

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

**ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СУШКИ  
ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ**

(Учебное пособие)

**Иваново**

**2007**

УДК 631.362:633.1

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СУШКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ /О.В. Чагин, Н.Р. Кокина, В.В. Пастин : Иван. хим. - технол. ун-т.:Иваново. 2007. 138 с.

В методических пособиях дан анализ принципа действия, достоинств и недостатков основных существующих и новых перспективных конструкций оборудования для сушки пищевых продуктов и методы их расчета.

Учебное пособие состоит из трех разделов. В первом разделе представлены теоретические основы процесса обезвоживания пищевых продуктов. Выполнен анализ кинетики сушки пищевых материалов. Представлены схемы наиболее часто встречающихся сушилок, используемых в пищевой промышленности.

Во втором разделе представлены методики расчета конвективных, контактных и радиационных сушилок, как наиболее часто используемых в пищевой промышленности.

в третьем разделе рассмотрено основное промышленное оборудование для сушки пищевых продуктов.

Табл.4 . Ил.40. Библиогр.32.

Методические указания предназначены для студентов специальности 17.06.00."Машины и аппараты пищевых производств".

ISBN 5-230-01593-4

С Ивановский государственный  
химико0технологический  
университет, 2007

# **1. СУШКА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ**

## **1.1. СПОСОБЫ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ**

Многие виды сырья для пищевых производств содержат значительное количество воды. При протекании технологических процессов нередко происходит увлажнение полупродуктов производства. Однако готовые пищевые продукты для повышения степени сохранности и транспортабельности должны содержать минимальное количество влаги. Поэтому процесс обезвоживания встречается почти во всех пищевых производствах.

Влага из материалов может быть удалена различными способами: механическим, физико-химическим, тепловым (сушка). При механическом удалении влага отжимается в прессах или под действием центробежной силы в центрифугах. Механически удаляется только часть влаги, содержащейся в материале. После механического удаления обычно применяется сушка. Физико-химические способы сушки основаны на применении водоотнимающих средств. На производстве они применения не получили, но используются в лабораторной практике (обезвоживание над серной кислотой или над хлористым кальцием в эксикаторах).

## **1.2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СУШКИ**

Сушка как способ удаления влаги из материалов получила наибольшее распространение. Высушиванию подвергаются твердые и жидкие материалы, содержащие воду. Процесс сушки связан с подводом к высушиваемому телу тепла, за счет которого происходит испарение влаги. Для отвода испаряемой влаги применяются сушильные агенты (воздух, перегретый пар, топочные газы), которые насыщаются влагой, диффундирующей с поверхности материала.

Сушка является, с одной стороны, диффузионным процессом, с другой — тепловым. Это сложный технологический процесс, в результате которого изменяются свойства материала.

На рис.1.1 представлена схема сушильного процесса В сушилку *A* поступает влажный материал, который соприкасается с подогретым воздухом, топочными газами или перегретым паром, нагревается, и в результате происходит испарение влаги с поверхности материала. Влага диффундирует в воздух. Последний, следовательно, не только охлаждается, но и увлажняется и, выходя из сушилки, уносит влагу. Из рассмотрения этого процесса вытекает, что сушка—это термический процесс удаления влаги, происходящий вследствие ее испарения и диффузии.

### 1.3. ЗНАЧЕНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ДЛЯ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Процесс сушки играет громадную роль в различных отраслях народного хозяйства. В Советском Союзе на высушивание затрачивалось ежегодно свыше 3 млн. т топлива. В пищевой промышленности сушка является одним из основных процессов и применяется почти в любом производстве.

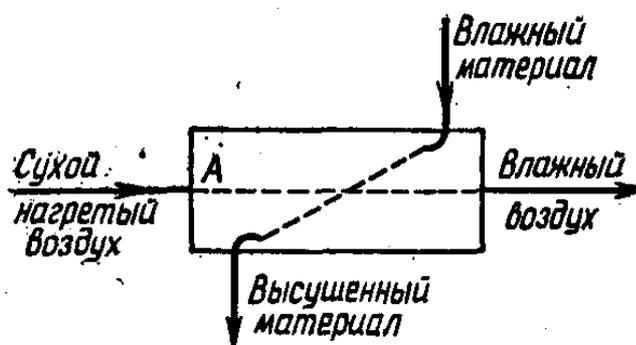


Рис.1.1

#### Принципиальная схема сушки

В свеклосахарном производстве сушке подвергаются сахар-песок, сахар-рафинад, а также отходы производства - жом. В спиртовом производстве высушиваются отходы производства: барда, пищевые и кормовые дрожжи. Большую роль играет сушка в пивоваренном производстве, где сушке подвергается солод, а также отходы производства. В крахмало - паточном производстве высушивают крахмал и отходы

производства. Сушка используется также при получении сгущенного молока, сухих фруктов и овощей и т.п. Хлеб сушат для получения сухарей. В ряде производств сушка является заключительным этапом, определяющим качество готового продукта, как, например, при производстве макарон, пастилы, сухих фруктов.

## **1.4 ВЛАЖНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

### **1.4.1. Виды влажных материалов**

Влажные материалы могут быть разделены на следующие группы

#### *I. Жидкости, содержащие влагу:*

- 1) растворы кристаллоидов;
- 2) коллоидные растворы.

#### *II. Твердые тела, содержащие влагу:*

- 1) кристаллические (сахар, поваренная соль и т.п.);
- 2) коллоидно-дисперсные системы.

Последняя группа является наиболее распространенной. Коллоидные тела, подвергаемые сушке, А.В. Лыков предлагает разделить на три группы:

а) эластичные гели, к которым относятся типичные коллоидные тела: желатин, агар-агар, прессованное мучное тесто. При удалении влаги эти тела сжимаются, но сохраняют эластичность;

б) хрупкие гели, к которым относятся тела, которые при удалении влаги становятся хрупкими: древесный уголь, керамические материалы и т.д. В высушенном состоянии они могут быть превращены в порошок;

3) коллоидные капиллярно-пористые тела, к которым относятся такие материалы, как торф, древесина, кожа, зерно, хлеб и т.п. Стенки капилляров

этих тел эластичные, поэтому при сушке происходит усадка. После высушивания эти тела (сухари) становятся хрупкими.

#### 1.4.2. Виды связи влаги с материалом

Классификация форм связи влаги с материалом (по П.А. Ребиндеру). В основу классификации форм связи влаги положена энергия связи. Форма связи играет большую роль в технологии процесса сушки. Связь может быть:

- а) химическая (ионная, молекулярная);
- б) физико-химическая (адсорбционная, осмотическая, структурная);
- в) механическая (влаги в капиллярах и макрокапиллярах, влаги смачивания).

Наиболее прочным видом связи влаги является химическая. Материалами с химической связью влаги являются, например,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (ионная связь) и  $\text{CuSO}_4 \times \text{H}_2\text{O}$  (гидратная вода). Для нарушения этой связи сушка недостаточно эффективна, и в этом случае нужно применить прокалывание или химическое воздействие.

Влага, связанная с материалом физико - химически, может быть удалена при помощи сушки. Формы физико-химической связи разнообразны.

Адсорбционно-связанная влага. Адсорбционно-связанная влага удерживается у поверхности раздела коллоидных частиц с окружающей средой. Обладая большой поверхностью, коллоидные структуры имеют большую адсорбционную способность. Адсорбционная влага удерживается молекулярным силовым полем. Прочно связанная с материалом, эта влага называется связанной водой. Связанная вода настолько прочно соединена с коллоидными частицами, что она не участвует в растворении кристаллических веществ, если они добавлены в коллоидный раствор. Адсорбция влаги сопровождается выделением тепла, которое называется теплом гидратации.

Осмотически удержанная и структурная влага. Эта влага отличается от адсорбционной тем, что при присоединении влаги этих видов не выделяется тепло. Эта влага связана с материалом менее прочно, чем адсорбционная. Чтобы уяснить состояние осмотически связанной и структурной влаги, нужно рассмотреть структуру коллоидного тела. Гель состоит из частиц различного размера. Высокомолекулярные частицы нерастворимы в воде, а частицы с малой молекулярной массой растворимы. Высокомолекулярная фракция образует скелет клеток геля, внутри которых находятся в водном растворе частицы с низкомолекулярной массой. Оболочка из высокомолекулярных соединений обладает свойствами полупроницаемых перегородок. Поэтому внутриклеточная влага удерживается осмотическими силами. Если влага попадает внутрь клеток геля при образовании его, она называется структурной. К этой группе может быть отнесена влага, заключенная в клетках растительных тканей.

Влага, наименее прочно связанная с материалом, удерживаемая механически. Механическая влага содержится в капиллярах тела и на его поверхности. Капилляры пористых тел весьма разнообразны по диаметру. Микрокапиллярами называются капилляры, средний радиус которых меньше  $10^{-5}$  см. Макрокапилляры имеют средний радиус более  $10^{-5}$  см.

Влага, находящаяся на поверхности тела, называется влагой смачивания. Влага смачивания и влага макропор имеет весьма непрочную связь с материалом и может быть удалена механическим способом (отжатием); такая влага называется свободной.

### 1.4.3. Концентрация влаги

Обычно влага в материале распределена неравномерно. Поэтому различают среднюю концентрацию в материале либо концентрацию в данной точке

Влажностью материала  $W$  называется содержание влаги в процентах массы влажного материала:

$$W = (m_{\text{вл}} / m) 100, \quad (1.1)$$

где  $m_{\text{вл}}$  — масса воды, кг;

$m$  — общая масса материала, кг.

В ряде случаев более удобно относить влагу к абсолютно сухому веществу. В этом случае влагосодержание материала

$$\xi = m_{\text{вл}} / (m_{\text{вл}} - m_{\text{вл}}).$$

### 1.4.4. Равновесная влажность

Поместим какой-либо материал в замкнутый сосуд, в которой находится влажный воздух с определенным парциальным давлением водяного пара. В результате взаимодействия влажного воздуха с материалом влага перейдет из материала в воздух либо из воздуха влага перейдет в материал; после этого установится равновесие и переход влаги прекратится.

