пивного производства — в основном вальцовые сушилки. В пищевой промышленности для конвективных сушилок используется чистый воздух; все узлы сушилки, контактирующие с продуктом, должны быть выполнены из пищевой нержавеющей стали.

Если опыт сушки конкретного материала отсутствует и практика сушки еще не отработана, требуются выбор подходящего метода сушки и проведение пилотных испытаний сушки на моделях сушильных аппаратов небольшого размера.

В этом случае выбор сушильного аппарата определяется по совокупности физико-химических свойств влажного материала, основными из которых являются внешний вид материала, допустимая температура сушки, пожаро- и взрывоопасность и др. Ниже приведен опросный лист, в котором учтены все необходимые параметры для выбора типоразмера сушильного аппарата<sup>1</sup>.

На основании исходных данных табл. 8-1 выполняется выбор типа сушильного аппарата, рассчитываются материальные и тепловые потоки, подбираются типоразмер сушильного аппарата и вспомогательное оборудование, производится расчет стоимости оборудования.

---

<sup>1</sup> В таблице приведены исходные данные для конвективной сушилки. Для контактных или других типов сушилок требуются несколько иные исходные данные.

Таблица 8-1

**Исходные данные для выбора и расчета сушильного аппарата**

<b>1. Исходный материал</b>	
Наименование материала	Указать, как называется материал, дать описание, как он получается, отметить его характерные особенности
Внешний вид материала	Сыпучий материал, суспензия, паста, желе, гранулят, порошок, раствор, волокно и т. д.
Влажность, % масс. (в том числе кристаллическая влага)	Указать наличие кристаллической, внутренней, поверхностной влаги
Температура материала, подаваемого на сушку	Указать диапазон температур, при которых получается и хранится исходный материал
Химический состав, % масс.	Указать химический состав
Плотность материала, кг/м <sup>3</sup>	Насыпная, истинная
Гранулометрический состав, % масс.	Указать гранулометрический состав
Материал липкий?	да/нет
Материал абразивный?	да/нет
Материал комкующийся?	да/нет
Материал взрывоопасный?	да/нет
Материал горючий?	да/нет
<b>2. Конечный продукт</b>	
Назначение материала	Указать, для чего используется материал, как он упаковывается, как хранится
Внешний вид	Сыпучий материал, гранулят, порошок
Влажность, % масс. (в том числе кристаллическая)	Указать влажность конечного продукта (воздушно-сухой продукт, технически нулевая влажность)
Требуется ли охлаждение продукта?	да/нет
Температура разложения материала, °C	Указать температуру, при которой продукт разлагается
<b>3. Сушилка</b>	
Предпочитаемый тип сушилки?	Конвективная, контактная и т. д.
Производительность по конечному продукту	Тонн/час, тонн/сут, тонн/год
Режим работы	Сменный, круглосуточный
Максимально допустимая температура материала во время сушки, °C	Указать температуру, при которой продукт теряет свои потребительские свойства
Требуется ли гранулирование или дезагломерация при сушке?	Да/нет
<b>4. Топливо</b>	
Указать вид топлива	Природный газ, жидкое топливо, уголь, pellets, греющий пар, электрообогрев

Окончание табл. 8-1

5. Воздух	
Температура воздуха (лето/зима), °C	+18 / –7C (Россия, Санкт-Петербург)
Относительная влажность воздуха, % (зима/лето)	87 / 69 (Россия, Санкт-Петербург)
Высота над уровнем моря, м	100
Допустимая запыленность отходящих газов после очистки, мг/м <sup>3</sup>	50 (для песка)
Расположение оборудования	На открытой площадке или в помещении, указать температуру в помещении
6. Оборудование	
Тип, характеристики эл. двигателей	3/N/PE/ 380V AC 50Hz IP55
Взрывобезопасное исполнение	да/нет
Бункер исходного материала	да/нет
Питатели	да/нет
Сушилка	да/нет
Горелка, топка, калорифер	да/нет
Система очистки отходящих газов	да/нет
Вентилятор и дымовая труба	да/нет

Ниже приведены основные сушильные аппараты, которые используются для сушки материалов в различных отраслях промышленности.

### 8.1. ХИМИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Химическая промышленность характеризуется большим разнообразием материалов, подлежащих высушиванию. Условно их можно разбить на следующие группы:

- минеральные соли и неорганические вещества;
- порошкообразные красители и пигменты;
- органические материалы;
- пластмассы и высокомолекулярные соединения;
- синтетические моющие средства и другие материалы бытовой химии.

Основные сушильные аппараты, используемые для сушки продукции химических производств, рассмотрены в специальной литературе [27, 51–52, 64–69, 71, 82].

Большинство сыпучих материалов при производстве неорганических продуктов (удобрения, рудные материалы, соли, порошки) сушат в барабанных сушилках или сушилках взвешенного слоя. Эти два типа сушилок особенно распространены в химической промышленности и имеют свои преимущества и недостатки.

Продукты органической химии требуют соблюдения температурного режима сушки, и их сушка часто сопряжена с необходимостью соблюдения

мер противопожарной безопасности. В некоторых случаях сушке подвергаются материалы, содержащие органические растворители, необходимость рекуперации которых накладывает определенные ограничения на конструкцию сушильного аппарата. Органические материалы бывают липкие, термически нестойкие. Все эти свойства должны учитываться при выборе конструкции сушильного аппарата и всей схемы сушки.

В табл. 8-2 приведен список сушильных аппаратов, которые были разработаны для сушки конкретных продуктов химической и горно-рудной промышленности.

Таблица 8-2

## Сушильные аппараты, применяемые для сушки влажных материалов

№	Материал	Произв., т/ч	Тип сушки
<b>Химическая промышленность</b>			
1	Минеральные удобрения	375	Барабанная сушилка
2	Моноаммоний фосфат	15	Барабанная сушилка, охладитель
3	Монофосфат кальция	20	Барабанная сушилка, гранулятор
4	Мочевина	10–150	Вибросушилка
5	Сульфат магния (кизерит)	80	Барабанная сушилка
6	Калия хлорид		Вибросушилка
7	Калия сульфат		Барабанная сушилка
8	Гербицид	4	Барабанная сушилка
9	Морская соль (натрия хлорид)	20	Вибросушилка
10	Хлористый кальций	20	Сушилка взвешенного слоя с грануляцией
11	Боросиликат натрия	0,5	Барабанная сушилка непрямого нагрева
12	Пентагидрат буры	70	Сушилка взвешенного слоя
13	Скрап алюминия	20	Барабанная сушилка
14	Диоксид титана	5	Сушилка взвешенного слоя
15	Тальк	50	Барабанная сушилка (двойной барабан)
16	Стеклобой	10–60	Барабанная сушилка
17	Цеолит	20	Барабанная сушилка
18	Сепиолит	20	Вибросушилка
19	Углеродная сажа	1,3	Вибросушилка с охладителем
20	Металлический порошок	5,0	Барабанная сушилка (двойной барабан), охладитель
21	Целлюлоза	0,3	Вибросушилка
22	Плексиглаз (порошок)	0,5	Вихревая сушилка
23	Кальцийсульфатный кек	0,3	Барабанная сушилка
24	Пигментно-глазурная суспензия		Сушилка взвешенного слоя
25	Нафталинсульфонат	0,3	с инертными телами

Окончание табл. 8-2

№	Материал	Произв., т/ч	Тип сушилки
26	Полиакриламид гидролизированный	0,2	Дисковая, валковая сушилка
27	Полиметилена-нафталинсульфо- кислоты Na-соль	2,2	Сушилка взвешенного слоя с инертными телами
28	Хромат стронция		Сушилка взвешенного слоя с инертными телами
<b>Горнорудная промышленность</b>			
1	Никелевый песок	60	Барабанная сушилка (монобарабан)
2	Магнетитовая руда	40	
3	Ильменитовая руда	60	
4	Медно-никелевая руда	40	
5	Полевой шпат	12	
6	Антрацит	10	
7	Нефтяной кокс	20	Вибросушилка
8	Бурый уголь	80	
9	Активированный уголь	110 кг	Сушилка взвешенного слоя (периодического действ.)
10	Уголь		Барабанная сушилка (двойной барабан), охладитель
11	Боксит, уголь, графит	5	Барабанная сушилка (двойной барабан)

В химической промышленности для сушки и грануляции удобрений и минеральных солей наиболее распространены барабанные сушилки, особенно для многотоннажного производства. Соли обычно получают кристаллизацией с последующим центрифугированием или фильтрацией кристаллического осадка. Влажность таких осадков после центрифуги составляет 3–7 %, влага в основном поверхностная. В качестве сушильного агента обычно используют дымовые газы, полученные в смесительной топке. Температуру дымовых газов выбирают максимальную, исходя из физико-химических свойств солей (в основном температуры плавления). Для тугоплавких материалов возможна установка газовой или дизельной горелки непосредственно на входе в барабан без топки смешения. Чем выше температура дымовых газов, тем экономичнее работает сушильный барабан. Пылевая фракция солей улавливается в рукавном фильтре. Количество пыли зависит от дисперсного состава исходного продукта (от условий кристаллизации соли) и составляет обычно 10–30 %. Мелкая фракция при достаточной длине барабана успевает высохнуть и в рукавный фильтр попадает при нулевой влажности.

Если при высоких температурах неорганический материал разрушается (плавится, разлагается, теряет свои потребительские свойства), перед сушилкой устанавливают топку смесительного типа, в которой



дымовые газы от горелки смешиваются с холодным воздухом для получения сушильного агента необходимой температуры.

Соли, которые производятся для пищевого применения (поваренная соль, сода пищевая), сушат чистым воздухом в барабанных сушилках либо в сушилках взвешенного слоя. В этом случае все поверхности, контактирующие с солью, должны быть выполнены из нержавеющей пищевой стали. По этой причине сушилки взвешенного слоя часто оказываются более предпочтительны, поскольку корпус сушильной камеры сушилки КС может быть изготовлен из более тонкого металла, чем барабан роторной сушилки и, соответственно, весь сушильный комплекс будет иметь меньшую стоимость.

Для хорошо растворимых либо плохо кристаллизующихся солей используют сушилки взвешенного слоя с грануляцией [67]. В промышленности работают установки, в которых на взвешенный слой материала форсунками подается концентрированный раствор соли. Раствор мгновенно высыхает на поверхности частиц, что приводит к росту и укрупнению гранул продукта. Во взвешенном слое обычно происходят одновременно рост и дробление частиц. В зависимости от физико-химических свойств материала и условий сушки возможно укрупнение гранул в процессе сушки или, наоборот, их измельчение. Для регулирования крупности гранул используют либо ретур материала, либо его дробление после сушки [71]. Сушилки такого типа применяют для сушки хлорида и нитрата кальция, а также некоторых других солей.

В производстве стекла для стекловаренных печей необходимо сушить не только песок, но и стеклобой. В зависимости от назначения стекольной продукции в печь может быть добавлено до 50 % стеклобоя. Добавка в стекловаренную печь 10 % стеклобоя снижает расход топлива на 2–3 %.

Вторичное стекло дробят, очищают и сушат. Дробленое стекло является сильно абразивным материалом и сушится в барабанных сушилках (см. табл. 8-2). Барабаны выполняют из толстой стали с защитными от абразивного истирания устройствами.

Пигменты и красители сушат в сушилках с взвешенным слоем инертного материала [67].

Для получения наполнителей — мелкодисперсных материалов с большой удельной поверхностью, таких как белая сажа (аморфный диоксид кремния БС-100, БС-120), — используют распылительные сушилки.

Сушка полимерных материалов имеет свои особенности. Большинство полимеров склонны к комкованию в процессе сушки; возможны образование статического электричества, слипание частиц. Для сушки таких материалов (поливинилхлорид, капрон, полистирол) используют сушилки с активным гидродинамическим режимом — кипящего, фонтанирующего слоя. В материалах такого типа часто присутствуют органические растворители, которые улавливают в конденсаторах или абсорберах, а сушку ведут в замкнутом цикле в токе азота.

Сушка топливных материалов, таких как различные марки угля, антрацит, коксовые отсеивы, может производиться в барабанных сушилках, вибросушилках, сушилках взвешенного слоя (см. табл. 8-2). Сушка в аппаратах кипящего слоя позволяет не только сушить, но и обеспылить продукт. Сушилки топливных материалов должны быть оснащены средствами пожаротушения и взрывными клапанами, так как материал является пожароопасным, а углеродная пыль в определенных концентрациях в смеси с воздухом взрывоопасна.

В горнорудной промышленности в основном используются барабанные сушилки, однако для некоторых материалов применяются сушилки других типов.

## 8.2.

### ПРОИЗВОДСТВО СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Потребление минеральных наполнителей и сухих строительных смесей (ССС) в России и за рубежом постоянно растет. Для сушки компонентов СССР используют барабанные сушилки, сушилки взвешенного (кипящего) слоя, вибросушилки. В табл. 8-3 приведен список сушильных аппаратов для сушки песка, известняка, минеральной крошки, минеральных порошков и других наполнителей СССР.

Большие объемы переработки достигаются при сушке различных видов песка (карьерного, морского, кварцевого, фракционированного). Здесь используются в основном аппараты большой единичной мощности, и по этой причине основным показателем работы сушилок является их экономичность. Барабанные сушилки наиболее распространены из-за простоты их обслуживания и возможности их установки на открытой площадке непосредственно в карьере, вблизи месторождения. Для сушки песка можно использовать газовую горелку, установленную непосредственно перед барабаном, без топки смешения. Существенная экономия может быть достигнута при использовании горизонтальных сушилок с двойным барабаном. В сушилках такого типа возможно совмещение сушки и охлаждения материала. Рекуперация тепла и испарительное охлаждение позволяют снизить затраты тепла на сушку на 10–15 % по сравнению с монобарабанными сушилками. Для сушилок большой мощности это существенная экономия топлива. Достоинства и недостатки современных барабанных сушилок (монобарабанных и с двойным барабаном) подробно описаны в работе [93].

Однако, если необходимы не только сушка/охлаждение, но и обеспыливание песка, целесообразно применить сушилку кипящего слоя.

Для сушки кускового материала (известняк, доломит, щебень) используют монобарабанные сушилки. В барабанах специальной конструкции возможны не только сушка, но и очистка кускового материала от глинистых примесей и пыли [93].

Т а б л и ц а 8-3

## Сушильные аппараты, применяемые для сушки влажных материалов

№	Материал	Прозв., т/ч	Тип сушилки
Строительные смеси, горная промышленность			
1	Песок фракционированный	160	Барабанная сушилка (монобарабан)
2	Песок	50–70	Барабанная сушилка (двойной барабан), охладитель
3	Доломит	30	Барабанная сушилка (монобарабан)
4	Известняк	110	Барабанная сушилка с обеспыливанием
5	Глина	40	Барабанная сушилка(монобарабан)
6	Глина	20	Сушилка взвешенного слоя
7	Бентонит (глина)	7	Барабанная сушилка с грануляцией
8	Гипс (гранулы)	40	Вихревая сушилка + вибросушилка
9	Микросферы золы уноса	4	Барабанная сушилка(монобарабан)
10	Песок гранитный, базальтовый	20	
11	Пуццолан	30	
Переработка отходов			
1	Шлак от сжигания отходов	150,0	Барабанная сушилка (монобарабан)
2	Отходы шлака	2,3	Барабанная сушилка (монобарабан)
3	Растительные отходы		Лопастная сушилка
4	Отходы бумажной промышленности	20,0	Барабанная сушилка(монобарабан)
5	Отходы картофеля	0,5	Лопастная сушилка

Сушка глины, каолина может быть совмещена с размолом (деагломерацией) комков для получения однородного глинопорошка (см. главу 7.2, с. 130, рис. 62).

В промышленности керамических материалов (керамическая плитка, керамический кирпич) используют сушилки специального назначения. Для сушки штучных изделий (например, кирпича-сырца) применяют туннельные сушилки. Для сушки керамической плитки используют ленточные сушилки. Шликерный порошок для прессования керамических изделий производят в распылительных сушилках. Печи и сушилки керамической промышленности подробно описаны в специальной литературе [99, 100, 109].

Вращающейся барабанной сушилке отдается предпочтение тогда, когда необходимо сушить влажные материалы при изменяющейся производительности, влажности, а также если частицы материала имеют неравномерное распределение по размеру (допускается размер частиц более 6 мм). Вращающаяся сушилка может быть изготовлена очень надежной даже для обработки сильно абразивных твердых частиц.

Сушилки со взвешенным и вибровзвешенным слоем целесообразно устанавливать в производственных помещениях: они занимают меньше места и позволяют фракционировать дисперсный материал, удаляя из него пыль.

Для сушки песка может быть использована как барабанная сушилка, так и сушилка взвешенного слоя. В табл. 8-4 для одинаковых условий сушки и охлаждения карьерного песка дано сравнение технических характеристик этих сушильных агрегатов.

Таблица 8-4

**Сравнение технико-экономических характеристик  
барабанной сушилки и сушилки КС**

Материал — карьерный песок	Производительность 30 т/ч по конечному продукту	
Гранулометрический состав	0–4 мм	
Начальная влажность	7 % влаги	
Начальная температура влажного материала	10 °С	
Температура наружного воздуха	20 °С	
Удельная теплоемкость сухого песка	0,8 кДж/(кг·К)	
Теплота сгорания (природный газ)	37,200 кДж/м³	
Конечная влажность после сушки	0,5 % влаги	
Расход испаренной влаги	2100 кг/ч	
Температура высушенного песка после охлаждения	60 °С	

Параметры сушилки	Барабанная сушилка (Mozer TK)	Сушилка КС (WS-V-T/K)
Длина сушилки/охладителя	11 м	8 м
Расход отработанного газа	30 000 м³/ч	34 000 м³/ч
Расход тепла	2350 кВт	2200 кВт
Расход природного газа (при стандартных условиях)	227 м³/ч	215 м³/ч
Тип газовой горелки	Газовая горелка установленная непосредственно перед сушильным барабаном	Газовая горелка с топкой перед воздуховодом в системе подачи воздуха в сушилку
Удельное потребление природного газа на тонну высушенного материала	7,6 м³/т	7,2 м³ /т
Полная мощность потребляемой электроэнергии	60 кВт	90 кВт
Количество вентиляторов	1	3
Установленная мощность электрооборудования	90 кВт	125 кВт
Удельная потребляемая мощность электрооборудования на тонну высушенного материала	2,0 кВт/т	3,0 кВт/т

Выбор типа сушилки в данном случае должен осуществляться на основе анализа всех параметров производства, таких как доступность производственных помещений, стоимость электроэнергии, газа, климатические условия, уровень подготовки обслуживающего персонала и т. д.

Сушка (обезвоживание) гипса и фосфогипса имеет определенные особенности, отличающиеся от переработки инертных материалов строительной отрасли.

Природный гипс существует обычно в виде кристаллогидрата  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Влажность кристаллогидрата составляет 20,9 % в расчете на общую массу.  $\beta$ -гипс (алебастр  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ) имеет влажность 6,6 %. При температуре 107–115 °С двухводный гипс превращается в полуводный. При более высокой температуре 150–180 °С образуется безводный гипс. При обезвоживании гипса важно не только получить гипс с необходимой влажностью, но и обеспечить его потребительские свойства, такие как время схватывания, предел прочности, объемное расширение и др. (ГОСТ 23789–2018). Сушка и обезвоживание гипса<sup>1</sup> являются длительным по времени процессом, протекающим при достаточно высоких температурах.

Для обезвоживания гипса используют различные аппаратурно-технологические схемы производства, которые описаны в специальной литературе [103–105].

В качестве сырья для обезвоживания гипса применяется кусковой материал размером до 40 мм или порошкообразный гипс, либо фосфогипс размером частиц до 0,2 мм.

Конечный продукт при обезвоживании — это полуводный гипс (алебастр) или безводный гипс (ангидрит). Обезвоживание кускового материала проводят в шахтных или вращающихся печах (сушилках). В качестве топлива используются природный газ, уголь или мазут, которые сжигаются в топке.

Во вращающихся барабанах гипс обезвоживают при температуре газов на входе 600–900 °С, на выходе — не более 160–180 °С. Влагонапряженность барабана составляет 25–43 кг/(м<sup>3</sup>·ч). Время, необходимое для дегидратации, составляет 1,5–2 ч. Используется как прямоточное, так и противоточное движение материала и газов.

В шахтных печах дымовые газы подаются в слой материала, который движется вниз, непрерывно выгружаясь из нижней части шахты. Температура дымовых газов составляет на входе 600 °С, на выходе — не более 130–150 °С; выгружаемый материал имеет температуру 200–300 °С, движение газа и материала противоточное.

<sup>1</sup> В дальнейшем сушку, включающую в себя удаление кристаллизационной влаги, будем называть обезвоживанием.

Применяют также гипсоварочные котлы и автоклавы, которые, в отличие от барабанных и шахтных печей, работают как аппараты периодического действия [105]. В гипсоварочный котел подается просушенный и размолотый в мельнице порошкообразный гипс. Варка (обезвоживание) продолжается более часа. При варке происходит интенсивное выделение влаги: материал как бы кипит, способствуя интенсивному перемешиванию порошкообразного гипса.

В автоклавах при пропаривании кускового гипса (щебня, размером 10–15 мм) при температуре 124 °С (0,23 МПа) в течение 6 ч с последующей сушкой газами с температурой 220–160 °С получается высокопрочный гипс.

Известны варианты дегидратации гипса и фосфогипса в сушилках взвешенного слоя. В работе [67] дегидратацию гипса осуществляли в опытно-промышленном аппарате взвешенного (фонтанирующего) слоя. При температуре в слое 128–136 °С и среднем времени пребывания 130 мин гипс получается равномерно обожженным, стандартного качества. Густота гипсового теста и сроки схватывания отвечали требованиям ГОСТа на строительный гипс.

Компания ALLGIER (Германия) разработала двухстадийную схему сушки и обезвоживания гипса (см. табл. 8.3). Первоначально гранулы гипса сушатся в вихревой сушилке, где время пребывания составляет несколько десятков секунд. В вихревой сушилке удаляется поверхностная влага и частично происходит дегидратация гипса. Окончательная дегидратация происходит в вибросушилке при повышенных температурах. Установка дегидратации гипса производительностью 40 т/ч с 2012 года успешно работает за рубежом.

### 8.3. ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Сушка древесины является обязательным условием для ее дальнейшей переработки.

Сушке подвергают следующие виды древесины:

- цилиндрические бревна (ошкуренные или неошкуренные);
- пиломатериалы (доски обрезные или необрезные, брус и др.);
- стружки для производства ориентированно-стружечных плит (ОСП);
- шпон для производства фанеры;
- опилки и стружки для производства ДСП или для других целей;
- отходы пиломатериалов для сжигания в котлах-утилизаторах.

В зависимости от вида материала используют различные конструкции сушилок.

В табл. 8-5 дана ориентировочная влажность свежеспиленной древесины. Обращает на себя внимание большая разность влажности древе-



сины, заготовленной в летнее и зимнее время. Так, средняя влажность осины в зимнее время составляет 118 %, в то время как летом — 70 %.

Таблица 8-5

**Влажность свежесрубленной древесины**

Порода	Влажность, %		
	ядра	заболони	средняя
Береза	—	70–90	78
Дуб	50–80	70–80	70
Ель	30–40	100–120	91
Лиственница	30–40	100–120	82
Осина	—	80–100	90
Сосна	30–40	100–120	88
Ясень	35–40	35–40	38
Пихта	—	—	101
Кедр	—	—	92

Влажность древесины, в отличие от влажности всех остальных веществ, принято выражать в пересчете на абсолютно сухую древесину. В табл. 8-5 влажность указана в процентах: в килограммах влаги, отнесенной на 1 кг абсолютно сухой древесины.

Следует понимать, что во влажной древесине нет поверхностной влаги: вся влага внутренняя, клеточная, осмотически связанная. Поэтому сушка древесины — это достаточно длительный процесс, который может длиться часы и сутки, в зависимости от условий сушки и размеров высушиваемого материала. Подробно процессы и особенности сушки древесины рассмотрены в специальной литературе [33, 34, 59].

Для каждого отдельного предназначения древесины используют различные методы сушки (атмосферный, камерный, петролатумный, контактный, индукционный, радиационный, в камерах с аэродинамическим подогревом воздуха).

Сушка на открытом пространстве или под навесом называется атмосферной. Она характеризуется низкой себестоимостью и медленным протеканием процесса сушки. Также она зависит от климатических и погодных условий. Атмосферную сушку используют при сезонной отгрузке пиломатериалов в летнее время.

Камеры для сушки — это отапливаемые помещения, специально построенные для сушки древесины. Процесс сушки состоит в обдувании древесины нагретой смесью воздуха с топочным газом или нагретым паром. При изменении температуры сушильного агента (воздуха) возможно получение древесины с заданной влажностью. Такой метод характеризуется наиболее приемлемыми сроками сушки и затратами на ее проведение.

При контактной сушке между двумя нагретыми плитами помещается тонкий плоский материал в форме листов. При нагревании плиты ее температура благодаря прямому контакту передается материалу.

Петролатумный способ — это способ сушки древесины в жидкости. Петролатум состоит из очищенного высоковязкого масла и отходов химической переработки нефти. Сырая древесина помещается в ванну с петролатумом, после чего вещество нагревают до температуры 100–130 °С. При такой температуре влага древесины образует пар, который выходит наружу. Процесс занимает в 5–7 раз меньше времени, чем в сушильных камерах. Однако он имеет существенный недостаток — проникновение петролатума в древесину, после чего древесина плохо поддается обработке (механической), склеиванию и обработке лаком. В некоторых областях применения древесины, таких как изготовление шпал или инженерных конструкций, приобретенное свойство оказывает полезное защитное воздействие: оно препятствует проникновению влаги, а также предохраняет поверхность древесины от насекомых. Основным недостатком этого метода сушки — пожароопасность.

Высокой интенсивностью отличается индукционный способ сушки. Древесину помещают в электрическое поле токов высокой частоты между двумя металлическими сетками (электродами). Материал очень быстро прогревается, и влага из него испаряется моментально. Учитывая современные цены на электричество, такой способ сушки самый дорогостоящий среди применяемых.

Радиационная сушка — это сушка прямыми инфракрасными лучами. Источником инфракрасных лучей могут быть электрические или газовые лампы. После нагревания до красного каления они служат источниками лучей. Лучистая теплота проникает в дерево на глубину от 10 до 12 мм. Прогревая доски толщиной от 20 до 25 мм с обеих сторон, их можно высушить за короткий промежуток времени. Но при этом доски сушатся в свободном состоянии, а не в зажатом, что приводит к их короблению. Именно это следствие препятствует применению радиационной сушки древесины.

Для сушки древесины используют камеры ПАП: рециркуляционные, бескалориферные камеры из металла с аэродинамическим подогревом. С помощью вентилятора осуществляются подогрев воздуха и его дальнейшая циркуляция в камере, при этом воздух нагревается до высокой температуры. Сушильные камеры ПАП просты в эксплуатации; основным их недостатком является большое потребление электроэнергии.

Последнее время получили применение СВЧ-камеры для сушки древесины. Отличительной особенностью СВЧ-сушки является то, что прогревается весь объем древесины, без градиента температуры. Следствием этого является не только сушка за счет испарения, но и выдавливание влаги из межклеточного пространства волокон за счет теплового

расширения воды. Таким образом, часть влаги удаляется без испарения, что снижает общие затраты на сушку. Однако этот способ имеет два существенных недостатка: высокое потребление электрической энергии и небольшой срок службы магнетронов (см. подраздел 7.6).

Для сушки стружки, опилок, щепы и отходов переработки древесины используют ленточные, барабанные, лопастные и другие типы сушилок. Схема шестиярусной сушилки с ленточным ситом представлена в главе 7.1, рис. 51–53, с. 119–123.

На рис. 98 показана лопастная сушилка для сушки древесной стружки в производстве ОСП, которая сочетает в себе преимущества взвешенного слоя и барабанной сушилки.

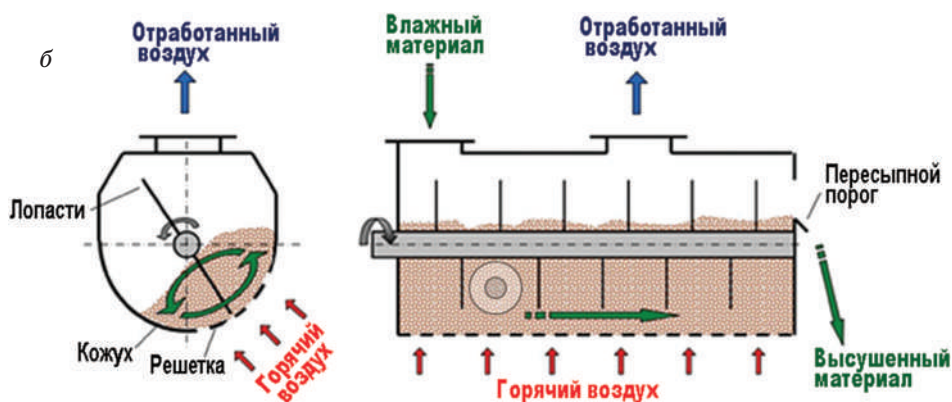
Конструкция сушилки обеспечивает равномерную и бережную сушку при умеренной температуре и большой продолжительности сушки. Она оптимально подходит для сушки древесных материалов, топливных пеллет, отходов и растительных материалов, таких как биошлам, свекловичный жом, багасса, корма для животных и др.

Принцип работы сушилки показан на рис. 98, б. Слой продукта находится на перфорированном днище и продувается снизу горячим воз-



**Рис. 98.** Лопастная сушилка с перемешиваемым слоем материала:

*а* — общий вид; *б* — схема движения потоков



духом. Для транспортировки продукта и хорошего перемешивания слой материала постоянно переворачивается лопастями мешалки. Благодаря высокой степени заполнения сушильной камеры сушильный агент (воздух) изменяет направление движения много раз, прежде чем покинуть слой материала. Это ведет к очень эффективному теплообмену и гарантирует отсутствие влажных зон. Кроме того, отсутствует расслоение между горячим обдуваемым днищем и верхней стороной засыпки, что обеспечивает равномерный и оптимальный результат сушки.

#### 8.4. ПЕРЕРАБОТКА ОТХОДОВ

Сушка отходов производится с целью их использования в производстве или для дальнейшего сжигания или обезвреживания.

Большое количество отходов образуется в целлюлозно-бумажной промышленности. Это низкомолекулярная целлюлоза, осадки сточных вод, лигнин, лигносульфонаты. Ранее эти отходы захоранивались на полигонах. В настоящее время ведутся работы по использованию некоторых видов отходов в промышленности. Так, лигносульфонаты могут применяться как добавка к бетонным растворам в качестве пластификатора, однако их транспортировка в жидком виде неэкономична, поэтому для получения товарного вида их необходимо сушить. Сушку лигносульфонатов можно производить в сушилках с взвешенным слоем инертного материала или в трубчатых гребковых (лопастных) сушилках. Поскольку лигнин является пожароопасным продуктом, сушку ведут под разрежением в атмосфере с низким содержанием кислорода.

При производстве бумаги образуется значительное количество некондиционной целлюлозы: это низкомолекулярные волокна, которые осаждаются в отстойнике, фильтруются и после сушки могут быть использованы в качестве наполнителя для производства гипсоволокнистых плит, полимеров и других материалов. Сушку такой целлюлозы осуществляют в сушилках взвешенного или вибровзвешенного слоя.

На целлюлозно-бумажных комбинатах (ЦБК) образуется большое количество древесных отходов (кора, щепа, ветки), которые сжигаются в твердотопливных котлах. Тепло, получаемое в таких котлах, идет на технологические нужды производства, а также на сушку осадка сточных вод, который затем направляется на сжигание.

Осадок очистных сооружений ЦБК состоит из волокон целлюлозы, смешанных с активным избыточным илом очистных сооружений. Для устойчивого горения осадка необходима влажность не более 55 %. Однако исходная влажность осадка после фильтр-пресса составляет 80 %. Поэтому осадок сушат на вибросушилке или гребковой трубчатой сушилке до достижения необходимой влажности перед подачей его в котел.

В деревообрабатывающей промышленности также используются твердотопливные котлы для получения технологической тепловой энергии (горячая вода, греющий пар), однако в последнее время бóльшая часть отходов перерабатывается в пеллеты и топливные брикеты.

Для этого необходимы сушка, измельчение и гранулирование (или прессование) отходов древесины. Для сушки опилок, коры, щепы и других отходов наиболее простым вариантом является барабанная сушилка. Температура сушильного агента (горячего воздуха) на входе в барабан составляет 250–300 °С, максимально до 450 °С, на выходе 80–90 °С. При высоких температурах происходит возгонка летучих компонентов древесины, которые затем осаждаются на холодном конце барабана и в газоходах. Поэтому возможны возгорание и пожар в сушилке. Следует установить в барабане систему пожаротушения и периодически выполнять очистку воздухопроводов от смолистых веществ.

В настоящее время скопилось большое количество отвалов, полученных при работе тепловых станций, работающих на угле. Золоотвалы занимают большие территории и могут быть использованы для получения минерального порошка, применяемого в асфальтобетонной промышленности. При достаточной мелиорации золоотвала остаточная влажность золы составляет 20–25 %, и становится экономически целесообразно сушить золу до влажности 0,3–0,5 % с последующим помолотом для получения минерального порошка МП-100 с размерами частиц 0–100 мкм.

Размеры влажных частиц золы варьируются от 0 до 5 мм. Сушка золы выполняется в барабанной сушилке с газовой горелкой. Пылевывнос составляет 25–30 %.

Особый интерес представляют микросферы золы, которые собирают с поверхности золоотвала и сушат в барабанных сушилках. Микросферы представляют собой пустотелые стеклообразные частицы, которые могут быть частично заполнены водой, поэтому для их сушки необходимо значительно большее время. Поскольку этот материал имеет низкую плотность, в барабанных сушилках наблюдается значительный пылевывнос влажных частиц. При проектировании таких сушилок необходимо использовать длинные барабаны либо применять другие типы сушилок (например, вибросушилки).

Значительное количество отходов образуется в пищевой промышленности. Это отходы переработки зерна, картофеля, семечковых культур и многие другие. Поскольку пищевые отходы содержат в основном внутреннюю влагу, для их сушки предпочтительны аппараты с длительным временем пребывания материала в сушильной камере. Это лопастные сушилки, вибросушилки.

Отходы пищевой промышленности часто перерабатываются в корма для животных. Для этого их подвергают грануляции и сушке.

## 8.5. ПИЩЕВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

В пищевой промышленности сушке подвергаются продукты питания, а также различные вещества, которые используются для приготовления блюд (загустители, консерванты, наполнители и др.).

Вопросам сушки овощей и фруктов посвящено много литературы [19, 30, 75]. Сушке подвергаются картофель, морковь, капуста, свекла, лук, чеснок, а также другие овощи и зелень.

В зависимости от конечного вида продукта используются сушилки определенной конструкции.

Кусковой материал сушится в ленточных сушилках, порошкообразный продукт можно получить в распылительных сушилках. Применяют также сушилки контактного типа: вальцовые сушилки, вакуум-сушильные шкафы и некоторые другие аппараты.

В качестве сушильного агента обычно используется воздух, который очищают на фильтрах и нагревают в паровых теплообменниках или в электрокалориферах.

Для сохранения биологически активных компонентов в продуктах используют сушку в замороженном состоянии. Сублимационная (лиофильная) сушка описана в подразделе 7.6, на с.182 и в литературе [22, 24, 25, 28].

Известны две принципиально различные технологические схемы производства овощных и фруктовых порошков. По первой схеме подготовленное сырье очищают, моют, разваривают, протирают в пюре, которое затем сушат на вальцовых или распылительных сушилках с добавлением или без добавления других продуктов (крахмал, сахар и т. п.). Полученный порошок при необходимости измельчают и фасуют в герметичную тару. Порошки, высушенные с добавками, приобретают большую пищевую ценность, устойчивость при хранении и легче сушатся. По второй схеме овощные порошки получают методом прямой сушки, при котором нарезанное на кусочки сырье сушат на ленточных сушилках, а затем измельчают в порошок. Таким способом изготавливают порошки из лука, чеснока и пряной зелени, но можно использовать это сырье также для зеленого горошка, яблок и др.

В молочной промышленности применяют вальцовые и распылительные сушилки [108].

Вальцовые сушилки используют преимущественно для сушки обезжиренного молока, пахты и сыворотки. Вальцовые вакуумные сушилки позволяют снизить температуру материала во время сушки до 60–70 °С, поэтому продукты получаются значительно лучшего качества, чем в атмосферных сушилках. Сухое молоко получают сушкой сгущенного молока на вальцах вакуумной сушилки.