Влажность материала в этом равновесном состоянии называется равновесной влажностью. Ясно, что равновесная влажность является функцией парциального давления водяного пара при заданной температуре. Меняя в сосуде парциальное давление пара при постоянной температуре, можно получить ряд значений равновесной влажности и построить кривую линию, называемую изотермой сорбции влаги. Практикой установлено, что для большинства материалов равновесная влажность не зависит от температуры, а зависит только от относительной влажности воздуха

## 1.5.КИНЕТИКА СУШКИ

### 1.5.1. Влагопроводность и термовлагопроводность

При конвективной сушке влажных материалов влага перемещается в материале по направлению от центра кусков материала к периферии, где материал омывается сушильным агентом (воздухом, топочными газами). Такое перемещение влаги (миграция)—в основном диффузионный процесс, движущей силой которого является разность между концентрациями влаги в различных точках материала. Однако, как мы увидим далее, процесс этот усложняется тепловым воздействием на материал. Рассмотрим первоначально перемещение влаги только под влиянием разности концентраций влаги. Поскольку мы имеем дело с диффузионным процессом, то основное уравнение влагопроводности может быть записано аналогично уравнению Фурье

$$m_w = -K_w F(dc / dx) \tau, \quad (1.2)$$

где  $m_w$  — количество влаги, прошедшей через поверхность  $F$  за время  $\tau$  при градиенте концентрации  $dc/dx$ ;

$K_w$  — коэффициент, зависящий от характера связи влаги с материалом и от характера материала.

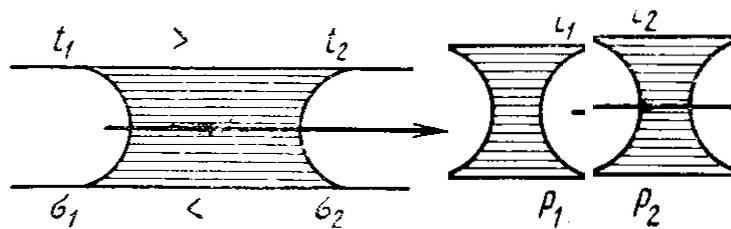


Рис.1.2.

#### *Капиллярные силы и эффект заземленного воздуха*

Следует отметить, что влага может перемещаться в материале как в виде жидкости, так и в виде пара, что также зависит от формы связи и от

характера материала.

Осмотическая влага будет мигрировать через стенки клетки в жидком виде. Адсорбционно-связанная влага перемещается в виде пара. При большой влажности материала преобладает миграция влаги в виде жидкости. При малой влажности материала перемещение происходит в основном в виде пара.

В действительности описанная картина процесса осложняется тем, что материал подвергается одновременному воздействию тепла. При этом наряду с концентрационным градиентом имеет место и температурный градиент. Во влажном материале этот градиент оказывает существенное влияние на механизм миграции влаги. Вследствие наличия температурного градиента во влажном материале проявляется действие термовлагопроводности. Экспериментально установлено, что под влиянием температурного градиента во влажных материалах влага перемещается по направлению потока тепла. Можно указать на три основные причины этого явления:

- 1) термодиффузия, т.е. молекулярное движение жидкости или пара;
- 2) уменьшение поверхностного натяжения с повышением температуры; вследствие этого (рис.1.2) в капиллярах пористых тел происходит движение жидкости в сторону меньших температур, т.е. по направлению теплового потока;
- 3) влияние так называемого заземленного воздуха; при нагревании этого воздуха, содержащегося в капиллярах, он расширяется и проталкивает влагу в том направлении, где давления воздуха меньше, т.е. к месту с более низкой температурой; таким образом, и это явление способствует движению влаги по направлению теплового потока.

Общее количество влаги, которое перемещается под действием температурного градиента  $dt/dx$ , может быть выражено следующим уравнением:

$$m_t = -K_t F(dt / dx) \tau, (1.3)$$

где  $K_t$  - коэффициент, аналогичный коэффициенту  $K_w$  уравнении (1.1)

Суммарное количество влаги, перемещенное при наличии обоих градиентов, при обычной конвективной сушке равно разности

$$m_w - m_t = m, (1.4)$$

так как тепловой поток направлен от периферии к центру тела, а поток влаги, обусловленный разностью концентраций, имеет противоположное направление.

### 1.5.2. Кривые сушки и кривые скорости сушки

Сушка материала состоит из трех этапов:

- 1) перемещения влаги внутри высушиваемого материала по направлению к его поверхности;
- 2) парообразования;
- 3) перемещения пара от поверхности материала в окружающий воздух.

Мы уже рассмотрели первый из этих процессов и выяснили сложную картину этого явления. Влага испаряется на поверхности материала или внутри материала. Затем образовавшийся пар диффундирует в окружающую среду. Этот третий этап процесса протекает следующим образом.

На поверхности влажного материала образуется пограничный воздушно-паровой слой, который находится в равновесии с влагой материала; следовательно, этот слой будет насыщенным при температуре материала.

Движущей силой диффузии влаги из поверхности пленки в окружающую среду является разность парциальных давлений:

$$\Delta P = P_n - P_e,$$

где  $P_n$  — парциальное давление водяного пара в пограничном паровом слое;

$P_e$  — парциальное давление водяного пара в окружающей среде.

Количество продиффундировавшего пара

$$m = B(P_n - P_e)F \tau, \quad (1.5)$$

где  $B$  — коэффициент испарения;

$F$  — площадь поверхности испарения.

Очевидно, количество влаги, прошедшее через пограничный слой в окружающую среду, должно быть равно количеству влаги, подведенной к этому слою из материала. Скорость сушки может лимитироваться этими процессами и зависит от свойств материала и режима сушки.

Наблюдая за изменением массы материала в процессе сушки строят кривую сушки. Кривая сушки строится в координатах (влажность материала в массовых долях) и  $\tau$  (время в минутах или часах). На рис.1.3 представлена кривая сушки коллоидного капиллярно-пористого тела.

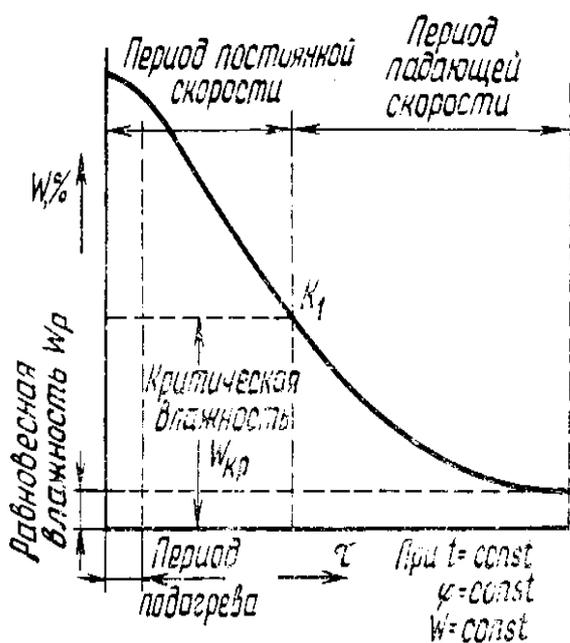


Рис.1.3.

*Кривая сушки коллоидного капиллярно-пористого тела*

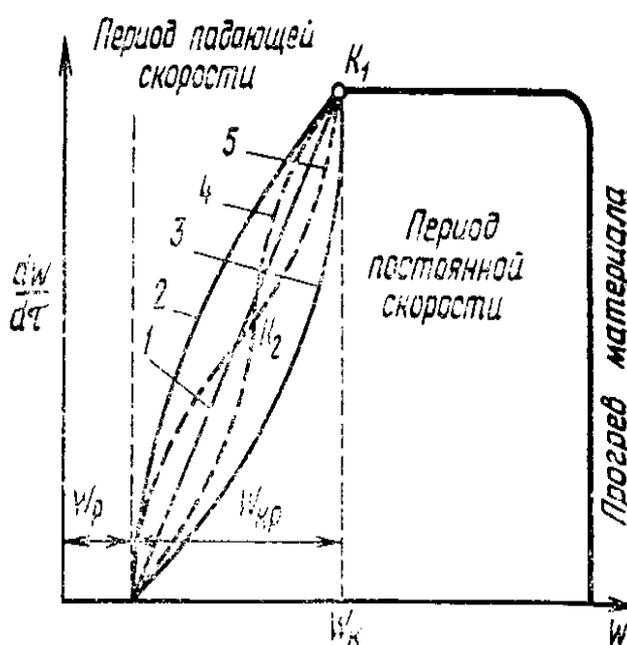


Рис.1.4.

*Кривая скорости сушки*

В начале сушки в течение небольшого промежутка времени линия сушки имеет вид кривой —это период прогрева материала. Затем начинается период постоянной скорости сушки. В этот период линия сушки имеет вид прямой. В точке  $K_1$ , соответствующей определенной влажности материала, характер линии сушки изменяется. Она становится кривой, асимптотически

приближающейся к значению  $W_p$ —равновесной влажности при заданных условиях сушки. Во втором периоде скорость сушки непрерывно уменьшается.

Точка  $K_1$ , разделяющая два периода сушки, называется критической точкой, а влажность материала, соответствующая ей,— критической влажностью.

В первый период сушки происходит удаление свободной влаги (влаги макрокапилляров и смачивания). В этот период давление пара над материалом равно давлению пара чистой жидкости, испаряющейся при тех же условиях.

Когда свободная влага полностью удалена, наступает второй период— период удаления связанной влаги. В этот период форма кривой сушки зависит от характера связи влаги с материалом, а также от структуры материала, обуславливающей механизм перемещения влаги.

Кроме кривой сушки для анализа сушки служит кривая скорости сушки. Для построения ее используется кривая сушки (рис.1.4). Если на этой кривой измерить угол наклона касательной к кривой в различных точках, то значения  $\operatorname{tg}\varphi$  будут равны производной  $dW/d\tau$ , т.е. скорости сушки. Если на горизонтальной оси отложить содержание влаги в материале в процентах, а на вертикальной  $dW/d\tau$  в процентах в час, получим линию, называемую кривой скорости сушки. В период постоянной скорости линия будет горизонтальной. В период убывающей скорости характер кривых скорости сушки различен в зависимости от характера материала и вида связи в нем влаги. На рис. 1.4 представлены кривые скорости сушки в этот период. Все они кончаются в точке, соответствующей равновесной влажности материала, при которой  $dW/d\tau = 0$ .

Простейшая линия сушки типа кривой 1 является прямой. Такие линии дают грубопористые материалы (бумага, тонкий картон). Линии типа кривой 2 соответствуют сушке ткани, тонкой кожи, макаронного теста; линия типа кривой 3 характерна для пористых керамических материалов. Эти кривые

имеют только одну критическую точку.

Материалы, имеющие более сложную структуру, имеют более сложные кривые скорости сушки. Кривая 5, например, характерна для сушки сухарей, кривая 4—для сушки глины. На этих кривых наблюдается вторая критическая точка. Эта точка соответствует границе влажности, при которой изменяется механизм перемещения влаги в материале. Для многих материалов эта точка означает начало удаления адсорбционно-связанной влаги, тогда как в первый период убывающей скорости сушки удаляется влага микрокапилляров.

### 1.5.3. Уравнения скорости сушки

Первый период сушки. В этот период удаляется свободная влага, испарение которой можно рассматривать как испарение воды со свободной поверхности. При уменьшении влажности материала вплоть до первой критической точки парциальное давление пара в поверхностной пленке не изменяется. Поэтому движущей силой процесса в первый период сушки будет  $(p_n - p_в)$  и скорость сушки [в кг/(ч м<sup>2</sup>)] может быть выражена уравнением

$$U - dW/d\tau = 0,0745 [v_в \rho^{0,8}(p_n - p_в)]. \quad (1.6)$$

Таким образом, в первый период скорость сушки, отнесенная к единице поверхности, зависит от  $(p_n - p_в)$ , плотности сушильного агента и его скорости.

Следовательно, в первый период определяющими факторами являются параметры сушильного агента. Скорость диффузии влаги внутри материала не определяет интенсивности испарения.

Второй период сушки. Кинетические закономерности второго периода сушки более сложные, что видно из кривых скорости сушки. В этот период начинает удаляться связанная вода. При этом парциальное давление водяных паров на поверхности материала становится меньше давления чистой воды при той же температуре. В этот период давление водяного пара является функцией температуры материала и его влажности на поверхности. Последняя же зависимость от скорости перемещения влаги в материале. Значит, скорость сушки в этот период зависит не только от диффузии влаги в окружающий воздух, но также от влагопроводности материала. Таким образом, во второй период скорость сушки определяется явлениями, связанными с перемещением влаги внутри материала. Допустим, что во второй период сушки движущей силой процесса сушки является разность между влагосодержанием материала  $W$  и равновесным влагосодержанием  $W_p$ . Мы можем записать тогда выражение для скорости сушки во второй период

$$dW/d\tau = K(W - W_p). \quad (1.7)$$

где  $K$  — коэффициент сушки, характеризующий интенсивность влагообмена.

Для второго периода сушки начальное влагосодержание материала соответствует критической влажности  $W_k$  (рис.1.5) или, точнее, приведенной критической влажности. Приведенная критическая влажность может быть определена, как показано на рис.1.5. Принимают, что линия сушки во второй период является прямой. Для построения этой прямой проводят линию  $AB$  так, чтобы она отсекала равновеликие площади (на рис.1.5 они заштрихованы). Точка  $K_n$  может лежать вправо или влево от точки  $K_l$  в зависимости от типа кривой сушки. Точке  $K$  соответствует приведенная критическая влажность  $W_{кп}$ . Проинтегрируем уравнение (1.7) в пределах от  $W_{кп}$  до  $W_2$

$$dW/d\tau = \ln[(W_{кп} - W_p)/(W_2 - W_p)] = K \tau$$

где  $W_2$  — конечное влагосодержание материала.

Из последнего выражения получаем продолжительность второго периода сушки

$$\tau_2 = (1/K) \ln[(W_{кп} - W_p)/(W_2 - W_p)] \quad (1.8)$$

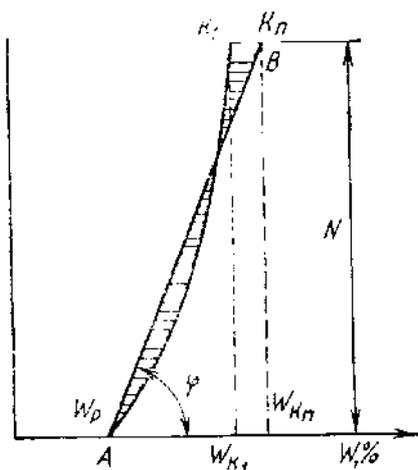


Рис.1.5.

К расчету продолжительности второго периода сушки

Коэффициент сушки  $K$  должен быть найден экспериментально. Если принять, что во второй период кривая скорости сушки может быть заменена прямой (см. рис.1.5), то коэффициент сушки может быть представлен так:

$$K = (l/R) [1/(1/\beta + 4/\pi^2 R/a_m)] \quad (1.9).$$

где  $R$  — определяющий геометрический размер высушиваемого тела;

для пластины  $R$  равен 1/2 ее толщины;

$\beta$ —коэффициент внешнего влагообмена, м/ч;

$a_m$  — коэффициент потенциалопродности массопереноса, м<sup>2</sup>/ч. Этот коэффициент аналогичен коэффициенту теплопроводности, зависит в основном от формы связи влаги с материалом и температуры материала и определяет внутренний перенос влаги

При введении коэффициента сушки считают, что влажкоэффициенты не изменяются в процессе сушки, точнее расчет вести по зонам. Из уравнения (1.9) следует, что коэффициент  $K$  уменьшается с увеличением размеров высушиваемого тела, следовательно, согласно уравнению (1.8) продолжительность сушки при этом увеличится. Таким образом, во второй период сушки большую роль играют геометрические формы высушиваемых тел, влажность материала, влажпродность его. Имеют также значение, хотя в меньшее, чем в первый период, скорость движения воздуха и его параметры.

#### 1.5.4. Усадка и коробление продуктов

При сушке почти всех материалов уменьшаются их размеры и изменяется их форма. Первое явление называется усадкой. Усадка нередко сопровождается растрескиванием и короблением материалов. Эти явления для ряда продуктов нежелательны, так как они портят форму изделий и снижают их качество, а в некоторых случаях делают их даже непригодными к употреблению. У различных материалов усадка происходит только в первый период либо во второй или же в обоих периодах.

К первой группе относятся такие материалы, как глина;

ко второй — дерево, уголь;

к последней — торф, зерно, кожа, хлеб.

Установлено, что при медленной сушке по мере удаления из тела влаги линейные размеры тела изменяются по закону прямой. Линейный размер материала при его влажности  $W$

$$l=l_0(1 - \alpha W),$$

где  $l_0$  — постоянная величина; для одних материалов она равна размеру абсолютно сухого материала, для других ее принимают несколько меньшей;

$\alpha$  — коэффициент линейной усадки, характеризующий интенсивность усадки, т.е. изменение линейных размеров на 1 % изменения влажности: различные материалы имеют разные величины  $\alpha$ : так, для макарон — 0,0061, ржаного хлеба — 0.0056, вермишели — 0,047.

При неравномерной сушке материала влажность распределяется неравномерно; это вызывает неравномерную усадку, коробление и растрескивание материала. Поэтому для сохранения формы материала и предохранения от растрескивания необходимо стремиться к равномерному обтеканию материала сушильным агентом.

## 1.6. ОСНОВЫ РАСЧЕТА СУШИЛОК

### 1.6.1. Нормальный теоретический сушильный процесс

На рис.1.6 изображена схема сушильной установки с нормальным сушильным процессом, состоящей из подогревателя (калорифера) 1 для воздуха и сушильной камеры 2. Воздух, поступающий в подогреватель, имеет температуру  $t_0$ , влагосодержание  $X_0$ , удельную энтальпию  $i_0$  и относительную влажность  $\varphi_0$ . Выходя из подогревателя, воздух будет иметь параметры  $t_1, X_1, i_1, \varphi_1$  (рис.1.6).

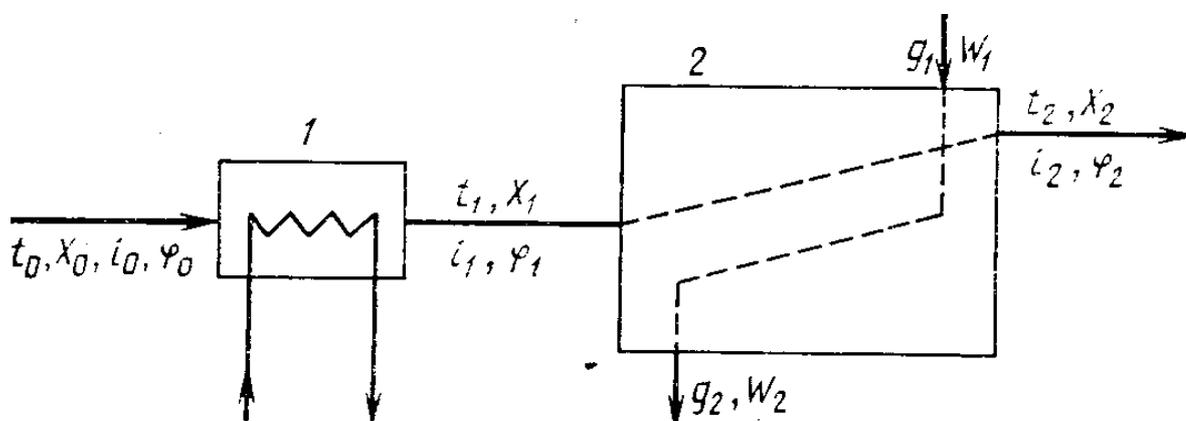


Рис. 1.6.