Распылительные сушилки позволяют получить порошкообразный продукт, сохранив все биологически активные свойства веществ, поскольку время сушки в таких сушилках составляет секунды, и материал не успевает прогреться до высоких температур. Сухие продукты, полученные на распылительных сушильных установках, обладают хорошей растворимостью, поэтому эти установки широко применяют для сушки цельного молока, сливок, мороженого, пахты, обезжиренного молока, сыворотки, продуктов детского питания, а также для производства сухого масла.

Наилучшим методом консервирования скоропортящихся продуктов питания, несомненно, является сублимационная сушка, т. е. высушивание пищевых продуктов в замороженном состоянии под вакуумом.

В промышленных сублимационных сушильных установках повышение интенсивности сублимации льда обычно достигается снижением давления над материалом. В процессе основного обезвоживания материал находится в замороженном состоянии, поэтому микроструктура и свойства материала сохраняются в максимальной степени. Продукты, высушенные методом сублимации, сохраняют первоначальный объем, легко поглощают влагу при оводнении; при этом цвет, аромат, содержание витаминов и других компонентов в них практически не изменяются. В надлежащей упаковке такие продукты не портятся даже при длительном хранении в обычных складских условиях (при нерегулируемых температуре и влажности).

К недостаткам сублимационной сушки можно отнести высокое потребление энергии, стоимость самой сушильной установки и периодический режим ее работы.

Особое внимание уделяется сушке сельскохозяйственного сырья (зерно, крупы, травы — хмель, табак), поскольку хранение этих продуктов возможно только в высушенном виде. В сыром виде травы портятся, в зерне заводятся вредители.

Сушка зерна обычно производится в шахтных сушилках на зернохранилищах: это наиболее качественный способ сушки [18]. Производительность шахтных сушильных агрегатов составляет до 50 т/ч. На месте сбора урожая применяют передвижные сушилки меньшей производительности. Иногда применяют барабанные и другие типы сушильных агрегатов.

Температура сушильного агента для сушки зерна зависит от его состояния (свежеубранное, лежалое и др.) и составляет 65–120 °С. В качестве топлива применяют природный газ или жидкое топливо.

Сушку травы производят в периодическом режиме в сушильных шкафах, на стеллажах, а также в непрерывно действующих сушилках с ленточным ситом.

### 8.6. ХИМИКО-ФАРМАЦЕВТИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

В фармацевтической промышленности широко распространены сушилки виброкипящего слоя периодического действия. В сушилках такого типа можно совмещать процессы сушки и нанесения покрытия на гранулы высушенного продукта.

На рис. 99 показана передвижная вибросушилка небольшой производительности, которая может быть использована для сушки небольших партий фармацевтических препаратов. Лекарственное средство таблетируется, загружается в сушилку и сушится, после чего на таблетки наносится покрытие.

Большое разнообразие лекарственных средств требует выбора различных типов сушильных аппаратов для определенных групп материалов. Сушке подвергаются следующие лекарственные препараты [21]:

- синтетические лекарственные средства;
- препараты из растительного сырья;
- антибиотики, кровезаменители;
- синтетические витамины;
- наполнители, добавки.

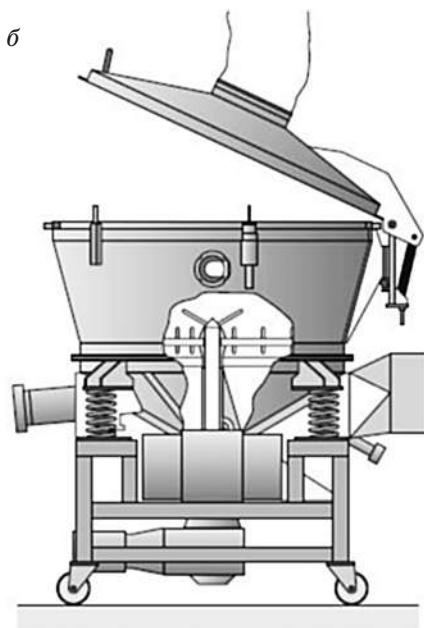


Рис. 99. Вибросушилка периодического действия:  
а — общий вид; б — схема сушилки

Каждый вид лекарственного сырья требует определенных условий сушки.

По своим физическим свойствам большинство химико-фармацевтических препаратов и полупродуктов их производства относятся к классу условно-сыпучих: во влажном состоянии они занимают промежуточное положение между твердыми телами и пастообразными материалами. Они обладают рядом свойств, затрудняющих процесс сушки: неспособностью выдерживать значительные температуры, иногда повышенной липучестью и склонностью к комкообразованию, требованием низкой конечной влажности. Кроме того, химико-фармацевтические препараты имеют высокую стоимость. Большинство лекарственных продуктов выпускается небольшими партиями, поэтому для сушки часто используются сушилки периодического действия.

Ленточные сушилки используются для сушки растительного сырья. Для сушки трав и корней применима лопастная сушилка с перемешиваемым слоем материала, изображенная на рис. 98. Температура воздуха, подаваемого на сушку лекарственных трав, не превышает 80 °С.

Для сушки растворов и экстрактов лекарственных трав применяют распылительные сушилки. Порошок, получаемый в таких сушилках, легко таблетруется. Таким способом получают порошки солодки, пустырника, валерианы.

Многие антибиотики представляют собой перед сушкой твердые кристаллические вещества, содержащие органические растворители. Такие препараты подвергают сушке в установках с замкнутым циклом, в которых совмещаются операции сушки и регенерации летучих растворителей. В качестве теплоносителя применяется азот или другой инертный газ. Замкнутый процесс сушки позволяет сократить расход органических растворителей на производство, свести до минимума выбросы их паров в атмосферу, снизить пожарную опасность, если растворителями являются ЛВЖ, а также уменьшить расход инертного газа (обычно азота), когда последний по соображениям безопасности или предотвращения окисляемости продукта при контакте с воздухом применяется в качестве теплоносителя. Удаление растворителя из газа, отходящего из сушилки, осуществляется его конденсацией в поверхностных трубчатых конденсаторах.

Сушку биологически активных веществ проводят в сублимационных (лиофильных) сушилках. При сублимационной сушке многих препаратов, вследствие того что структура клеток вещества не нарушается, сухой препарат имеет сильно развитую внутреннюю поверхность, благодаря чему очень быстро растворяется (лиофилизируется) в воде. Поэтому такой метод обезвоживания называют также лиофильной сушкой.

Низкая температура при сублимационной сушке не способствует денатурации белков, вследствие чего их растворы высыхают до легкой пористой массы, легко превращающейся в быстрорастворимый порошок.

Следует отметить, что при этом все первоначальные свойства лиофилизированного препарата полностью сохраняются.

Лиофильная сушка применяется для получения сухих сывороток, вакцин; энзимов, гормонов, сухой плазмы донорской крови, а также других биологических продуктов.

# 9

## ПРОИЗВОДИТЕЛИ СУШИЛОК

Сушильная установка, как правило, состоит из большого количества узлов, изготавливаемых различными производителями. Основной узел — это сушильный агрегат, или сушильная камера. Помимо собственно сушильного агрегата в схему, в зависимости от типа сушилки, могут входить:

- топка с горелкой, или электрокалорифер, или паровой калорифер;
- питатели и транспортеры;
- бункеры, силосы;
- газоочистное оборудование (циклоны, фильтры — для конвективных сушилок);
- вентилятор или дымосос;
- система управления процессом (панель управления, приборы, датчики).

Как правило, производители основного оборудования сами комплектуют свою установку дополнительным оборудованием, выполняют проектирование, монтаж, шефмонтаж, холодный пуск и пуско-наладку. Однако для крупного потребителя имеет смысл самостоятельно укомплектовать технологическую схему дополнительным оборудованием, что может уменьшить общую стоимость проекта.

Сушильный агрегат является достаточно сложным оборудованием, и большинство производителей специализируется на одном или двух типах сушильных аппаратов. Например, производитель барабанных сушилок вряд ли возьмет заказ на изготовление распылительной или вакуум-гребковой сушилки. Некоторые производители специализируются на сушке только определенного вида продукта.

В настоящее время наиболее передовыми являются европейские производители (Германия, Швеция, Финляндия), которые производят экономичные и надежные аппараты. Однако цена, хотя и соответствует качеству, но достаточно высока. Китайские производители предлагают большое количество оборудования, в том числе сушильного, по низкой цене и зачастую удовлетворительного качества. Однако некоторые китайские изделия имеют срок службы один-два года. Промежуточное положение по соотношению «цена–качество–надежность» занимают итальянские и турецкие производители. Многие производители, имеющие мировую известность, имеют представительства во многих странах мира, в том числе в России. Поэтому при обращении в российскую компанию вам зачастую предлагают оборудования известной международной компании.

Выбор производителя оборудования является сложной технико-экономической задачей. Грамотный покупатель выполняет анализ как минимум трех коммерческих предложений от производителей оборудования, выезжает на предприятия, где предложенное оборудование работает, собирает информацию о надежности потенциальных поставщиков оборудования и услуг, об их финансовом положении.

У многих крупных производителей сушильного оборудования есть свой испытательный центр, где представлены работающие модели сушильных установок. Проведение испытаний конкретного материала, представленного покупателем в испытательный центр, позволяет уточнить параметры сушки и дать надежное коммерческое предложение на сушильный аппарат. В некоторых случаях испытания материала могут дать отрицательный результат, в этом случае продавец предложит покупателю другой тип сушильного аппарата, а покупатель будет избавлен от непроизводительных расходов.

В табл. 9-1 приведен список крупных производителей сушильного оборудования, как российских, так и зарубежных, а также дано описание оборудования, которое они производят.

Таблица 9-1

## Основные производители сушильного оборудования

Логотип компании	Веб-сайт, контакты	Тип производимого оборудования
I. Россия и страны СНГ		
	<a href="http://www.strommash.ru/">http://www.strommash.ru/</a> Строммашина, ООО, Россия, г. Самара	Барабанные сушилки для сыпучих минеральных материалов
	<a href="http://www.processes-apparates.ru">http://www.processes-apparates.ru</a> <a href="http://kianit.ru">http://kianit.ru</a> КИАНИТ, ООО, Россия, г. Санкт-Петербург	Расчет, проектирование, изготовление сушилок: барабанных, взвешенного слоя, вибросушилок.
	<a href="http://www.ibeton.ru">http://www.ibeton.ru</a> <a href="http://isilos.ru/">http://isilos.ru/</a> Завод Стройбетон, ООО, Россия, г. Санкт-Петербург	Барабанные сушилки для песка, оборудование для производства бетона
«Чайковское строительное оборудование», ООО	<a href="http://www.prom59.ru">http://www.prom59.ru</a> Чайковское строительное оборудование, ООО, Россия, Пермский край, г. Чайковский	Барабанные сушилки, насосы
	<a href="https://tulpech.ru">https://tulpech.ru</a> <a href="mailto:info@tulpech.ru">info@tulpech.ru</a> Россия, Тула	Сушильные барабаны, печи косвенного нагрева, сушильные камеры



Логотип компании	Веб-сайт, контакты	Тип производимого оборудования
	<a href="https://consit.ru/">https://consit.ru/</a> Консит, ООО, info@consit.ru Россия, Москва	Сушилки вибрационные конвективные, инфракрасные
	<a href="http://spline58.ru">http://spline58.ru</a> Сплайн, spline58@yandex.ru Россия, г. Пенза	Сушильные барабаны для сушки минеральных продуктов
	<a href="http://npo-elcom.ru">http://npo-elcom.ru</a> НПО ЭЛКОМ, Россия, Республика Татарстан	Сушильные камеры с ИК-обогревом (термо-радиационные сушилки)
	<a href="https://bio-rus.ru">https://bio-rus.ru</a> Биорус, ООО, Россия, Москва	Лиофильные сушильные камеры, лабораторные распылительные сушилки
	<a href="http://no-h2o.ru">http://no-h2o.ru</a> Санкт-Петербург, Россия	Инфракрасные конвейерные установки сушки
	<a href="https://www.ingredient.su">https://www.ingredient.su</a> ПК Ингредиент, info@ingredient.su Россия, г. Санкт Петербург	Оборудование для сушки и жарки пищевых продуктов
	<a href="http://dry-food.ru">http://dry-food.ru</a> dry@dry-food.ru Москва, Россия	Конвективные, сублимационные сушилки для сушки пищевых продуктов, зерносушилки
	<a href="http://www.vztm.su">http://www.vztm.su</a> Воздухотех ООО, Россия, г. Москва	Распылительные сушилки для сушки молока и других продуктов
	<a href="http://sneks.ru">http://sneks.ru</a> Республика Беларусь, г. Минск	Распылительные сушилки для сушки молока
II. Страны Евросоюза, США		
	<a href="http://www.allgaier.de">http://www.allgaier.de</a> <a href="http://www.allgaier.de/ru/content/process-technology">http://www.allgaier.de/ru/content/process-technology</a> Allgaier Werke GmbH Uhingen, Germany	Барабанные сушилки; сушилки кипящего, виброкипящего слоя; дисковые сушилки
	<a href="http://www.nabertherm.com">http://www.nabertherm.com</a> <a href="http://www.nabertherm-rus.ru">http://www.nabertherm-rus.ru</a> Nabertherm GmbH, Germany <a href="http://www.thermoprocess.ru">http://www.thermoprocess.ru</a> Москва (дилер)	Камерные сушилки KTR и печи Nabertherm
	<a href="http://global.anhydro.com">http://global.anhydro.com</a> SPX Flow Technology (Denmark)	Распылительные сушилки, сушилки кипящего слоя

Логотип компании	Веб-сайт, контакты	Тип производимого оборудования
	<a href="https://www.bhs-sonthofen.com/en/process-technology">https://www.bhs-sonthofen.com/en/process-technology</a> BHS-Sonthofen Process Technology GmbH & Co. KG	Контактные лопастные горизонтальные сушилки и вертикальные спиральные сушилки периодического действия
	<a href="http://www.dva-gmbh.de/ru/">http://www.dva-gmbh.de/ru/</a> DVA Holland-Merten GmbH (Deutschland)	Контактные сушилки: лопастные, вакуум-лопастные, вакуум-вальцовые сушилки
	<a href="http://www.geaprocess.co.uk">http://www.geaprocess.co.uk</a> GEA Process Engineering Ltd	Распылительные, аэрофонтанные, сушилки кипящего слоя, вихревые сублимационные, лопастные, барабанные сушилки
	<a href="http://www.buflovak.com">http://www.buflovak.com</a> Tonawanda, NY 14150, USA	Вальцовые, лопастные, вакуумные сушилки
	<a href="https://www.perryofoakley.co.uk">https://www.perryofoakley.co.uk</a> <a href="https://perryengineering.ru">https://perryengineering.ru</a> Perry of Oakley Ltd UK	Оборудование для сушки и транспортировки (ленточные сушилки, зерносушилки)
	<a href="http://omnikon.eu">http://omnikon.eu</a> Omnikon Sp., Poland	Сушилки барабанные; кипящего, виброкипящего слоя; охладители
	<a href="https://www.vettertec.com">https://www.vettertec.com</a> VetterTec GmbH, Germany	Трубчатые лопастные, распылительные, пневматические сушилки
	<a href="https://www.akahl.de/ru">https://www.akahl.de/ru</a> AmandusKahl GmbH & Co. KG Deutschland (Germany)	Переработка и сушка древесных отходов, ленточные сушилки, грануляторы
	<a href="http://www.alligno-pellets.de">http://www.alligno-pellets.de</a> Alligno GmbH Germany	Оборудование для производства пеллет, сушка отходов древесины
	<a href="http://www.muench-edelstahl-gmbh.de">www.muench-edelstahl-gmbh.de</a> MÜNCH-Edelstahl GmbH Germany	Сушилки для древесины, оборудование для производства пеллет
	<a href="https://prodesa.net">https://prodesa.net</a> Zaragoza (Spain), (Baltic, Russia, Asia, France, USA, Canada, Brazil)	Ленточные и барабанные сушилки для сушки биомассы. Пеллетное производство «под ключ»

Логотип компании	Веб-сайт, контакты	Тип производимого оборудования
	<a href="https://www.spxflow.com">https://www.spxflow.com</a> SPX FLOW, Inc., USA	Распылительные сушилки, сушилки взвешенного слоя, грануляторы и др.
	<a href="https://www.stela.de">https://www.stela.de</a> STELA Laxhuber GmbH Massing (Germany)	Ленточные сушилки для сушки агросырья, биотоплива, отходов
	<a href="https://www.rudnick-enners.com">https://www.rudnick-enners.com</a> Rudnick & Enners Maschinen- und Anlagenbau GmbH Alpenrod (Germany)	Сушилки и оборудование для переработки древесины
	<a href="https://www.katres.cz">https://www.katres.cz</a> <a href="http://katres.by">http://katres.by</a> Czech Republic	Сушильные камеры для древесины; туннельные, ленточные сушилки
	<a href="https://www.glatt.com">https://www.glatt.com</a> GlattIngenieurtechnik GmbH, Germany	Аппараты с псевдооживленным слоем, грануляторы и др. для фармацевтической и пищевой промышленности
	<a href="http://www.icfwplants.com">http://www.icfwplants.com</a> <a href="http://www.icf-plant.com">http://www.icf-plant.com</a> I.C.F. & WELKO S.p.a Maranello, Italy	Распылительные сушилки, взвешенного слоя, сублимационные сушилки; оборудование для молочной, кофе и пищевой промышленности
	<a href="https://normit.ru">https://normit.ru</a> Malacky, SLOVAKIA	Оборудование для пищевой промышленности (сушилки, смесители и др.)
III. Китай		
	<a href="http://www.dryingmachineschina.ru">http://www.dryingmachineschina.ru</a> Jiangsu Xianfeng Drying Engineering Co., Ltd., China	Распылительные, камерные, ленточные, кипящего слоя, вакуумные, гребковые сушилки
	<a href="http://www.thy.chemchina.com/thhgen">http://www.thy.chemchina.com/thhgen</a> <a href="http://cntianhua.en.made-in-china.com">http://cntianhua.en.made-in-china.com</a> <a href="http://lztianhua.en.alibaba.com">http://lztianhua.en.alibaba.com</a> Tianhua Institute of Chemical Machinery & Automation Co., Ltd	Крупногабаритное сушильное оборудование и полная система сушки (oar blade dryer). Печи.
	<a href="http://www.ore-beneficiation.ru">http://www.ore-beneficiation.ru</a> GongyiHengchang Metallurgy Building Material Equipment Plant, China	Барабанные сушилки, оборудование для обогащения руд

Логотип компании	Веб-сайт, контакты	Тип производимого оборудования
	<a href="http://www.vacuumdryingmachine.com">www.vacuumdryingmachine.com</a> Changzhou Welldone Machinery Technology Co., Ltd, Manufacturer for drying machine	Гребковые сушилки, вакуумные сушилки. Роликовый скребковый осушитель жидкости
	<a href="http://www.ymdryers.com/">http://www.ymdryers.com/</a> Changzhou Yimin Drying Equipment Co., Ltd., China	Вакуумные сушилки, сушилки КС, распылительные сушилки, ленточные, пневматические сушилки; пневматические, флэш-сушилки, оборудование для грануляции.
	<a href="http://www.teficttech.com/">http://www.teficttech.com/</a> TEFIC BIOTECH CO., Ltd., China	Лабораторные распылительные и вакуумные сушилки, производительность 3–10 литров в час
	<a href="http://www.kemolo.com/">http://www.kemolo.com/</a> Kemolo Co., China	Лиофильные (сублимационные) сушилки
	<a href="http://www.dxymachinery.ru">http://www.dxymachinery.ru</a> <a href="https://www.dxymachinery.com">https://www.dxymachinery.com</a> Shandong DXY Machinery Equipment Co., Ltd., China	СВЧ сушка пищевых продуктов и растительного сырья
	<a href="http://en.sundachina.net/">http://en.sundachina.net/</a> Xi'an Sunda Environmental Protection Equipment Co., Ltd, admin@sundachina.net	СВЧ-сушка Осушитель с тепловым насосом
 Manufacturer/factory	<a href="https://www.cnboily.com/">https://www.cnboily.com/</a> Jiangyin Baoli Machinery Manufacturing Co., Ltd	Сушилки конвективные, вакуумные, вибросушилки, сушилки КС. А также дробилки, смесители, грануляторы

В таблице дан далеко не полный список производителей на начало 2020 года. Учитывая, что мировое машиностроение постоянно развивается, появляются новые компании, а некоторые компании за-

крываются, следует выполнять поиск производителей оборудования в Интернете.

Для любого конкретного материала существуют один или несколько типов оптимальных сушильных аппаратов, которые используются в производстве. Применение аппаратов другого типа либо нецелесообразно по экономическим причинам, либо вообще невозможно. Поэтому при выборе сушильного аппарата необходимо исходить из опыта применения сушильных аппаратов в технологии производства данного конкретного продукта. Если опыт применения аппаратов отсутствует, необходимо проводить испытания материала на пилотных установках и только после положительных испытаний рекомендовать конкретный сушильный аппарат в производство.

Многие производители сушильного оборудования имеют свой испытательный центр, где представлены работающие модели сушильных аппаратов, на которых проводят испытания по сушке различных материалов.

# 10

## РАСЧЕТ СУШИЛОК. ВЫБОР СУШИЛЬНОГО АППАРАТА И ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Расчет сушилок подразумевает определение расходов сушильного агента, теплоносителя, размеров конкретного сушильного аппарата. При наличии линейки стандартных сушильных аппаратов выполняют выбор ближайшего по характеристикам аппарата — как правило, с запасом 15–20 % по производительности. По результатам расчета сушилки производят расчет и выбор вспомогательного оборудования — циклонов, фильтров, вентиляторов, калориферов, топок, питателей и др.

Для конвективных сушилок расчет может быть выполнен графически, по диаграмме состояния влажного воздуха (диаграмме Рамзина), а также численно с использованием программ Excel, MathCad, MathLab, Fortran и некоторых других. Численный расчет предпочтительнее, так как позволяет быстро выполнить расчет большого количества различных вариантов с поиском оптимального.

Ниже приведены примеры расчета сушильных аппаратов конвективного и контактного типов.

### 10.1. РАСЧЕТ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ КАРЬЕРНОГО ПЕСКА В БАРАБАННОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ СУШИЛКЕ. ТОПЛИВО — ПРИРОДНЫЙ ГАЗ

#### *ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ*

Технологическая схема сушки карьерного песка представлена на рис. 63, с. 131 (см. подраздел 7.2). В приемную камеру барабанной сушилки подается карьерный песок<sup>1</sup> влажностью 6 %. Дисперсный состав песка приведен в табл. 10-1.

Сушке подвергается карьерный песок для строительных работ средней крупности 2-го класса (ГОСТ 8736–2014). Производительность по высушенному материалу 50 т/ч. Конечная влажность 0,1 %.

Сушилка работает по прямоточной схеме.

---

<sup>1</sup> Карьер Калелово, Ленинградская обл., компания ЛСР.



Таблица 10-1

## Гранулометрический состав карьерного песка

Фракция, мм	> 5,0	5,0– 2,5	2,5– 1,25	1,25– 0,63	0,63– 0,315	0,315– 0,16	0,16– 0,063	< 0,063
Содержание, %	3,19	3,78	6,29	23,37	36,63	16,26	5,32	1,16

- Песок средней крупности, II класса.
- Модуль крупности песка 2,23.
- Содержание пылевидных и глинистых частиц менее 0,1 %.
- Насыпной вес сухого материала 1600 кг/м<sup>3</sup>.
- Кажущаяся (истинная) плотность материала 2100 кг/м<sup>3</sup>.
- Теплоноситель — природный газ, низшая теплота сгорания которого 33 600 кДж/м<sup>3</sup>.
- Запыленность отходящих газов — не более 50 мг/м<sup>3</sup>.

Барабан имеет наклон 3° к горизонту, скорость вращения барабана регулируется частотным преобразователем и составляет 1–5 об/мин. На сушилке установлена газовая горелка без топки.

Необходимо рассчитать расход природного газа на сушку карьерного песка, определить типоразмер сушильного барабана и вспомогательного оборудования (вентиляторы, циклоны, питатели, бункеры и др.).

Расчет выполнить для летнего и зимнего сезона Санкт-Петербурга.

**1.1. МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС.  
РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ИСПАРЕННОЙ ВЛАГИ**

Составим уравнения материального баланса по общей массе:

$$G_{\text{н}} = G_{\text{к}} + W \quad (10.1)$$

и по сухому веществу

$$G_{\text{н}} (100 - w_{\text{н}}) = G_{\text{к}} (100 - w_{\text{к}}), \quad (10.2)$$

где  $w_{\text{н}}$ ,  $w_{\text{к}}$  — начальная и конечная влажность материала, %;  $G_{\text{н}}$ ,  $G_{\text{к}}$  — начальный и конечный расход материала (влажного и высушенного), кг/с;  $W$  — расход испаренной из материала влаги, кг/с.

Решая эти уравнения относительно неизвестных величин —  $G_{\text{н}}$  и  $W$ , — получаем:

$$G_{\text{н}} = G_{\text{к}} \frac{(100 - w_{\text{к}})}{(100 - w_{\text{н}})} = 14,761 \text{ кг/с} = 53,14 \text{ т/ч}; \quad (10.3)$$

$$W = G_{\text{н}} - G_{\text{к}} = 0,872 \text{ кг/с} = 3,138 \text{ т/ч}. \quad (10.4)$$

Теперь составим материальный баланс по воздуху, из которого определим количество воздуха (в пересчете на абсолютно сухой воздух), необходимого для сушки влажного материала.

Для расчета будем пользоваться диаграммой Рамзина ( $I$ - $x$  диаграммой влажного воздуха) и понятием о теоретической и реальной сушилке.

### 1.2. ДИАГРАММА РАМЗИНА

Пользуясь интернетом и диаграммой Рамзина, найдем характеристики атмосферного воздуха для летнего и зимнего периода Санкт-Петербурга (см. табл. 10-2).

Таблица 10-2

Свойства влажного атмосферного воздуха

№	Наименование параметра	Лето (июль)	Зима (январь)
1	Средняя температура воздуха, °С	17,5	-7,7
2	Относительная влажность воздуха, %	69	87
3	Влагосодержание воздуха, кг $H_2O$ /(кг абс. сухого возд.)	0,009	0,001
4	Энтальпия воздуха, кДж/(кг абс. сухого возд.)	40	-8

Параметры 3, 4 получены из диаграммы Рамзина (см. рис. 100).

Поскольку карьерный песок не разрушается при высоких температурах, примем для сушки максимально возможную начальную температуру дымовых газов 750 °С. При более высокой температуре создается опасность деформации барабана, при более низкой — уменьшается скорость сушки и увеличиваются размеры сушильного барабана. Температуру отработанных дымовых газов примем 110 °С, поскольку при более низкой температуре возможна конденсация паров воды и прекращается сушка материала.

Для определения степени избытка воздуха и температуры смеси дымовых газов с воздухом составим баланс по воздуху и продуктам горения, исходя из реакции горения.

Состав и свойства природного (горючего) газа, поставляемого в районы Северо-Запада и Ленинградской области приведен в табл. 10-3.

Так как основной компонент природного газа — это метан (98 %  $CH_4$ ), то все расчеты будем вести по метану, поскольку это не повлияет существенно на точность расчетов.

Уравнение реакции горения метана выглядит следующим образом:

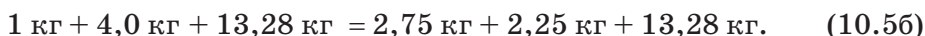
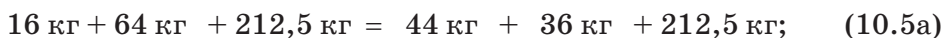


Таблица 10-3

## Свойства и состав природного газа

№	Наименование параметра
1	Состав природного газа: $\text{CH}_4$ — 98,0 %, $\text{C}_2\text{H}_6$ — 1,0 %, $\text{C}_3\text{H}_8$ — 0,2 %, $\text{C}_4\text{H}_{10}$ — 0,3 %, $\text{CO}$ — 0,2 %, $\text{H}_2$ — 0,3 %
2	Средняя молярная масса — 16,41 кг/кмоль
3	Плотность при 20 °С и 760 мм. рт. ст. — 0,683 кг/м <sup>3</sup>
4	Низшая теплота сгорания — 49 195 кДж/кг, 33 600 кДж/м <sup>3</sup> (20 °С, 760 мм. рт. ст.)

В уравнение реакции записан азот для удобства расчета. Воздух содержит 23,15 % масс. кислорода и 76,85 % масс. азота и других инертных газов. Записывая молекулярный вес каждого из компонентов (10.5а), определяем количество продуктов горения (10.5б) на 1 кг природного газа. При сгорании 1 кг метана образуется:

- 2,75 кг углекислого газа;
- 2,25 кг водяного пара;
- 13,28 кг азота.

Из строки (10.5б) можно определить массу воздуха  $g_{\text{в}}$ , теоретически необходимую для сгорания 1 кг метана:

$$g_{\text{в}} = 4,0 \text{ кг} + 13,28 \text{ кг} = 17,28 \text{ кг}, \quad (10.6)$$

и количество дымовых газов  $g_{\text{д.г}}$ , образующихся при сгорании 1 кг метана:

$$g_{\text{д.г}} = 2,75 + 13,28 \text{ кг} = 16,03 \text{ кг (без учета паров воды)}. \quad (10.7)$$

Влагосодержание дымовых газов рассчитывается на абсолютно сухое количество дымовых газов:

$$x_{\text{д.г}} = 2,25 / 16,03 = 0,140 \text{ кг/кг}, \quad (10.8)$$

где  $x_{\text{д.г}}$  — влагосодержание дымовых газов, кг  $\text{H}_2\text{O}$ /(кг дым. газов).

Принимая во внимание, что физические свойства разбавленных воздухом дымовых газов близки свойствам чистого воздуха, для расчета сушки будем пользоваться диаграммой Рамзина для влажного воздуха.

Следовательно, принимаем:

$$\text{кг } \text{H}_2\text{O}/(\text{кг сух. дым. газов}) \approx \text{кг } \text{H}_2\text{O}/(\text{кг абс. сух. воздуха}).$$

## 1.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗБЫТКА ВОЗДУХА

Примем температуру разбавленных воздухом дымовых газов, поступающих на сушку, равной 750 °С. Определим коэффициент избытка

воздуха, необходимого для получения такой температуры. Коэффициент избытка воздуха — это количество воздуха, отнесенное к количеству воздуха, теоретически необходимого для сгорания метана:

$$\alpha = G_{\text{в}} / g_{\text{в}}, \quad (10.9)$$

где  $g_{\text{в}}$  — масса воздуха, необходимого для сгорания 1 кг метана, кг/кг;  
 $G_{\text{в}}$  — масса воздуха, поступившего для горения 1 кг метана, кг/кг.

Для этого составим тепловой баланс, который запишем в табл. 10-4.

Таблица 10-4

Тепловой баланс сгорания 1 кг метана, кДж/кг

Приход тепла	
Теплосодержание исходного метана	$c_{\text{м}} t_{\text{м}0}$
Теплосодержание исходного воздуха	$\alpha g_{\text{в}} [(c_{\text{в}} + c_{\text{п}} x_0) t_0 + r x_0]$
Теплота сгорания метана	$q_{\text{м}}$
Расход тепла	
Теплосодержание дымовых газов	$g_{\text{дг}} [(c_{\text{в}} + c_{\text{п}} (x_0 + x_{\text{дг}})) t_{\text{г}} + r (x_0 + x_{\text{дг}})]$
Теплосодержание нагретого воздуха	$(\alpha - 1) g_{\text{в}} [(c_{\text{в}} + c_{\text{п}} x_0) t_{\text{г}} + r x_0]$

где  $c_{\text{м}}$ ,  $c_{\text{в}}$ ,  $c_{\text{п}}$  — теплоемкость метана и сухого воздуха и водяного пара,  $c_{\text{м}} = 2,20$  кДж/(кг·К),  $c_{\text{в}} = 1,005$  кДж/(кг·К),  $c_{\text{п}} = 1,97$  кДж/(кг·К);  $r$  — теплота испарения воды при атмосферном давлении,  $r = 2493$  кДж/кг;  $g_{\text{дг}}$  — количество дымовых газов, получающихся при сгорании 1 кг метана;  $g_{\text{дг}} = 16,03$  кг/кг;  $g_{\text{в}}$  — количество воздуха, необходимого для сгорания 1 кг метана,  $g_{\text{в}} = 17,28$  кг/кг;  $x_0$ ,  $x_{\text{дг}}$  — влагосодержание воздуха и дымовых газов, кг/кг;  $x_0 = 0,009$ ,  $x_{\text{дг}} = 0,140$ ;  $t_0$ ,  $t_{\text{г}}$  — исходная температура воздуха и конечная температура смеси дымовых газов с воздухом после сжигания метана, °С;  $t_{\text{м}}$  — исходная температура метана, °С;  $q_{\text{м}}$  — низшая<sup>1</sup> теплота сгорания метана,  $q_{\text{м}} = 50\,042$  кДж/кг, однако мы

<sup>1</sup> Низшая теплотворная способность (теплота сгорания) — количество теплоты, выделяемой при полном сгорании топлива без конденсации водяного пара. Высшая теплотворная способность — количество теплоты, выделяемой при полном сгорании топлива, охлаждении продуктов сгорания до температуры топлива и конденсации водяного пара, образовавшегося при окислении водорода, входящего в состав топлива. Поскольку дымовые газы после сушки отводятся при температуре выше температуры конденсации паров воды, то мы используем низшую теплоту сгорания.

возьмем для расчета низшую теплоту сгорания для природного газа, представляющего собой смесь газов, состав которой указан в табл. 10-4,  $q_{\Gamma} = 49\,195$  кДж/кг.

Здесь также принято, что теплофизические свойства воздуха и дымовых газов близки, поэтому теплоемкость сухих дымовых газов равна теплоемкости сухого воздуха.

Пренебрегая потерями тепла, записываем уравнение теплового баланса:

$$\begin{aligned} c_{\text{м}} t_{\text{м}0} + \alpha g_{\text{в}} [(c_{\text{в}} + c_{\text{п}} x_0) t_0 + r x_0] + q_{\Gamma} = \\ = (\alpha - 1) g_{\text{в}} [(c_{\text{в}} + c_{\text{п}} x_0) t_{\Gamma} + r x_0] + \\ + g_{\text{д.г}} [(c_{\text{в}} + c_{\text{п}} (x_0 + x_{\Gamma})) t_{\Gamma} + r (x_0 + x_{\Gamma})]. \end{aligned} \quad (10.10)$$

Примем температуру метана равной температуре воздуха  $t_{\text{м}0} = t_0$ . Для упрощения введем обозначения

$$A = c_{\text{м}} t_0 + \alpha g_{\text{в}} (c_{\text{в}} + c_{\text{п}} x_0) t_0 + q_{\Gamma},$$

$$B = g_{\text{в}} r x_0 - g_{\text{д.г}} r (x_0 + x_{\text{д.г}}).$$

Решая уравнение (10.10) относительно  $t_{\Gamma}$ , определяем температуру дымовых газов для конкретного значения коэффициента избытка воздуха:

$$t_{\Gamma} = \frac{A + B}{(\alpha - 1) g_{\text{в}} (c_{\text{в}} + c_{\text{п}} x_0) + g_{\text{д.г}} (c_{\text{в}} + c_{\text{п}} (x_0 + x_{\Gamma}))}. \quad (10.11)$$

В табл. 10-5 дана зависимость температуры смеси дымовых газов с воздухом от коэффициента избытка воздуха при начальной температуре воздуха  $t_0 = 17,5$  °С.

Коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  должен быть не менее 1,15; при меньшем значении коэффициента происходят неполное сгорание газа и образование копоти.

Таблица 10-5

**Зависимость температуры смеси дымовых газов с воздухом  
в зависимости от коэффициента избытка воздуха**

$\alpha$	1,15	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
$t_{\Gamma}$	1761	1394	1074	873	736	636	560

Формулу (10.11) можно рассчитать на калькуляторе или в программе Excel и определить значение коэффициента избытка воздуха для любой температуры. Для расчета примем коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 2,94$ ; тогда температура сушильного агента на входе в сушильную камеру составит  $750^\circ\text{C}$ .