*Схема нормального сушильного процесса*

В сушильной камере нагретый воздух встречается с влажным материалом. Обозначим влажность материала через  $W_1$  (см.1.6) при входе в сушильную камеру и  $W_2$  при выходе из нее. В сушилке происходит процесс взаимодействия воздуха с материалом. Рассмотрим теоретический процесс сушки. Для этого процесса мы предполагаем, что в сушильной камере воздуху не сообщается дополнительно тепла и он не теряет принесенного тепла. Такой процесс называется теоретическим.

Рассматривая этот процесс, мы предполагаем, что воздух, поступивший в сушилку, передает свое тепло влаге материала, которая нагревается и испаряется. Образовавшиеся пары со всем теплом, полученным

от воздуха, смешиваются с воздухом. Поэтому теплосодержание воздуха остается постоянным, хотя температура его снижается.

Уходящий воздух имеет параметры  $t_2$ ,  $X_2$ ,  $i_2$ , и  $\varphi_2$ . Очевидно,  $X_2 > X_1$ ,  $\varphi_2 > \varphi_1$ ,  $t_2 < t_1$ , но  $i_1 = i_2$ .

Теоретический сушильный процесс изобразим с помощью  $i$ — $x$ -диаграммы влажного воздуха (рис.1.7). Пусть точка  $A$  соответствует состоянию воздуха при его входе в подогреватель. Процесс подогрева воздуха изобразится линией  $AB$  при  $x_1 = x_0$ . Точка  $B$  соответствует состоянию воздуха при выходе его из подогревателя. Влагосодержание этого воздуха  $x_1 = x_0$ . Теоретический процесс сушки изобразится линией  $BC$ , которая параллельна линии постоянной энтальпии, т.е.,  $i = \text{const}$ . Точка  $C$  характеризует воздух при выходе его из сушильной камеры

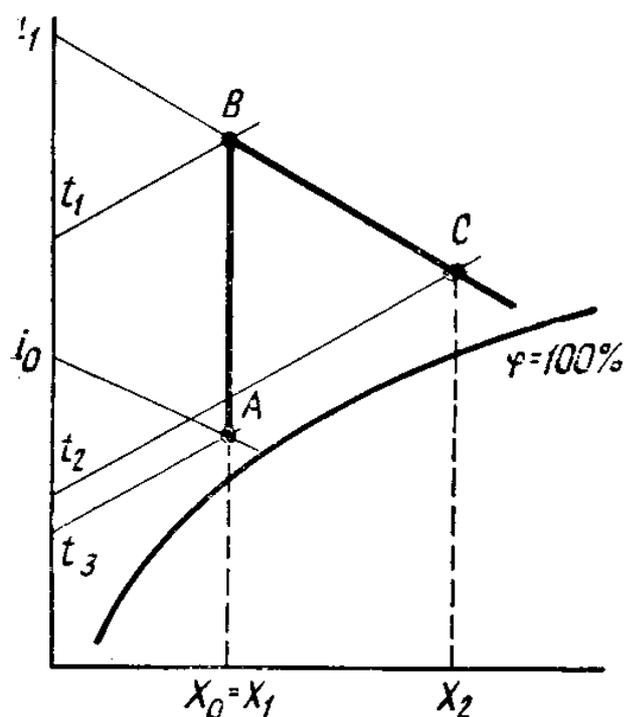


Рис.1.7.

*Нормальный процесс на  $i$ — $x$ -диаграмме*

Изображенный на рис.1.7 процесс называется нормальным теоретическим процессом сушки.

По  $i$ — $x$ -диаграмме можно определить количество воздуха тепла, расходуемых на 1 кг влаги, испаренной в сушилке.

Расход сухого воздуха на 1 кг испаренной воды

$$l = 1/(x_2-x_1) = 1/(x_1-x_0). \quad (1.10)$$

Влагосодержание  $x_1$  и  $x_2$  можно легко определить по  $i$ — $x$ -диаграмме. На нагрев в подогревателе 1 кг сухого воздуха, поступающего в сушилку, расходуется  $i_2=i_0$  кДж. Расход тепла на 1 кг испаренной влаги (в кДж)

$$q = i/(i_1-i_0) = (i_1-i_0)/(x_2-x_1). \quad (1.11)$$

### 1.6.2. Материальный и тепловой балансы реального процесса сушки

Рассмотрим процессы, протекающие в реальной сушилке при потерях тепла или в отдельных случаях при введении в сушильную камеру дополнительного тепла (для этого в сушильной камере должен быть установлен дополнительный подогреватель).

Материальный баланс. Для составления материального баланса сушилки введем следующие обозначения (рис. 1.8)

$m_1$  — расход влажного материала, кг/ч;

$W_1$  — его влажность по массе, %;

$m_2$  — расход высушенного материала, кг/ч;

$W_2$  — влажность, высушенного материала, массовые доли (% мас.);

$m_w$  — количество испаренной влаги, кг/ч;

$L$  — расход сухого воздуха, кг/ч;

$Q_1$  и  $Q_2$  — температура материала.

Составим таблицу материального баланса (в кг/ч).

<i>Приход</i>	<i>Расход</i>
Воздух сухой $L$	Воздух сухой $L$
Влага, содержащаяся в сухом воздухе, $Lx_0$	Влага, содержащаяся в сухом воздухе, $Lx_2$
Сырой материал $m_1$	Высушенный материал $m_2$

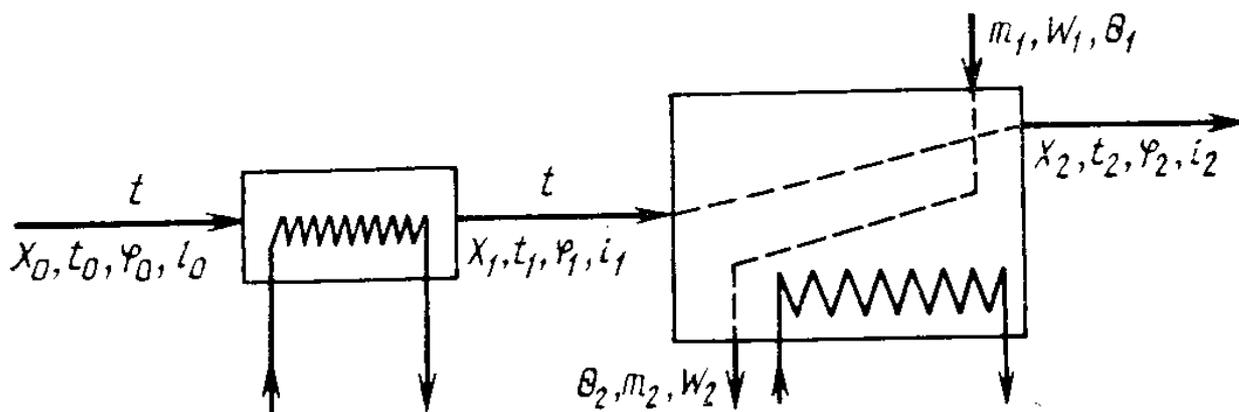


Рис.1.8.

*К расчету реальной сушилки*

Уравнение материального баланса будет иметь вид

$$L + L X_0 + m_1 = L + L X_2 + m_2.$$

Отсюда

$$m_1 - m_2 = L X_2 - L X_0 = L(X_2 - X_0), \quad (1.12)$$

или

$$W = L(X_2 - X_0), \quad (1.13)$$

или

$$W/L(X_2 - X_0) = L, \quad (1.14)$$

**Тепловой баланс.** Рассмотрим тепловой баланс реальной сушильной камеры.

Приход тепла. Теплота, вносимая:

- 1) воздухом и влагой, содержащейся в нем, а также влажным материалом;
- 2) оборудованием, вводимым в сушилку (транспортные

приспособления);

3) дополнительно в камеру сушилки от обогревательных элементов.

Расход тепла. Тепло, уносимое:

1) воздухом;

2) высушенным материалом;

3) оборудованием (транспортными приспособлениями);

4) потери теплоты в окружающее пространство. Составим таблицу теплового баланса (в кДж/ч) (табл.2)

Составим уравнение теплового баланса

$$Li_1 + m_1c_1\theta_1 + m_{\text{тр}}c_{\text{тр}}\theta_{\text{тр}}^1 + q_{\text{дооб}} = Li_2 + m_2c_2\theta_2 + m_{\text{тр}}c_{\text{тр}}\theta_{\text{тр}}^{11} + Q_{\text{ном}}$$

Отсюда

$$L(i_2 - i_0) = m_1c_1\theta_1 + m_{\text{тр}}c_{\text{тр}}\theta_{\text{тр}}^1 + q_{\text{дооб}} - m_2c_2\theta_2 - m_{\text{тр}}c_{\text{тр}}\theta_{\text{тр}}^{11} - Q_{\text{ном}}$$

или

$$L(i_2 - i_0) = \Sigma Q \quad (1.14)$$

Правую и левую части этого уравнения отнесем к 1 кг испаренной в сушилке воды:

$$(i_2 - i_0) L/W = \Sigma Q/W; l(i_2 - i_0) = \Delta \quad (1.15)$$

Отсюда  $i_2$  (в килоджоулях на 1 кг сухого воздуха) составит

$$i_2 = i_1 + \Delta/l \quad (1.16)$$

где  $\Delta$ —количество теплоты, вносимой в камеру сушилки или теряемой ей, Дж на 1 кг испаренной влаги.

Таблица 1.2

Приход		Расход	
Статьи прихода	Обозначения	Статьи расхода	Обозначения
Теплота, вносимая воздухом и состоящая из теплоты, вносимой воздухом в подогреватель.	$Li = Li_0 + Q_n$	Теплота, уносимая воздухом, уходящим из сушилки	$Li_2$
$Li_0$ и теплоты, вводимой в подогреватель, $Q_n$	$m_1 c_1 t_1$		
Теплота, вносимая материалом, где $c_1$ — теплоемкость материала [в кДж/(кг К)] и $\theta_1$ — его температура	$m_{тр} c_{тр} \theta_{тр}^1$	Теплота, уносимая высушенным материалом	$m_2 c_2 \theta_2$
Теплота, вносимая транспортными устройствами	$q_{доб}$	Теплота, уносимая транспортными устройствами	$m_{тр} c_{тр} \theta_{тр}^{11}$
Добавочная теплота, вводимая в камеру		Потери теплоты в окружающую среду	$Q_{пот}$

Величина  $\Delta$  может быть положительной или отрицательной в

зависимости от значения слагаемых теплового баланса. В частном случае, когда величины со знаком минус равны величинам со знаком плюс,  $\Delta=0$ . В этом случае  $i_2=i_1$ . График теплового баланса сушилки приведен на рис.1.9.

### 1.6.3. Нормальный действительный процесс сушки на $i$ — $x$ -диаграмме

Рассмотрим построение процесса сушки на  $i$ — $x$ -диаграмм. Сделаем построение для случая, когда  $\Delta>0$ . Сначала построим график теоретического процесса для заданных условия работы сушилки (линии ABC на рис.1.10).

При  $\Delta>0$  состояние воздуха в сушильной камере изменяется не в соответствии с линией BC, а по какой-то линии, лежащей выше этой линии и имеющей начало в точке B, например, в соответствии с линией BC<sub>1</sub>. Если воздух выходит из сушилки при одной и той же относительной влажности, то теплосодержание его в точке C<sub>1</sub> больше, чем в точке C.

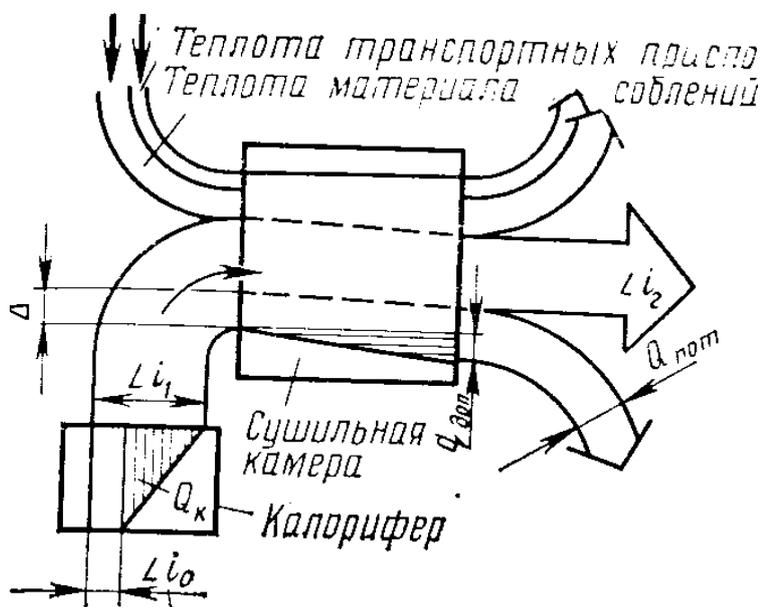


Рис.1.9.

*График теплового баланса сушилки*

Согласно сказанному выше  $i_2 = i_1 + \Delta i$  и  $\Delta = (i_2 - i_1)l$ ,

$l = 1/(x_2 - x_1)$ , отсюда

$$\Delta = (i_2 - i_1)/(x_2 - x_1).$$

Это выражение позволяет определить положение линии  $BC$ , при известном  $\Delta$ . Для этого через произвольную точку  $e$  на линии  $BC$  проведем горизонталь  $eF$  и вертикаль  $Ee$ . Из точки  $C_1$  проведем вертикаль  $C_1G$  до пересечения с продолжением линии  $BC$ . Из подобия треугольников  $BEe$  и  $BC_1G$ ,  $FBe$  и  $DBG$  следуют, что

$$GC_1(Ee) = DG/(eF), \text{ но } GC_1 = (i_2 - i_1)M_i \text{ и } DG = (x_2 - x_1)M_x,$$

где —  $M_i$  и  $M_x$  масштабы теплосодержания и влагосодержания.

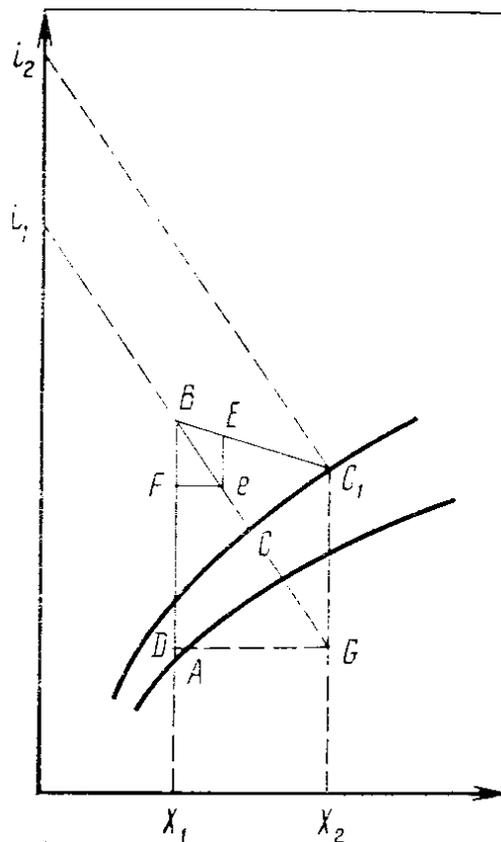


Рис.1.10.

*Графический расчет реальной сушки*

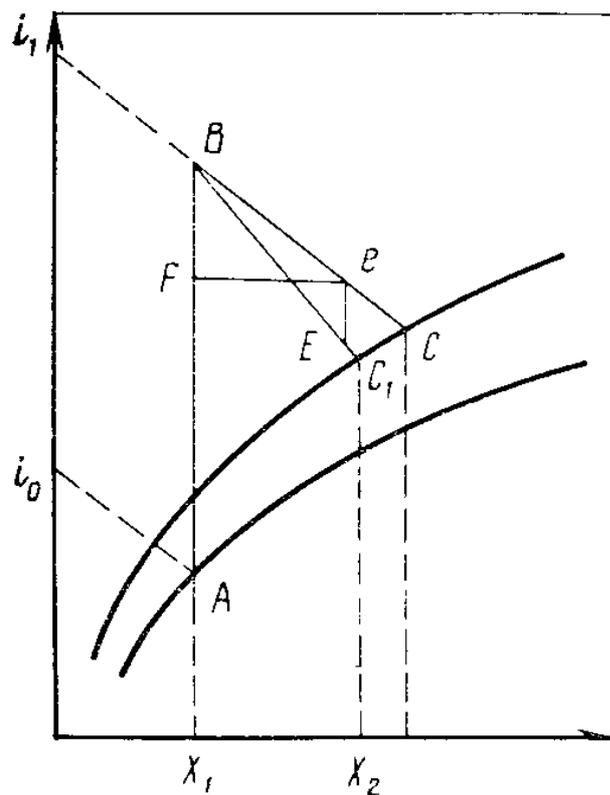


Рис.1.11.

*Графический расчет действительного процесса сушки*

Из этих уравнений можно написать

$$(i_2 - i_1)M_i / (E e) = (x_2 - x_1)M_x / (e F)$$

или

$$\begin{aligned} (E e) &= [(i_2 - i_1)M_i] (e F) / [(x_2 - x_1)M_x] = \\ &= [(i_2 - i_1)] (e F n) / [(x_2 - x_1)] \end{aligned}$$

следовательно,

$$E e = \Delta n F e \quad (1.17)$$

Таким образом, при  $\Delta > 0$  линию действительного процесса строим

следующим образом.

При заданных условиях сушки строим линии теоретического процесса. Через произвольную точку  $e$  на линии  $BC$  проводим линию  $eF$  и измеряем  $eF$  (в мм). По формуле (1.17) определяем  $eE$  (в мм). Откладываем  $eE$  и через точки  $B$  и  $E$  проводим линию действительного процесса. Аналогично находим линию действительного процесса сушки при  $\Delta < 0$  (рис.1.П).  
Удельный расход воздуха

$$l = I/(x_2 - x_1).$$

Удельный расход тепла в подогревателе

$$q = (i_1 - i_0)/(x_2 - x_1).$$

## 1.7. ВАРИАНТЫ СУШИЛЬНОГО ПРОЦЕССА

Кроме нормального сушильного процесса, рассмотренного выше, могут быть построены иные процессы, отличающиеся способом подвода тепла к сушильному агенту. Применение того или иного варианта процесса определяется свойствами материала и стремлением создать наиболее экономичный сушильный процесс

### 1.7.1 Сушилка с подогревом воздуха в сушильной камере

Построение этого процесса мы рассматривали выше. Рассмотрим некоторые особенности этого процесса. Предположим, что нормальный теоретический процесс  $ABC$  (рис.1.12) протекает с расходом теплоты в подогревателе, равным  $ABM_t$  и 1 кг воздуха, поступающего в сушилку. Однако эта теплота может быть внесена не только в подогреватель, но также частично и в сушильную камеру. Крайним случаем будет, когда вся теплота вводится в сушильную камеру. Очевидно, этот процесс будет идти по линии  $AC$ . Между этими двумя крайними положениями линий сушки ( $BC$  и  $AC$ ) могут быть расположены линии процессов с последовательно увеличивающимся количеством теплоты вводимой в подогреватель. Процесс  $ABC$  соответствует случаю, когда в сушилку введено такое количество теплоты, которое компенсирует потери в окружающее пространство. Одним из промежуточных положений сушки будет линия  $B_1C$ , которая совпадает с изотермой, проходящей через точку  $C$ . Следовательно, в этом случае процесс сушки будет протекать при постоянной температуре. Часть теплоты в этом случае будет введена в калорифер, а остальная часть в сушилку.