Таким образом, для получения заданной начальной температуры сушильного агента необходим трехкратный избыток воздуха. Обычно в газовой горелке устанавливается коэффициент избытка воздуха 1,15, а остальное количество воздуха поступает в топку (сушильный барабан), а также неорганизованно в виде подсосов через загрузочный люк, неплотности барабана и регулируется дутьевым вентилятором и разрежением, которое создает вытяжной вентилятор на выходе из сушильного барабана.

#### 1.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СУШКИ И РАЗМЕРОВ СУШИЛЬНОГО БАРАБАНА

На рис. 100 изображен процесс сушки карьерного песка на диаграмме Рамзина. Исходная точка *A* характеризует свойства атмосферного воздуха (для летних условий  $x_0 = 0,009$ ). При смешении дымовых газов с влажосодержанием  $x_{д.г} = 0,140$  с атмосферным воздухом, в соответствии с коэффициентом избытка  $\alpha = 2,94$ , получаем влажосодержание дымовых газов на входе в сушильную камеру (сушильный барабан):

$$x_1 = \frac{\alpha g_v x_0 + g_{д.г} x_{д.г}}{(\alpha - 1) g_v + g_{д.г}} = 0,055 \text{ кг/кг.} \quad (10.12)$$

Следовательно, точка *B* характеризует параметры влажных дымовых газов на входе в сушильную камеру. Изменение параметров дымовых газов в процессе теоретической сушки идет по линии постоянной энтальпии (линия *BC*). Примем температуру дымовых газов на выходе из сушильного барабана  $110^\circ\text{C}$ <sup>1</sup>. Тогда для теоретической сушки влажосодержание дымовых газов на выходе из сушильной камеры составит  $x_2 = 0,333 \text{ кг/кг}$ .

Рассчитаем удельный расход тепла и удельный расход сушильного агента:

$$l_t = \frac{1}{x_2 - x_1} = 3,597 \text{ кг/кг,} \quad (10.13)$$

$$q_t = l_t \cdot (I_1 - I_0) = 3561 \text{ кДж/кг}$$

<sup>1</sup> Конечная температура сушильного агента после сушки зависит от скорости сушки и длины барабана — точнее, времени контакта сушильного агента с поверхностью влажного материала. Для барабанной сушки есть расчетные зависимости скорости сушки, по которым можно определить конечную температуру сушильного агента (см. подраздел 6.7 и [51]). Однако чаще всего конечную температуру сушильного агента принимают на  $20\text{--}30^\circ\text{C}$  выше точки росы и исходя из этого рассчитывают длину сушильного барабана по эмпирическим рекомендациям.



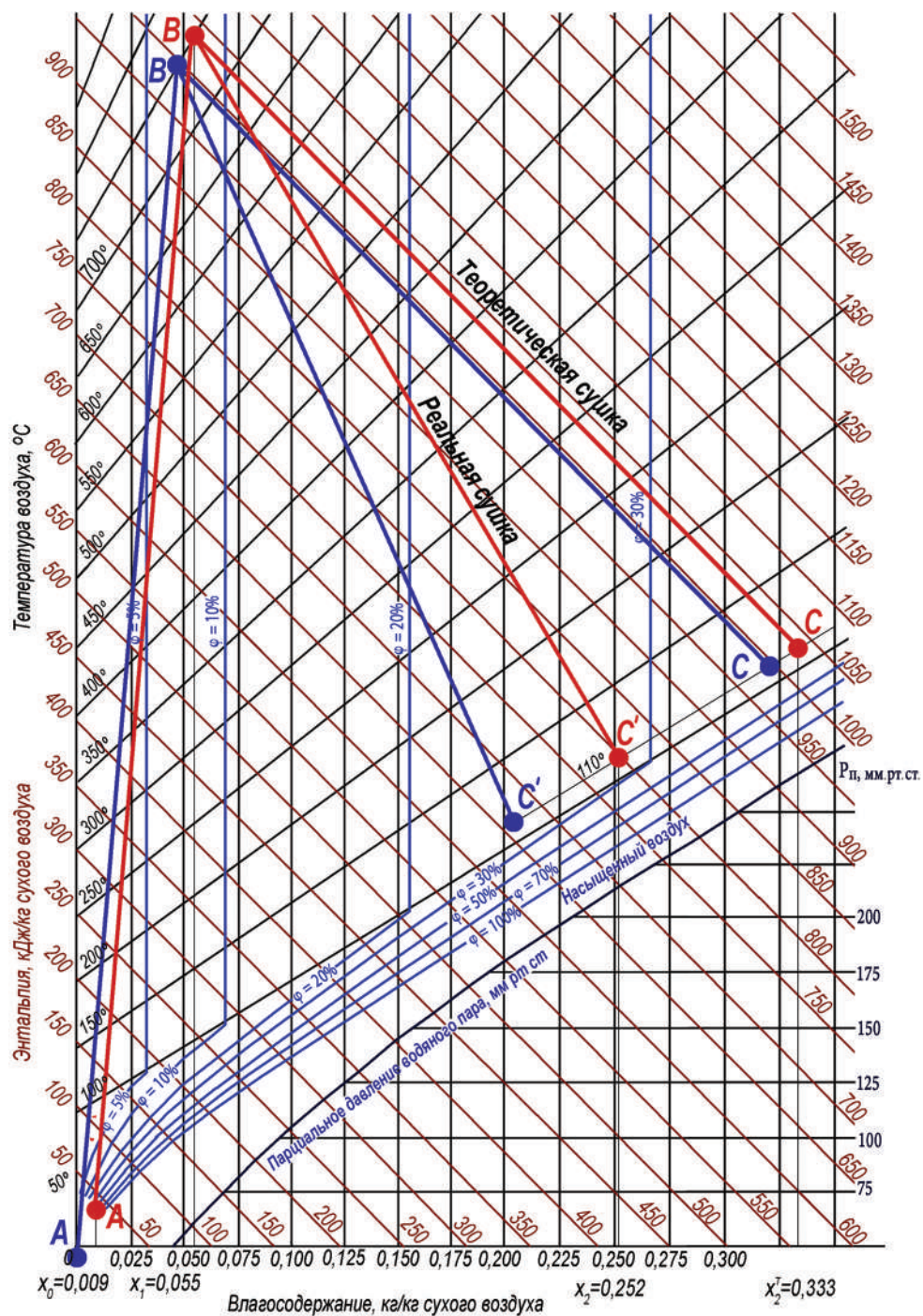


Рис. 100. Изображение процесса сушки карьерного песка на диаграмме Рамзина (летние условия — красные линии, зимние условия — синие линии)

По диаграмме Рамзина определяем  $I_1 = 1030$  кДж/кг,  $I_0 = 40$  кДж/кг.

Зная расход испаренной влаги  $0,872$  кг/с (уравнение (10.4)), определим расход сушильного агента (дымовых газов) и расход тепла на теоретическую сушку:

$$L_T = W \cdot l_T = 3,137 \text{ кг/с}, \quad Q_T = q_T \cdot W = 3105 \text{ кВт}. \quad (10.14)$$

Объемный расход отработанных дымовых газов при температуре  $110^\circ\text{C}$  составит:

$$V_T = \frac{L_T (1 + x_2)}{\rho_2} = 4,610 \text{ м}^3/\text{с} = 16\,595 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (10.15)$$

где  $\rho_2$  — плотность дымовых газов при  $110^\circ\text{C}$ ,  $\rho_2 = 0,907$  кг/м<sup>3</sup>; для реальной сушилки расход дымовых газов будет больше на 20–40 %.

По табл. 7-1 (с. 124) определяем среднюю допустимую скорость дымовых газов в барабане. Для кажущейся плотности песка  $2100$  кг/м<sup>3</sup> с размером частиц  $0,1$ – $0,6$  мм средняя скорость  $w$  составляет  $3$  м/с. Однако для песка средней крупности рекомендуемая скорость газов составляет  $1,5$ – $2,0$  м/с. Невысокая скорость дымовых газов в барабане позволит уменьшить пылевынос из барабана и снизить нагрузку на пылеочистное оборудование. Примем скорость дымовых газов  $1,5$  м/с. Диаметр барабана при его заполнении материалом на 20 % составит:

$$D_T = \sqrt{\frac{V_T}{0,785 \cdot 0,8 \cdot w}} = 2,2 \text{ м}, \text{ для реальной сушилки } 2,6 \text{ м}. \quad (10.16)$$

Для дальнейших расчетов примем диаметр барабана  $2600$  мм.

Рекомендуемая длина барабана принимается  $(3,5\text{--}7)D_T$ . Примем длину барабана  $14$  м. Боковая поверхность барабана с учетом теплоизоляции  $40$  мм составит  $118$  м<sup>2</sup>.

Зная размеры барабана, определим потери тепла  $Q_{\text{пот}}$  в окружающую среду. Сушильный барабан для карьерного песка обычно устанавливается на открытой площадке, и теплоизолируется слоем минеральной ваты. Расчет теплопотерь для слоя изоляции толщиной  $40$  мм при средней температуре в сушильном барабане  $430^\circ\text{C}$  дает следующие значения:

- для летнего периода ( $+17,5^\circ\text{C}$ ) потери тепла  $433$  Вт/м<sup>2</sup>, температура на стенке  $53^\circ\text{C}$ ;
- для зимнего периода ( $-7,7^\circ\text{C}$ ) потери тепла  $460$  Вт/м<sup>2</sup>, температура на стенке  $30^\circ\text{C}$ .

Коэффициент теплопроводности теплоизоляции принят равным  $0,046$  Вт/(м·К).

Для летних условий потери тепла  $Q_{\text{пот}}$  составят  $433 \cdot 118 / 1000 = 51,1$  кВт. Для условий зимы потери тепла через кожух барабана 54,3 кВт.

Примем теплоемкость материала 840 Дж/(кг·К). Температура песка на входе в сушильный аппарат равна температуре окружающей среды 17,5 °С, на выходе примем 110 °С. Тогда расход тепла на нагрев материала составит  $50\,000 / 3600 \cdot 840 / 1000 \cdot (100 - 17,5) = 1079$  кВт для летних условий и 1373 кВт для условий зимы.

Для летних условий удельные потоки тепла равны (см. формулу (4.14), глава 4, с. 39):

$$\begin{aligned} q_{\text{пот}} &= \frac{Q_{\text{пот}}}{W} = 58,6 \text{ кДж/кг}, \\ q_{\text{м}} &= \frac{Q_{\text{м}}}{W} = 1237 \text{ кДж/кг}. \end{aligned} \quad (10.17)$$

Рассчитаем внутренний баланс сушильной камеры:

$$\begin{aligned} \Delta &= c_{\text{в}} \theta_{\text{н}} - q_{\text{м}} - q_{\text{пот}} = \\ &= 4,19 \cdot 17,5 - 1237 - 58,6 = -1222 \text{ кДж/кг}. \end{aligned} \quad (4.16)$$

Зная значение внутреннего баланса  $\Delta$ , построим реальную сушилку на диаграмме Рамзина. Для этого используем уравнение

$$I_2 = I_1 + \Delta \cdot (x_2 - x_1). \quad (4.17)$$

Представим его в виде

$$I = I_1 + \Delta \cdot (x - x_1). \quad (4.17a)$$

Зададимся произвольным значением  $x$ , вычислим  $I$  и построим прямую линию. Например, при  $x = 0,250$  кг/кг,  $I_1 = 1030$  кДж/кг,  $I = 1030 - 1222(0,250 - 0,055) = 792$  кДж/кг.

Проведя прямую линию от  $I_1$  через точку  $I$ , получаем линию изменения параметров влажного воздуха (дымовых газов) для реальной сушилки — линию  $BC'$ . На этой линии при температуре 110 °С влагосодержание дымовых газов  $x_2 = 0,252$  кг/кг (точка  $C'$ ).

Рассчитаем удельный расход тепла и удельный расход сушильного агента для реальной сушилки:

$$\begin{aligned} l &= \frac{1}{x_2 - x_1} = 5,07 \text{ кг/кг}, \\ q &= l(I_1 + I_0) = 5019 \text{ кДж/кг}. \end{aligned} \quad (10.18)$$

Зная расход испаренной влаги, определим расход сушильного агента (дымовых газов) и расход тепла для реальной сушки:

$$L = W \cdot l = 4,42 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}, \quad Q = q \cdot W = 4377 \text{ кВт}. \quad (10.19)$$

Объемный расход отработанных дымовых газов:

$$V = \frac{L(1 + x_2)}{\rho_2} = 6,10 \text{ м}^3/\text{с} = 23\,465 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (10.20)$$

где  $\rho_2$  — плотность дымовых газов при 110 °С,  $\rho_2 = 0,907 \text{ кг/м}^3$ .

Диаметр барабана реальной сушилки составит:

$$D = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot 0,8 \cdot w}} = 2,54 \text{ м}. \quad (10.21)$$

Примем диаметр барабана 2600 мм. Длина барабана 14 000 мм.

Тогда скорость дымовых газов в барабане составит 1,44 м/с.

Для зимних условий получаем следующие значения:

$$l = \frac{1}{x_2 - x_1} = 6,23 \text{ кг/кг}, \quad (10.18a)$$

$$q = l(I_1 + I_0) = 5902 \text{ кДж/кг};$$

$$L = W \cdot l = 5,43 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}, \quad (10.19a)$$

$$Q = q \cdot W = 5145 \text{ кВт};$$

$$V = \frac{L(1 + x_2)}{\rho_2} = 7,24 \text{ м}^3/\text{с} = 26051 \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (10.20)$$

Зимой скорость дымовых газов в барабане будет выше, так как для нагрева холодного воздуха требуется больше газа. Скорость дымовых газов зимой составит 1,7 м/с.

Расход природного горючего газа

$$V_r = \frac{Q}{q_r} = 0,130 \text{ м}^3/\text{с} = 469 \text{ м}^3/\text{ч}, \text{ зимой } 551 \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (10.22)$$

Коэффициент полезного действия сушилки:

$$\eta = \frac{r_0}{q} = 54,4\%, \text{ зимой } 46,3\%. \quad (10.23)$$

Напряженность сушильного барабана по влаге составит:

$$A_v = \frac{W}{0,8 \cdot V_6} = 53 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{ч}}. \quad (10.23)$$

Практические значения  $A_v$  для песка, приведенные в [80], находятся в пределах 80–100 кг/(м<sup>3</sup>·ч). Выбранная сушилка будет работать с запасом по производительности, либо сможет сушить песок с большей влажностью.

Таким образом, окончательно принимаем для сушки карьерного песка 50 т/ч сушильный барабан БС-2,6×14. Результаты расчета сведены в табл. 10-6.

Таблица 10-6

**Результаты расчета барабанной сушильной установки**

Наименование	Значение	
	Лето	Зима
Расход влажного материала с влажностью 6 %, т/ч	53,14	
Количество испаренной влаги, т/ч,	3,14	
Расход высушенного материала с влажностью 0,1 %, т/ч, в том числе:	50,0	
• крупная фракция песка (сушилка)	47,2	
• мелкая фракция песка (циклон)	2,6	
• пыль (рукавный фильтр)	0,2	
Коэффициент избытка воздуха $\alpha$	2,94	2,88
Температура дымовых газов, начальная °С	750	
Температура отходящих газов после сушки, °С	110	
Размеры барабана сушилки:		
• диаметр, м	2,6	
• длина, м	14,0	
Расход дымовых газов, тыс. м <sup>3</sup> /ч (при 110 °С)	23,47	26,05
Скорость дымовых газов на выходе из барабана, м/с	1,44	1,70
Тепловая мощность, МВт	4,38	5,15
Расход природного газа на горение, м <sup>3</sup> /ч	469	551
Напряженность сушильной камеры по испаренной влаге, кг/(м <sup>3</sup> ·ч)	53	
Установленная мощность привода барабана, кВт	55	
Масса барабанной сушилки, т	14	

Таким образом, сушка песка характеризуется следующими параметрами:

- удельный расход природного газа 9,4 м<sup>3</sup>/т (лето), 11,0 м<sup>3</sup>/т (зима);
- удельный расход электроэнергии 1,1 кВт·ч/т.

### 1.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЫЛЕВЫНОСА ИЗ СУШИЛЬНОГО БАРАБАНА

Мелкая фракция песка и пыль выносятся из барабана вместе с потоком дымовых газов и осаждаются в циклонах и рукавном фильтре (см. рис. 63, с. 131). Для расчета пылевыноса рассчитаем скорость осаждения  $w_{oc}$  частиц песка по формуле

$$Re_{oc} = \frac{Ar}{(18 + 0,575\sqrt{Ar})}, \quad (10.24)$$

$$Re_{oc} = \frac{w_{oc} d \rho}{\mu}, \quad Ar = \frac{g d^3}{\mu^2} \rho_t \rho,$$

где  $\rho$  — плотность дымовых газов, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  — динамический коэффициент вязкости газов, Па·с;  $\rho_t$  — плотность частиц песка, кг/м<sup>3</sup>;  $d$  — размер частиц песка, м.

Расчет скорости осаждения для фракций песка приведен в табл. 10-7.

Таблица 10-7

Расчет скорости осаждения частиц карьерного песка

Фракция, мм	> 5,0	5,0–2,5	2,5–1,25	1,25–0,63	0,63–0,315	0,315–0,16	0,16–0,05	< 0,05
Средний размер, мм	5,0	3,75	1,88	0,94	0,47	0,24	0,11	0,025
Скорость осаждения, м/с	15,7	15,7	10,7	6,82	3,79	1,68	0,46	0,03

В связи с тем, что материал, подвергаемый сушке, является тонкодисперсным, образуется большой пылеунос в систему аспирации. Для снижения пылевыноса корпус барабана разбит на четыре зоны:

1. Зона подъемных лопаток, с большой площадью и высотой. Данная конструкция обеспечивает интенсивную сушку в начале процесса, когда материал влажный и пылевыделение незначительно.

2. Зона подъемно-лопастных лопаток.

3. Зона секторных насадок, которая обеспечивает минимальное пылеобразование.

4. Зона без лопаток: в конце барабана лопасти не устанавливаются, материал сыпается в нижнюю часть барабана и выгружается в приемный бункер.

Схема движения материала и воздуха в концевой части барабана дана на рис. 101. Крупные частицы имеют высокую скорость осаждения и успевают упасть вниз и выгрузиться из барабана. Мелкие частицы не успевают достичь нижней части барабана и выносятся потоком дымовых газов в вытяжной газопровод и далее в циклоны и фильтр.



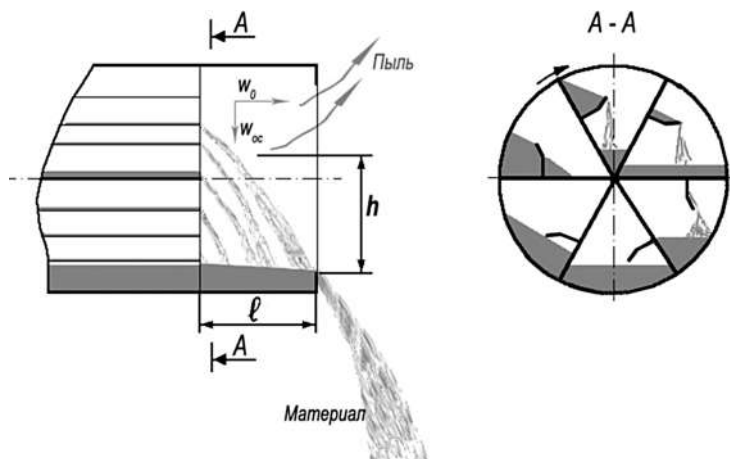


Рис. 101. Схема движения материала в концевой части сушильного барабана

Оценить вероятность выноса частиц можно с помощью отношения времени осаждения частиц к времени движения их в горизонтальном потоке дымовых газов в барабане:

- время осаждения  $\tau_{oc} = h / (\varphi w_{oc})$ ;
- время движения в потоке  $\tau_0 = l / w_0$ .

Здесь коэффициент  $\varphi$  характеризует влияние стесненности сыпавшего с лопаток материала.

При стесненном осаждении частиц более мелкие частицы тормозят движение более крупных, а частицы больших размеров увлекают за собой мелкие частицы, ускоряя их движение. Поэтому для крупных частиц коэффициент  $\varphi < 1$ , а для мелких частиц коэффициент  $\varphi > 1$ .

Оценочный коэффициент пылевыноса запишется в виде условия

$$A_w = \frac{\tau_{oc}}{\tau_0} = \frac{h}{l\varphi} \frac{w_0}{w_{oc}} \approx K_w \frac{w_0}{w_{oc}}. \quad (10.25)$$

Коэффициент стесненности  $\varphi \approx 0,5 \div 0,7$  для крупных частиц и  $\varphi = 1,3 \div 1,5$  для мелких частиц. Примем для мелких частиц  $K_w = 0,9$ . Расчет пылевыноса из барабана диаметром 2,6 м представлен в табл. 10-8. Чем больше  $A_w$ , тем больше пылевынос.

Пылевынос для каждой фракции  $G_{wi}$  (кг/ч) определялся из условия

$$\begin{aligned} G_{wi} &= 0, \text{ если } A_{wi} \leq 1, \\ G_{wi} &= G_{0i} \left( 1 - \frac{1}{A_{wi}} \right), \text{ если } A_{wi} > 1, \end{aligned} \quad (10.26)$$

где  $G_{0i}$  — расход фракции  $i$  в исходном высушенном материале, кг/ч.

Таблица 10-8

Расчет пылевыноса из сушильного барабана

Диаметр сушилки	2,60 м		Скорость дымовых газов на выходе из барабана				1,70 м/с		$K_w = 0,90$
Лен. обл., ЛСР, карьер Калелово		50 000	кг/ч	Пыле- вынос	5,2%	Запыленность дым. газов, кг/м³		0,100	
Фракция, мм	> 5,0	5,0–2,5	2,5–1,25	1,25–0,63	0,63–0,315	0,315–0,16	0,16–0,05	Сумма	
А. Исходный материал									
Содержание фракции, %	3,19	3,78	6,29	27,37	36,63	16,26	5,32	1,16	100,0%
Исх. продукт $G_0$ , кг/ч	1595	1890	3145	13 685	18 315	8130	2660	580	50 000
Скорость осаждения, м/с	> 10	> 10	10,67	6,82	3,79	1,68	0,46	0,03	
Коэф. пылевыноса $A_w$ , %	0,00	0,00	0,14	0,25	0,45	1,01	3,67	54,79	
Процент пылевыноса, %	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,3%	72,7%	98,2%	
Б. Пыль уноса сушилки									
Содержание фракции, %	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,2%	74,0%	21,8%	100,0%
Пыль уноса, кг/час	0	0	0	0	0	109	1 934	569	2 613
В. Сухой материал на выходе из сушилки									
Содержание фракции, %	3,4%	4,0%	6,6%	28,9%	38,6%	16,9%	1,5%	0,0%	100,0%
Продукт сушилки, кг/ч	1 595	1 890	3 145	13 685	18 315	8 021	726	11	47 387
Баланс	1 595	1 890	3 145	13 685	18 315	8 130	2 660	580	50 000

Как видно из таблицы, самый большой унос пыли для фракции  $< 0,05$  мм составляет 98,2 %. Всего выносятся потоком дымовых газов 2613 кг пыли; следовательно, пылевынос составит 5,2 %. Запыленность газов на выходе из барабана  $2613/26051 = 0,100$  кг/м<sup>3</sup>.

*1.6. ВЫБОР ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ.  
РАСЧЕТ И ВЫБОР ЦИКЛОНА, РУКАВНОГО ФИЛЬТРА И ДЫМОСОСА*

В состав сушильной установки, кроме сушильного барабана, входит вспомогательное оборудование для транспортировки, загрузки и выгрузки материала, для подачи и удаления воздуха и очистки дымовых газов (см. рис. 63). Сушильная установка также должна быть оснащена автоматической системой управления технологическим процессом (АСУТП).

Состав оборудования приведен в табл. 10-9.

В системе пылеочистки дымовых газов обычно используют две стадии очистки: циклоны (1-я стадия) и рукавный фильтр. Последний может быть заменен электрофильтром или скруббером. Иногда, при незначительном пылевыносе из сушильного барабана, первую стадию очистки совмещают со второй (используют только фильтр).

Для расчета необходимо знать расход дымовых газов. Поскольку для зимних условий расход дымовых газов больше, возьмем для расчета 26,05 тыс. м<sup>3</sup>/ч (см. табл. 10-6).

Для средней и мелкодисперсной пыли применяют циклоны ЦН-11, ЦН-15 и некоторые другие. Возьмем циклон СЦН-40, который более эффективно очищает воздух и газы от мелкой и средней пыли. Высокая степень очистки в циклоне СЦН-40 достигнута за счет повышения интенсивности вращательного движения газа в корпусе циклона и одновременного снижения скорости радиального стока в направлении к выхлопной трубе.

Степень очистки в циклоне СЦН-40 при оптимальных условиях составляет до 95 %.

Для нашего расхода принимаем групповой циклон СЦН-40-1200×4, гидравлическое сопротивление которого составит:

$$\Delta p_{\text{ц}} = \zeta \frac{\rho w_{\text{ц}}^2}{2} = 1277 \text{ Па}, \quad (10.27)$$

где  $\zeta = 1100$  — коэффициент сопротивления циклона;  $w_{\text{ц}} = 1,6$  м/с — условная скорость дымовых газов в циклоне.

Примем степень очистки в циклоне 92 %; тогда количество материала, осевшего в бункере циклона, составит  $2613 \cdot 0,92 = 2404$  кг/ч (см. табл. 10-8).

В рукавный фильтр поступит  $2613 \cdot (1 - 0,92) = 209$  кг/ч пылеобразного карьерного песка. После циклона запыленность дымовых газов будет  $209/26050 = 0,008$  кг/м<sup>3</sup> = 8 г/м<sup>3</sup>.

Принимая степень очистки воздуха в рукавном фильтре 99,5 %, получаем запыленность дымовых газов на выходе из рукавного фильтра  $8 \cdot (1 - 0,995) = 0,40 \text{ г/м}^3 = 40 \text{ мг/м}^3$ . В рукавном фильтре осядет  $208 \text{ кг/ч}$  пыли.

При прохождении циклонов температура газов и объемный расход дымовых газов уменьшаются. Падение температуры на циклонах зависит от температуры окружающей среды и составляет примерно  $20\text{--}30^\circ\text{C}$ . Пересчет объемного расхода на температуру  $80^\circ\text{C}$  дает результат  $24,0 \text{ тыс. м}^3/\text{ч}$ . Скорость фильтрации дымовых газов через фильтроткань в зависимости от типа пыли и условий фильтрации принимают  $0,7\text{--}2,0 \text{ м/мин}$ . Для кварцевого песка рекомендуемая скорость фильтрации  $1,6 \text{ м/мин}$ . Поверхность фильтрации составит  $24\,000/60/1,6 = 250 \text{ м}^2$ .

По каталогу производителя принимаем к установке рукавный фильтр с импульсной продувкой фильтровальных рукавов ФРИ-300. Характеристики фильтра и компрессора к нему указаны в табл. 10-9.

Основное гидравлическое сопротивление создают циклоны и рукавный фильтр. Потери давления в сушильном барабане и газоходах незначительны и составляют примерно  $300 \text{ Па}$ . Принимаем общее гидравлическое сопротивление системы с запасом  $4,0 \text{ кПа}$ , в том числе циклоны  $1,4 \text{ кПа}$ , фильтр  $2,0 \text{ кПа}$ .

По расходу дымовых газов  $24 \text{ тыс. м}^3/\text{ч}$  и гидравлическому сопротивлению  $4,0 \text{ кПа}$  выбираем дымосос (вентилятор) ВР 132-30-11,2, исполнение 1,  $75 \text{ кВт}$  (характеристики указаны в табл. 10-9). Для регулировки производительности на электродвигатель вентилятора устанавливается преобразователь частоты.

### *1.7. РАСЧЕТ ТРАНСПОРТЕРОВ, ВЫБОР ГАЗОВОЙ ГОРЕЛКИ*

Газовую горелку выбираем для зимних условий сушки. Мощность горелки должна быть не менее  $5,6 \text{ МВт}$ . По каталогу итальянского производителя берем модулируемую газовую горелку Lamborghini LMB G 6500 RE-V (DN65), мощность  $2000\text{--}6500 \text{ кВт}$ , расход газа  $212\text{--}628 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Подачу влажного материала в сушилку проектируют исходя из рельефа местности и плана добычи песка в карьере. Исходный материал загружают в бункер, под которым устанавливается грохот. На грохоте из песка удаляются посторонние предметы (ветки, камни, зимой — смерзшийся материал). Из-под грохота материал обычно поступает на ленточный транспортер и поднимается на высоту загрузочного бункера сушилки. Длина транспортера зависит от рельефа местности и учитывает максимальный угол наклона транспортера ( $11\text{--}15^\circ$ ). Над загрузочным бункером сушилки устанавливается приемный бункер, а также шлюзовый питатель для того, чтобы обеспечить герметичность загрузки материала. Примерный перечень загрузочного оборудования приведен в табл. 10-9.

Выгрузка высушенного материала происходит через шлюзовый затвор либо винтовым питателем. Это необходимо для обеспечения герметичности, чтобы исключить подсос окружающего воздуха в систему аспирации. Подъем высушенного материала в силосный бункер осуществляется цепным ковшовым элеватором. Возможен вариант пневмотранспорта. Выбор определяется условиями работы производства.

Для бесперебойной работы участка сушки необходимо установить как минимум два силосных бункера, объемом 500 м<sup>3</sup> каждый. Под силосами устанавливают телескопические загрузчики для загрузки автотранспорта. Под силосами могут быть установлены также автомобильные весы.

Кроме того, необходимо обеспечить выгрузку мелкой фракции песка из циклонов и пыли из рукавного фильтра (в табл. 10-9 эти устройства не учтены).

Высушенный песок используется на предприятиях, выпускающих сухие строительные смеси (ССС) и некоторые виды строительных материалов.

Таблица 10-9

## Оборудование сушильной установки

№ п/п	Наименование, характеристики оборудования	Стоимость, тыс. руб. <sup>1</sup>
1	Сушилка барабанная БС 2,6×14, мощность привода 75 кВт, масса 62 т	14 300
2	Газовая горелка Lamborghini LMB G 6500 RE-V (DN65), мощность 2000–6500 кВт, расход газа 212–628 м <sup>3</sup> /ч	1620
3	Циклон групповой СЦН-40-1200×4	860
4	Фильтр рукавный ФРИ-300. Производительность 10,4–36,0 тыс. м <sup>3</sup> /ч, площадь фильтрации 300 м <sup>2</sup> (240 рукавов), гидравлическое сопротивление 2,0 кПа, запыленность на входе до 80 г/м <sup>3</sup> , на выходе 10 мг/м <sup>3</sup>	2850
5	Компрессор винтовой для регенерации рукавов фильтроткани ФРИ-300, 1500 л/мин, 0,6 МПа, 15 кВт,	1300
6	Вентилятор ВР 132-30-11,2, исполнение 1,75 кВт, 1500 об/мин., 4,8–6,1 кПа, 10–30 тыс. м <sup>3</sup> /ч (с преобразователем частоты)	480
7	Грохот ГИЛ-41, 11 кВт	560
8	Ленточный транспортер ЛК-650 мм, L = 30 м, 8 кВт	360
9	Бункер 40 м <sup>3</sup>	80
10	Шлюзовый питатель ШП-400, 2,2 кВт	90
11	Винтовой (шнековый) питатель Ø250 мм, L <sub>1</sub> = 5 м	280
12	Элеватор цепной ЦГК-400	1200
13	Силосные бункеры 500 м <sup>3</sup> , 2 шт.	16 000
14	Фильтры картриджные 24 м <sup>2</sup> на силосные бункеры 2 шт.	260
15	Телескопические загрузчики на силосные бункеры, 2 шт.	900

<sup>1</sup> Дана ориентировочная стоимость единицы оборудования на начало 2020 года без учета НДС и доставки, курс евро 72 руб.

Таким образом, затраты на оборудование для участка сушки карьерного песка обойдутся инвестору ориентировочно в 40 млн руб. без учета расходов на доставку и монтаж. В таблице также не учтены стоимость общестроительных работ, газовое хозяйство и электрообеспечение участка.

Общая мощность установленного электрооборудования составит 200 кВт.

Расход на 1 тонну высушенного песка:

- природный газ 10,2 м<sup>3</sup>/т (60 руб./т);
- электроэнергия 3,5 кВт·ч/т (12 руб./т).

### 10.2.

#### РАСЧЕТ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ЗОЛООТВАЛОВ ТЭС В БАРАБАННОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ СУШИЛКЕ. ТОПЛИВО — ПРИРОДНЫЙ ГАЗ

В результате сжигания угля на теплоэлектростанциях (ТЭС) образуется зола, которая смыывается из топки котлов водой (мокрое золоудаление) и сбрасывается на шламовые поля (золоотвалы). Отвальные золошлаковые смеси гидроудаления ТЭС (далее — зола ТЭС) можно использовать для производства минерального порошка (МП), который применяется в качестве компонента при производстве асфальтобетонных и щебеночно-мастичных смесей. Зола, извлеченная из золоотвалов для переработки, имеет влажность 25 %. Для переработки в минеральный порошок требуются сушка и размол золы до крупности менее 100 мкм. Сушка производится в барабанных сушилках, размол — в шаровых или роторных мельницах. Технологическая схема сушки золы аналогична сушке карьерного песка (рис. 63, с. 131 см. подраздел 7.2). Однако зола характеризуется непостоянным зерновым составом и большим содержанием мелких фракций.

#### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Сушке подвергается зола ТЭС влажностью 25 %. Производительность по высушенному материалу 10 т/ч. Конечная влажность 0,5 %. Сушилка работает по прямоточной схеме.

Фракционный состав исходного материала определяется результатами лабораторных испытаний проб, отобранных из золоотвала (табл. 10-10). Материал достаточно мелкий, модуль крупности 0,95.

Топливо — природный газ с калорийностью не менее 33 600 кДж/м<sup>3</sup>. Запыленность отходящих газов — не более 20 мг/м<sup>3</sup>. Режим работы — круглосуточный, 3 смены в сутки, 7 дней в неделю. Средняя температура окружающей среды 10 °С, относительная влажность 80 %. В зимнее время работы не ведутся.

Насыпная плотность влажного материала 750 кг/м<sup>3</sup>, сухого материала — 700 кг/м<sup>3</sup>, истинная плотность 2090 кг/м<sup>3</sup>.



Таблица 10-10

## Фракционный состав золоотвала

Фракция, мм	> 4,0	2,0– 4,0	2,0– 1,25	1,25– 0,63	0,63– 0,315	0,315– 0,16	0,16– 0,08	< 0,08
Фракц. состав, %	0,85	0,86	0,81	4,82	20,24	32,26	19,10	21,06

Необходимо рассчитать расход природного газа на сушку золы ТЭС, определить типоразмер сушильного барабана и вспомогательного оборудования (вентиляторы, циклоны, питатели, бункеры и др.).

Расчет сушки выполним численным методом с использованием программы Excel-2010.

**2.1. МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС.  
РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ИСПАРЕННОЙ ВЛАГИ**

Расчет материальных потоков выполняем по уравнениям (10.1); (10.2), результат представлен в табл. 10-11.

Таблица 10-11

## Материальный баланс. Задан конечный расход, т/час

1	Расход начальный, $G_n$	кг/с	3,685	т/ч	13,267
2	Расход конечный, $G_k$	кг/с	2,778	т/ч	10,000
3	Расход влаги, $W$	кг/с	0,907	т/ч	3,267
4	Влажность начальная, $u_n$	%	25,0		
5	Влажность конечная, $u_k$	%	0,5		

**2.2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА**

Примем влагосодержание атмосферного воздуха  $x_0 = 0,009$  кг/кг, температуру  $t_1 = 700$  °С. Температура дымовых газов на выходе из барабана  $t_2 = 110$  °С.

Расчет расхода воздуха и тепла на сушку выполняем в табличной форме Excel-2010 по формулам, приведенным ниже. Результаты расчета даны в табл. 10-12.

Сначала устанавливаем исходные данные и проверяем константы (пп. 1–17, табл. 10-12). Далее выполняем расчет по формулам, начиная с п. 18:

18. Температуру дымовых газов  $t_1 = 700$  °С устанавливаем, изменяя значение коэффициента избытка воздуха  $\alpha = 3,40$ .

19. Рассчитываем начальное влагосодержание дымовых газов:

$$x_1 = (x_{д.г} + (\alpha - 1)x_0) / \alpha = 0,048 \text{ кг/кг.}$$

20. Конечную температуру дымовых газов после сушки устанавливаем  $t_2 = 110$  °С.