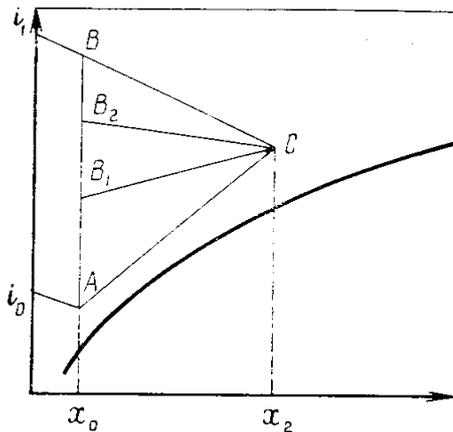


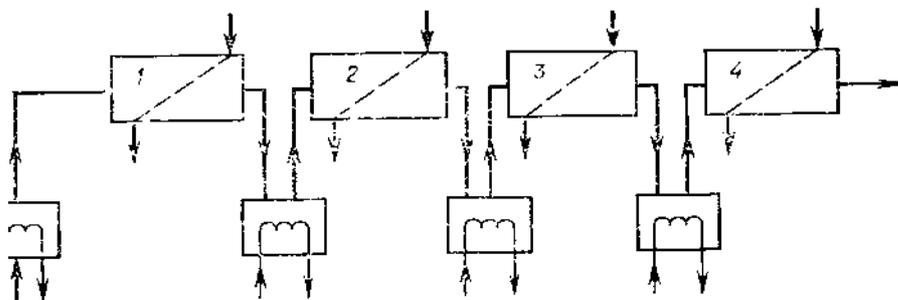
Рис.1.12.

*Процесс в сушилке с подогревом внутри камеры*

Так как во всех этих процессах конечное и начальное состояние воздуха остается постоянным, удельный расход воздуха не изменяется:  $l = I/(x_2 - x_0)$ . Удельный расход теплоты в калорифере (в кДж на 1 кг воды) также будет одинаковым, во всех процессах:

$$(i_1 - i_0)l = (i_1 - i_0)/(x_2 - x_0). \quad (1.18)$$

*Камеры*



*Калориферы*

Рис.1.13.

*Принципиальная схема сушилки с промежуточным подогревом воздуха*

Поэтому эти процессы равно экономичны. Однако процесс с подогревом воздуха внутри сушильной камеры имеет то преимущество, что может протекать при низкой температуре. Это весьма важно при работе с материалами, которые при высоких температурах разлагаются.

### 1.7.2. Сушилка с промежуточным подогревом воздуха

Температура сушильного агента может быть также снижена при другом варианте сушильного процесса — сушке с промежуточным подогревом воздуха. Принципиальная схема сушилки с таким процессом изображена на рис.1.13, а рабочий процесс сушки для этого варианта — на рис.1.14.

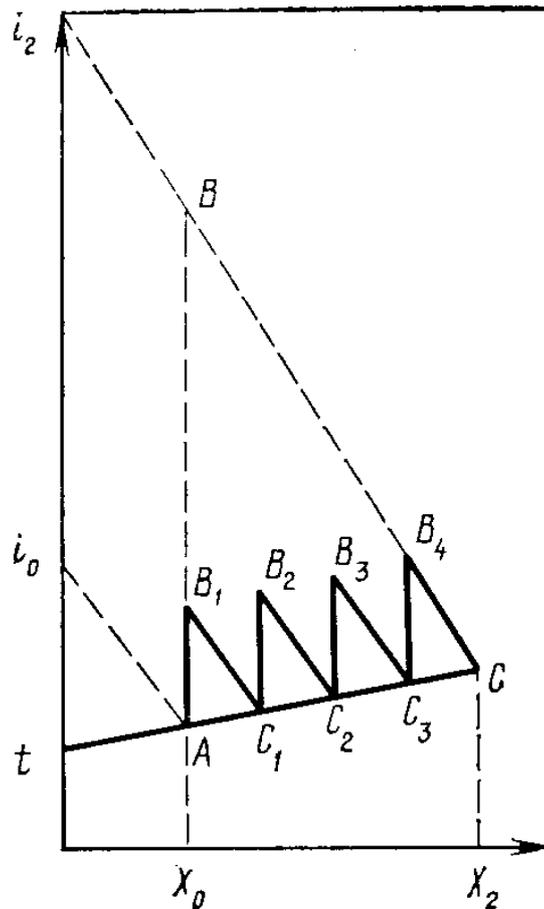


Рис.1.14

#### *Процесс сушки с промежуточным подогревом на t-x- диаграмме*

Воздух, отработанный в первой камере, направляется в первый промежуточный подогреватель; подогретый воздух поступает во вторую сушильную камеру. Отработанный воздух второй камеры может быть подогрет во втором промежуточном подогревателе и направлен в третью сушильную камеру и т.д.

На рис.1.14 вертикальные отрезки  $AB_1$ ,  $C_1B_2$ ,  $C_2B_3$  и  $C_3B_4$  изображают подогрев в основном и в трех промежуточных подогревателях, когда воздух, выходящий из камер, имеет температуру  $t$  и  $\Delta = 0$ . Удельный расход воздуха в этой сушилке будет  $1 / (x_1 - x_0)$ , а удельный расход теплоты  $q = (i_1 - i_0)/(x_2 - x_1)$ . Расход воздуха и теплоты мог бы быть таким же в нормальном процессе  $ABC$ , но только при значительно более высокой температуре.

### 1.7.3. Сушилка с возвратом отработавшего воздуха

Схема такой сушилки представлена на рис.1.15. Часть отработанного воздуха с параметрами  $(\varphi_2, t_2, x_2, i_2)$  смешивается со свежим воздухом, имеющим параметры  $(\varphi_0, t_0, x_0, i_0)$ . Полученная смесь направляется в сушилку. На  $t-x$ -диаграмме этот вариант изобразится следующим образом (при  $\Delta = 0$ ) (рис.1.16). Точка  $M$ , соответствующая смеси, находится на прямой, соединяющей точки  $A$  и  $C$ . Она делит отрезок  $AC$  на части, обратно пропорциональные смешиваемым массовым количества воздуха в состоянии  $A$  и  $C$ . Смесь поступает в подогреватель, где подогревается до состояния, изображаемого точкой  $B$ . Процесс в сушильной камере будет изображен линией  $BC$ . Равноэкономичный нормальный процесс будет изображен линиями  $AB, C$ . Сопоставляя его с рассматриваемым процессом, можно установить, что расход воздуха будет больше в процессе с возвратом отработавшего воздуха, так как  $(x_2 - x_c) < (x_2 - x_0)$ .

Удельный расход тепла в подогревателе при нормальном процессе будет равен

$$(i_2 - i_0) / (x_2 - x_0).$$

При процессе с возвратом воздуха удельный расход тепла ставит

$$(i_2 - i_1) / (x_2 - x_0).$$

но

$$(i_2 - i_0) / (x_2 - x_0) = (i_2 - i_1) / (x_2 - x_c).$$

что вытекает из подобия треугольников  $AB_1C$  и  $MBC$  ( $x_c$  — влагосодержание смеси).

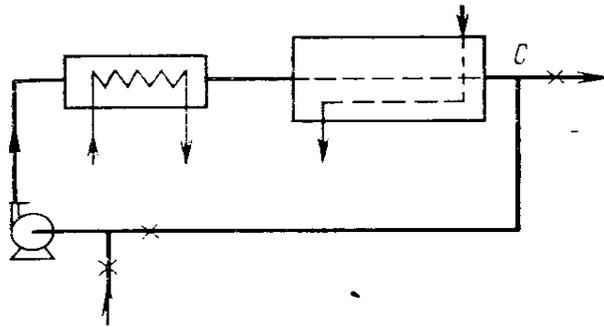


Рис.1.15.

*Принципиальная схема сушилки с возвратом отработавшего воздуха*

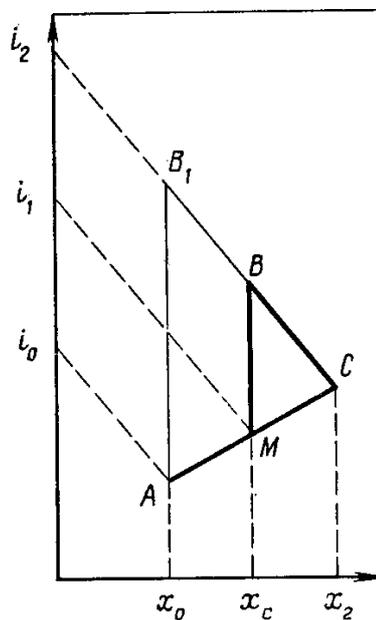


Рис.1.16.

*Процесс сушки с возвратом отработавшего воздуха на диаграмме*

Процесс с возвратом отработавшего воздуха получил широкое распространение для сушки материалов, требующих применения мягкого режима сушки, например пастилы, мармелада, макарон. В этом случае высокое парциальное давление водяных паров в циркулирующем воздухе уменьшает движущую силу процесса, что ведет к его замедлению. Этот вариант позволяет очень точно и гибко регулировать влажность и температуру воздуха в сушилке.

## 1.8. УСТРОЙСТВО СУШИЛОК

### 1.8.1. Классификация сушилок

В пищевой промышленности применяются разнообразные сушилки, так же как и разнообразные материалы, которые подвергаются сушке. Классификация сушилок может быть произведена на основе различных признаков.