21. Рассчитываем энтальпию дымовых газов  $I_1 = (c_v + c_n x_1) t_1 + r_0 x_1 = 890,3$  кДж/кг.

22. Для теоретической сушилки  $I_1 = I_2$ . Исходя из этого условия, рассчитываем влагосодержание дымовых газов на выходе из сушильного барабана:

$$x_2 = \frac{I_1 - c_v t_2}{c_n t_2 + r_0} = 0,288 \text{ кг/кг.}$$

23. Удельный расход сушильного агента (дымовых газов)

$$l_T = \frac{1}{(x_2 - x_1)} = 4,18 \text{ кг/кг.}$$

24. Энтальпия воздуха  $I_0 = (c_v + c_n x_0) t_0 + r_0 x_0 = 32,7$  кДж/кг.

25. Удельный расход тепла  $q_T = l_T (I_1 - I_0) = 3581$  кДж/кг.

Таблица 10-12

Расчет влагосодержания и температуры дымовых газов

№ пп	Наименование	Ед. изм.	Значение	Примечание
<b>Исходные данные</b>				
1	Коэф. избытка воздуха, $\alpha$		3,40	
2	Влагосодержание воздуха, $x_0$	кг/кг	0,009	
3	Температура воздуха, $t_0$	°С	10	
4	Температура газа, $t_r$	°С	10	
<b>Константы</b>				
5	Теплота сгорания газа, низшая, $q_r$	кДж/кг	49195	
6	Теплоемкость воздуха, $c_v$	кДж/кг·°С	1,005	
7	Теплоемкость метана, $c_m$	кДж/кг·°С	2,20	
8	Теплоемкость водяного пара, $c_n$	кДж/кг·°С	1,97	
9	Теплота парообразования воды, $r_0$	кДж/кг	2493	
10	Теор. расход воздуха на горение, $g_v$	кг/кг	17,28	
11	Теор. расход дымовых газов, $g_r$	кг/кг	16,03	
12	Влагосодержание дымовых газов, $x_r$	кг/кг	0,140	
13	Молекулярная масса воздуха, $M_v$	кмоль	28,97	
14	Молекулярная масса дым. газов, $M_{д.г}$	кмоль	28,57	
15	Плотность воздуха, $\rho_v$	кг/м³	1,248	при 0 °С
16	Молекулярная масса газа, $M_r$	кмоль	16,41	
17	Плотность газа, $\rho_r$	кг/м³	0,683	при 20 °С
<b>Расчет</b>				
<b>а) теоретическая сушилка</b>				
18	Температура дымовых газов, $t_1$	°С	700	
19	Влагосодержание дымовых газов, $x_1$	кг/кг	0,048	

Окончание табл. 10-12

№ пп	Наименование	Ед. изм.	Значение	Примечание
20	Температура дым газов конечная, $t_2$	°С	110	
21	Энтальпия дымовых газов начальная, $I_1$	кДж/кг	890,3	
22	Влагосодерж. дым газов конечное, $x_2$	кг/кг	0,288	
23	Удельный расход суш агента (возд.), $l = 1/(x_2 - x_1)$	кг/кг	4,18	
24	Энтальпия воздуха начальная, $I_0$	кДж/кг	32,7	
25	Удельный расход тепла, $q_T = l(I_1 - I_0)$	кДж/кг	3581	
<b>б) реальная сушилка</b>				
26	Удельные потери тепла, $\Delta = q_m + q_n - c \cdot t_{mn}$	кДж/кг	241	
27	Удельные потери тепла, $q_m = G_k/W \cdot c_m(t_{mk} - t_{mn})$	кДж/кг	257	
28	Удельные потери тепла, $q_n = Q_{пот}/W$	кДж/кг	26	
29	Энтальпия дымовых газов конечная, $I_2$	кДж/кг	837	
30	Влагосодерж. дым газов конечное, $x_2$	кг/кг	0,268	
	Точка росы, $t_{p2}$	°С	48	
	Удельный расход воздуха (приближение)	кг/кг	4,55	0,00
31	Удельный расход воздуха, $l = 1/(x_2 - x_1)$	кг/кг	4,55	
32	Удельный расход тепла, $q = l \cdot (I_1 - I_0)$	кДж/кг	3899	
33	Удельный расход газа, $g_r$	кг/кг	0,079	
34	К.п.д. сушилки	%	64 %	

Предварительно по расходу дымовых газов на выходе из барабана

$$V_T = \frac{l_T W (1 + x_2)}{\rho} = 5,92 \text{ м}^3/\text{с}$$

определим диаметр барабана, приняв скорость дымовых газов 2,0 м/с:

$$D = \sqrt{\frac{V_T}{0,785 \cdot 0,8 \cdot w}} = 2,17 \text{ м},$$

где плотность дымовых газов при 110 °С  $\rho = 0,908 \text{ кг/м}^3$ .

Принимаем к расчету диаметр барабана 2,15 м, толщину теплоизоляции 100 мм, длину барабана 14 м.

Для определения параметров сушильного агента (дымовых газов) для реальной сушилки рассчитаем внутренний баланс сушильной камеры (барабана). В табл. 10-13 расчет выполнен по формулам, аналогичным (4.16), как в предыдущем примере. Температура наружной поверхности слоя теплоизоляции 30 °С. Получаем (табл. 10-13):

- п. 5. Потери тепла в окружающую среду через поверхность барабана 23,3 кВт;
- п. 15. Потери тепла на нагрев материала 233 кВт.

В результате внутренний баланс сушильной камеры составит  $\Delta = 241$  кДж/кг.

Таблица 10-13

## Расчет сушилки

№ п/п	Наименование	Ед. изм.	Значение	Ед. изм.	Значение
<b>а) теоретическая сушилка</b>					
1	Расход сушильного агента, $L = l \cdot W$	кг/с	3,79	кг/ч	13 639
2	Расход тепла, $Q = L \cdot (I_1 - I_0)$	кВт	3249		
3	Расход горючего газа, $V_r = Q/q$	нм <sup>3</sup> /с	0,097	м <sup>3</sup> /ч	348
4	Низшая теплота сгорания газа, $q_r$	кДж/м <sup>3</sup>	33600		
<b>б) реальная сушилка</b>					
5	Потери тепла в окружающую среду $Q_n = \alpha_0 \cdot F \cdot (t_6 - t_c)$	кВт	23,3		
6	Удельные потери тепла в окружающую среду, $q_n = Q_n/W$	кДж/кг	25,7		
7	Температура материала конечная	°С	110		
8	Температура материала начальная	°С	10		
9	Диаметр барабана	м	2,4		
10	Длина барабана	м	14,0		
11	Поверхность барабана, $F$	м <sup>2</sup>	104,6		
12	Коэффициент теплоотдачи окружающей среды, $\alpha_0$	Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	11,1		
13	Температура поверхности барабана	°С	30		
14	Температура окружающей среды	°С	10		
15	Потери тепла материала, $Q_m = G_k \cdot c_m (t_{mk} - t_{mn})$	кВт	233		
16	Удельные потери тепла, $q_m = Q_m/W$	кДж/кг	257,1		
17	Теплоемкость материала, $c_m$	кДж/кг·°С	0,84		
18	Расход сушильного агента, $L = l \cdot W$	кг/с	4,13	кг/ч	14 852
19	Расход тепла, $Q = q \cdot W$	кВт	3538		
20	Расход горючего газа, $V_r = Q/q$	нм <sup>3</sup> /с	0,105	м <sup>3</sup> /ч	379
21	Расход газа на тонну сухого материала, $v_r = V_r/G_k$	нм <sup>3</sup> /т	37,9		
22	Расход воздуха, $G_b = \alpha \cdot g_b \cdot V_r \cdot \rho_r (1 + x_0)$	кг/с	4,26	кг/ч	15 333
23	Расход дымовых газов, $G_2 = L(1 + x_2)$	кг/с	5,23	кг/ч	18 835

Окончание табл. 10-13

№ п/п	Наименование	Ед. изм.	Значение	Ед. изм.	Значение
24	Объемный расход дымовых газов, $V_2 = G_2/\rho_2$ при $t_2$	м <sup>3</sup> /с	5,763	м <sup>3</sup> /час	20 747
25	Молекулярная масса дымовых газов, $M_s$	кг/кмоль	28,53		
26	Плотность дымовых газов, $\rho_2$	кг/м <sup>3</sup>	0,908		
27	Температура дымовых газов, $t_2$	°С	110		
<b>Размеры барабана</b>					
28	Скорость газа в сушилке	м/с	2,00		
29	Сечение барабана	м <sup>2</sup>	3,60		
30	Диаметр барабана, $D$	м	2,14		
31	Диаметр барабана принятый	м	2,15		
32	Скорость газа в сушилке реальная	м/с	1,99		
33	Длина барабана, $L = (3,5 - 7) D$	м	10,75		$L =$ $= (3,5 - 7) \cdot D$
34	Длина барабана принятая	м	14,00		
35	Объем барабана	м <sup>3</sup>	50,80		
36	Напряженность по влаге	кг/(м <sup>3</sup> · ч)	80,4		

Далее ведем расчеты для реальной сушилки (табл. 10-12):

26. Удельные потери тепла (внутренний баланс сушильной камеры)

$$\Delta = 241 \text{ кДж/кг.}$$

27. Удельные потери тепла на нагрев материала  $q_m = 257 \text{ кДж/кг.}$

28. Удельные потери тепла через кожух аппарата  $q_n = 26 \text{ кДж/кг.}$

29. Энтальпия дымовых газов на выходе из барабана с учетом потерь тепла рассчитывается из условия

$$I_2 = (c_b + c_n x_2) t_2 + r_0 x_2;$$

$$I_2 = I_1 - \Delta / l;$$

$$l = \frac{1}{x_2 - x_1}.$$

Уравнения решаем в программе Excel методом подбора параметра (Данные — анализ «что-если» — подбор параметра...) либо методом итерации в любой другой программе:

- задаемся  $x_2$ ;
- рассчитываем  $l$ ;
- рассчитываем  $I_2$ ;
- определяем  $x_2$ ;
- уточняем  $l$ .

И далее до совпадения с заданным значением  $x_2$ . Получаем энтальпию  $I_2 = 850$  кДж/кг.

30. Получаем влагосодержание дымовых газов на выходе из сушильного барабана (конечное)  $x_2 = 0,268$  кг/кг.

31. Удельный расход дымовых газов  $l = 4,55$  кг/кг.

32. Удельный расход тепла  $q = 3899$  кДж/кг.

33. Удельный расход газа  $g_r = q/q_r = 0,079$  кг/кг.

34. К.п.д. сушилки  $\eta = r_0/q = 64\%$ .

В табл. 10-13 получаем следующие результаты:

п. 18. Расход сушильного агента<sup>1</sup>  $L = l \cdot W = 4,13$  кг/с = 14 852 кг/ч.

п. 19. Расход тепла  $Q = q \cdot W = 3538$  кВт.

п. 20. Расход горючего газа  $V_r = q \cdot W = 0,105$  м<sup>3</sup>/с = 379 м<sup>3</sup>/ч.

п. 23. Расход дымовых газов  $G_2 = L(1 + x_2) = 5,23$  кг/ч.

п. 24. Объемный расход дымовых газов при 110 °С  $V_2 = G_2/\rho_2 = 5,763$  м<sup>3</sup>/с = 20 747 м<sup>3</sup>/ч.

Для выбранного барабана получаем напряженность по испаренной влаге  $A_v = 80,4$  кг/(м<sup>3</sup>·ч), что вполне допустимо для сушки материалов такого рода. Скорость дымовых газов в сушилке 1,99 м/с.

### 2.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЫЛЕВЫНОСА ИЗ СУШИЛЬНОГО БАРАБАНА

Пылевынос из сушильного барабана определяем по методике, изложенной в подразделе 10.1.

Результаты расчета представлены в табл. 10-14.

Пылевынос по расчету при  $K_w = 0,9$  составит 33,1 %, из сушильного барабана с потоком дымовых газов улетит 3,31 т/ч пылеобразного материала с размером частиц < 0,16 мм. При расходе дымовых газов 20,8 тыс. м<sup>3</sup>/час при 110 °С запыленность газов составит 159 г/м<sup>3</sup>. Это очень высокая запыленность, поэтому для очистки газа до санитарных норм потребуется три стадии очистки.

Первая стадия очистки — циклон СДО-1600-1УП. Его характеристики:

- диаметр 1600 мм;
- высота 5720 мм;
- производительность по воздуху 22 000 м<sup>3</sup>/час;
- циклон поставляется в комплекте с бункером и шлюзовым разгрузчиком;
- гидравлическое сопротивление 790 Па;
- степень очистки 91 %;
- расход осажденной пыли 3,87 т/ч;
- запыленность газов после циклона 14 г/м<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Расход дымовых газов в пересчете на абсолютно сухой воздух, кг/с.



Таблица 10-14

Расчет пылевыхоса из сушильного барабана

Диаметр сушилки 2,15 м		Скорость дымовых газов на выходе из барабана 1,99 м/с					K <sub>ω</sub> 0,90	
Золотвал Череповецкой ГРЭС		10 000 кг/ч	Пылевынос	33,1 %	Запыленность дым. газов, кг/м³		0,127	
Фракция, мм		2,0–4,0	2,0–1,25	1,25–0,63	0,63–0,315	0,315–0,16	0,16–0,08	Сумма, %
А. Исходный материал								
Содержание фракции, %	0,85	0,86	0,81	4,82	20,24	32,26	19,10	21,06
Исх. продукт G <sub>0и</sub> , кг/ч	85	86	81	482	2 024	3 226	1 910	2 106
Скорость осаждения, м/с	> 10	> 10	9,79	6,82	3,79	1,68	0,58	0,08
Коэфф. пылевыхоса A <sub>ω</sub> , %	0,00	0,00	0,16	0,25	0,45	1,01	2,91	21,92
Процент пылевыхоса, %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	65,7	95,4
Б. Пыль уноса сушилки								
Содержание фракции, %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	37,9	60,8
Пыль уноса, кг/ч	0	0	0	0	0	43	1 255	2 010
В. Сухой материал на выходе из сушилки								
Содержание фракции, %	1,3	1,3	1,2	7,2	30,2	47,6	9,8	1,4
Продукт сушки, кг/ч	85	86	81	482	2 024	3 183	655	96
Баланс	85	86	81	482	2 024	3 226	1 910	2 106

Далее на вторую стадию очистки поступает  $21170 \text{ м}^3/\text{ч}$  запыленных дымовых газов при температуре  $95^\circ\text{C}$ , содержащих  $14 \text{ г}/\text{м}^3$  пыли, дисперсный состав которой приведен в табл. 10-14. На второй стадии очистки используем группу из четырех циклонов СЦН-40-1100-4.

Их характеристики:

- диаметр 1100 мм, высота 4100 мм, ширина 2900 мм;
- производительность по воздуху  $21\,900\text{--}26\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- циклон поставляется в комплекте с бункером и шлюзовым разгрузчиком;
- гидравлическое сопротивление 1170 Па;
- степень очистки 95 %;
- расход осажденной пыли 362 кг/ч;
- запыленность газов после циклона  $0,7 \text{ г}/\text{м}^3$ .

На третьей стадии очистки используем рукавный фильтр. Удельная нагрузка по воздуху для минеральной пыли (скорость фильтрации) примем  $1,9 \text{ м}/\text{мин}$ .

Требуемая поверхность фильтрации составляет  $190 \text{ м}^2$ .

Для очистки воздуха рекомендуется поставить фильтр RM06-2-2000 (компания PPT Filter, Финляндия).

Степень очистки воздуха в рукавном фильтре 99,7 %. Концентрация пыли после фильтра составит  $25 \text{ мг}/\text{м}^3$ .

Характеристики фильтра:

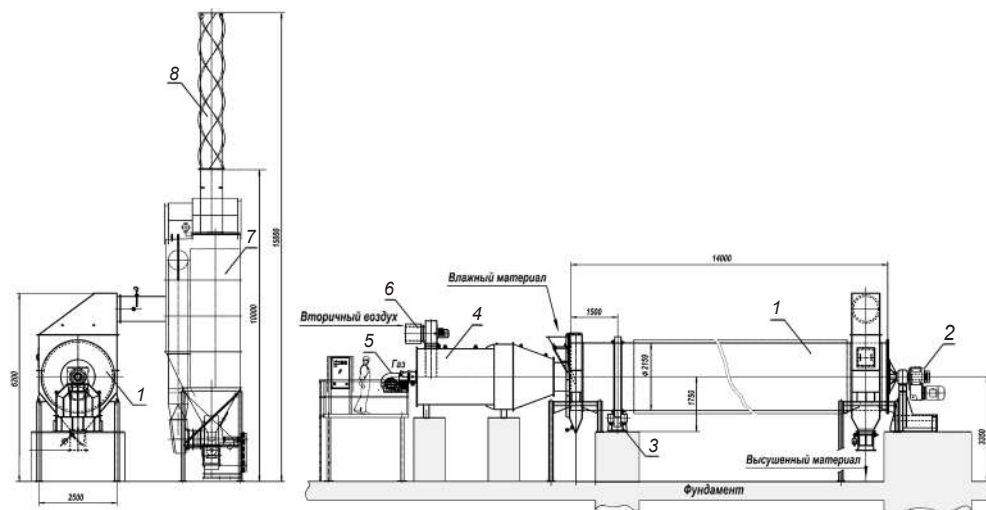
- площадь фильтрации  $198 \text{ м}^2$ ;
- длина  $\times$  ширина  $\times$  высота —  $5100 \times 3500 \times 5370 \text{ мм}$ ;
- расход сжатого воздуха (5 бар) 240 л/мин;
- гидравлическое сопротивление 500 Па.

Общее гидравлическое сопротивление сушилки и трех стадий очистки дымовых газов от пыли составит  $200 + 790 + 1170 + 500 = 2660 \text{ Па}$ , расход дымовых газов при температуре  $80^\circ\text{C}$  — 20 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$ . Для удаления дымовых газов используем вентилятор (дымосос) ВР-100-45-8. На электродвигатель вентилятора устанавливаем частотный преобразователь, который позволит плавно изменять расход удаляемых из сушилки дымовых газов.

Характеристики вентилятора ВР-100-45-8:

- расход (подача) 20–25 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;
- напор 4000–2900 Па;
- частота вращения рабочего колеса  $1810 \text{ мин}^{-1}$ ;
- мощность электродвигателя 45 кВт;
- производитель — Уфимский вентиляторный завод.

Данные расчета были подтверждены в испытательном центре компании ALLGIER (Германия) на модели барабанной сушилки диаметром 600 мм. Сушка золы ТЭС с влажностью 25 % выполнялась воздухом,



**Рис. 102.** Промышленная установка для сушки золы ТЭЦ:

1 — сушильный барабан; 2 — привод барабана; 3 — бандаж и опорные ролики; 4 — топка; 5 — горелка; 6 — вентилятор вторичного воздуха; 7 — рукавный фильтр; 8 — дымовая труба (вытяжной вентилятор за фильтром не показан)

нагретым до  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; на выходе температура составила  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Пылевыхос из барабана варьировался в пределах  $25\text{--}30\%$ . На основании испытаний были выполнены уточненные расчеты и дано предложение на оборудование для сушки золы ТЭС  $10\text{ т/ч}$ :

- горизонтальный сушильный монобарабан  $2150 \times 14\,000\text{ мм}$ ;
- наружный диаметр барабана с теплоизоляцией  $2350\text{ мм}$ ;
- установленная мощность привода барабана/горелки/вентилятора/транспортера выгрузки пыли  $10/7,5/37/4\text{ кВт}$  (суммарно  $58,5\text{ кВт}$ );
- расход газа  $361\text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- расход отработанного воздуха  $28\,000\text{ м}^3/\text{час}$  при температуре  $100\text{--}120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- стоимость сушильного агрегата  $355\text{ кЕвро}$  без учета НДС;
- стоимость газоочистного оборудования (рукавный фильтр с блоком предварительной очистки)  $220\text{ кЕвро}$  без учета НДС/

На рис. 102 представлен общий вид сушильного агрегата с фильтром.

При установке современного газоочистного оборудования не требуется циклонов, поскольку рукавный фильтр имеет предварительную стадию очистки от грубодисперсной пыли. При такой схеме очистки отпадает необходимость в шнековых (винтовых) транспортерах для перегрузки материала из бункера в бункер, что сократит затраты на их приобретение и обслуживание. Кроме того, существенно сократится гидравлическое сопротивление системы, что снизит мощность вытяжного вентилятора ( $37\text{ кВт}$  вместо  $45\text{ кВт}$ ) и затраты на электроэнергию.

### 10.3. РАСЧЕТ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ КАРЬЕРНОГО ПЕСКА В СУШИЛКЕ КИПЯЩЕГО СЛОЯ

#### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В сушилках кипящего слоя (КС) возможна не только сушка, но и обеспыливание продукта. Преимущества и недостатки сушилок КС подробно описаны в табл. 8-4 (см. подраздел 8.2, с. 193). Ниже представлен расчет сушилки КС для сушки и обеспыливания кварцевого песка карьера Толмачево Ленинградской области. Технологическая схема сушки представлена на рис. 103.

Влажный карьерный песок загружается в расходный бункер 1, откуда шнековым питателем или вибропитателем подается в сушилку кипящего слоя 2.

В сушильную камеру сушилки КС под распределительную решетку подаются дымовые газы, полученные при сгорании природного газа в газовой горелке 3. Дымовые газы разбавляются холодным воздухом в топке для создания необходимой температуры 550–650 °С.

В сушилке КС установлена секционированная распределительная решетка беспровального типа, изготовленная из нержавеющей стали. В результате активного перемешивания влажного материала в токе

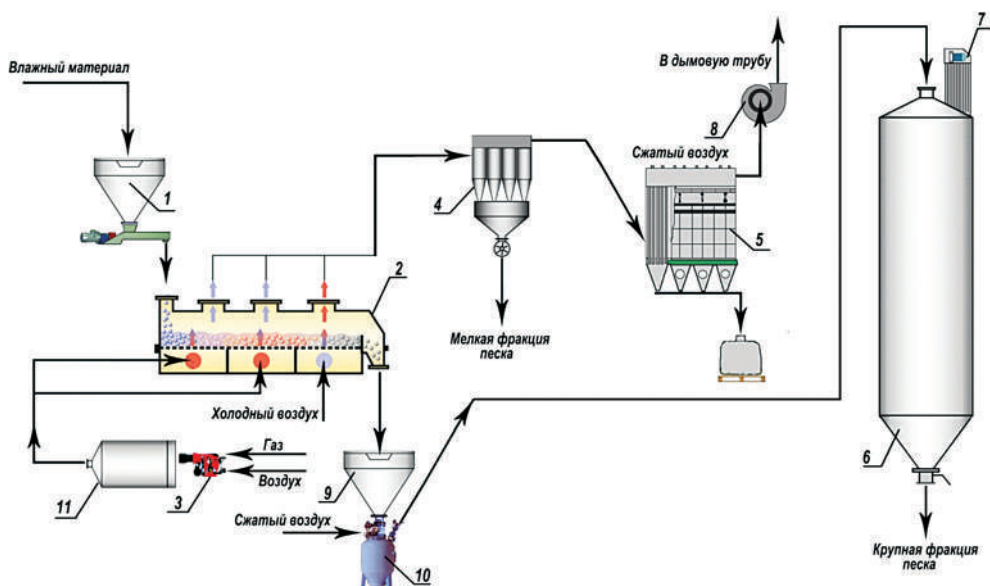


Рис. 103. Технологическая схема сушки карьерного песка в сушилке КС:

1 — бункер; 2 — сушилка КС; 3 — газовая горелка; 4 — циклон; 5 — рукавный фильтр; 6 — силосный бункер готовой продукции; 7 — картриджный фильтр; 8 — вентилятор; 9 — бункер; 10 — пневмокамерный насос; 11 — топка

горячих дымовых газов происходит быстрая сушка песка. Скорость газов в надрешеточном пространстве выбирается таким образом, чтобы обеспечить унос с газовой фазой частиц мельче 0,160 мм.

Высушенный материал разгружается в бункер 9, откуда пневмокамерным насосом 10 направляется в силосный бункер 6. На силосе установлен картриджный фильтр 7.

Запыленные газы из сушилки КС направляются в группу циклонов 4, где мелкодисперсная пыль разгружается в приемный бункер циклонов и шлюзовым питателем пересыпается в бункер 9, а очищенные от пыли газы направляются в рукавный фильтр 5 или группу мультициклонов для дальнейшей очистки и вентилятором 8 сбрасываются в атмосферу. Самая мелкая фракция из бункера рукавного фильтра выгружается в бэги. Запыленность газов после рукавного фильтра не превышает 20–40 мг/м<sup>3</sup>, после мультициклонов — 200–300 мг/м<sup>3</sup>.

Рекомендуется установить грохот перед подачей песка в сушилку КС для удаления посторонних включений (камни, ветки, посторонние предметы), а также смерзшихся комков песка в зимнее время.

Поскольку кварцевый песок выдерживает высокие температуры, выбор температуры сушильного агента (теплоносителя) определяется жаростойкостью распределительной решетки сушилки КС. В частности, при использовании решетки из стали 08X18H10T, предельная температура эксплуатации которой 800 °С, целесообразно принять температуру теплоносителя 650 °С.

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В приемный бункер сушилки КС поступает карьерный песок<sup>1</sup> с влажностью 6 %. Дисперсный состав песка приведен в табл. 10-15.

Сушке подвергается карьерный песок очень мелкий 1-го класса (ГОСТ 8736–2014). Производительность по высушенному материалу 20 тонн в час. Конечная влажность менее 0,1 %.

Таблица 10-15

Гранулометрический состав карьерного песка

Фракция, мм	1–0,63	0,63–0,4	0,4–0,315	0,315–0,16	0,16–0,1	0,1–0,063	0,063–0,05	< 0,05
Содержание, %	0,25	4,52	9,83	76,2	6,53	2,28	0,36	0,03

- Модуль крупности 1,06;
- Содержание глинистых примесей 0,48 %;
- Марка песка по ГОСТ 2138–91 2К<sub>2</sub>О<sub>3</sub>025;

<sup>1</sup> Карьер Толмачево, Ленинградская обл., компания Лужский ГОК.

## Химический состав:

Компонент	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiO <sub>2</sub>	CaO + MgO	Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	Сера	п.п.п. *
Содержание, %	98–99,0	0,12–0,16	0,95–1,45	0,3–0,4	0,3–0,5	н/сод	0,2–0,3

\* п.п.п. – потери при прокаливании.

- Насыпной вес сухого материала 1440 кг/м<sup>3</sup>.
- Истинная плотность сухого карьерного песка 2100 кг/м<sup>3</sup>.
- Теплоноситель — природный газ, низшая теплота сгорания составляет 33 600 кДж/нм<sup>3</sup>.
- Запыленность отходящих газов — не более 20–40 мг/м<sup>3</sup>.

Расчет выполнить для средней температуры окружающей среды 10 °С, относительная влажность 70 % (влагосодержание  $x_0 = 0,007$  кг/кг).

Расчет сушки КС для производительности 20 т/час по высушенному материалу выполнялся в программе Excel 2010 на основе электронных таблиц, приведенных в предыдущем примере (табл. 10-11–10-13).

Результаты расчета приведены в табл. 10-16.

Таким образом, сушка песка характеризуется следующими параметрами:

- удельный расход природного газа 7,6 м<sup>3</sup>/т;
- удельный расход электроэнергии 4,6 кВт·ч/т.

Таблица 10-16

## Результаты расчета сушки КС

Наименование	Значение
Расход влажного материала с влажностью 6 %, т/ч	21,255
Количество испаренной влаги, т/ч	1,255
Расход высушенного материала с влажностью < 0,1 %, т/ч, в том числе:	20,00
• крупная фракция песка > 0,16 мм	18,16
• мелкая фракция песка < 0,16	1,83
• пыль < 0,05 мм	0,01
Коэффициент избытка воздуха	3,40
Температура разбавленных воздухом дымовых газов, начальная, °С	650
Температура отходящих газов после сушки, °С	120
Влагосодержание сушильного агента, кг/кг:	
• перед сушильной камерой	0,046
• после сушильной камеры	0,242
Расход тепла, кВт	1426
Расход природного газа на горение, м <sup>3</sup> /ч (20 °С, 101,3 кПа)	153
Расход сушильного агента (дымовых газов), кг/с	2,27
Расход отработанных дымовых газов, м <sup>3</sup> /ч (при 120 °С)	9223
Расход холодного воздуха (10 °С) для охлаждения продукта, кг/с	2,87

Окончание табл. 10-16

Наименование	Значение
Размеры распределительной решетки, мм:	
• зоны сушки	3×1000×1000
• зоны охлаждения	1×1000×1000
Размеры сушилки КС (без учета теплоизоляции):	
• ширина, м	1,2
• длина, м	5,0
• высота, м	3,2
Установленная мощность электрооборудования, кВт	96
Напряженность сушильной камеры по испаренной влаге, кг/(час·м³)	209

Для расчета размеров сушилки КС рассчитаны скорости начала псевдооживления слоя  $w_{\text{по}}$  и скорости уноса (осаждения)  $w_{\text{ос}}$  для граничных размеров частиц песка 0,16 мм и 0,63 мм по формулам<sup>1</sup>:

$$\text{Re}_{\text{ос}} = \frac{\text{Ar}}{(18 + 0,61\sqrt{\text{Ar}})}; \quad (10.24)$$

$$\text{Re}_{\text{по}} = \frac{\text{Ar}}{(1400 + 5,22\sqrt{\text{Ar}})}, \quad (10.24a)$$

$$\text{Re}_{\text{ос(по)}} = \frac{w_{\text{ос}} d \rho}{\mu}, \quad \text{Ar} = \frac{g d^3}{\mu^2} \rho_T \rho.$$

Результаты расчета сведены в табл. 10-17. Следует отметить, что скорость осаждения и скорость уноса равнозначны.

В случае надрешеточного пространства сушилки:

- для граничного размера 0,16 мм — скорость уноса 0,92 м/с;
- для граничного размера 0,63 мм — скорость уноса 4,98 м/с, скорость начала псевдооживления — 0,20 м/с.

Следовательно, скорость газа над решеткой и в сепарационном пространстве сушильной камеры должна быть больше 0,92 м/с, а для псевдооживления слоя необходима скорость больше 0,20 м/с.

Примем скорость газа над решеткой 1,0 м/с. Для сушки материала по уравнению теплового баланса требуется 9223 м³/ч (2,56 м³/с) дымовых газов при 120 °С. Следовательно, площадь сечения решетки составит 2,56/1,0 = 2,56 м². Возьмем с запасом площадь сечения решетки 3,0 м² — три секции 1000×1000 мм при ширине решетки 1000 мм. Тогда реальная фиктивная<sup>2</sup> скорость дымовых газов над решеткой составит 0,854 м/с.

<sup>1</sup> В некоторых источниках в формуле (10.24) стоит коэффициент  $0,575 \sqrt{\text{Ar}}$ .

<sup>2</sup> Фиктивная скорость — скорость газа, отнесенная к полному сечению решетки без учета сечения частиц взвешенного слоя.



Таблица 10-17

## Результаты расчета скорости осаждения

Средний размер, мм	0,16	0,63	Средний размер, мм	0,16	0,63
Критерий Ar	142	8 678	Критерий Ar	328	11 428
Критерий $Re_{oc}$	5,72	121,26	Критерий $Re_{oc}$	11,53	143,81
Критерий $Re_{по}$	0,10	4,60	Критерий $Re_{по}$	0,22	5,84
Скорость осаждения, м/с	0,92	4,98	Скорость осаждения, м/с	1,04	4,86
Скорость п/ожиж., м/с	0,15	0,20	Скорость п/ожиж., м/с	0,09	0,16
Температура, °C	120		Температура, °C	10	80
Вязкость, $\cdot 10^6$ , Па·с	22,95		Вязкость, $10^6$ , Па·с	17,81	21,17
Плотность д. газа, кг/м <sup>3</sup>	0,887		Плотность д. газа, кг/м <sup>3</sup>	1,232	0,994
Плотность частиц, кг/м <sup>3</sup>	2100		Плотность частиц, кг/м <sup>3</sup>	2100	
Скорость рабочая, м/с		0,85	Скорость рабочая, м/с		1,86
Re		20,80	Re		54,90
Порозность		0,556	Порозность		0,699
Высота слоя $h_0$ , мм		300	Высота слоя $h_0$ , мм		300
Высота слоя $h$ , мм		405	Высота слоя $h$ , мм		598

С учетом секции для охлаждения продукта получаем четырех- или пятисекционную решетку, длиной 4–5 м, шириной 1000 мм (4–5 секций 1×1 м). Скорость горячего сушильного агента в сушилке ( $w = 0,85$  м/с) при желании может быть увеличена за счет регулирования расхода горячих газов в топке. Изменяя расход и температуру дымовых газов в подрешеточном пространстве, можно добиться требуемой сепарации мелких частиц в сушильной камере.

Пылевая фракция содержит в основном глинистые примеси и мелкодисперсный песок фракции  $< 0,160$  мм. Самая мелкая фракция осаждается в рукавном фильтре или в мультициклонах, ее количество незначительно — оценочно менее одной тонны в сутки.

Число псевдоожижения  $K_w = w / w_{по} = 0,85 / 0,20 = 4,25$ . Напряженность сушильной камеры по испаренной влаге 209 кг/(м<sup>3</sup>·ч). Столь высокая влагонапряженность сушильной камеры определяется активным гидродинамическим режимом сушки во взвешенном слое и высокой температурой сушильного агента.

Высоту кипящего слоя примем  $h_0 = 300$  мм (в пересчете на неподвижный слой) с последующим уточнением. Во взвешенном состоянии высота слоя будет больше и определяется порозностью  $\varepsilon$ , которая может быть определена графически через критерий Лященко  $Ly = w^3 \rho^2 / (\mu_r g)$  [67] либо по формуле:

$$\varepsilon = \left[ (18Re + 0,36Re^2) / Ar \right]^{0,21}. \quad (10.246)$$

Высота слоя в псевдооживленном состоянии

$$h = \frac{h_0 (1 - \varepsilon_0)}{1 - \varepsilon}. \quad (10.28)$$

При скорости  $w = 0,85$  м/с для частиц  $d = 0,63$  мм получаем  $\varepsilon = 0,56$ ,  $h = 406$  мм (см. табл. 10-17).

По данным [11], высоту сепарационного пространства принимаем в 4 раза больше высоты кипящего слоя ( $406 \times 4 = 1624$  мм), общая высота сушильной камеры 2 м. Площадь сечения сепарационной зоны принимают на 20–30 % больше площади решетки: тогда ширина сушильной камеры в верхней части составит 1200 мм.

Потери давления в сушилке КС определяются суммой гидравлических сопротивлений взвешенного слоя и газораспределительной решетки.

Примем живое сечение решетки 8 %, целевую распределительную решетку (см. подраздел 7.3, рис. 67, б, с. 139). Скорость газов в щели решетки при температуре 650 °С составит  $w = 20,7$  м/с, плотность газа  $\rho = 0,376$  кг/м<sup>3</sup>. При коэффициенте сопротивления решетки  $\zeta = 1,9$  сопротивление решетки составит:

$$\Delta p_{\text{реш}} = \zeta \frac{\rho w^2}{2} = 0,15 \text{ кПа}. \quad (10.29)$$

Высота слоя в неподвижном состоянии 300 мм. Гидравлическое сопротивление слоя

$$\Delta p_{\text{сл}} = \rho_{\text{т}} g \cdot h_0 (1 - \varepsilon_0) = 3,71 \text{ кПа}. \quad (10.30)$$

Общее сопротивление сушилки с учетом сопротивления газоходов (200 Па) составит 4,26 кПа.

В последнюю секцию сушилки подается холодный воздух. Расход воздуха подбираем таким образом, чтобы на газораспределительной решетке был режим устойчивого псевдооживления. Принимаем<sup>1</sup> начальную температуру воздуха 10 °С, конечную — 80 °С. Начальная температура материала в слое 120 °С, конечную температуру примем 60 °С. Расход воздуха  $G_v$  рассчитываем по уравнению теплового баланса

<sup>1</sup> Скорость теплообмена материала с воздухом очень высокая, поскольку частицы песка очень мелкие; время охлаждения, рассчитанное по методике, изложенной в [41], составляет менее 0,3 с, поэтому температура воздуха на выходе близка к температуре материала. Охлаждение материала происходит в режиме перекрестного тока — материал движется в сторону разгрузочного желоба, а холодный воздух снизу перпендикулярно потоку материала, поэтому усредненную конечную температуру воздуха на выходе из зоны охлаждения принимаем немного меньше, чем  $(60 + 120)/2 = 90$  °С.

$$G_B = \frac{G_M c_M (t_{MH} - t_{MK})}{c_B (t_{BK} - t_{BH})} = 3,69 \text{ кг/с}, \quad (10.31)$$

где  $G_M$  — расход обеспыленного материала, кг/с;  $t_{MH}$ ,  $t_{MK}$  — начальная и конечная температура материала, соответственно, °С;  $t_{BH}$ ,  $t_{BK}$  — начальная и конечная температура воздуха, °С.

Для охлаждения продукта необходимы две секции с решеткой  $1000 \times 1000$  мм, поскольку если взять одну секцию, то получится высокая скорость воздуха в щелях решетки и в слое.

Для сечения зоны охлаждения  $2,0 \text{ м}^2$  получаем следующие значения. Скорость воздуха в щелях решетки при температуре  $10^\circ\text{С}$  составит  $18,5 \text{ м/с}$ , сопротивление решетки  $\Delta p_{\text{реш}} = 0,41 \text{ кПа}$ . Расчетная скорость начала псевдоожижения для воздуха с температурой  $60\text{--}80^\circ\text{С}$  составит  $0,15\text{--}0,16 \text{ м/с}$  (см. табл. 10-17), поэтому расход воздуха достаточен для создания взвешенного слоя в секциях для охлаждения материала. Фиктивная скорость воздуха над решеткой при температуре воздуха в псевдоожиженном слое  $70\text{--}80^\circ\text{С}$  составит  $3,69/1,00 = 1,84 \text{ м/с}$ , где  $1,00 \text{ кг/м}^3$  — плотность воздуха при  $80^\circ\text{С}$ . Коэффициент псевдоожижения  $K_w = 1,84/0,16 = 16,8$ , где  $0,16 \text{ м/с}$  — скорость начала псевдоожижения при  $80^\circ\text{С}$ . Скорость уноса частиц размером  $0,63 \text{ мм}$  составляет  $4,86 \text{ м/с}$  — меньше фиктивной скорости воздуха над взвешенным слоем.

Для подачи холодного воздуха в секцию охлаждения ставим дутьевой вентилятор. Он необходим, поскольку гидравлическое сопротивление распределительной решетки секции охлаждения больше, чем для сушильных секций. Выбираем дутьевой вентилятор ВЦ 14-46-5 (№ 5), который имеет следующие характеристики:

- производительность  $7500\text{--}10\,800 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- полное давление  $1980\text{--}2380 \text{ Па}$ ;
- частота вращения рабочего колеса  $1500 \text{ об/мин}$ ;
- мощность электродвигателя  $11 \text{ кВт}$ .

Как видим, массовый расход воздуха на охлаждение материала сопоставим с расходом дымовых газов на сушку материала. Это существенно увеличивает размеры сушилки, нагрузку на аспирационное оборудование, и требует выбора вытяжного вентилятора большей мощности. Поэтому охлаждение материала нужно делать только тогда, когда это является производственной необходимостью.

Суммарный расход дымовых газов на сушку материала и воздуха на охлаждение продукта составит  $2,27 + 3,69 = 5,96 \text{ кг/с}$ . Температура смеси газов после сушилки составит  $95^\circ\text{С}$ , плотность —  $0,957 \text{ кг/м}^3$ , влагосодержание —  $0,098 \text{ кг/кг}$ , точка росы —  $60^\circ\text{С}$ . Объемный расход смеси газов составит  $5,96/0,957 = 6,228 \text{ м}^3/\text{с}$ .

В схеме необходимо установить циклон. Поскольку потери давления в сушилке КС высокие и в схеме предусмотрен рукавный фильтр, выберем циклон СЦН-50-1600У, который имеет низкое гидравлическое сопротивление (коэффициент сопротивления  $\zeta_{\text{ц}} = 185$ ):

$$\Delta p_{\text{ц}} = \zeta_{\text{ц}} \frac{\rho w^2}{2} = 0,85 \text{ кПа.} \quad (10.27)$$

Для уменьшения потерь давления в рукавном фильтре примем минимальную скорость фильтрации  $w_{\text{ф}} = 0,7$  м/мин. Объемный расход дымовых газов уменьшится, поскольку снизится его температура после циклонов до  $80^\circ\text{C}$ . Объемный расход газов составит  $5,96(273 + 80)/(273 + 95) = 5,71$  м<sup>3</sup>/с или 343 м<sup>3</sup>/мин. Площадь фильтрации составит  $343/1,6 = 214$  м<sup>2</sup>. Рукавный фильтр ФРИ-240 будет иметь сопротивление 700 Па.

Полное гидравлическое сопротивление цепи аппаратов составит  $4,26 + 0,85 + 0,7 = 5,81$  кПа.

Расход смеси газов при  $75\text{--}80^\circ\text{C}$  равен  $5,71 \cdot 3600 = 20\,560$  м<sup>3</sup>/ч.

Выбираем вытяжной вентилятор ВР-132-30-10, имеющий следующие характеристики:

- производительность 9000–26 640 м<sup>3</sup>/ч;
- полное давление 7200–5800 Па;
- частота вращения рабочего колеса 1500–2000 об/мин;
- мощность электродвигателя 75 кВт.

Для регенерации фильтроткани рукавного фильтра необходим компрессор с осушителем воздуха, установленная мощность компрессора равна 10 кВт. Суммарная установленная мощность дутьевого, вытяжного вентилятора и компрессора составит 96 кВт.

На рис. 104 изображена рассчитанная сушилка КС. В первые три секции сушилки 1 из топки 2 подаются топочные газы, разбавленные воздухом до температуры  $650^\circ\text{C}$ . В последние две секции вентилятором 4 подается холодный воздух. Влажный материал загружается в бункер 5, откуда через весовой дозатор 6 поступает на распределительную решетку сушилки 1.

Вытяжной вентилятор, циклон и рукавный фильтр на рисунке не показаны.

На рис. 105 представлена схема топки. Топка предназначена для получения смеси дымовых газов с воздухом и подачи полученных газов в барабанную сушилку.

Из горелки 1 продукты горения поступают в топочное пространство с температурой  $1300\text{--}1500^\circ\text{C}$  и в конце топочного пространства разбавляется воздухом до температуры, необходимой для сушки материала ( $550\text{--}650^\circ\text{C}$ ). Внутреннее пространство топки футеровано огнеупорным материалом 3. Для охлаждения корпуса топки через патрубок 4 в кольцевое

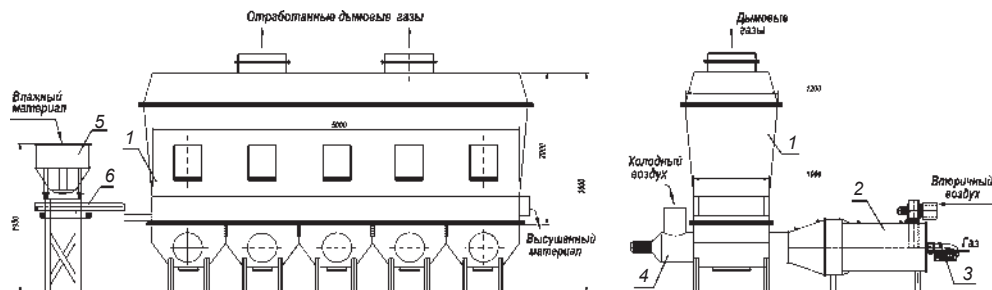


Рис. 104. Схема сушилки КС:

1 — сушилка; 2 — топка; 3 — горелка; 4 — дутьевой вентилятор; 5 — бункер; 6 — весовой дозатор

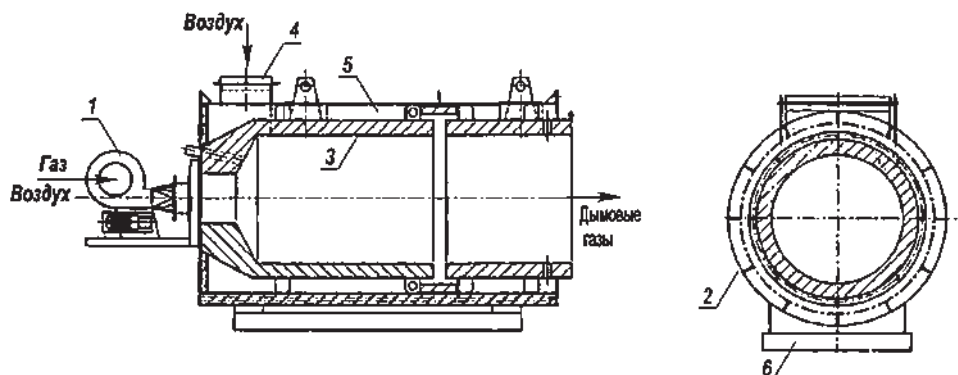


Рис. 105. Схема топки:

1 — горелка; 2 — корпус топки; 3 — огнеупорная футеровка; 4 — патрубок для подачи воздуха; 5 — воздушный канал; 6 — опора

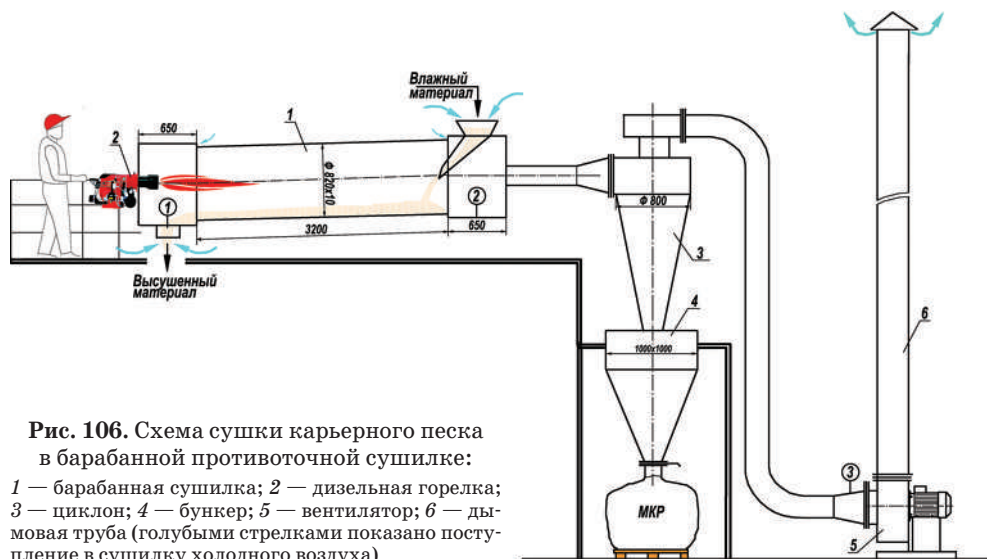
пространство 5 дутьевым вентилятором подается холодный воздух, который, нагреваясь, поступает в топку для разбавления продуктов горения.

Изменяя расход воздуха, можно регулировать температуру газов, поступающих в сушильную камеру.

#### 10.4.

### РАСЧЕТ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ КАРЬЕРНОГО ПЕСКА В БАРАБАННОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ СУШИЛКЕ С ГОРЕЛКОЙ НА ДИЗЕЛЬНОМ ТОПЛИВЕ

Наиболее дешевый вид топлива для сушики — горючий природный газ. Однако не все районы России газифицированы. Кроме того, работы по монтажу газоподводящего оборудования требуют немалых затрат. Поэтому для сушильных аппаратов небольшой мощности часто используют дизельные горелки. Ниже представлен расчет барабанной сушилки небольшой производительности.



**Рис. 106.** Схема сушки карьерного песка в барабанной противоточной сушилке:

1 — барабанная сушилка; 2 — дизельная горелка; 3 — циклон; 4 — бункер; 5 — вентилятор; 6 — дымовая труба (голубыми стрелками показано поступление в сушилку холодного воздуха)

Имеется барабанная сушилка с дизельной горелкой. Сушке подвергается карьерный песок для строительных работ средней крупности. Производительность по высушенному материалу 4–6 т/ч. Конечная влажность  $< 0,3\%$ .

Барабанная сушилка (рис. 106) работает по противоточной схеме. Горелка Lamborghini ECO 40/2 сжигает строго постоянный расход дизельного топлива (34 кг/ч) с заданным коэффициентом избытка воздуха ( $\alpha = 1,16$ ). Остальное количество воздуха подсасывается через неплотности прилегания вращающегося барабана к неподвижным загрузочной и разгрузочной камерам, но основная часть холодного воздуха поступает через разгрузочный люк, который полностью открыт для поступления воздуха<sup>1</sup>. Загрузочный люк имеет воронку, через которую также поступает небольшое количество холодного воздуха.

Вытяжной вентилятор ВЦП 7-40 (№ 5, схема 5, 11 кВт, 1810 об/мин) подсоединен к сушильному барабану через систему газопроводов и циклон СК-ЦН-34-800 с улиткой и бункером. Частота вращения рабочего колеса вентилятора может меняться частотным преобразователем, который подключен к электродвигателю вентилятора. Характеристики вентилятора даны на рис. 107.

<sup>1</sup> Следует отметить, что обычно в сушильный барабан материал подают через специальный питатель, например шнековый или шлюзовый, который предотвращает подсос воздуха в сушилку. Разгрузка материала также преследует цель не допустить подсоса воздуха внутрь сушилки. Однако в данном случае на действующей установке разгрузочный люк полностью открыт, так что воздух, поступающий через него, разбавляет дымовые газы горелки.

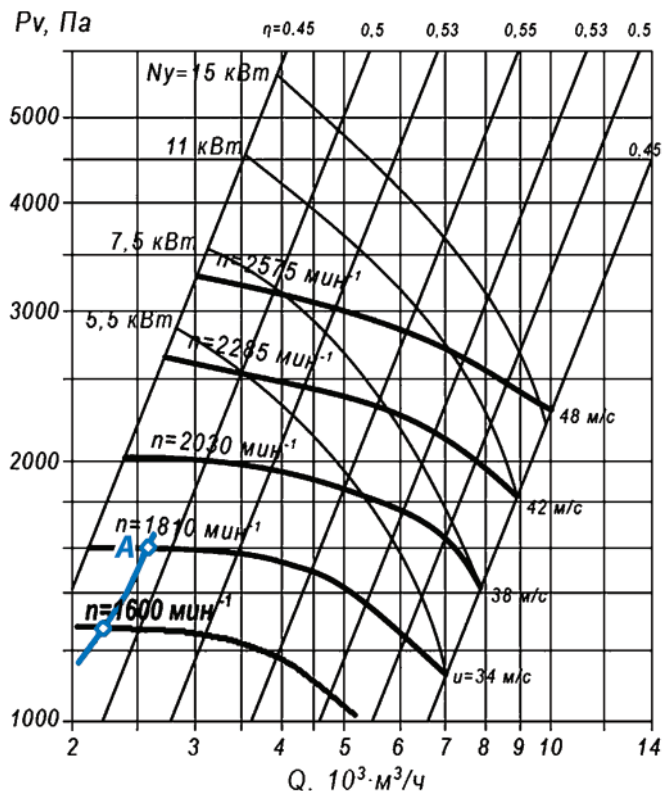


Рис. 107. Аэродинамические характеристики вентилятора ВЦП 7-40-5 (черные линии) и характеристика сети (синяя линия и точки)

Таким образом, при увеличении числа оборотов рабочего колеса вентилятора увеличивается количество подсасываемого воздуха, который разбавляет горячие дымовые газы. Причем подсос воздуха через разгрузочный люк разбавляет дымовые газы, которые идут на сушку материала, а подсос воздуха через противоположный (загрузочный) люк никак не влияет на сушку и разбавляет лишь отходящие из сушильного барабана отработанные газы.

Выполним расчет сушилки при различной частоте вращения рабочего колеса вентилятора с целью определить основные характеристики процесса сушки и найти оптимальный режим ее работы.

#### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

- Производительность по исходному материалу (песок)  $G_n = 4-6$  т/ч;
- Влажность начальная  $w_n = 6-10$  %.
- Влажность конечная  $w_k = 0,3$  %;
- Сушильный барабан не теплоизолирован, температура поверхности  $150$  °C;



- Температура сухого материала на выходе 100–120 °С;
- Температура дымовых газов 130 °С;
- Расход дизельного топлива (ДТ) 34 кг/ч.

Характеристики сушильного барабана:

- диаметр барабана 820×10 мм, длина 3200 мм;
- загрузочная камера: диаметр 860×10 мм, длина 650 мм;
- разгрузочная камера: диаметр 860×10 мм, длина 650 мм;
- загрузочный люк 240×120 мм;
- разгрузочный люк 240×120 мм;
- диаметр газоходов (внутренний) 250 мм, длина газоходов 8 м.

Характеристики дизельной горелки Lamborghini ECO 40/2:

- Мощность 267–474 кВт;
- Расход топлива 22,5–40 кг/ч.

Характеристики вентилятора ВЦП 4-70-5 (схема 5):

- производительность 3600–8100 м³/ч;
- давление 2,4–1,5 кПа;
- мощность электродвигателя 11 кВт;
- частота вращения рабочего колеса 1810 об/мин.

Характеристика циклона СЦН-40-800-УП в комплекте с улиткой, бункером 0,8 м³ и шиберной заслонкой:

- расход газа 2350–3435 м³/ч;
- гидравлическое сопротивление 1–2 кПа;
- диаметр 700 мм, высота 3 м.

Коэффициент сопротивления, отнесенный к сечению корпуса циклона,  $\zeta_{\text{ц}} = 1100$ .

Состав и свойства дизельного топлива приведены в табл. 10-18.

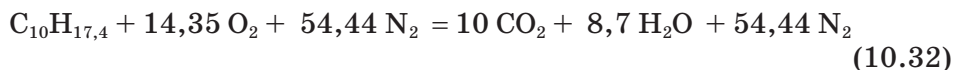
Таблица 10-18

Свойства и состав дизельного топлива (ДТ)

№ п/п	Наименование параметра
1	Состав ДТ: $\text{C}_9\text{H}_{20} \approx 20\%$ $\text{C}_{10}\text{H}_{22} \approx 80\%$ $\text{C} - 87\%$ , $\text{H} - 12,6\%$ , $\text{O} - 0,004\%$ , $\text{S} - 0,2-0,5\%$
2	Средняя молярная масса 120–230 кг/кмоль
3	Плотность при 20 °С и 760 мм. рт. ст. — 840–860 кг/м³
4	Теплоемкость (от 20 до 100 °С) — 2050 кДж/(кг·К)
5	Низшая теплота сгорания — 42 700 кДж/кг

Дизельное топливо состоит из набора определенных химических элементов: парафиновых углеводородов (10–40 %), нафтеновых углеводородов (20–60 %); ароматических углеводородов (15–30 %). Для состава, указанного в таблице, базовая формула будет  $C_{10}H_{17,4}$ .

Уравнение реакции горения выглядит следующим образом:



$$137,4 \text{ кг} + 459,2 \text{ кг} + 1524,3 \text{ кг} = 440 \text{ кг} + 156,6 \text{ кг} + 1524,3 \text{ кг}; \quad (10.32a)$$

$$1,0 \text{ кг} + 3,3 \text{ кг} + 11,1 \text{ кг} = 3,2 \text{ кг} + 1,1 \text{ кг} + 11,1 \text{ кг}. \quad (10.32b)$$

В уравнение реакции записан азот для удобства расчета. Воздух содержит 23,15 % масс. кислорода и 76,85 % масс. азота и других инертных газов. Записывая молекулярный вес каждого из компонентов (10.32a), определяем количество продуктов горения (10.32b) на 1 кг углеводородов. Таким образом, при сгорании 1 кг дизельного топлива образуется:

- 3,2 кг углекислого газа;
- 1,1 кг водяного пара;
- 11,1 кг азота и других газов.

Из строки (10.32b) можно определить массу воздуха  $g_v$ , теоретически необходимую для сгорания 1 кг дизельного топлива (ДТ):

$$g_v = 3,3 \text{ кг} + 11,1 \text{ кг} = 14,4 \text{ кг}, \quad (10.33)$$

и количество дымовых газов  $g_{д.г.}$ , образующихся при сгорании 1 кг топлива:

$$g_{д.г.} = 3,2 + 11,1 \text{ кг} = 14,3 \text{ кг (без учета паров воды)}. \quad (10.34)$$

Влагосодержание дымовых газов рассчитывается на абсолютно сухое количество дымовых газов:

$$x_{д.г.} = 1,1 / 14,3 = 0,080 \text{ кг/кг}, \quad (10.35)$$

где  $x_{д.г.}$  — влагосодержание дымовых газов, кг  $H_2O$ /(кг дымовых газов).

Принимая во внимание, что физические свойства разбавленных воздухом дымовых газов близки свойствам чистого воздуха, для расчета сушки будем пользоваться диаграммой Рамзина для влажного воздуха.

Следовательно, принимаем:

$$\text{кг H}_2\text{O}/(\text{кг сух. дым. газов}) \sim \text{кг H}_2\text{O}/(\text{кг абс. сух. воздуха}).$$

Расчет температуры смеси дымовых газов с воздухом  $t_r$  на входе в сушильный барабан выполняем так же, как описано в подразделе 10.1 (с. 216).

Т а б л и ц а 10-19

Тепловой баланс сгорания 1 кг дизельного топлива (ДТ), кДж/кг

Приход тепла	
Теплосодержание ДТ	$c_{д.т} \cdot t_{д.т0}$
Теплосодержание исходного воздуха	$\alpha g_v [(c_v + c_{пx_0}) t_0 + r x_0]$
Теплота сгорания ДТ	$q_{д.т}$
Расход тепла	
Теплосодержание дымовых газов	$g_{д.г} [(c_v + c_{п(x_0 + x_r)}) t_r + r(x_0 + x_{д.г})]$
Теплосодержание нагретого воздуха	$(\alpha - 1) g_v [(c_v + c_{пx_0}) t_r + r x_0]$

где  $c_{д.т}$ ,  $c_v$ ,  $c_{п}$  — теплоемкость ДТ, сухого воздуха и водяного пара,  $c_{д.т} = 2,05$  кДж/(кг·К),  $c_v = 1,005$  кДж/(кг·К),  $c_{п} = 1,97$  кДж/(кг·К);  $r$  — теплота испарения воды при атмосферном давлении,  $r = 2493$  кДж/кг;  $g_{д.г}$  — количество дымовых газов, получающихся при сгорании 1 кг ДТ;  $g_{д.г} = 14,3$  кг/кг;  $g_v$  — количество воздуха, необходимого для сгорания 1 кг ДТ,  $g_v = 14,4$  кг/кг;  $t_0$ ,  $t_r$  — исходная температура воздуха и конечная температура смеси дымовых газов с воздухом после сжигания ДТ, °С;  $t_{д.т0}$  — исходная температура ДТ, °С;  $q_{д.т}$  — низшая теплота сгорания ДТ,  $q_{д.т} = 42\,700$  кДж/кг.

Теплофизические свойства воздуха и дымовых газов близки, поэтому теплоемкость сухих дымовых газов равна теплоемкости сухого воздуха.

Пренебрегая потерями тепла, записываем уравнение теплового баланса:

$$\begin{aligned}
 c_{д.т} t_{д.т0} + \alpha g_v [(c_v + c_{пx_0}) t_0 + r x_0] + q_{д.т} = \\
 = (\alpha - 1) g_v [(c_v + c_{пx_0}) t_r + r x_0] + \\
 + g_{д.г} [(c_v + c_{п(x_0 + x_{д.г})}) t_r + r(x_0 + x_{д.г})].
 \end{aligned}
 \tag{10.36}$$

Примем температуру ДТ равной температуре воздуха  $t_{д.т0} = t_0$ .

Для упрощения введем обозначения

$$A = c_{д.т} t_0 + \alpha g_{в} (c_{в} + c_{п} x_0) t_0 + q_{д.т}$$

$$B = g_{в} r x_0 - g_{д.г} r (x_0 + x_{д.г})$$

Решая уравнение теплового баланса (10.30) относительно  $t_r$  определяем температуру дымовых газов на входе в сушильный барабан:

$$t_r = \frac{A + B}{(\alpha - 1) g_{в} (c_{в} + c_{п} x_0) + g_{д.г} (c_{в} + c_{п} (x_0 + x_{д.г}))}. \quad (10.37)$$

Коэффициент избытка воздуха определяется количеством воздуха, подаваемого в горелку, и подсосом свежего воздуха через выгрузочный люк.

Расход воздуха  $V_1$  через выгрузочный люк можно оценить по разрежению  $p_1$  в сушильном барабане вблизи люка (точка 1 на рис. 106):

$$\Delta p'_1 = p_0 - p_1 = \zeta_1 \frac{\rho w_1^2}{2}, \quad V_1 = w_1 B H, \quad (10.38)$$

где  $BH$  — сечение люка  $0,24 \times 0,12$  м;  $\zeta_1$  — коэффициент гидравлического сопротивления при входе в разгрузочный бункер сушилки, имеющий диаметр 860 мм (см. рис. 106, с. 250). По справочнику<sup>1</sup> коэффициент сопротивления входа в бункер  $\zeta_1 = 2,5-4,5$ .

Холодный воздух, поступающий через выгрузочный люк, охлаждает высушенный материал и разбавляет дымовые газы горелки до необходимой температуры, которую нам необходимо определить.

Разрежение  $p_1$  в сушильном барабане в месте разгрузочного люка можно определить по гидравлическому сопротивлению всего сушильного тракта, состоящего из сушильного барабана, газоходов и циклона, расчет приведен в таблице (10-20).

Примем разрежение на всасе вентилятора  $p_3 = 1,6$  кПа с последующим уточнением. Этому разрежению на характеристике вентилятора (рис. 107, с. 251) соответствует точка А с расходом  $2640$  м<sup>3</sup>/ч ( $0,73$  кг/с). Зная расход и температуру, определим потери давления в циклоне и газоходах  $\Delta p_3 = p_3 - p_2$  и, соответственно, разрежение  $p_2$  в бункере загрузки материала (точка 2 на рис. 106):

$$\Delta p_2 = p_2 - p_3 = \zeta_{ц} \frac{\rho w_{ц}^2}{2} + \lambda \frac{L}{d} \frac{\rho w^2}{2} + \zeta_{мс} \frac{\rho w^2}{2}, \quad (10.39)$$

где коэффициент сопротивления, отнесенный к сечению корпуса циклона  $\zeta_{ц} = 1100$ , коэффициент трения  $\lambda = 0,019$ , сумма коэффициентов местных сопротивлений  $\zeta_{мс} = 0,33$ .

Получаем в точке 2 разрежение  $0,326$  кПа (см. табл. 10-20).

<sup>1</sup> *Идельчик И. Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992. 672 с. (С. 118).

Таблица 10-20

## Расчет гидравлического сопротивления сушильной установки

№ п/п	Наименование	Разм.	Значение
1	Напор вентилятора (точка 1)	кПа	1,600
2	Расход дымовых газов	кг/с	0,73
3	Расход дымовых газов	м³/с	0,73
4	Расход дымовых газов	м³/ч	2643
5	Температура дымовых газов	°С	80
6	Плотность дымовых газов	кг/м³	1,00
<b>Циклон, газоходы</b>			
1	Потери давления в циклоне	кПа	1,17
2	Скорость в циклоне	м/с	1,46
3	Коэффициент сопротивления циклона		1100
4	Разрежение перед циклоном	кПа	0,429
5	Потери давления в газоходах	кПа	0,103
6	Скорость в газоходах	м/с	14,96
7	Коэффициент трения		0,019
8	Коэффициент м. с. (повороты)		0,330
9	Разрежение после барабана (2)	кПа	0,326
<b>Загрузочный бункер</b>			
1	Подсос воздуха в загрузочном бункере	м³/с	0,09
2	Скорость воздуха в загрузке	м/с	3,00
3	Перепад давления загрузки		0,326
4	Расход дымовых газов в барабане	кг/с	0,621
<b>Сушильный барабан</b>			
1	Потери давления в барабане	кПа	0,041
2	Скорость в барабане	м/с	3,02
3	Температура газов в барабане	°С	415
4	Плотность газов в барабане	кг/м³	0,51
5	Разрежение на входе в барабан	кПа	0,285
<b>Разгрузочный бункер</b>			
1	Подсос воздуха в разгрузочном бункере	м³/с	0,377
2	Скорость воздуха в разгрузке	м/с	13,07
3	Перепад давления разгрузки		0,285
4	Температура воздуха	°С	12
5	Плотность воздуха	кг/м³	1,24
6	Коэффициент сопротивления разгрузки		2,7
7	Расход дымовых газов горелки	кг/с	0,156
8	Расход дымовых газов в барабане	кг/с	0,621
9	Коэффициент избытка воздуха		3,5

Загрузка материала в барабан происходит через загрузочную воронку, которая должна обеспечивать герметичность и предотвращать поступление холодного воздуха в систему газоходов. Однако на существующей сушилке было замечено поступление некоторого количества холодного воздуха в загрузочный бункер (оценочно 300–400 м³/ч).

Расчет гидравлического сопротивления сушильного барабана вызывает некоторые затруднения. В литературе нет расчетных зависимостей по потерям давления в барабане. Потеря давления в барабане зависит от скорости теплоносителя, его температуры, свойств пересыпаемого на лопастях материала, геометрических размеров насадки, длины и диаметра барабана. Сопротивление барабана небольшое и составляет примерно 100–200 Па для промышленных сушилок длиной 10–20 м.

Для нашего случая (длина барабана  $L = 3200$  мм, скорость  $w = 3$  м/с) расчет потерь давления в барабане дал ориентировочное значение  $\Delta p_1 = 35\text{--}45$  Па. Получаем разрежение в разгрузочной части барабана (перед горелкой), которое составило  $p_1 = 0,285$  кПа.

Расход дымовых газов дизельной горелки, потребляющей 34 кг/ч ДТ, составляет  $34 \cdot 14,3 \cdot 1,15 = 600$  кг/ч, где 14,3 кг — количество дымовых газов, которое получается при сгорании 1 кг ДТ, 1,15 — коэффициент избытка воздуха, поступающего на горелку. Расход холодного воздуха, поступающего через разгрузочный люк, рассчитанный по формуле (10.38), составил 0,377 м³/с (0,465 кг/с); коэффициент избытка воздуха для сушильного барабана составил 3,5.

Совмещая тепловой, материальный расчет сушильного барабана (табл. 10-21, 10-22) с гидравлическим расчетом (см. табл. 10-20), получаем производительность сушилки при заданной частоте вращения рабочего колеса вентилятора  $n = 1810$  об/мин (табл. 10-23, вариант 0). Затем расчет был выполнен для других исходных данных.

Таблица 10-21

## Расчет влагосодержания и температуры дымовых газов

№	Наименование параметра	Размерность	Значение	Примечание
<i>Исходные данные</i>				
1	Коэффициент избытка воздуха, $\alpha$		3,50	
2	Влагосодержание воздуха, $x_0$	кг/кг	0,007	
3	Температура воздуха, $t_0$	°С	12,0	
4	Температура дизельного топлива, $t_{д.т}$	°С	12,0	
<i>Константы</i>				
5	Низшая теплота сгорания газа, $q_{д.т}$	кДж/кг	42700	
6	Теплоемкость воздуха, $c_v$	кДж/кг·°С	1,005	
7	Теплоемкость жидкого ДТ, $c_{д.т}$	кДж/кг·°С	2,05	
8	Теплоемкость водяного пара, $c_n$	кДж/кг·°С	1,97	

Окончание табл. 10-21

№	Наименование параметра	Размерность	Значение	Примечание
9	Теплота парообразования воды, $r$	кДж/кг	2493	при 0 °С
10	Теор. расход воздуха на горение, $g_v$	кг/кг	14,40	на 1 кг ДТ
11	Теор. расход дымовых газов, $g_r$	кг/кг	14,30	
12	Влагосодержание дымовых газов, $x_{д.г}$	кг/кг	0,080	
13	Плотность воздуха, $\rho_v$	кг/м <sup>3</sup>	1,239	при 0 °С
14	Плотность ДТ, $\rho_{д.т}$	кг/м <sup>3</sup>	860	при 0 °С
<b>Расчет</b>				
<i>а) теоретическая сушилка</i>				
15	Температура дымовых газов, $t_1$	°С	725	
16	Влагосодержание нач. дымовых газов, $x_1$	кг/кг	0,030	
17	Энтальпия воздуха, $I_0$	кДж/кг	29,7	
18	Энтальпия смеси дым. газов, нач $I_1$	кДж/кг	818,7	
19	Температура дым. газов конечная, $t_2$	°С	130	
20	Энтальпия смеси дым. газов, нач $I_1$	кДж/кг	845,7	
21	Влагосодерж. дым. газов конечное, $x_2$	кг/кг	0,260	
22	Уд. расход дым. газов, $l = 1/(x_2 - x_1)$	кг/кг	4,34	
23	Уд. расход тепла, $q_t = l(I_1 - I_0)$	кДж/кг	3544	
24	Удельный расход ДТ, $g_{д.т}$	кг/кг	0,083	
25	К.п.д. теоретич. сушилки	%	67	
<i>б) реальная сушилка</i>				
26	Уд. потери тепла, $\Delta = q_m + q_n - c \cdot t_{м.н}$	кДж/кг	1846	
27	Уд. потери тепла, $q_m = G_k/W \cdot c_m \cdot (t_{м.к} - t_{м.н})$	кДж/кг	1455	
31	Уд. потери тепла, $q_n = Q_{пот}/W$	кДж/кг	442	
32	Энтальпия дым. газов, конечная, $I_2$	кДж/кг	591	
33	Влагосодерж. дым. газов конечное, $x_2$	кг/кг	0,168	
35	Уд. расход воздуха, $l = 1/(x_2 - x_1)$	кг/кг	7,26	
36	Уд. расход тепла, $q = l(I_1 - I_0)$	кДж/кг	5924	
37	Удельный расход газа, $g_r$	кг/кг	0,139	
38	К.п.д. сушилки	%	40	

Таблица 10-22

## Расчет барабанной сушилки

№	Наименование параметра	Размерность	Значение	Размерность	Значение
<i>а) теоретическая сушилка</i>					
1	Расход сушильного агента, $L = l \cdot W$	кг/с	0,29	кг/ч	1045
2	Расход тепла, $Q = L(I_1 - I_0)$	кВт	237		
3	Расход ДТ, $G_{д.т} = Q/q$	кг/с	0,006	кг/ч	20,0
4	Низшая теплота сгорания газа, $q_r$	кДж/кг	42 700		



Окончание табл. 10-22

№	Наименование параметра	Размер- ность	Значе- ние	Размер- ность	Значе- ние
<i>б) реальная сушилка</i>					
5	Потери тепла в окр. среду $Q_n = \alpha_0 F (t_6 - t_c)$	кВт	30		
6	Уд. потери тепла в окр. среду, $q_n = Q_n/W$	кДж/кг	453		
7	Диаметр барабана	м	0,8		
8	Длина барабана (с бункерами)	м	4,5		
9	Поверхность барабана, $F$	м <sup>2</sup>	11,3		
10	Коэффициент теплоотдачи окр. среды $\alpha_0$	Вт/(м <sup>2</sup> · К)	19,4		
11	Температура барабана	°С	150		
12	Температура окружающей среды	°С	12		
13	Потери тепла м-л, $Q_m = G_m c_m (\theta_{mk} - \theta_{mn})$	кВт	97		
14	Уд. потери тепла, $q_m = Q_m/W$	кДж/кг	1455		
15	Теплоемкость материала, $c_m$	кДж/кг°С	0,9		
16	Температура материала конечная, $\theta_{mk}$	°С	110		
17	Температура материала начальная, $\theta_{mn}$	°С	12		
18	Расход суш. агента, $L = l W$	кг/с	0,49	кг/ч	1780
19	Расход тепла, $Q = q W$	кВт	403		
20	Расход ДТ, $G_{д.т} = Q/q_{д.т}$	кг/с	0,009	кг/ч	34,0
21	Расход ДТ на тонну сухого м-ла, $G_{д.т}/G_k$	кг/т	8,6		
22	Расход воздуха, $G_v = \alpha g_v G_{д.т} (1 + x_0)$	кг/с	0,50	кг/ч	1812
23	Расход дым газов, $G_2 = L (1 + x_2)$	кг/с	0,58	кг/ч	2073
24	Объемн расход дым газов, $V = G_2/\rho_2$ при $t_2$	м <sup>3</sup> /с	0,66	м <sup>3</sup> /ч	2364
25	Молекулярная масса дым газов, $M_v$	кг/кмоль	29,00		
26	Плотность дым газов, $\rho_2$	кг/м <sup>3</sup>	0,877		
27	Температура дым газов, $t_2$	°С	130		

В табл. 10-23 даны варианты расчета сушильной установки по изложенной методике:

- вариант 0 — описанный выше, начальная влажность 6 %;
- вариант 1 — начальная влажность 6 %, отсутствует подсос воздуха в загрузке, установлена теплоизоляция на барабане 20 мм (минеральный мат);
- вариант 2 — вариант 0, увеличена частота вращения рабочего колеса вентилятора до 2030 об/мин.
- вариант 3 — вариант 0 при начальной влажности 10 %.