<i>Классифицирующий признак</i>	<i>Типы сушилок</i>
1.Режим работы	Периодического и непрерывного действия
2.Способ подвода тепла	Кондуктивные, радиационные, конвективные и высокочастотные
3.Род сушильного агента	Воздушные, с применением топочных газов, и перегретого пара
4.Давление в сушильной камере	Атмосферные, вакуумные, глубоковакуумные
5.Вариант сушильного процесса	С нормальным процессом, с подогревом внутри камеры и промежуточным подогревом
6.Циркуляция сушильного агента	С естественной и принудительной циркуляцией
7.Конструкция	Камерные, шахтные, ленточные, барабанные, трубчатые, коридорные, распылительные и др.
8.Направление потока материала и сушильного агента	Противоточные, прямоточные, с перекрестным потоком

Рассмотрим основные типы сушилок, применяемых для сушки пищевых продуктов.

### 1.8.2. Барабанные сушилки

Барабанные сушилки получили широкое распространение для сушки сыпучих отходов пищевых производств: свекловичного жома, зерно - картофельной барды спиртовых заводов, кукурузных ростков и мезги на крахмало - паточных заводах. Они применяются также для сушки зерна и сахара-песка. Барабанные сушилки являются атмосферными сушилками. В качестве сушильного агента в них используется воздух либо топочные газы.

На рис.1.17 представлена принципиальная схема барабанной сушилки. Основным элементом сушилки является барабан 1, который вращается на роликовых опорах 4, опираясь на них бандажими. Барабан приводится во вращение при помощи зубчатого венца 2, надетого на барабан и находящегося в зацеплении с зубчатым колесом 3. Последнее приводится во вращение от мотора через редуктор. Барабан установлен горизонтально либо слегка наклонно ( $0,5—6^\circ$ ) в сторону движения материала. Для создания хорошего контакта материала с сушильным агентом в барабане устанавливаются внутреннюю насадку. При вращении барабана насадка способствует перелопачиванию материала и лучшему обтеканию его сушильным агентом.

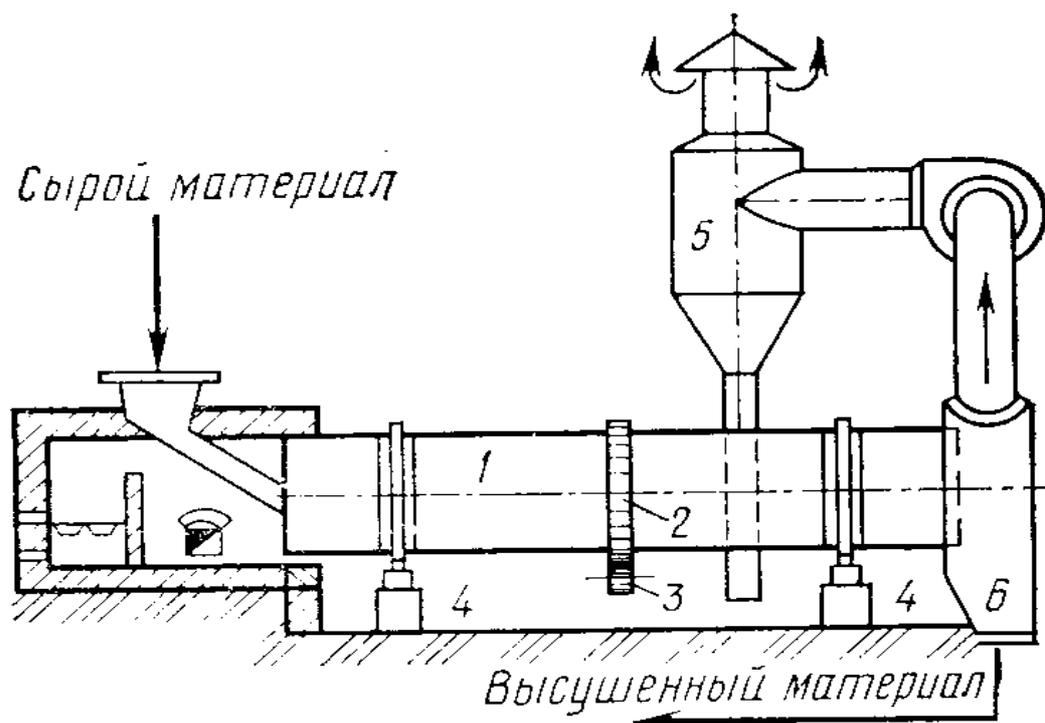


Рис.1.17.

*Принципиальная схема барабанной сушилки:*

*1 — барабан; 2 — зубчатый венец; 3 — зубчатое колесо; 4 — опоры; 5 — циклон; 6 - выгрузочный патрубок*

Тип насадки выбирается в зависимости от свойств материала. На рис.1.18 показаны различные типы внутренних насадок барабанных сушилок. Изображенные на рисунке насадки применяются для:

- а) крупнокусковых материалов, склонных к прилипанию;
- б) крупнокусковых материалов с малой сыпучестью и большой плотностью;
- в) мелкокусковых материалов с хорошей сыпучестью;
- г) материал образующих много пыли (например, система с закрытыми ячейками).

Барабан вращается с частотой 1—8 об/мин. Диаметр барабана зависит от производительности сушилки и составляет от 1200 до 2800 мм. Отношение длины к диаметру барабана ( $L:D$ ) составляет от 3,5 : 1 до 7 : 1.

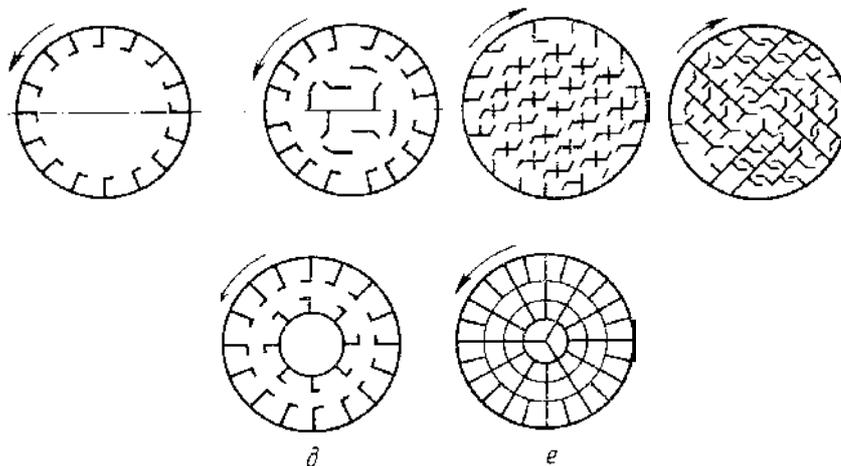


Рис.1.18.

*Схемы внутренних насадок в барабанной сушилке:*

*a — подъемно-лопастная система; б — секторная; в и г-распределительная система; д — комбинированная, е — перевалочная с закрытыми ячейками*

Влажный материал поступает в барабан при помощи питателя. Сушильный агент движется в сушилке со скоростью 2— 3 м/с и уносит из сушилки частицы высушенного материала. Для их улавливания установлен циклон 5 (см. рис.1.17), через который отходящие из сушилки газы выбрасываются в атмосферу.

Выгрузка материала происходит в зоне б (см. рис.1.17). Сухой материал отводится шнеком. Характерным показателем для расчета размеров барабана является напряжение барабана по влаге  $K$ [в кг/(ч м<sup>3</sup>)]:

$$K = m_w / z V,$$

где—  $m_w$  количество влаги, удаленной за  $z$  часов;

$V$ — объем барабана, м<sup>3</sup>

Таблица 1.3

Материал	Влажность материала, %		Температура газа, °С		К
	началь- ная	конеч- ная	началь- ная	конеч-ная	
Жом	84	12	750	150-125	185
Жом	84	12	400	100	100
Мезга кукурузная	68	12	300	100	40-50
Сахар-песок	68	0	100	40	8-9
Пшеница	20	14	150-200	50-80	20-30
Уголь каменный	9	0,6	800-1000	60	32-40

В табл. 1.3 приведены некоторые данные для материалов, высушиваемых в барабанных сушилках.

Как видно из изложенного, в барабанных сушилках протекает нормальный процесс. Они могут работать как при прямотоке, так и при противотоке.

### 1.8.3. Туннельные сушилки

Туннельные, или коридорные, сушилки относятся к группе атмосферных сушилок. В качестве теплоносителя в них используется воздух либо топочные газы. В пищевой промышленности этот тип сушилок употребляется для сушки овощей, сухарей, фруктов, мармелада, пастилы, макарон. Они применяются так же для сушки керамических материалов и древесины. Эти сушилки удобны в том случае, если желательно сохранить форму материала и избежать его перелопачивания.

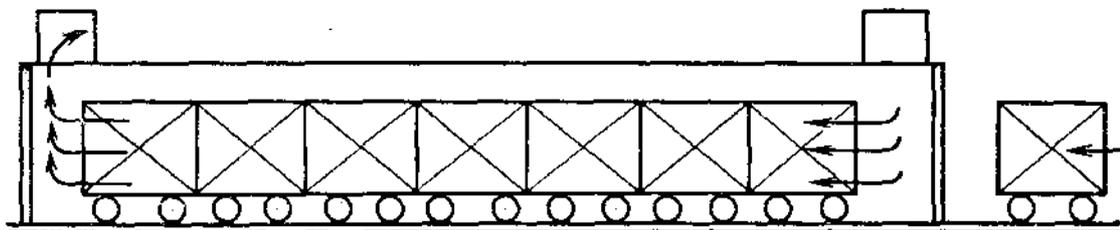


Рис.1.19.