Таким образом, по результатам расчета можно установить, что при теплоизоляции барабана и герметизации загрузки (вариант 1) производи-

Таблица 10-23

## Результаты расчета барабанной сушилки

№	Наименование	Вар 0	Вар 1	Вар 2	Вар 3
1	Влажность начальная, %	6,0	6,0	6,0	10,0
2	Расход ДТ, кг/ч кг/т	34 8,37	34 7,74	34 8,58	34 11,33
3	Производительность • по конечному материалу, кг/ч • по испаренной влаге, кг/ч	3967 241	4394 266	3963 240	3000 291
4	Влагонапряженность, кг/(м <sup>3</sup> ·ч)	151	165	149	181
5	Потери тепла через кожух, кВт	30	7	30	30
6	Коэффициент избытка воздуха	3,5	3,5	3,8	3,4
7	Температура теплоносителя нач., °С	725	727	665	741
8	Поступление холодного воздуха через загрузку (подсос)*, м <sup>3</sup> /ч	324	0	324	324
9	Расход дымовых газов**, м <sup>3</sup> /ч	2326	2387	2560	2374
10	Разрежение на вентиляторе, кПа	1,6	1,3	2,0	1,6
11	Частота вращения колеса, об/мин	1810	1600	2010	1810
12	Расход на вентиляторе***, м <sup>3</sup> /ч	2643	2290	2924	2642

\* При 12 °С.

\*\* При 130 °С по тепловому расчету.

\*\*\* При 80 °С с учетом подсосов по гидравлическому расчету.

тельность сушилки увеличится на 8 %, а вентилятор будет работать при меньшей частоте 1600 об/мин (см. рис. 107) (экономия электроэнергии).

При увеличении частоты вращения рабочего колеса вентилятора (вариант 2), наоборот, производительность сушилки падает, а расход электроэнергии возрастает.

При увеличении начальной влажности либо снизится производительность сушилки, либо при неизменном расходе влажного материала возрастет влажность продукции.

Обычно процесс сушки регулируется по температуре отходящих газов. Однако в данном случае есть смысл осуществлять регулировку процесса также и по разрежению на вытяжном вентиляторе. В результате расчетов и испытаний сушильной установки были отработаны режимы сушки и найден оптимальный режим, который характеризует наибольшую производительность при минимальных расходах топлива и электроэнергии.

Удельный расход ДТ на тонну песка при его начальной влажности 6 % (вариант 0) составит 8,4 кг/т, что в рублевом эквиваленте 2020 года составит 390 руб./т. При теплоизоляции барабана снизятся потери тепла, и расход ДТ составит 7,7 кг/т.

Расход электроэнергии определяется суммой энергопотребляющего оборудования:

- вентилятор, установленная мощность 11 кВт, потребляемая — 3 кВт (см. рис. 107, с. 251);
- горелка дизельная, потребляемая мощность 0,37 кВт;
- вибропитатель 2,2 кВт, потребляемая — 1,5 кВт;
- двигатель ленточного конвейера 5,5 кВт, потребляемая — 4,5 кВт.

Итого установленная мощность оборудования составит 19 кВт, потребляемая — 9,4 кВт.

Удельный расход электроэнергии на тонну песка составит 2,4 кВт·ч/т.

Расчет и испытания данного сушильного агрегата позволили выявить следующие недостатки сушилки:

1. Длина барабана недостаточна для эффективной сушки песка, о чем свидетельствует высокая температура отходящих дымовых газов. Оптимальная рекомендованная длина составит 5,6 м ( $L/D = 7$ ).

2. В результате противоточного движения теплоносителя и материала высушенный песок имеет высокую температуру (100–130 °С). При прямоточном движении фаз температура может быть снижена.

3. Герметизация узлов загрузки и выгрузки позволит регулировать температуру на входе в сушильный барабан, а также снизить нагрузку на вентилятор.

4. Сушильный барабан не теплоизолирован. Потери тепла через кожух составит 30 кВт; теплоизоляция барабана и бункеров сушилки позволит снизить потери более чем в 3 раза.

5. Для удаления дымовых газов можно использовать вентилятор меньшей мощности, например ВЦП 7-40-4, напор 2,79–1,65 кПа, производительность 2,5–6,2 тыс. м<sup>3</sup>/ч, 5,5 кВт, 3000 об/мин.

Расчет показывает, что если использовать барабан большей длины, а кожух барабана теплоизолировать, то производительность сушилки возрастет до 4,6 т/ч, а удельный расход топлива снизится до 7,4 кг/т.

Таким образом, работающий сушильный агрегат характеризуется неэкономичностью как по расходу топлива, так и по потреблению электроэнергии.

Если выполнить перечисленные выше мероприятия (что невозможно на действующей установке), можно снизить расход ДТ на 10–15 %.

В табл. 10-24 приведен сравнительный анализ затрат на топливо для сушки песка с влажностью 6 % в прямоточном барабане диаметром 800 мм, длиной 5,6 м, выполненным с надлежащей теплоизоляцией.

Из таблицы видно, что наиболее экономичным видом топлива является природный газ. Стоимость затрат на сушку с использованием дизельной горелки в 5–6 раз больше.

Перспективным видом топлива для сушилок небольшой производительности являются древесные пеллеты. Как следует из таблицы, стоимость сушки пеллетами в 3 раза больше, чем природным газом, но в 2 раза меньше, чем дизельным топливом. Стоимость котла для сжигания пеллет несколько больше, чем стоимость дизельной горелки, однако затраты на приобретение котла окупаются меньшей стоимостью топлива. Немаловажным преимуществом пеллетного котла является его экологичность.

Таблица 10-24

## Затраты топлива на сушку

Наименование топлива	Цена	Теплота сгорания	Удельный расход	Стоимость
	руб./кг	МДж/кг	кг/т	руб./т
Дизельное топливо	46,5	42,7	7,4	343
Природный газ	9,5	48,0	6,6	62
Древесные пеллеты	10,0	17,0	18,5	185

## 10.5.

### РАСЧЕТ СУШИЛКИ ВЗВЕШЕННОГО СЛОЯ С ПОДОГРЕВОМ ВОЗДУХА ВНУТРИ СУШИЛЬНОЙ КАМЕРЫ. ОБОГРЕВ ГРЕЮЩИМ ПАРОМ

На крупных предприятиях вырабатывается греющий пар, имеющий давление 0,6–1,0 МПа (6–10 кгс/см<sup>2</sup>). В сушильной практике пар используют для нагрева воздуха в различных схемах конвективной сушки, а также в сушилках контактного типа.

Рассмотрим процесс сушки пищевой поваренной соли (хлорида натрия) в секционированной конвективной сушилке кипящего слоя.

Разрабатываемая схема участка сушки поваренной соли включает в себя оборудование для кристаллизации, сушки, транспортировки соли, классификацию соли, газоочистное оборудование, систему контроля и автоматизацию процесса.

Проект участка должен выполняться в составе общего проекта производства поваренной соли, состоящего из следующих пределов:

- выпарка рассола с кристаллизацией соли;
- отделение соли на центрифугах;
- сушка соли в сушилке кипящего слоя;
- рассев соли на фракции;
- упаковка соли.

Для сушки пищевой соли используется чистый воздух, нагретый в теплообменнике-калорифере до температуры 150–170 °С греющим

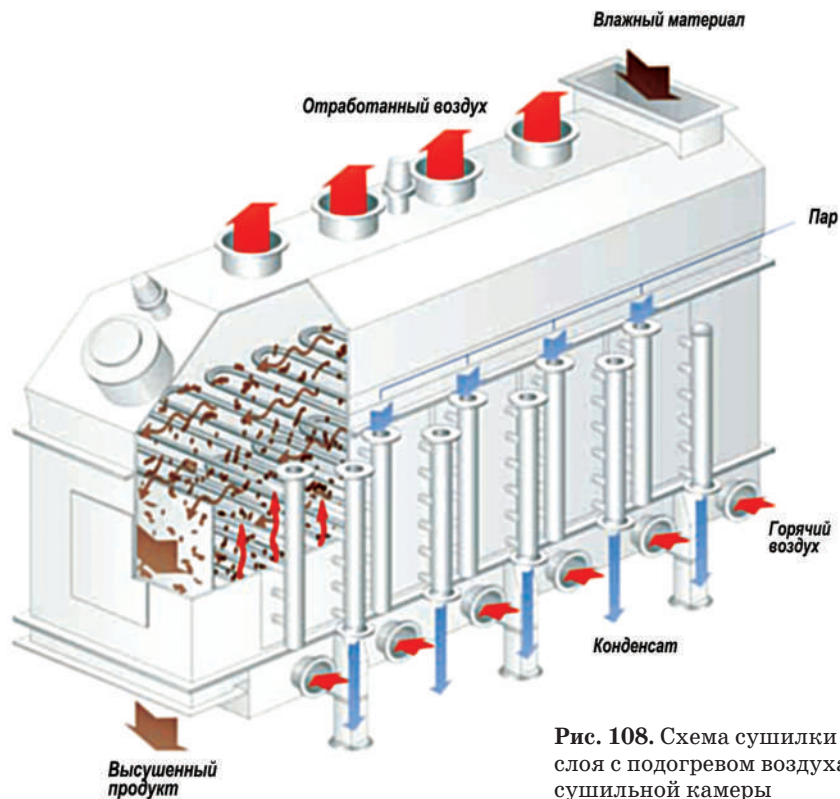


Рис. 108. Схема сушилки взвешенного слоя с подогревом воздуха внутри сушильной камеры

паром, имеющим избыточное давление 0,8 МПа. Схема сушики представлена на рис. 69 (с. 146).

При сушке материалов температура воздуха в кипящем слое быстро снижается; следовательно, снижается движущая сила процесса сушки. Для повышения температуры воздуха в слое устанавливают дополнительные теплообменные поверхности в виде труб, обогреваемых внутри паром. Общий вид такой сушилки представлен на рис. 108. При дополнительном нагреве воздуха греющим паром через теплообменные поверхности температура воздуха в слое повышается и скорость сушки увеличивается. Такая организация процесса позволяет поддерживать температуру воздуха внутри слоя на уровне 120–130 °С, что достаточно для сушки влажного материала на решетке. Температура воздуха на выходе из слоя равна 100–110 °С.

#### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Расчет участка выполнен для следующих исходных данных:

- Производительность по сухому продукту — 25 т/ч, с запасом по производительности до 30,0 т/ч (180–250 тыс. т в год).

- Влажность исходного материала, поступающего в сушилку, 2,5 %.
- Влажность конечного продукта  $\leq 0,1\%$ .
- Дисперсный состав кристаллической соли после центрифуги:

Фракция, мм	> 1,0	1–0,63	0,63–0,4	0,4–0,315	0,315–0,2	0,2–0,16	0,16–0,063	< 0,063
Содержание, %	0,0	15,66	40,30	27,39	14,54	1,29	0,61	0,2

- Насыпной вес сухого материала 1045–1100 кг/м<sup>3</sup>.
- Теплоноситель — насыщенный греющий пар с избыточным давлением 0,8 МПа, температура 174,5 °С, влажность не более 1 %.
- Запыленность отходящих газов — не более 0,5 мг/м<sup>3</sup>.
- Режим работы — круглосуточный, 24 ч в сутки, 350 дней в году.

Расчет сушилки кипящего слоя аналогичен описанному в подразделе 10.3 лишь с той разницей, что при нагревании воздуха в калорифере его влагосодержание остается постоянным:  $x_1 = x_0$ .

Для нагревания воздуха перед сушилкой устанавливают паровые калориферы с оребренными трубами. Расчет таких теплообменников подробно описан в учебной литературе [7].

Внутри сушильной камеры над решеткой устанавливают теплообменные трубы без оребрения. Расчет количества дополнительно подводимого тепла в сушильной камере выполняют по уравнению теплопередачи  $Q_{\text{доп}} = KF(t_{\text{гр.п}} - t_{\text{сл}})$ , принимая среднюю температуру во взвешенном слое  $t_{\text{сл}} = (t_{\text{н}} + t_{\text{к}})/2$ . Поверхность теплопередачи  $F$  определяют исходя из геометрических размеров сушильной камеры и высоты взвешенного слоя. Коэффициент теплопередачи  $K$  рассчитывают по известным формулам для коэффициентов теплоотдачи [1, 2, 4–7].

В уравнение внутреннего баланса сушильной камеры добавляется дополнительное слагаемое  $q_{\text{доп}} = Q_{\text{доп}} / W$ , характеризующее нагрев воздуха в сушильной камере:

$$\Delta = c_{\text{в}}\theta_{\text{н}} - q_{\text{м}} - q_{\text{пот}} + q_{\text{доп}}. \quad (4.16)$$

В результате расчета получаем сушилку, состоящую из шести секций сушки. После сушки температура продукта равна 100 °С. Секцию охлаждения можно исключить, поскольку в процессе транспортировки и рассева на фракции продукт охлаждается воздухом вытяжной вентиляции.

Результаты расчета сушильной установки приведены в табл. 10-25.

Таким образом, сушка соли характеризуется следующими параметрами:

- удельный расход греющего пара 64 кг/т;
- удельный расход электроэнергии 2,6 кВт·ч/т.

Для очистки отработанного воздуха от остаточной пыли после циклонов целесообразно использовать скруббер, поскольку оборотная вода после скруббера может быть направлена на выпарку.

Таблица 10-25

Наименование	Значение
Расход влажного материала с влажностью 2,5 %, т/ч	30,7
Количество удаленной влаги, т/ч	0,7
Расход высушенного материала с влажностью 0,1 %, т/ч	30,0
Температура нагретого в газовом подогревателе воздуха, °С	155
Температура отходящих газов после сушки, °С	105
Расход греющего пара, кг/ч, всего	1920
В том числе:	
• в основном калорифере	1400
• в нагревательных элементах внутри сушильной камеры	520
Поверхность теплопередачи парового калорифера, м <sup>2</sup>	388
Удельный расход греющего пара, кг/т	64
Установленная мощность электрооборудования, кВт	110
Расход отработанного воздуха, тыс. м <sup>3</sup> /ч (при 105 °С)	21,2
Размеры сушильного аппарата:	
• сечение распределительной решетки, м <sup>2</sup>	18
• высота, м	2,8

### 10.6. РАСЧЕТ СУШИЛКИ С КИПАЮЩИМ СЛОЕМ ИНЕРТНОГО МАТЕРИАЛА НА ГАЗОВОМ ТОПЛИВЕ ДЛЯ СУШКИ ПЛАСТИФИКАТОРА

Преимущества сушки на взвешенном слое инертного материала описаны в главе 7.3 (с. 140). На взвешенном слое инерта происходят одновременно сушка и измельчение материала. Сушке подвергают растворы и суспензии, которые подают в сушильную камеру на взвешенный слой через форсунки. Сушильный аппарат работает на полный пылевынос.

В данном примере приведен расчет процесса сушки пластификатора для бетонов, который получается полимеризацией метиленафталинсульфокислоты.

Упрощенная схема представлена на рис. 109. Раствор пластификатора, полученного нейтрализацией полиметиленафталинсульфокислоты, поступает в расходную емкость 1.

Из расходной емкости нагретый до температуры 85–90 °С раствор пластификатора насосом 2 через форсунки подается в сушилку 3 кипящего слоя (КС). В сушилке во взвешенном состоянии в потоке горячих



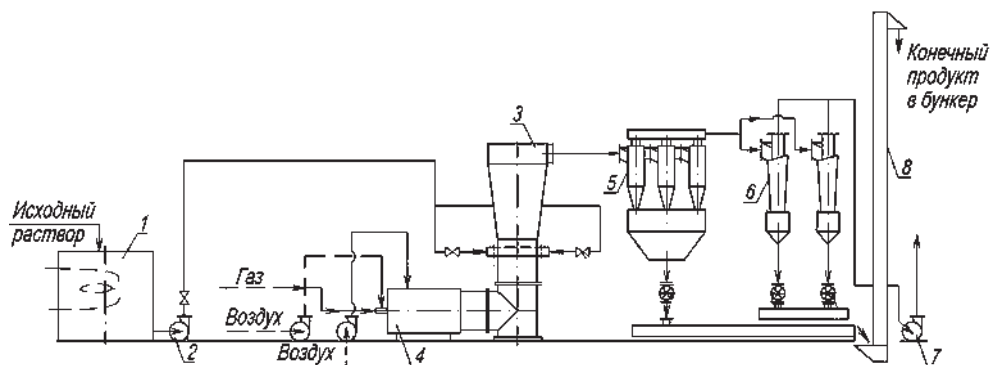


Рис. 109. Технологическая схема сушильной установки:

1 — емкость исходного раствора; 2 — насос; 3 — сушилка; 4 — топка; 5, 6 — циклоны; 7 — дымосос; 8 — элеватор

дымовых газов находится инертный слой — фторопластовые кубики размером  $6 \times 6 \times 6$  мм. Раствор, осаждаясь на поверхности инертного слоя, высыхает; чешуйки сухого материала отделяются от поверхности фторопласта и уносятся потоком дымовых газов.

Дымовые газы образуются при сжигании природного газа в горелке и поступают в топку 4, где разбавляются воздухом до необходимой температуры. Верхний предел температуры определяется свойствами продукта.

Высушенный материал потоком дымовых газов выносится в циклоны 5 и 6, где осаждается большая часть продукта; очищенные от пыли дымовые газы вентилятором-дымососом 7 сбрасываются в атмосферу. Готовая продукция элеватором 8 направляется в бункеры и далее на затаривание в МКР.

Сушилка КС представляет из себя цилиндроконический аппарат высотой 8,6 м с решеткой диаметром 1500 мм. Диаметр отверстий провальной решетки составляет 10 мм. Аппарат не теплоизолирован, расположен в цехе; окружающая среда имеет температуру в непосредственной близости от сушильного аппарата  $48^\circ\text{C}$ ; температура кожуха аппарата  $84^\circ\text{C}$ .

Требуется выполнить расчет и дать предложения по увеличению производительности сушильной установки.

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Реальные показатели работы сушильной установки:

- начальная влажность раствора ..... 48–49,5 %
- конечная влажность высушенного продукта ..... 7,6–7,8 %
- расход по исходному раствору ..... 3,8–4,4 т/ч
- производительность по конечному продукту ..... 1,9–2,3 т/ч

- производительность по испаряемой влаге..... 1,6–1,8 т/ч
- температура исходного раствора..... 88–90 °С
- температура топочных газов ..... 220 °С
- температура газов на выходе из сушилки ..... 115–117 °С

Скорость сушки и, соответственно, ее производительность определяются уравнением

$$W \approx KF(T_{\text{сл}} - t_{\text{м}}),$$

где  $K$  — коэффициент скорости сушки;  $F$  — поверхность инертного носителя,  $\text{м}^2$ ;  $T_{\text{сл}}$  — температура сушильного агента в слое, К;  $t_{\text{м}}$  — температура испарения влаги из материала, К, которая равна температуре мокрого термометра.

Коэффициент скорости сушки, в свою очередь, зависит от скорости, температуры и других свойств сушильного агента.

Повысить производительность сушилки по испаренной влаге  $W$  можно, изменяя следующие параметры:

1. Увеличить температуру сушильного агента, что, соответственно, повысит температуру в слое  $T_{\text{сл}}$ .
2. Увеличить расход сушильного агента (дымовых газов).
3. Повысить качество распыла на форсунках, что позволит равномерно распределить материал на поверхности инертного слоя. Поставить дополнительные форсунки.
4. Увеличить массу инертного слоя, что увеличит поверхность слоя  $F$ .
5. Уменьшить размер частиц инертного слоя, что позволит увеличить поверхность  $F$  инертного слоя. Заменить материал частиц инертного слоя.
6. Увеличить температуру исходного раствора.
7. Уменьшить влажность исходного раствора.

Поскольку по влажности исходного раствора достигнута предельная концентрация, то увеличение производительности сушилки возможно лишь за счет изменения основных параметров сушильного агента (дымовых газов), инертного слоя и условий подачи исходного раствора.

Несомненно, изменение указанных параметров имеет определенные ограничения и влияет на работу другого оборудования (циклоны, вентиляторы, дымосос).

Для выявления влияния указанных параметров на работу сушилки был выполнен расчет процесса сушки по методике, приведенной в примерах 10.1–10.4.

Первоначально был выполнен расчет исходного варианта сушки по данным, представленным заказчиком (технологическая карта, результаты замеров).

Результат расчета исходного варианта сушки приведены в табл. 10-26, см. вариант 2017.

Таблица 10-26

## Результаты расчета вариантов сушки

№ пп	Наименование	Ед. изм.	Вар. 2017 КС-1	Вар. 2018 КС-1	Вар. 2018 КС-2
1	Расход исходного раствора	т/ч	3,653	4,853	4,816
2	Расход конечного продукта	т/ч	2,060	2,640	2,626
3	Расход испаренной влаги	т/ч	1,593	2,213	2,190
4	Влажность исходного раствора	%	48,0	49,4	49,5
5	Влажность конечного продукта	%	7,8	7,0	7,4
6	Температура под решеткой	°С	220	233	234
7	Температура над слоем	°С	115	106	105
8	Температура исходного раствора	°С	88	90	90
9	Расход тепла	кВт	2444	2958	2891
10	Расход газа (20 °С, 760 мм. рт. ст.)	м³/ч	280	311	286
11	Расход воздуха	кг/ч	34 453	39 233	39 544
12	Объемный расход дымовых газов*	м³/ч	40 357	47 329	46 403

\* Расход дан при температуре отходящих газов над слоем инерта

Таким образом, при заданных условиях сушки для исходного варианта расчетным путем получают производительность сушилки по испаренной влаге 1,59 т/ч, расход газа 280 м³/ч, что совпадает с результатами замеров на промышленной сушилке.

Далее в расчете были изменены параметры, позволяющие повысить производительность сушилки.

Повышение температуры исходного раствора на 10–20 °С позволило бы увеличить производительность сушилки на 4–5 % от первоначальной. Однако при повышении температуры раствора полимерного материала происходит ухудшение его текучести — «застывание» раствора в трубопроводах за счет полимеризации. Поэтому максимально возможная температура раствора в расчетах принята 90 °С.

Основной характеристикой инертного слоя является его удельная поверхность. Чем больше удельная поверхность, тем тоньше слой раствора осаждается на поверхности тем он быстрее высыхает. Однако необходимо правильно распределить раствор, чтобы смочить максимальную большую поверхность.

Уменьшение размера частиц инертного слоя увеличивает его удельную поверхность. Если использовать частицы 6×6×6 мм, поверхность составит 1000 м²/м³. Если использовать частицы 5×5×5 мм, то удельная поверхность составит 1200 м²/м³. То есть на частицах меньшего размера

производительность сушилки может быть увеличена до 20 %, если вся поверхность материала смачивается раствором и если тепла на сушку достаточно для высыхания всей поверхности инертного слоя. Однако уменьшение размеров частиц требует уменьшения скорости теплоносителя в надрешеточном пространстве в целях уменьшения выноса частиц из сушилки.

Увеличение массы слоя позволит увеличить общую поверхность инертного материала, однако это повысит гидравлическое сопротивление всей схемы сушки, что также неприемлемо.

Эксперименты по замене инертного материала на гранулы оксида алюминия не дали положительного результата: сопротивление слоя возросло, а производительность сушилки снизилась.

Единственным вариантом повышения производительности остается повышение температуры и расхода теплоносителя. В табл. 10-26 приведены данные испытаний сушильных аппаратов КС-1 и КС-2 для температуры теплоносителя 233–234 °С, в результате чего удалось повысить производительность сушилок по испаренной влаге на 37–39 %. Дальнейшее повышение температуры приводило к воспламенению материала в сушилке. Система пожаротушения, установленная в сушилке, позволяла быстро ликвидировать пожар, однако любое возникновение пожара снижало производительность сушилки и качество продукции.

На рис. 110 дано изображение процесса сушки до и после повышения ее производительности.

Процесс сушки идет с увеличением энтальпии, так как в сушилку подается раствор с повышенной температурой.

Как следует из табл. 10-26, повышение производительности достигнуто за счет не только увеличения температуры на 13–14 °С, но и повышения расхода сушильного агента (дымовых газов) на 6–7 тыс. м<sup>3</sup>/ч. Рассчитаем, есть ли возможность дальнейшего увеличения расхода сушильного агента.

Сушилки со взвешенным слоем материала имеют высокое гидравлическое сопротивление, которое определяется сопротивлением газораспределительной решетки, собственно слоя и газоочистного оборудования (циклоны, фильтры). По этой причине в схеме сушки установлено дутьевое оборудование (турбокомпрессор, вентилятор), которое позволяет преодолеть сопротивление топки, решетки и слоя, а для преодоления сопротивлений циклонов установлен вытяжной вентилятор.

Расчет гидравлического сопротивления всей сети от топки до вытяжного вентилятора дает потери давления 7,35 кПа. Для преодоления этого сопротивления в технологической схеме сушки установлено следующее тягодутьевое оборудование:

- вентилятор вытяжной ВМ-15 8,4 — 4,6 кПа (15–58 тыс. м<sup>3</sup>/ч);
- вентилятор радиальный ВЦ6-20-8 12,0 — 11,8 кПа;
- турбокомпрессор ТВ-500-1,08М 1 — 0,8кПа.



Фосфогипс — продукт производства фосфорной кислоты. По своему составу он может быть охарактеризован как химический мелиорант, так как содержит до 94 %  $\text{CaSO}_4$ , а также как кальций-фосфорно-серное удобрение. Фосфогипс получают путем орошения апатита серной кислотой. При этом полученная фосфорная кислота используется для приготовления фосфорных удобрений, а гипс идет в отвал.

Фосфогипс находит применение в сельском хозяйстве и в промышленности. Однако в сыром виде его неудобно транспортировать и применять. Поэтому сушка фосфогипса имеет большое значение. Поскольку для технических целей из фосфогипса необязательно удаление кристаллогидратной воды (см. подраздел 8.2, с. 194), будем считать влажность этого материала, относительно массы кристаллогидрата  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . То есть при сушке мы удаляем только поверхностную влагу и не удаляем кристаллогидратную.

Для сушки будем использовать пневматическую трубу-сушилку, а именно ее усовершенствованный вариант, изображенный на рис. 79 (с. 163). Отличие этой сушилки от традиционной пневматической состоит в том, что комки материала, упавшие вниз, разбиваются на лопастях измельчителя и вовлекаются в восходящий поток сушильного агента. Кроме того, после сушилки установлен досушиватель, где материал продолжает сушиться.

Технологическая схема участка сушки фосфогипса (см. рис. 79) включает в себя флэш-сушилку, досушиватель, топку, горелку, циклон, бункер, вентилятор, рукавный фильтр, а также систему контроля и автоматизацию процесса.

Фосфогипс представляет собой порошок, не склонный к комкованию, состоящий из гипса (90–94 %) с примесью фосфатов.

Исходные данные для расчета:

- производительность по конечному продукту 500–1000 кг/ч;
- режим работы непрерывный либо односменный;
- влажность исходного материала, поступающего в сушилку, 10–15 %;
- влажность конечного продукта  $\leq 0,3$  %;
- температура исходного продукта 10–20 °С;
- температура конечного продукта 90–120 °С;
- гранулометрический состав сухого материала 20–120 мкм;
- насыпной вес сухого материала 1350 кг/м<sup>3</sup>;
- теплоноситель — дизельное топливо.

Для расчетов принята исходная влажность 15 % на общую массу кристаллогидрата, производительность 600–1000 кг/ч по конечному материалу.

Для расчета взята сушилka XSG-8 китайского производителя Jiangsu Xianfeng Drying Engineering, имеющая следующие характеристики:



- диаметр / высота сушильной камеры (трубы) — 800 / 5000 мм;
- диаметр / высота досушивателя — 1000 / 5600 мм;
- максимально допустимая температура теплоносителя на входе в сушилку — 220 °С;
- максимально допустимая температура теплоносителя на входе в рукавный фильтр — 120 °С;
- расход ДТ в дизельной (модулируемой) горелке — 30–40 кг/ч;
- производительность / напор вытяжного вентилятора (при 100 °С) — 6030–9500 м³/ч / 7,6–6,5 кПа.

По уравнениям материального и теплового баланса мы рассчитали расходы испаренной влаги, сушильного агента, тепла при условии, что за время, которое материал находится в сушилке, он высохнет до необходимой влажности. Результаты расчета даны в табл. 10-27.

Таблица 10-27

## Результаты расчета сушилки

№ п/п	Параметры сушики	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3
1	Расход высушенного материала, кг/ч	1000	800	600
2	Расход испаренной влаги, кг/ч	173	138	104
3	Влажность начальная*, %	15,0		
4	Влажность начальная, %	0,3		
5	Температура материала начальная, °С	10		
6	Температура материала конечная, °С	95		
7	Температура дымовых газов начальная, °С	220		
8	Температура дымовых газов конечная, °С	110		
9	Расход тепла, кВт	314	253	193
10	Расход ДТ, кг/ч	26,4	21,3	16,3
11	Расход сушильного агента (дым. газов), кг/ч	4823	3894	2970
12	Влагосодержание сушильного агента, кг/кг: • на входе в сушилку • на выходе из сушилки	0,016		
		0,051	0,051	0,050
13	Расход отработ. дымовых газов, м³/час при 110 °С	5495	4435	3380
13	Время пребывания материала в сушилке, с	4,6	5,6	7,4

\* Влажность рассчитана на кристаллогидрат  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

Однако необходимое время сушики может быть больше, чем время пребывания материала в сушилке, и реальная конечная влажность будет больше, чем принятая. Кроме того, температура сушильного агента



быстро падает и скорость сушки уменьшается, что также может привести к недосушиванию материала.

Расчетное время полного высыхания частицы размером 120 мкм при средней температуре 165 °С составляет доли секунды. Время пребывания материала в сушильной трубе (включая досушиватель) составляет 5–7 с. То есть при полном диспергировании частиц в потоке разбавленных воздухом дымовых газов весь материал должен высохнуть. Однако при подаче влажного материала в сушилку не происходит полного диспергирования частиц в потоке. Наличие комков снижает скорость сушки, и материал будет выходить из сушилки недосушенным.

Так, для частиц размером 1 мм расчетное время сушки при температуре 165 °С составляет 12 с — больше, чем время пребывания. Кроме того, предположение о внешнедиффузионном характере сушки фосфогипса может быть неверным.

Таким образом, конечную влажность и температуру после сушильного аппарата расчетным путем получить невозможно.

Испытания некоторых материалов (фосфогипс, галлит) на промышленной сушилке позволили уточнить производительность данного аппарата при указанных выше исходных данных. На фосфогипсе она составила 500 кг/ч, на галлите 400 кг/ч.

#### 10.8. РАСЧЕТ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШИЛКИ ДЛЯ СУШКИ ПОЛИВИНИЛ-ПИРРОЛИДОНА, ЭЛЕКТРООБОГРЕВ

Поливинилпирролидон (ПВП) используется в самых разнообразных отраслях медицины, фармацевтики, косметологии и промышленного производства. Получается он полимеризацией в водной среде при 100–180 °С в присутствии перекиси водорода. В зависимости от условий реакции получается полимер  $(C_6H_9NO)_n$  с молекулярной массой 5000–50 000. Поливинилпирролидон представляет собой белый аморфный порошок, растворяющийся без остатка в воде с образованием бесцветного или желтоватого раствора.

Для получения тонкодисперсного порошка этого материала применяются распылительные сушилки [26]. Ниже представлен расчет распылительной сушилки небольшой производительности.

##### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Производительность по высушенному продукту 12 кг/ч.

Влажность:

- исходная 70 %;
- конечная <5 %.

Конечный продукт — сыпучий порошок, размер частиц 0–80 мкм.

Характеристика сушилки:

- Сушильная башня, центробежный распылитель с частотным преобразователем.
- Распыленная жидкость контактирует с горячим воздухом.
- Параллельный поток воздуха и жидкости. Электронагрев.
- Подача раствора перистальтическим насосом с частотным преобразователем.
- Выгрузка материала — циклон. Очистка воздуха от пыли через аппарат с водяной пленкой.

Расчет включает в себя материальный, тепловой баланс, в результате которого получаем расходы сушильного агента, испаренной воды, мощность электрокалорифера, а также расчет скорости сушки, из которого получаем размеры сушильной башни.

Сушильный агент — воздух; перед подачей в сушильную камеру он очищается от пыли на фильтре и нагревается в электрокалорифере. Исходя из свойств данного продукта примем начальную температуру сушильного агента 210 °С, а температуру на выходе из сушилки — 90–95 °С. Раствор ПВП перед подачей в сушилку подогревается до 60 °С.

Результаты расчета приведены в табл. 10-28.

Таблица 10-28

Результаты расчета распылительной сушилки

№ п/п	Наименование	Значение
1	Влажность начальная, $w_n$ , %	70,0
2	Влажность конечная, $w_k$ , %	2,0
3	Производительность по конечному продукту, $G_k$ , кг/ч	12,0
4	Расход испар. влаги, $W$ , кг/час	27,2
5	Температура воздуха начальная, $t_0$ , °С	20
6	Температура перед сушилкой, $t_1$ , °С	210
7	Температура после сушилки, $t_2$ , °С	90
8	Температура точки росы, $t_p$ , °С	38
9	Температура мокрого термометра, $t_m$ , °С	44
10	Влагосодержание начальное, $x_1$ , кг/кг	0,009
11	Влагосодержание конечное, $x_2$ , кг/кг	0,045
12	Расход воздуха (сухого), $L$ , кг/с	0,21
13	Расход отработанного воздуха*, $V_2$ , м³/с	0,23
14	Расход тепла на сушилку, кВт	40,8
15	• в том числе потери тепла через кожух**, кВт	3,95
16	• в том числе потери тепла на нагрев материала, кВт	0,09
17	Диаметр сушильной башни, м	2,00
18	Высота сушильной башни, м	2,44

Окончание табл. 10-28

№ п/п	Наименование	Значение
19	Расход воздуха в суш. башне, кг/с	0,22
20	Скорость воздуха в суш. башне, м/с	0,08
21	Скорость осаждения капель в башне, м/с	0,32
22	Время осаждения капель в башне, с	6,03
23	Время сушки капель, с	5,10
24	Объем сушильной башни, м <sup>3</sup>	10,3
25	Напряженность по испар. влаге, кг/(м <sup>3</sup> · ч)	2,6

\* При конечной температуре 90 °С.

\*\* При температуре кожуха 30 °С.

Справочные данные:

Влажность воздуха, % 60

Теплота испарения, кДж/кг 2380

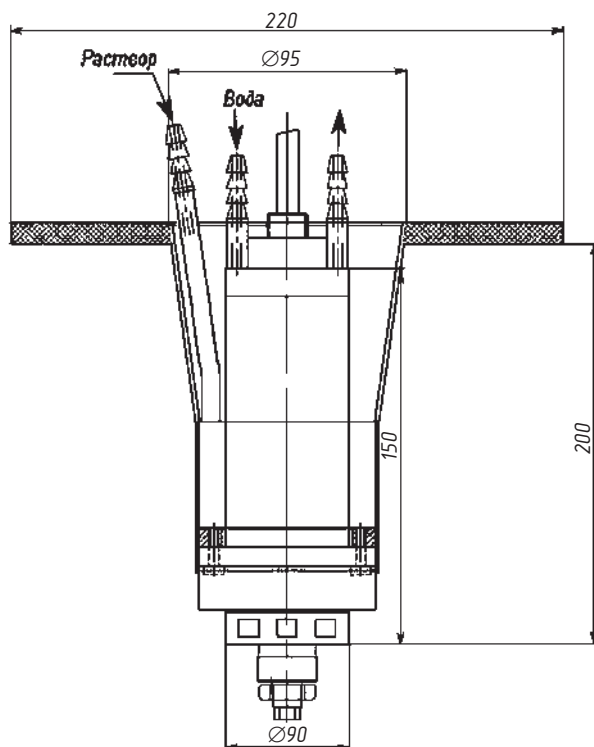


Рис. 111. Атомайзер

Для расчета диаметра сушильной башни выясним, высохнет ли капля в потоке воздуха, который движется вниз прямолинейно с каплями раствора.

Дисперсный состав продукта зависит от конструкции и скорости вращения ротора распылителя. Выберем распылитель (атомайзер) с водяным охлаждением: производительность 0–40 л/ч, 0,25 кВт, скорость вращения ротора 24 000–35 000 об/мин. Такой распылитель дает тонкий распыл раствора ПВП, имеющего относительную вязкость 33. Сухой порошок будет иметь размер частиц до 80 мкм, влажные капли после атомайзера будут иметь размер до 120 мкм (баланс по сухому веществу). Эскиз атомайзера дан на рис. 111.

Расчет по уравнению (6.14), с. 72 и табл. 6-2 дает значение коэффициента теплоотдачи при средней температуре  $(210 + 90) = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$   $\alpha = 490\text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$  и время сушки от 70 до 2 % 5,1 с. Расчет выполнялся для скорости осаждения частиц 0,32 м/с, рассчитанной по уравнению (10.24).

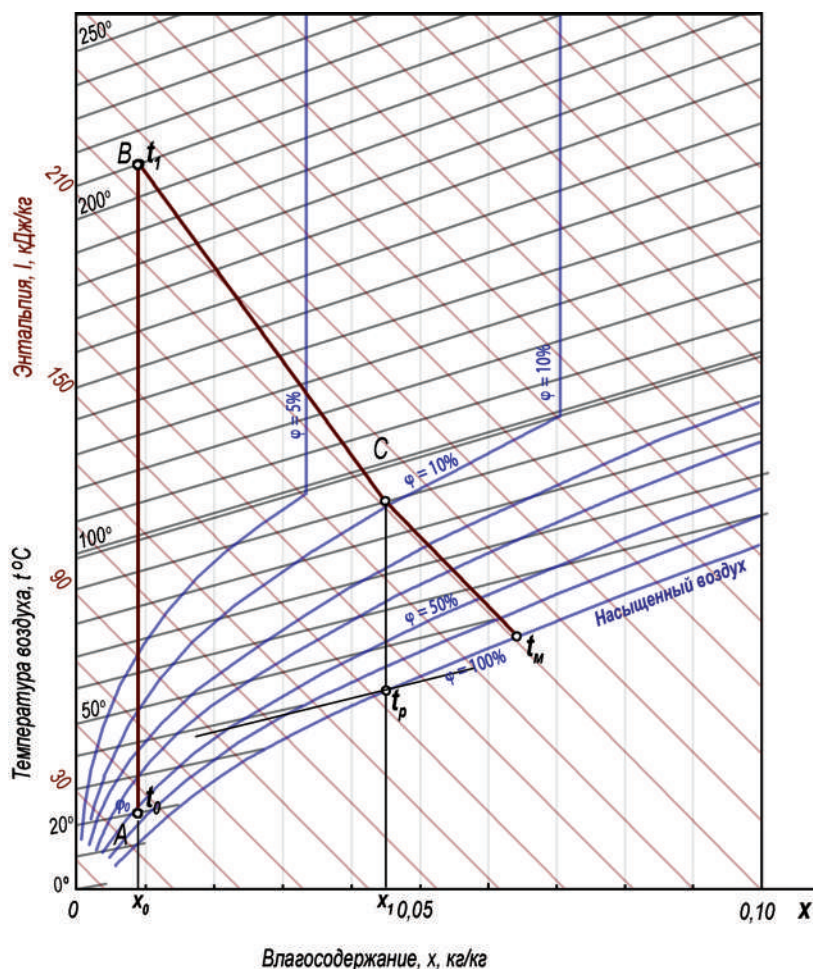
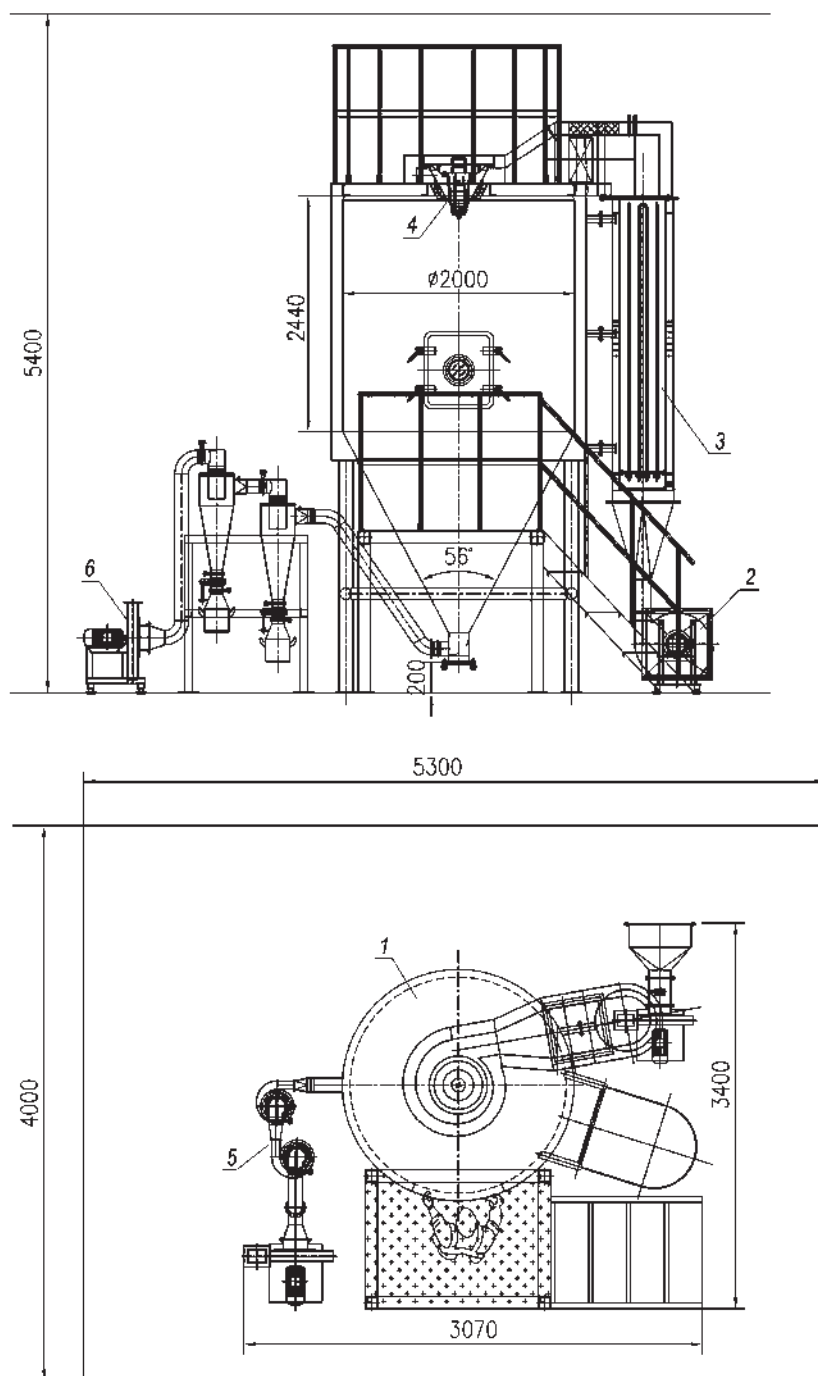


Рис. 112. Изображение сушки раствора ПВП в башенной распылительной сушилке:

$AB$  — линия нагрева воздуха,  $BC$  — линия сушки



**Рис. 113.** Распылительная сушилка для сушки раствора ПВП:

1 — сушилка; 2 — дутьевой вентилятор; 3 — электрокалорифер; 4 — атомайзер; 5 — циклоны; 6 — вытяжной вентилятор

Время пребывания капли в сушильной башне составляет 6 с — больше, чем необходимое время сушки. Следовательно, выбранный диаметр и высота башни достаточны для полного высыхания раствора ПВП. При меньших диаметре и высоте сушильной башни влажные капли будут осажаться и налипать на коническом днище аппарата.

Высоту конусной части аппарата выбираем из условия сползания частиц материала в разгрузочный патрубок. Угол конусности для этого типа материала составляет  $55^\circ$ . Из нижнего патрубка днища сушилки 1 высушенный материал выносится потоком воздуха в циклоны 5, где осажается в бункерах. Далее отработанный воздух следует на очистку в скруббер и затем сбрасывается в атмосферу.

На рис. 112 дано изображение сушки ПВП на диаграмме Рамзина. Точка А определяется по значению начальной температуры воздуха  $20^\circ\text{C}$  и относительной влажности  $60\%$ . Линия нагрева воздуха в электрокалорифере идет по вертикальной линии АВ при постоянном значении влагосодержания  $x_1 = x_0$ . Сушка идет по линии ВС с понижением энтальпии до температуры  $t_2 = 90^\circ\text{C}$ . На диаграмме показаны точка росы  $t_p = 38^\circ\text{C}$  и температура мокрого термометра  $t_m = 43^\circ\text{C}$ .

На рис. 113 изображен эскиз рассчитанной сушилки.

При наличии на производстве греющего пара воздух предварительно нагревают в паровом калорифере до  $140\text{--}150^\circ\text{C}$ , а дальнейший нагрев до  $210^\circ\text{C}$  производят в электрокалорифере. Это позволяет снизить затраты на сушку, поскольку электроэнергия вдвое дороже, чем пар.

### 10.9.

#### РАСЧЕТ ШЕСТИЯРУСНОЙ СУШИЛКИ С ЛЕНТОЧНЫМ СИТОМ ДЛЯ СУШКИ ДРЕВЕСНЫХ СТРУЖЕК, ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ — ГОРЯЧАЯ ВОДА

Низкотемпературные ленточные (конвейерные) сушилки используются для сушки древесины (щепы, стружки, коры, опилок), зеленой биомассы (соломы, травы люцерны и др.), а также отходов производства. В качестве теплоносителя применяется горячая вода, которая получается в котле при сжигании древесных или других отходов.

На рис. 52, 53 подраздел 7.1 (с. 120–121) изображена шестиярусная сушилка с сетчатой лентой.

Конвейерная сетчатая лента движется со скоростью  $2\text{--}6$  м/мин. Под каждую ленту подается воздух, нагретый в навесных теплообменниках. В трубное пространство теплообменников подается горячая вода с температурой  $95\text{--}100^\circ\text{C}$ . В межтрубное пространство, перпендикулярно оребренным трубам, направляется воздух. Нагретый воздух поступает под сетку, проходит через слой материала, находящегося на ленте, и удаляется вытяжными вентиляторами в атмосферу. Часть отработанного воздуха возвращается на сушку в сушильную камеру через

теплообменники. Поскольку отработанный воздух не содержит мелкой или липкой пыли, так как предварительно очищается на фильтрах, теплообменная поверхность не загрязняется и не засоряется.

На каждом ярусе установлено пять поверхностных теплообменников размером 1800×220×180 мм. Расход воздуха регулируется на каждый ярус в зависимости от влажности материала и условий сушки. На верхние ярусы требуется большее количество горячего воздуха, чем на последнем этапе сушки. Однако на нижние ярусы необходимо подавать более горячий воздух.

Продувание воздухом слоя продукта происходит снизу вверх. Скорость продувки слоя меньше скорости уноса стружки, поэтому с отработанным воздухом удаляются лишь самые мелкие частицы размером 1–2 мм. Материал на ленте находится в полувзвешенном состоянии.

Сушильная камера отделена от отсеков разгрузки и загрузки: таким образом, исключается утечка тепла. Сушильная камера работает под небольшим разрежением, что предотвращает утечку горячего воздуха и пыление сушилки.

Основные характеристики ленточной шестиярусной сушилки:

- длина 12 240 мм;
- высота 5220 мм;
- ширина сетчатой ленты 2020 мм;
- ширина сушилки с воздуховодами и площадками 6000 мм;
- длина сушилки с воздуховодами и площадками 14 080 мм;
- общая высота сушилки 7730 мм.

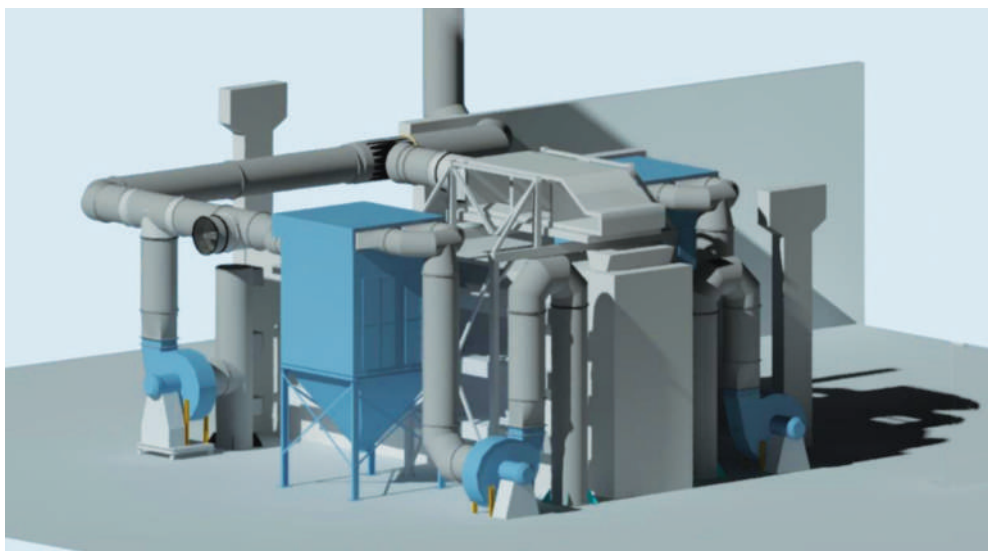


Рис. 114. Ленточная сушилка — общий вид



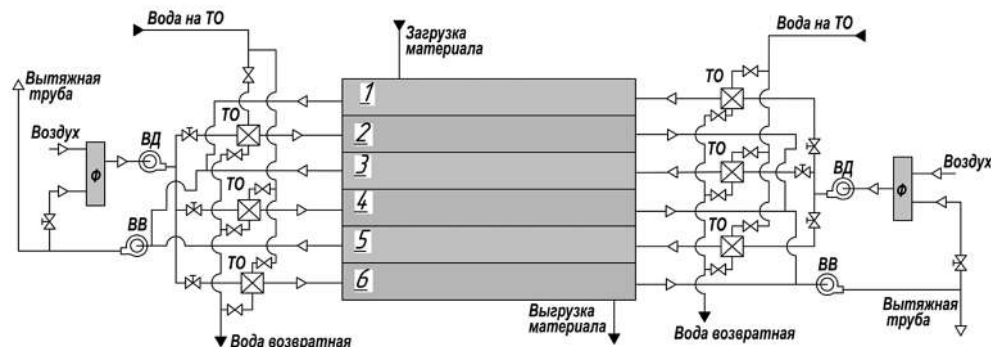


Рис. 115. Схема потоков шестиярусной ленточной сушилки:

Ф — рукавный фильтр; ВД — вентилятор дутьевой; ВВ — вентилятор вытяжной; ТО — теплообменники (пять теплообменников каждого яруса сушилки изображены на схеме условно в виде одного элемента)

На сушилке есть по два дутьевых и вытяжных вентилятора, а также два рукавных фильтра. Общий вид сушилки дан на рис. 114. Схема потоков представлена на рис. 115.

Требуется рассчитать производительность сушилки, расходы теплоносителей, тепловую мощность и найти оптимальный режим сушки.

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

1. Температура теплоносителя (горячая вода) 90–110 °С (для расчета принята 100 °С).

2. Производительность до 400–800 кг/ч сухого материала.

3. Размер стружки: толщина 0,6–0,8 мм, ширина 25 мм, длина 150 мм.

4. Основное сырье — осина и ель всех сезонов заготовки, в том числе свежесрубленная зимняя. Влажность естественная 70–115 %. Для расчета принята начальная влажность 70 % (0,70 кг в расчете на 1 кг абсолютно сухой древесины).

5. Требуемая влажность сырья на выходе 2–3 % (в расчетах принято 3 %).

6. Воздух поступает из помещения с температурой 20 °С, влажность 60 %.

Справочные данные:

- плотность свежесрубленной осины 760 кг/м<sup>3</sup>, после сушки 470 кг/м<sup>3</sup>;
- усушка древесины составляет 8 % (радиальная) 11 % (тангенциальная);
- теплоемкость сухой древесины 1,55 кДж/(кг · К);
- насыпная плотность 80–120 кг/м<sup>3</sup> для стружки с влажностью 5–15 %;
- гигроскопическая влажность 30–60 %.

Расчет был выполнен в программе Excel-2010.

Укрупненный расчет при условии, что воздух однократно нагревается до 80 °С, после сушки температура отработанного воздуха составляет 60 °С, сушилка теоретическая, дает следующий приближенный результат:

- расход тепла на сушку 1,2 МВт;
- расход воздуха на сушку 55 000 м<sup>3</sup>/ч (18,7 кг/с).

Далее каждый ярус сушилки разбиваем на пять участков (по числу теплообменников). Всего получается  $5 \cdot 6 = 30$  участков. Принимаем расход воздуха на каждый теплообменник 1,5–1,8 тыс. м<sup>3</sup>/ч. Каждый участок яруса рассчитывался по следующей схеме (см. табл. 10-30):

1. Задаются скорость конвейера, расход стружки, ее удельная поверхность.

2. Задается (а для следующих участков — рассчитывается) начальная влажность стружки.

3. Задается расход воздуха на каждый ярус.

4. Рассчитывается температура воздуха после теплообменника (см. ниже).

5. Задается влагосодержание, рассчитывается энтальпия воздуха.

6. Рассчитывается константа скорости сушки.

7. Рассчитывается количество испаренной влаги.

8. Рассчитываются конечная влажность и температура воздуха, покидающего слой стружки.

9. Определяется расход тепла.

Расчет повторяется для каждого участка всех ярусов. Поскольку часть параметров взаимосвязана, потребуется их пересчет.

Первоначально необходимо рассчитать температуру воздуха, который нагревается в теплообменнике и затем поступает под ленту.

На боковой поверхности рамы сушилки под воздуховодами установлены навесные поверхностные теплообменники с оребренными трубами. Внутренний размер кожуха теплообменника 180×220×1720 мм.

Трубный пучок четырехрядный по воздушному потоку, двухходовой по внутреннему пространству жидкого теплоносителя. Теплоноситель — горячая вода температурой 100 °С. Теплообменные трубы имеют диаметр 16×1,5 мм. Общее количество труб — 20. Оребрение выполнено алюминием АД1. Расположение труб — шахматное.

Поверхность теплообмена по паспорту 24,8 м<sup>2</sup>. Площадь сечения для прохода теплоносителя (воды) составляет 0,001327 м<sup>2</sup>, для прохода воздуха — 0,391 м<sup>2</sup>.

Расчет температуры воздуха выполнялся по уравнению теплового баланса и уравнению теплопередачи [7]:

$$Q_1 = G_B c_B (t_H - t_K),$$

$$Q_2 = L(1 + x) c_{\text{возд}} (T_H - T_K),$$

$$Q_3 = KF_{\text{нар}} t_{\text{ср}}, \quad Q_1 = Q_2 = Q_3,$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{пр}}} + \frac{1}{\alpha_2} \frac{F_{\text{нар}}}{F_{\text{вн}}}},$$

где  $Q$  — расход тепла, Вт;  $K$  — коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $L$  — расход воздуха через теплообменник, кг/с;  $x$  — влагосодержание воздуха, кг/кг;  $T, t$  — температура воздуха и воды, соответственно, °С;  $G_{\text{в}}$  — расход воды, кг/с;  $c_{\text{в}}, c_{\text{возд}}$  — теплоемкость воды и воздуха, кДж/(кг·К); остальные обозначения по учебнику [7].

Коэффициенты теплоотдачи (приведенный коэффициент для воздуха и коэффициент для воды)  $\alpha_{\text{пр}}, \alpha_2$  определяются по критериальным уравнениям, приведенным в [7, 9, 10]. Расчетный коэффициент теплопередачи  $K$  зависит в основном от скорости воздуха и находится в пределах 30–40 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Установим в схему сушки два дутьевых вентилятора производительностью по 30 тыс. м<sup>3</sup>/ч воздуха, общий расход 60 тыс. м<sup>3</sup>/час на шесть ярусов.

В табл. 10-29 дан расчет температуры воздуха после теплообменника в зависимости от расхода воздуха и его температуры на входе в теплообменник.

Чем больше расход воздуха на теплообменник, тем ниже его конечная температура. Повышение начальной температуры воздуха снижает расход тепла и повышает конечную температуру воздуха. По этой причине возврат части отработанного воздуха на сушку снижает расход тепла, повышает его температуру и скорость сушки. Однако чрезмерная подача отработанного воздуха в сушилку приводит к возрастанию влагосодержания воздуха и снижает скорость сушки. Постараемся найти оптимальный коэффициент рециркуляции отработанного воздуха расчетным путем.

Для расчета конечной влажности материала необходимо знать скорость сушки в зависимости от температуры и скорости воздуха. Для определения скорости сушки был выполнен эксперимент. Образец материала помещался в сушильный шкаф; при заданной температуре через определенные промежутки времени определялся вес материала. Материал на поддоне был уложен так, чтобы вся поверхность стружки имела контакт с горячим воздухом. По убыли веса рассчитывалась влажность материала и скорость сушки. Кривая сушки при температуре 74 °С приведена на рис. 116.

Экспериментальные кривые скорости сушки были получены для нескольких температур. Следует отметить, что критическая влажность

Т а б л и ц а 10-29

## Расчет теплообменника

№ п/п	Наименование	Ед. изм.	Вариант					
			1	2	3	4	5	6
1	Объемный расход воздуха	м <sup>3</sup> /ч	1500	1500	1500	1800	1800	1800
2	Массовый расход воздуха на ТО	кг/с	0,50	0,47	0,44	0,60	0,56	0,53
3	Скорость воздуха в ТО	м/с	4,8	4,6	4,5	5,7	5,5	5,4
4	Температура воздуха начальная	°С	20	40	60	20	40	60
5	Температура воздуха конечная	°С	91	94	97	88	92	95
6	Массовый расход воды на ТО	кг/с	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
7	Объемный расход воды	м <sup>3</sup> /ч	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7
8	Скорость воды в ТО	м/с	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
9	Температура воды начальная	°С	100	100	100	100	100	100
10	Температура воды конечная	°С	91	94	96	90	93	96
11	Коэффициент теплопередачи	Вт/ (м <sup>2</sup> · К)	36,1	34,9	33,6	39,9	38,5	37,3
12	Расход тепла на ТО	кВт	36	18	16	41	29	19
13	Потери давления для воздуха	кПа	0,06	0,06	0,05	0,08	0,07	0,07

\* На каждом ярусе установлено по 5 теплообменников (ТО).

зависит от температуры сушки и составила 50–80 %. Для расчета была принята средняя критическая влажность 60 %. Кривые сушки были заменены двумя прямыми. Горизонтальная прямая характеризует первый период — период постоянной скорости сушки, а наклонная прямая — период падающей скорости сушки.

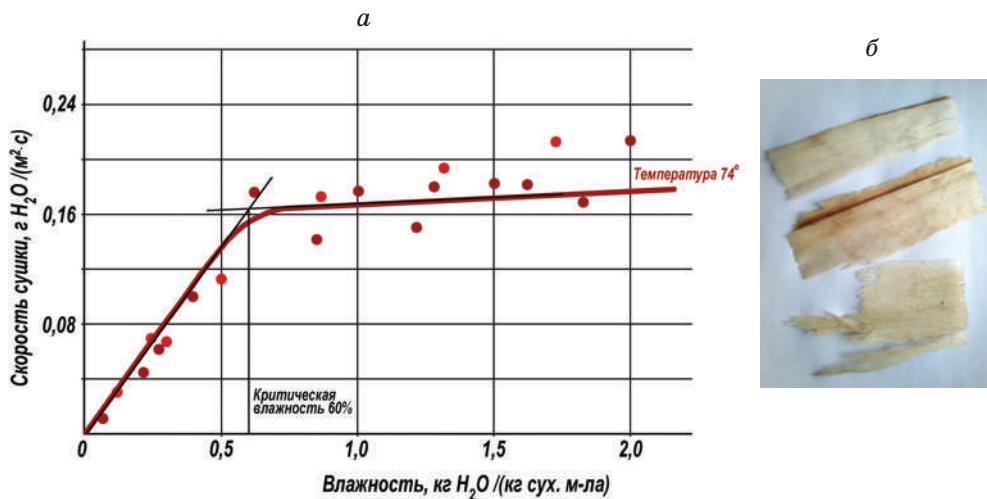


Рис. 116. Экспериментальная кривая скорости сушки для стружки осины (а), фото стружки (б)

По кривым скорости сушки были получены аппроксимационные зависимости, позволяющие рассчитать скорость сушки  $W$ , кг/с, для первого периода сушки при любой температуре в диапазоне от 50 до 90 °C:

$$W = K_0 S (T_{\text{сл}} - T_{\text{м}}),$$

где  $T_{\text{сл}}$ ,  $T_{\text{м}}$  — температура воздуха в слое материала и температура мокрого термометра, °C;  $S$  — поверхность стружки, м<sup>2</sup>;  $K_0$  — константа скорости сушки для первого периода сушки,  $K_0 = 3,6 \cdot 10^{-6}$  кг/(с · м<sup>2</sup> · К).

Для периода падающей скорости сушки (влажность меньше критической  $w < w_{\text{кр}}$ ) константа рассчитывалась по уравнению

$$K = K_0 \frac{w}{w_{\text{кр}}}.$$

Поверхность стружки была определена расчетным путем, а также экспериментально, через измерение поверхности в навеске материала. Удельная поверхность для сухого материала составила 6,2–14,9 м<sup>2</sup>/кг, для расчета принята средняя удельная поверхность  $S_{\text{уд}} = 10,5$  м<sup>2</sup>/кг.

Количество испаренной влаги  $W$ , кг/с, из стружки может быть рассчитано по формуле

$$\begin{aligned} W &= K_0 S (T_{\text{сл}} - T_{\text{м}}), \text{ если } w > w_{\text{кр}}, \\ W &= K_0 \frac{w}{w_{\text{кр}}} S (T_{\text{сл}} - T_{\text{м}}), \text{ если } w < w_{\text{кр}}, \end{aligned} \quad (10.40)$$

где  $S$  — поверхность стружки, м<sup>2</sup>;  $S = G_{\text{м}} \cdot S_{\text{уд}}$ ,  $G_{\text{м}}$  — количество материала на участке сетчатой ленты, кг. Определить экспериментально влияние скорости воздуха на константу скорости сушки не удалось. Константа  $K_0$  не учитывает влияние скорости и направления потока воздуха.

Таким образом, для каждого участка сушилки мы можем определить количество испаренной влаги  $W$  по уравнению (10.40), а затем рассчитать влажность стружки, выходящей с этого участка, по формуле

$$w_{\text{к}} = w_{\text{н}} - W / G, \quad (10.41)$$

где  $G$  — расход материала (стружки), кг/с.

В программе электронных таблиц Excel (см. табл. 10-30) был построен расчет сушилки, в котором по исходным данным можно рассчитать конечную влажность материала, расход тепла, воздуха и другие параметры сушки. Изменяя исходные значения в полученной расчетной модели, можно получить вариант, который характеризуется минимальным

Таблица 10-30

Пример расчета сушилки

№ пп	Влажная стружка	Обозначение	Ярус						Общее (среднее) значение
			1	2	3	4	5	6	
1	Влажность стружки, кг Н <sub>2</sub> O/кг	$w_n$	0,700	0,409	0,236	0,136	0,078	0,045	
2	Температура стружки, °C	$t$	61	70	77	84	89	91	
3	Расход воздуха, кг/с	$L$	5,00	5,00	2,50	2,50	2,50	2,50	20,0
4	Температура воздуха начальная, °C	$T_n$	85,0	85,0	94,3	94,3	94,3	94,3	91,2
5	Влагосодержание воздуха нач., кг/кг сух.	$x_0$	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014
6	Энтальпия воздуха, кДж/кг сух.	$I_1$	123	123	132	132	132	132	
7	Константа скорости сушики, кг/(м <sup>2</sup> ·с)·10 <sup>3</sup>	$K \cdot 10^3$	0,144	0,086	0,049	0,028	0,016	0,009	
8	Поверхность сушики, м <sup>2</sup>	$S$	340	340	340	340	340	340	
9	Количество испаренной влаги, кг/ч	$W$	174,5	104,0	59,9	34,5	19,9	11,5	404
10	Влажность стружки конечная, кг Н <sub>2</sub> O/кг	$w_k$	0,409	0,236	0,136	0,078	0,045	0,026	2,6%
11	Влагосодержание воздуха кон., кг/кг	$x^2$	0,024	0,020	0,021	0,018	0,016	0,015	0,019
12	Температура воздуха кон., °C	$T_k$	61	70	77	84	89	91	78,8
13	Средняя температура в слое, °C	$T_{cp}$	73	78	86	89	92	93	85,0
14	Температура мокрого термометра, °C	$T_m$	29	30	32	33	34	34	
15	Расход тепла, кВт	$Q$	180	180	115	115	115	115	820

Константа скорости сушики, кг/(с·м<sup>2</sup>·К):  $K_0 \cdot 10^6 = 3,6$   
Критическая влажность, кг/кг:  $w_{кр} = 0,600$ .

Таблица 10-31

## Результаты расчета вариантов сушки

№ пп	Наименование	Ед. изм.	Вар. 0-1	Вар. 0-2	Вар. 1-1	Вар. 1-2	Вар. 2-1	Вар. 2-2	Вар. 2-3	Вар. 2-4	Вар. 3-1	Вар. 3-2	Вар. 3-3
1	Расход материала сух	кг/час	600	400	600	400	600	400	600	600	600	400	400
2	Скорость трансп. ленты	м/мин	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	2,0	4,0	3,0	3,0	2,0
3	Количество испаренной влаги	кг/час	387	263	393	266	393	266	411	370	386	225	272
4	Расход воздуха	м³/час	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	60 000	40 000	40 000	40 000
5	Влагосодержание возд начальное	кг/кг	0,009	0,009	0,014	0,013	0,013	0,013	0,014	0,014	0,017	0,015	0,015
6	Влагосодержание возд конечное	кг/кг	0,014	0,012	0,019	0,017	0,017	0,016	0,019	0,019	0,027	0,022	0,022
7	Температура воздуха начальная	°C	86	86	91	91	85/94	86/95	85/94	85/94	98	98	98
8	Температура воздуха конечная	°C	72,3	76,7	77,0	81,5	79,1	84,0	79,5	79,1	74,0	82,0	81,0
9	Расход тепла	МВт	1,32	1,32	0,84	0,81	0,83	0,81	0,83	0,83	0,57	0,51	0,51
10	Влажность начальная	%	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0
11	Влажность конечная	%	5,5	4,3	4,5	3,5	4,4	3,5	1,5	8,4	5,7	4,8	1,9

Вариант 0. Подача свежего воздуха 20 °C на каждый ярус сушилки.

Вариант 1. Рециркуляция, подача 50 % свежего воздуха 20 °C и 50 % отработанного воздуха на каждый ярус сушилки.

Вариант 2. Подача на 1-й и 2-й ярус вдвое больше воздуха с рециркулятом, чем на остальные ярусы сушилки.

Вариант 3. Подача меньшего расхода воздуха на ярусы сушилки.



расходом тепла при заданной производительности и влажности материала. Параметры сушки подбирались таким образом, чтобы при минимальном расходе тепла достичь минимальной конечной влажности материала. По условиям процесса влажность после сушки должна быть ниже 3 %.

В табл. 10-31 приведены результаты расчета нескольких вариантов сушки. Из таблицы видно, что при однократном использовании воздуха (варианты 0-1, 0-2) не удается добиться нужной влажности материала; при этом расход тепла составляет 1,32 МВт. Температура отходящего воздуха 70–76 °С, сушилка работает неэффективно.

Подача части отработанного воздуха в сушильную камеру позволяет сократить затраты тепла на сушку.

Для вариантов 1-1, 1-2 50 % отработанного воздуха возвращалось в сушилку. В этом случае после теплообменников удалось получить более высокую температуру и сушка шла быстрее, Расход тепла снизился, но результата добиться не удалось.

Варианты 2-1, 2-2, при которых больший расход воздуха поступает на верхние ярусы, где находится влажная стружка, не дали ощутимого результата, поскольку при увеличении расхода воздуха его температура после теплообменников уменьшается. Установка на верхние ярусы теплообменников с большей поверхностью теплопередачи, возможно, даст положительный результат. Однако на существующих теплообменниках результат виден только при небольшой производительности по материалу.

Уменьшение скорости ленты при заданной производительности 600 кг/час позволяет увеличить высоту слоя материала на ленте и получить конечную влажность стружки менее 3 % (вариант 2-3).

Уменьшение расхода воздуха (варианты 3-1, 3-2, 3-3) ведет к снижению производительности сушилки.

В табл. 10-30 приведен пример расчета, который характеризуется оптимальным режимом работы сушилки при конечной влажности стружки менее 3 %:

- расход материала (стружки) по абс. сухому материалу 600 кг/ч;
- скорость конвейерной ленты 2,8 м/мин;
- влажность начальная 70 %;
- влажность конечная 2,6 %;
- расход испаренной воды 404 кг/ч;
- коэффициент рециркуляции воздуха 2,0;
- расход воздуха на 1,2 ярусы 16,74 тыс. м<sup>3</sup>/ч при 50 °С;
- расход воздуха на 3,6 ярусы 8,37 тыс. м<sup>3</sup>/ч при 50 °С;
- общий расход воздуха 67 тыс. м<sup>3</sup>/ч при 50 °С;
- расход тепла на сушку 820 кВт.

В таблице приведены средние расчетные значения, которые были получены при расчете каждого яруса сушилки. Для повышения точности

расчета каждый ярус был разбит на пять участков и каждый участок яруса считался отдельно.

При испытании сушилки удалось подтвердить выполненные расчеты и добиться производительности 600 кг/ч при условии равномерной подачи материала на верхний ярус. В случае, когда появляются промежутки сетки без материала, происходит прорыв воздуха через сетку и влажность стружки на выходе возрастает. Кроме того, была отмечена повышенная влажность клубков (сгустков) стружки, которые появлялись при неудовлетворительной работе строгального станка.

Основным преимуществом сушилки с ленточным ситом является то, что она работает на отходах, которые образуются при переработке древесины (так называемое биотопливо). Для сушки используется чистый воздух.

Вместе с тем существует немало недостатков сушилки данной конструкции. Сушилка имеет большие габариты, высокую стоимость, требует высокой квалификации обслуживающего персонала. Сетчатая лента засоряется, ее необходимо чистить несколько раз в неделю.

Таблица 10-32

## Ориентировочная стоимость шестиярусной ленточной сушилки

№ п/п	Наименование	Кол-во	Стоимость, тыс. руб	
			Ед	Сумма
1	Сушилка шестиярусная с ленточным ситом и приводной станцией	1	4500	4500
2	Теплообменники	30	18	550
3	Воздуховоды, теплоизоляция	2	800	1600
4	Бункер, транспортер, питатель	1	600	600
5	Дутьевые вентиляторы 75 кВт 30 тыс. м <sup>3</sup> /ч 6 кПа с ЧРП	2	597	1195
6	Вытяжные вентиляторы 45 кВт 35 тыс. м <sup>3</sup> /час 2 кПа с ЧРП	2	407	814
7	Рукавные фильтры ФРИ 30 м <sup>2</sup>	2	873	1746
8	Циклон ЦДО-2500	1	420	420
9	АСУТП, датчики температуры, расхода, влажности	1	12	12
	Итого:			11 436

Цены указаны без НДС 18 % на 2018 г.

Курс евро на август 2018 года составил 75 руб.

Производительность по испаренной влаге (влагонапряженность) составляет всего 4,3 кг/(м<sup>3</sup>·ч)<sup>1</sup>, в то время как аналогичная барабанная

<sup>1</sup> Повысить производительность сушилки данного типа можно за счет увеличения температуры сушильного агента при использовании котла на газовом топливе. Однако в данном случае газ на предприятии отсутствовал.

сушилка для древесных стружек, работающая на газовом топливе, имеет влагонапряженность 20–40 кг/(м<sup>3</sup>·ч). Сушилка с сетчатой лентой при невысокой производительности потребляет много электроэнергии: электрическая мощность оборудования (приводная станция, 4 вентилятора) составляет 250 кВт.

В табл. 10-32 приведена ориентировочная стоимость сушильной установки.

Гораздо эффективнее использовать сушилки другого типа, описанные в подразделе 8.3 (барабанная сушилка, вибросушилка, лопастная сушилка).

### 10.10. РАСЧЕТ ВАЛЬЦОВОЙ СУШИЛКИ ДЛЯ СУШКИ ГИДРОЛИЗОВАННОГО ПОЛИАКРИЛОНИТРИЛА, ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ — ГРЕЮЩИЙ ПАР

Большое значение в химической и нефтедобывающей промышленности имеют флокулянты. Высокими флокулирующими свойствами обладают синтетические полимерные флокулянты, такие как полиакриламид, поливинилпирролидон, полиакрилат натрия, полистирол-сульфокислота и другие.

В частности, флокулянт ВПРГ (гидролизованный полиакрилонитрил — ГИПАН) используется для регулирования реологических и фильтрационных свойств бурового раствора. Транспортировка реагента ВПРГ в жидком виде сопряжена с некоторыми трудностями, особенно в зимнее время, поэтому наряду с раствором используют сухой порошок, который получают на вальцовых сушилках.

ГИПАН получают методом статической полимеризации нитрила акриловой кислоты в среде водного конденсата с последующим гидролизом образовавшегося полиакрилонитрила едким натром. По внешнему виду это вязкая жидкость цвета от желтого до темно-коричневого. Динамическая вязкость 1%-ного водного раствора при 20 °С составляет 15 мПа·с. Относительная плотность 1,0–1,07. При температуре более 100 °С происходит выкипание воды и выделение аммиака, а при температуре ниже минус 5–10 °С реагент застывает с предварительным вымораживанием.

Необходимо рассчитать и выбрать сушильный аппарат для сушки ГИПАНа.

#### *Исходные данные:*

- производительность 40 кг/ч по конечному продукту (с влажностью 5 %);
- влажность конечного продукта не более 5 %;
- исходный продукт получается в виде 15 %-ного раствора, т. е. влажность 85 %;

- раствор, подаваемый на сушку, клейкий и похож по консистенции на мед;
- материал обладает высокой адгезией к металлу;
- сушку необходимо производить при температуре не выше 150–160 °С;
- для сушки следует использовать греющий пар с избыточным давлением не выше 5 бар;
- раствор поступает на сушку, нагретый до температуры 70 °С.

Принцип действия вальцовой сушилки описан в подразделе 7.5 (с. 171, см. рис. 87). Раствор, который налипает на вальце, должен высохнуть за один оборот вальца. Толщина раствора на поверхности вальца зависит от его вязкости и составляет 0,1–2,0 мм. При обогреве паром давление пара в вальцах достигает 5 кгс/см<sup>2</sup>. Коэффициент теплопередачи  $K$  ориентировочно составляет 150–400 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Напряжение по влаге поверхности вальцов достигает 30–40 кг/(м<sup>2</sup>·ч) при давлении греющего пара 5 бар. Коэффициент теплоотдачи пара  $\alpha_{\text{п}} = 8000\text{--}12\,000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). При работе вальцовых сушилок особое внимание должно быть уделено отводу конденсата и неконденсирующихся газов, так как значение коэффициента теплоотдачи уменьшается при попадании воздуха в цилиндр вальца и при плохом отводе конденсата. Коэффициент теплоотдачи от поверхности материала, налипшего на вальце к воздуху  $\alpha_{\text{в}}$ , можно рассчитать по критериальным уравнениям или определить экспериментально. Термическое сопротивление высушиваемого материала можно рассчитать, если известны его коэффициент теплопроводности и толщина слоя. Обычно значение коэффициента теплоотдачи от материала к воздуху много меньше, чем коэффициент теплоотдачи пара  $\alpha_{\text{в}} \ll \alpha_{\text{п}}$ .

Технологический расчет вальцовой сушилки заключается в определении поверхности вальца, расхода греющего пара и испаренной из материала влаги.

Необходимую поверхность вальца  $F$ , м<sup>2</sup>, определяем из уравнения теплопередачи

$$Q = KF(T_{\text{гр.п}} - t_0),$$

где  $Q$  — расход тепла, Вт, необходимый на нагрев материала и испарение жидкости.

$$Q = W \cdot r + G_{\text{м}} c_{\text{м}} (t_{\text{мн}} - t_{\text{мк}}) + Q_{\text{пот}},$$

где  $G_{\text{м}}$  — расход влажного материала, кг/с;  $W$  — расход испаренной влаги, кг/с;  $c_{\text{м}}$  — теплоемкость влажного материала, кДж/(кг·К);  $t_{\text{мн}}$ ,  $t_{\text{мк}}$  — начальная и конечная температура материала (температура испарения влаги), °С;  $r$  — теплота испарения воды при атмосферном давлении,  $r = 2490$  кДж/кг;  $T$  — температура греющего пара, °С;  $t_0$  — температура воздуха вблизи поверхности вальца, °С. Потери тепла примем 5 % от общего расхода тепла  $Q_{\text{пот}} = 0,05 \cdot Q$ .

Коэффициент теплопередачи рассчитываем по известной формуле [7]:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\Pi}} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{\delta_{\text{м}}}{\lambda_{\text{м}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}}}},$$

где  $\delta_{\text{ст}}$ ,  $\delta_{\text{м}}$  — толщина стальной стенки вальца и толщина слоя влажного материала, м;  $\lambda_{\text{ст}}$ ,  $\lambda_{\text{м}}$  — коэффициенты теплопроводности стали и материала соответственно, Вт/(м·К).

Первоначально определим ориентировочно поверхность теплопередачи вальца, приняв коэффициент теплопередачи  $K = 200$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). По уравнению материального баланса для влажного материала получаем:

- расход влажного материала 253 кг/ч;
- расход высушенного материала с влажностью 5 % — 40 кг/ч;
- расход испаренной влаги  $W = 213$  кг/ч.

Расход тепла на сушку

$$Q = 1,05(W \cdot r + G_{\text{м}} c_{\text{м}} (t_{\text{мн}} - t_{\text{мк}})) = 164 \text{ кВт}.$$

Поверхность теплопередачи

$$F = \frac{Q}{K(T - t_0)} = 6 \text{ м}^2.$$

Поскольку барабан частично погружен в раствор, необходимая поверхность будет больше  $F_0 = F / \varphi = 7,9 \text{ м}^2$ , где  $\varphi$  — коэффициент, характеризующий угол погружения вальца в раствор.

К расчету принимаем вальцовую сушилку: диаметр цилиндра (вальца) 1000 мм, длина вальца 1200 мм, его поверхность 3,77 м<sup>2</sup>. Потребуется два или три таких аппарата.

Теперь выполним более подробный расчет.

Раствор ГИПАНа имеет средний коэффициент теплопроводности<sup>1</sup>  $\lambda_{\text{м}} = 0,4$  Вт/(м·К), коэффициент теплопроводности стали  $\lambda_{\text{ст}} = 46,5$  Вт/(м·К).

Перенос тепла и испаренной влаги от поверхности материала к воздуху происходит за счет естественной конвекции и вынужденного движения паров воды и воздуха. Над вальцом сушилки устанавливают зонт, удаление воздуха производится вытяжным вентилятором. Для выбора вентилятора рассчитаем расход воздуха и гидравлическое сопротивление вытяжки.

<sup>1</sup> Данные по теплопроводности ГИПАНа отсутствуют, однако для большинства пластмасс минимальный коэффициент теплопроводности составляет 0,17 Вт/(м·К), а для воды — 0,65 Вт/(м·К). Берем среднее значение 0,4 Вт/(м·К).

Сечение вытяжного зонта размером  $1200 \times 1400$  мм примем  $0,4 \text{ м}^2$ , скорость воздуха в пространстве между цилиндром вальца и зонтом  $2 \text{ м/с}$ . Тогда расход воздуха составит  $2 \cdot 0,4 \cdot 3600 = 2880 \text{ м}^3/\text{час}$  при температуре  $20^\circ\text{C}$ . Примем скорость в газоходах  $9 \text{ м/с}$ , диаметр труб  $350 \text{ мм}$ . При длине вытяжного воздуховода  $10 \text{ м}$  гидравлическое сопротивление составит  $80 \text{ Па}$ .

Устанавливаем вытяжной вентилятор низкого давления ВР-80-75 № 4, его производительность  $1,8\text{--}4,3 \text{ тыс. м}^3/\text{ч}$ , напор  $520\text{--}290 \text{ Па}$ ,  $1450 \text{ об/мин}$ ,  $0,75 \text{ кВт}$ .

Влагосодержание воздуха после вытяжки составит  $x_2 = W / V_{\text{в}} = 0,083 \text{ кг/кг}$ , точка росы  $50^\circ\text{C}$ ; следовательно, температура воздуха после вытяжки должна быть не менее  $60^\circ\text{C}$ .

Для расчета коэффициента теплоотдачи от поверхности высушиваемого материала к окружающему цилиндру воздуха известные критериальные зависимости не применимы<sup>1</sup>, поскольку тепло поступает в тонкий слой материала от поверхности вальца, а с поверхности влажного материала испаряется влага при температуре, близкой к температуре кипения воды.

Оценить толщину пленки высыхающего раствора  $\delta$  можно по уравнению [7]

$$\delta = \left( \frac{3G\mu}{\rho^2 g \Pi} \right)^{0,33},$$

где расход раствора  $G = 0,070 \text{ кг/с}$ ; динамический коэффициент вязкости раствора,  $\mu = 33 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ ; плотность раствора  $\rho = 1005 \text{ кг/м}^3$ ; смоченный периметр  $L = 1,2 \text{ м}$ . Расчет дает значение  $0,84 \text{ мм}$ .

Толщину пленки раствора можно также оценить по расходу раствора при скорости вращения вальца, которая может быть установлена на сушилке от  $1$  до  $6 \text{ об/мин}$ . При скорости вращения вальца  $1,5 \text{ об/мин}$  толщина пленки раствора составляет  $0,89 \text{ мм}$ .

Для расчета примем толщину пленки  $\delta = 0,9 \text{ мм}$ , коэффициент теплопроводности пленки  $\lambda_{\text{м}} = 0,4 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ , коэффициент теплоотдачи греющего пара  $\alpha_{\text{п}} = 8000 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ .

Удельный расход тепла  $q$ ,  $\text{Вт/м}^2$ , от конденсирующегося пара внутри вальца к наружной поверхности пленки (поверхности испарения  $t_{\text{м}}$ ) составит:

$$q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{п}}} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{\delta_{\text{м}}}{\lambda_{\text{м}}}} (T_{\text{п}} - t_{\text{м}}).$$

<sup>1</sup> Расчет по известным критериальным уравнениям дает коэффициент теплоотдачи воздуха при вынужденной конвекции примерно  $10\text{--}20 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ , однако реальный коэффициент при испарении влаги намного выше, и составляет примерно  $100\text{--}200 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ .

С другой стороны,

$$q = \alpha_v (t_m - t_0),$$

При температуре испарения с поверхности пленки  $t_m = 100^\circ\text{C}$  получаем следующие значения:

- $\alpha_v = 284 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;
- $q = 22,7 \text{ кВт}/\text{м}^2$ ;
- $K = 164,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Уточненное значение поверхности теплопередачи составит

$$F_0 = \frac{Q}{q\varphi} = 9,63 \text{ м}^2.$$

Таким образом, для заданной производительности потребуются  $(9,63/3,77 = 2,5)$ , т. е. три вальцовых сушилки с размером вальца  $1000 \times 1200 \text{ мм}$ . Запас по производительности 20 %.

Испытания сушки раствора ГИПАНа на сушилке с размерами вальца ( $D \times L$ )  $800 \times 1000 \text{ мм}$  дали следующие результаты:

Производительность:

- по конечному (5 %) продукту 10 кг/ч;
- по испаренной влаге 63 кг/ч.

Расчетный коэффициент теплопередачи, отнесенный к рабочей поверхности вальца ( $1,9 \text{ м}^2$ )  $K = 187 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Удельный расход греющего пара 1,6 кг/кг.

Данные получены при сушке 13 %-ного раствора ГИПАНа с температурой  $70^\circ\text{C}$ . Избыточное давление греющего пара 0,5 МПа. Материал снимался с вальца в виде корки и затем отправлялся на дробление и затарку.



Фото образца ГИПАНа,  
высушенного на вальцовой  
сушилке



### 10.11. РАСЧЕТ ДВУХКОНУСНОЙ ВАКУУМ-СУШИЛКИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ СУШКИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОРОШКА

Металлический порошок нержавеющей стали (AISI 304L, AISI 316L) получается распылением жидкого металла в жидкую среду. После застывания металла водная суспензия порошка металла подается на центрифугу периодического действия. Разовая выгрузка порошка металла с влажностью 10 % из центрифуги составляет 560 кг, время центрифугирования 45 мин.

Для сушки целесообразно использовать аппарат периодического действия. Поскольку не допускается окисление поверхности частиц металлического порошка, процесс сушки необходимо производить под вакуумом или в инертной атмосфере.

В качестве теплоносителя можно использовать диатермическое масло или греющий пар. Температура органического масла от 90 до 200 °С, температура конденсации греющего пара (6 атм.) 165 °С. На производстве предполагается использовать только электронагрев.

Приведем основные исходные данные для расчета сушильного аппарата:

- производительность по конечному продукту не менее 500 кг за 45 мин;
- начальная влажность 10 %;
- конечная влажность 0,1 %;
- насыпная плотность 2,6–3,2 г/см<sup>3</sup>;
- истинная плотность — 6,9 г/см<sup>3</sup>;
- медианный размер частиц 0,045 мм, нормальное распределение 2,4.

Необходимо рассчитать и выбрать для сушки указанного материала двухконусную вакуум-сушилку периодического действия.

Металлические частицы содержат только поверхностную влагу, поэтому расчет скорости сушки можно выполнить по известным критерияльным уравнениям для первого периода сушки.

Расчет показывает, что при температуре 50–60 °С под вакуумом сушка одиночной частицы происходит за доли секунды. Однако для большого объема материала в плотном слое необходим продолжительный нагрев сушильного аппарата.

Вакуумные сушильные аппараты позволяют снизить температуру материала во время сушки и производить сушку в атмосфере с низким содержанием кислорода. Эти два фактора позволят предотвратить окисление поверхности металлических частиц.

Для сушки рекомендуется сушилка SZG китайской компании Xianfeng Drying Engineering либо аналогичные сушилki компании Ital Vacuum или Lemar Drying.

Двухконусная вакуум-сушилка изображена на рис. 84, 85 (глава 7.5, с. 168–169).

Технические характеристики двухконусной вакуум-сушилки типа SZG представлены в табл. 10-33.

Для расчета времени сушки приняты следующие данные сушилки:

- степень заполнения 40 %;
- давление (вакуум) в сушильной камере — 0,15 бар;
- давление в рубашке < 0,3 МПа;
- теплоноситель — диатермическое масло.

Поскольку металл имеет высокий коэффициент теплопроводности, а сушка происходит в первом периоде, скорость сушки полностью определяется скоростью подвода тепла в аппарат через масляную рубашку.

Время сушки можно рассчитать по уравнению теплопередачи.

В первом периоде сушки скорость сушки пропорциональна движущей силе  $(T - t)$  и рассчитывается по уравнению теплопередачи:

$$Q = KF(T - t)\tau,$$

где  $K$  — коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F$  — поверхность теплопередачи масляной рубашки, м<sup>2</sup>;  $T$  — температура масла, К;  $t$  — температура испарения влаги из материала, К;  $\tau$  — время сушки, с.

Коэффициент теплопередачи для данного теплового процесса составляет 120–300 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Принимая для расчета минимальный коэффициент теплопередачи, получаем максимальное время сушки для аппаратов, указанных в табл. 10-34.

Для выбранной центрифуги (500 кг за 45 мин) подойдет двухконусная вакуум-сушилка SZG-500, время сушки в которой 72 мин, а максимальная загрузка составляет 640 кг.

При разовой загрузке в сушильный бак 560 кг влажного порошка получаем общее время цикла 71–80 мин:

- время загрузки 5–10 мин;
- время прогрева материала 5 мин;
- время сушки 56–60 мин;
- время разгрузки материала 5 мин;

Итого: 61–80 мин.

Следовательно, необходимо выбрать две сушилки, которые будут работать попеременно: пока одна сушилка в работе, вторая загружается.

Рекомендуется поставить одну резервную сушилку на случай ремонта или технического обслуживания одной из сушилок.

Таблица 10-33

Технические характеристики вакуум-сушилок

Технические характеристики	Типоразмер двухконусной вакуум-сушилки SZG									
	100	350	500	750	1000	1500	2000	3500	4500	5000
Емкость бака, л	100	350	500	750	1000	1500	2000	3500	4500	5000
Вместимость, л	50	175	250	375	500	750	1000	1750	2250	2500
Площадь нагрева, м²	1,16	2,00	2,63	3,50	4,61	5,58	7,5	11,2	13,1	14,1
Скорость вращения бака, об/мин	4–6									
Мощность двигателя, кВт	0,75	1,1	1,5	2	3	3	4	5,5	7,5	11
Размеры • длина • ширина • высота	2160	2260	2160	2160	2160	2160	2160	2160	2160	2160
	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
	1750	1750	1750	1750	1750	1750	1750	1750	1750	1750
Давление в (разрезе) баке, МПа	00,1–0,015									
Давление в рубашке, МПа	≤ 0,3									
Рабочая температура, °С	бак ≤ 85, рубашка ≤ 140									
Вакуум-насос (для работы с конденсатором)	2X-15A	2X-15A	2X-30A	2X-30A	2X-70A	JZJX 300-8	JZJX 300-4	JZJX 600-8	JZJX 600-4	JZJX 600-4
Двигатель, мощность, кВт	2	2	3	3	5	7	9,5	11	20,5	22
Вакуум-насос (для работы без конденсатора)	СК-0,4	СК-0,8	СК-0,8	СК-2,7	СК-2,7	СК-3	СК-6	СК-6	СК-9	СК-10
Двигатель, мощность, кВт	1,5	2,2	2,2	4	4	5,5	11	11	15	18,5
Вес сушилки, кг	800	1100	1200	1500	2800	3300	3600	6400	7500	8600

Т а б л и ц а 10-34

## Расчет производительности вакуумной двухконусной сушилки

№ п/п	Параметр	Тип сушилки SZG				
		350	500	500	750	1000
1	Объем сушильной камеры, л	350	500	500	750	1000
2	Поверхность теплопередачи, м <sup>2</sup>	2,0	2,6	2,6	3,5	4,61
3	Степень заполнения	0,4	0,31	0,4	0,4	0,4
4	Загрузка материала, кг	448	500	640	960	1280
5	Температура испарения влаги при 0,15 МПа, °С	53	53	53	53	53
6	Температура диатермического масла начальная, °С	180	180	180	180	180
7	Температура диатермического масла конечная, °С	150	150	150	150	150
8	Разность температур, °С	112	112	112	112	112
9	Коэффициент теплопередачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	120	120	120	120	120
10	Мощность теплопередачи, кВт	27	35	35	47	62
11	Расход испаренной влаги, кг	44,8	50	64	96	128
12	Расход тепла на испарение, МДж	107,07	119,50	152,96	229,44	305,92
13	Время сушки, мин	66	56	72	81	82

Вакуумная двухконусная сушилка SZG-500 обогревается диатермическим маслом с начальной температурой 180 °С, которая является максимально допустимой для сушилок такого типа.

Схема обогрева приведена на рис. 83. Маслонагревательная станция нагревает масло ТЭНами, встроенными в емкость. Нагретое диатермическое масло подается насосом в рубашку сушилки. Масляная магистраль соединена с расширительным баком, находящимся сверху. Из рубашки сушилки масло возвращается в маслонагревательную станцию.

Вакуум в сушильной камере создается вакуум-насосом, который подсоединен к ресиверу.

Тепловая мощность для каждой сушилки составит 35 кВт. Для работы двух сушилок одновременно принимаем общую мощность 70 кВт.

Рекомендуется установить на каждую сушилку вакуум-насос производительностью 1,8 м<sup>3</sup>/ч (остаточное давление 0,097 МПа, мощность электродвигателя 5,5 кВт).

Двухконусная вакуум-сушилка SZG-500 является современным высокопроизводительным оборудованием. К ее преимуществу следует отнести быструю загрузку и выгрузку материала из аппарата, эффективный теплообмен, максимальную автоматизацию процесса.

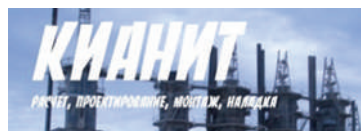
В сушильный бак должен быть встроен датчик температуры, который измеряет температуру материала. Во время сушки температура

материала составляет 53 °С; по мере высыхания материала температура поднимается и в конце сушки достигает температуры теплоносителя (150–180 °С). Подъем температуры до 70–100 °С свидетельствует о завершении процесса сушки, так что система должна автоматически остановить и разгрузить сушилку.

В таблице ниже приведены цены на сушильное оборудование по данным китайской компании Xianfeng Drying и ориентировочная цена по доставке товара в Россию.

№ п/п	Наименование	Кол-во	Цена, USD	Стоимость	
				USD	тыс. руб.
1	Двухконусная вакуум-сушилка SZG-500	3	11 030	33 090	1 985 400
2	Станция нагрева диатермического масла	1	5 800	5 800	348 000
3	Вакуум-насос с ресивером на две сушилки	1	960	960	57 600
4	Доставка оборудования из Китая	1	3 560	3 560	213 600
	Итого:			43 410	2 604 600

Три аппарата ZPG-500 помещаются в 40-футовый контейнер, остальное оборудование может поместиться в 20-футовый контейнер.



**ООО «КИАНИТ»**  
**Тел. (812) 947-04-58**  
 E-mail: anes126@mail.ru  
 www.kianit.ru  
 www.processes-apparates.ru  
 Россия, Санкт-Петербург,  
 пр. Юрия Гагарина, 1, оф. 642

Инженерная компания выполняет расчет, проектирование, шеф-монтаж и пуско-наладочные работы, изготовление оборудования:

- сушильные аппараты:
  - сушилки кипящего слоя, вибросушилки;
  - распылительные сушилки;
  - барабанные сушилки;
  - вакуумные сушилки;
- шахтные печи 25–100 тонн извести в сутки;
- аппараты для гашения извести 1–6 т/ч;
- пневмотранспорт 6–50 т/ч.

# ЛИТЕРАТУРА

## УЧЕБНИКИ, УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ

1. Гельперин Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии. В 2-х кн. М.: Химия, 1981. 812 с.
2. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии. В 2 кн. М.: Химия, 2002. 768 с.
3. Игнатович Э. Химическая техника. Процессы и аппараты. М.: Техносфера, 2007. 656 с.
4. Иоффе И. Л. Проектирование процессов и аппаратов химической технологии. Л.: Химия, 1991. 352 с.
5. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1973. 752 с.
6. Коган В. В. Теоретические основы типовых процессов химической технологии. Л.: Химия, 1977. 592 с.
7. Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Л.: Химия. 1970. 624 с.
8. Плановский А. Н., Николаев П. И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. М.: Химия, 1987. 496 с.
9. Романков П. Г., Фролов В. Ф., Флисюк О. М. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи). СПб.: ХимИздат, 2009. 544 с.
10. Фролов В. Ф. Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии». СПб.: ХимИздат, 2003. 608 с.

## КНИГИ

11. Акулич П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок. Минск, Беларус. наука, 2010. 443 с.
12. Берлинер М. А. Измерения влажности. М.: Энергия, 1973. 400 с.
13. Богуславский Н. М., Мелик-Ахназаров Т. Х. Псевдоожижение в химической технологии. М.: ГОСИНТИ, 1960. 98 с.
14. Бокиштейн Б. С. Диффузия в металлах. М.: Металлургия, 1978. 250 с.
15. Болгарский А. В. Влажный газ. М.; Л.: Государственное энергетическое издательство, 1951. 156 с.
16. Витман Л. А., Кацнельсон Б. Д., Палеев И. И. Распыливание жидкости форсунками. М.: Государственное энергетическое издательство, 1962. 264 с.
17. Гельперин Н. И., Айнштейн В. Г., Кваша В. Б. Основы техники псевдоожижения. М.: Химия, 1967. 664 с.
18. Гержой А. П., Самочетов В. Ф. Зерносушение и зерносушилки. М.: Колос, 1967. 116 с.
19. Гинзбург А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1973. 528 с.
20. Гинзбург А. С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. М.: Агропромиздат, 1985. 336 с.

21. Голубев Л. Г., Сажин С. С., Валашек В. Р. Сушка в химико-фармацевтической промышленности. М.: Медицина. 1978. 272 с.
22. Гуйго Э. И., Журавская Н. К., Каухчешвили Э. И. Сублимационная сушка пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1966. 358 с.
23. Денбиг К. Термодинамика стационарных необратимых процессов / Пер. с англ. М.: ИЛ, 1954. 119 с.
24. Дитякин Ю. Ф., Клячко Л. А., Новиков Б. В., Ягодкин В. И. Распыливание жидкостей. М.: Машиностроение, 1977. 208 с.
25. Долинский А. А., Иваницкий Г. К. Оптимизация процессов распылительной сушки. Киев: Наукова думка, 1984. 240 с.
26. Долинский А. А., Малецкая К. Д. Распылительная сушка. В 2 т. Киев: Академперіодика, Т. 1, 2011, 376 с.; Т. 2, 2015, 390 с.
27. Каганович Ю. Я., Злобинский А. Г. Промышленные установки для сушки в кипящем слое. Л.: Химия, 1970. 176 с.
28. Камовников Б. П., Малков Л. С., Воскобойников В. А. Вакуум-сублимационная сушка пищевых продуктов. М.: Агропромиздат, 1985. 288 с.
29. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 488 с.
30. Кац З. А. Производство сушеных овощей, картофеля и фруктов. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. 216 с.
31. Кей Р. Б. Введение в технологию промышленной сушки. Минск: Наука и техника, 1983. 262 с.
32. Красников В. В. Кондуктивная сушка. М.: Энергия, 1973. 288 с.
33. Кречетов И. В. Сушка древесины. М.: Лесн. пром-ть, 1980. 432 с.
34. Кречетов И. В. Сушка и защита древесины. М.: Лесная промышленность, 1987. 328 с.
35. Кришер О. Научные основы техники сушки / Пер. с нем. под ред. А. С. Гинзбурга. М.: Издательство, 1961. 539 с.
36. Лебедев П. Д. Расчет и проектирование сушильных установок. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. 320 с.
37. Лисай В. Э., Костицын Б. А., Уразовская В. Н. Процессы химической технологии. М.; Л.: Химия, 1965, 342 с.
38. Лурье М. Ю. Сушильное дело. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1938. 384 с.
39. Лурье М. Ю. Сушильное дело. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1948. 711 с.
40. Лыков А. В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
41. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.
42. Лыков А. В. Тепломассообмен. Справочник. М.: Энергия, 1972. 560 с.
43. Лыков А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1956. 464 с.
44. Лыков А. В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954. 296 с.
45. Лыков А. В., Михайлов Ю. А. Теория тепло- и массопереноса. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. 536 с.
46. Лыков М. В., Леончик Б. И. Распылительные сушилки. М.: Машиностроение, 1966. 331 с.
47. Лыков М. В. Сушка в химической промышленности. М.: Химия, 1970. 429 с.



48. Мальтри В., Пётке Э. Шнайдер Б. Сушильные установки сельскохозяйственного назначения / Пер. с нем. под ред. В. Г. Евдокимова М.: Машиностроение, 1979. 525 с.
49. Матур и др. Фонтанирующий слой / Пер. с англ. Л.: Химия, 1978. 287 с.
50. Михайлов Ю. А. Сушка перегретым паром. М.: Энергия, 1967. 200 с.
51. Муштаев В. И., Ульянов В. М. Сушка дисперсных материалов. М.: Химия, 1988. 352 с.
52. Муштаев В. И., Ульянов В. М., Тимонин А. С. Сушка в условиях пневмотранспорта. М.: Химия, 1984. 232 с.
53. Никитина Л. М. Термодинамические параметры и коэффициенты массопереноса во влажных материалах, М.: Энергия, 1968. 500 с.
54. Осипова В. А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. М.: Энергия, 1979. 320 с.
55. Пажид. Г., Галустов В. С. Распылители жидкостей. М.: Химия, 1979. 216 с.
56. Пажид. Г., Корягин А. А., Ламм Э. Л. Распыливающие устройства в химической промышленности. М.: Химия, 1975. 200 с.
57. Пажид. Г., Прахов А. М., Равикович Б. Б. Форсунки в химической промышленности. М.: Химия, 1971. 220 с.
58. Пахомов А. Н., Гатапова Н. Ц., Пахомова Ю. В. Моделирование и расчет кинетики сушки жидких дисперсных продуктов на подложках. Тамбов: Изд. ФГБОУ ВО ТГТУ, 2016. 160 с.
59. Пейч Н. Н., Царев Б. С. Сушка древесины. М.: Высш. школа, 1971. 220 с.
60. Пригожий И. Введение в термодинамику необратимых процессов / Пер. с англ. М.: ИЛ, 1960, 127 с.
61. Пономарев С. В., Мищенко С. В., и др. Теоретические и практические основы теплофизических измерений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 408 с.
62. Расев А. И. Сушка древесины. М., 1980. 178 с.
63. Расчеты аппаратов кипящего слоя: справочник / Под ред. И. П. Мухленова, Б. С. Сажина, В. Ф. Фролова. Л.: Химия, 1986. 352 с.
64. Рашковская Н. Б. Сушка в химической промышленности. Л.: Химия, 1977. 78 с.
65. Романков П. Г., Рашковская Н. Б., Фролов В. Ф. Массообменные процессы химической технологии. Л.: Химия, 1975. 336 с.
66. Романков П. Г., Рашковская Н. Б. Сушка во взвешенном состоянии. Л.: Химия, 1968. 360 с.
67. Романков П. Г., Рашковская Н. Б. Сушка во взвешенном состоянии. Л.: Химия, 1979. 272 с.
68. Романков П. Г., Рашковская Н. Б. Сушка в кипящем слое. Л.; М.: Химия, 1964. 288 с.
69. Романков П. Г., Фролов В. Ф. Массообменные процессы химической технологии. М.: Химия, 1990. 384 с.
70. Рудобашта С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой. М.: Химия, 1980. 248 с.
71. Сажин Б. С. Основы техники сушки. М.: Химия, 1984. 320 с.
72. Семенов Г. В., Касьянов Г. И. Сушка сырья: мясо, рыба, овощи, фрукты, молоко. Ростов-на-Дону, 2002. 112 с.

73. *Смольский Б. М.* Внешний тепло- и массообмен в процессах сушки. Минск: Изд-во БГУ, 1957, 205 с.

74. *Филоненко Г. К., Гришин М. А., др.* Сушка пищевых растительных материалов. М.: Изд. Пищевая промышленность, 1971, 440 с.

75. *Филоненко Г. К., Лебедев П. Д.* Сушильные установки. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1952. 264 с.

76. *Фролов В. Ф.* Моделирование сушки дисперсных материалов. Л.: Химия, 1987. 208 с.

77. *Хавкин Ю. И.* Центробежные форсунки. Л.: Машиностроение. 1976. 168 с.

78. *Тодес О. М., Каганович, Налимов С. П. и др.* Обезвоживание растворов в кипящем слое. М.: Металлургия, 1973. 288 с.

79. *Тодес О. М., Цитович О. Б.* Аппараты с кипящим зернистым слоем. Гидравлические и тепловые основы работы. Л.: Химия, 1981. 296 с.

80. *Чернобыльский И. Я., Тананайко Ю. М.* Сушильные установки химической промышленности. Киев: Техника, 1969. 280 с.

81. *Членов В. А., Михайлов Н. В.* Виброкипящий слой. М.: Наука, 1972. 325 с.

#### НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ЛИТЕРАТУРА

82. Типовые сушилки со взвешенным слоем материала. Обзорная информация / Б. С. Сажин, Е. А. Чувпило. Сер. ХМ-1. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1975. 72 с.

83. Сушильные аппараты. Каталог-справочник / Ред. Шапиро. М.: ЦИНТИхимнефтемаш. 1966. 84 с.

84. Сушильные аппараты и установки. Каталог ЦИНТИхимнефтемаш. М., 1988. 74 с.

85. ГОСТ 28115–86 / Аппараты и установки сушильные. Классификация.

86. ГОСТ 27134–86 / Аппараты сушильные с вращающимися барабанами. Основные параметры и размеры.

87. Jiangsu Xianfeng Drying Engineering Co., LTD. Catalog, 2016. 64 с.

88. CD-Dryers. Дисковые сушилки ALLGIER, 2015.6 с.

89. Сушилка с вихревым слоем ALLGIER, 2015. 8 с.

90. Технологии сушки для минеральных сырьевых материалов, 2015, 12 с.

#### СТАТЬИ, ЖУРНАЛЫ

91. Экспериментальное определение коэффициентов диффузии влаги газобетона гамма-методом / М. И. Низовцев, С. В. Станкус и др. // Известия вузов. Строительство. 2002, № 4. С. 123–127.

92. Измерение коэффициентов диффузии влаги газобетона гамма-методом при сорбционном увлажнении / М. И. Низовцев, С. В. Станкус и др. // Известия вузов. Строительство. 2003, № 4. С. 116–120.

93. *Тройский М.* Вращающиеся барабаны для эффективной сушки и охлаждения. ALLGIER, 2020. 41 с.

94. *Тройский М.* Критерии выбора для применения сушилок в производстве минерального сырья, химической промышленности, и при вторичной переработки материалов // ALLGIER, Cement international. № 1 / 2011. Р. 38–47.

95. Сублимационная сушка пищевых продуктов / Ред. А. С. Гинзбург М.: Пищевая промышленность, 1968. 272 с.

### ДИССЕРТАЦИИ

96. Сажин Б. С. Докт. дис., 1972.

97. Сажин В. Б. Канд. дис., 2000.

### ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 8

98. Мамыкин П. С., Левченко П. В., Стрелов К. К. Печи и сушила огнеупорных заводов. ГосНТИ по черной и цв. металлургии. Свердловск, 1963

99. Гинзбург Д. Б. и др. Печи и сушилки силикатной промышленности. М.: Строительство, 1963, 344 с.

100. Сулименко Л. М. Общая технология силикатов. М.: ИНФРА-М, 2004, 336 с.

101. Булавин И. А., Макаров И. А. и др. Тепловые процессы в технологии силикатных материалов. М.: Стройиздат, 1962, 246 с.

102. Левченко П. В. Расчеты печей и сушил силикатной промышленности, изд. 1968 г. М., 2007, 356 с.

103. Ахметов М. А., Атакузиев Т. А. Фосфогипс (исследование и применение). Ташкент: Изд-во УССР, 1980, 156 с.

104. Ляшкевич И. М. Эффективные строительные материалы на основе гипса и фосфогипса. Минск: Вышэйшая школа, 1989, 160 с.

105. Вихтер Я. И. Производство гипса. М., 1962, 246 с.

106. Чижский А. Ф. Сушка керамических материалов и изделий. М.: Стройиздат, 1971. 176 с.

107. Филоненко Г. К., Гришин М. А. и др. Сушка пищевых растительных материалов. М.: Пищевая промышленность, 1971, 440 с.

108. Сурков В. Д., Липатов Н. Н. и др. Технологическое оборудование предприятий молочной промышленности М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983, 432 с.

109. Гинзбург Д. Б., Деликишкин С. Н. и др. Печи и сушила силикатной промышленности. М.: Госиздат литературы по строительным материалам, 1956. 456 с.

*Александр Владимирович НЕСТЕРОВ*

## **ПРОМЫШЛЕННАЯ СУШКА**

### **МОНОГРАФИЯ**

Редакция  
инженерно-технической литературы

Ответственный редактор *Д. А. Петров*

ЛР № 065466 от 21.10.97

Гигиенический сертификат 78.01.10.953.П.1028  
от 14.04.2016 г., выдан ЦГСЭН в СПб

**Издательство «ЛАНЬ»**

lan@lanbook.ru; www.lanbook.com

196105, Санкт-Петербург, пр. Ю. Гагарина, д. 1, лит. А.

Тел./факс: (812) 336-25-09, 412-92-72.

Бесплатный звонок по России: 8-800-700-40-71

Подписано в печать 18.08.21.

Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Формат 70×100<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Печать офсетная. Усл. п. л. 24,70. Тираж 100 экз.

Заказ № 1002-21.

Отпечатано в полном соответствии

с качеством предоставленного оригинал-макета  
в АО «Т8 Издательские Технологии».

109316, г. Москва, Волгоградский пр., д. 42, к. 5.