#### *Коридорная сушилка*

На рис.1.19 представлена схема коридорной сушилки с вагонетками для перемещения материала. Основным элементом сушилки является туннель, в котором по рельсам перемещаются вагонетки. На вагонетках установлены стеллажи, на которые накладывается материал. Чтобы материал лучше омывался газами, полки делают ситчатыми. При перемещении вагонеток материал остается неподвижным. Движение воздуха в сушилке может быть противоточным материалу или параллельным. Вагонетки с высушенным материалом выходят через определенные промежутки времени. Воздух перемещается непрерывно. Туннельные сушилки удобны для применения различных вариантов сушильного процесса. На рис.1.20 представлена схема сушилки этого типа с промежуточным подогревом воздуха.

Для картофеля, нарезанного столбиками или кружками, нагрузка на 1

м<sup>2</sup> сита составляет 7—8,5 кг. При максимальной температуре 85—90°С длительность сушки составляет 5—6 ч. Для яблок нагрузка 7,5 кг/м<sup>2</sup>, длительность сушки 6—10 ч при температуре 60—70°С.

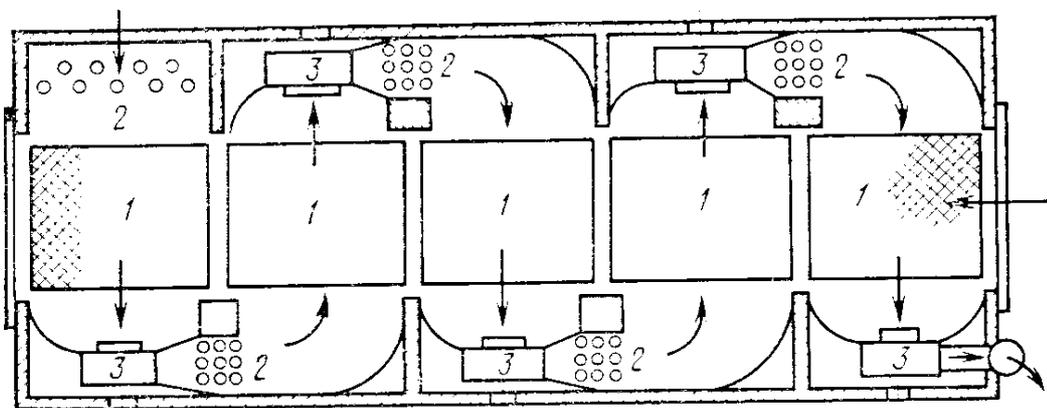


Рис.1.20.

*План коридорной сушилки с промежуточным подогревом воздуха:*

*1—вагонетка; 2—калориферы; 3—вентиляторы*

#### 1.8.4. Ленточные сушилки

На рис.1.21 изображена схема четырехленточной конвейерной сушилки. Такие сушилки получили широкое применение в овощесушильной промышленности. Аналогичного типа сушилки применяются для сушки фруктов, хлеба, крахмала, мелко - штучных макаронных изделий.

Материал, поступающий в сушилку, подается на ленты из пористого материала (ткань, металлическая сетка), расположенные одна над другой. Материал последовательно транспортируется лентами. Между холостой и рабочей ветвями каждой ленты расположены отопительные батареи. Таким образом, сушилка, изображенная на рис.1.21, работает по варианту с промежуточным подогревом. Ленточная сушилка является сушилкой непрерывного действия с перекрестным потоком материала и воздуха. Скорость движения ленты изменяется при помощи вариатора—редуктора. Для овощесушильных установок скорость составляет 0,1—0,7 м/мин.

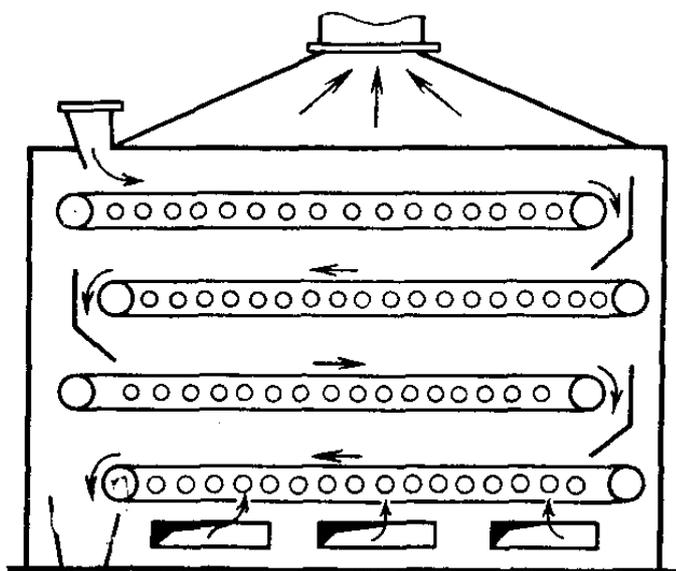


Рис. 21.

*Схема ленточной сушилки*

### 1.8.5. Шахтные сушиллки

На рис.1.22 показана принципиальная схема шахтной сушиллки непрерывного действия. Такие сушиллки применяются для сушки сыпучих продуктов: зерна, жома, свекловичной стружки после механического обезвоживания, овощей, угля, глины. и др. В этих сушилках движение материала происходит за счет действия силы тяжести. Чтобы замедлить движение материала, сушиллки снабжают полками различной формы.

Изображенная на рис.1.22 сушиллка предназначена для сушки свекловичного жома—отхода свеклосахарного производства. Элеватором 1 жом подается в загрузочный питатель 2, который подает сырой жом в сушиллку. Аппарат имеет ряд решетчатых полок 5 с центральными отверстиями. На вертикальном валу сушилок установлены конусы 4 и скребки, подгребающие материал, падающий с конусов, к центральному отверстию решеток. Горячий сушильный агент поступает из газохода 7 и отсасывается вентилятором 3. Сушиллки этого типа работают на топочных газах или на воздухе.

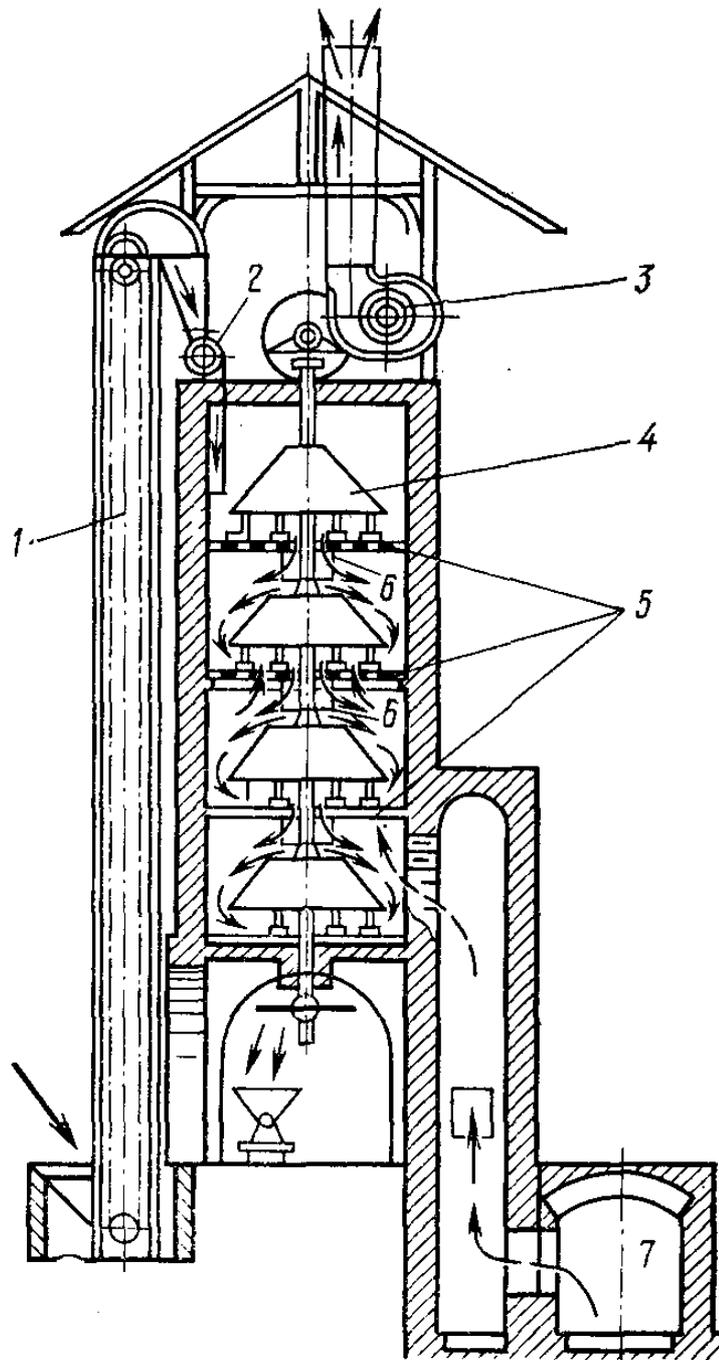


Рис. 22.

Схема шахтной сушилки.

1 — элеватор; 2 — загрузочный питатель; 3—вентилятор; 4 — вращающиеся конусы; 5 — решетка; 6 — распределительные устройства; 7 — газоход

### 1.8.6.Распылительные сушилки

Распылительные сушилки получили применение для сушки жидких продуктов: молока, яиц, барды, желатина, альбумина. Сушильная камера такой сушилки выполнена в виде полой башни значительных размеров ( $D = 2 — 5$  м,  $H = 3 — 5$  м) (рис.1.23). Материал, поступающий в сушилку, распыляется в верхней части сушилки. Капли его опускаются и при этом создается контакт между материалом и сушильным агентом, поступающим в нижнюю часть сушилки. Диспергирование материала производится путем разбрызгивания через форсунки или пневматически при помощи сжатого газа. Получило также применение центробежное распыление.

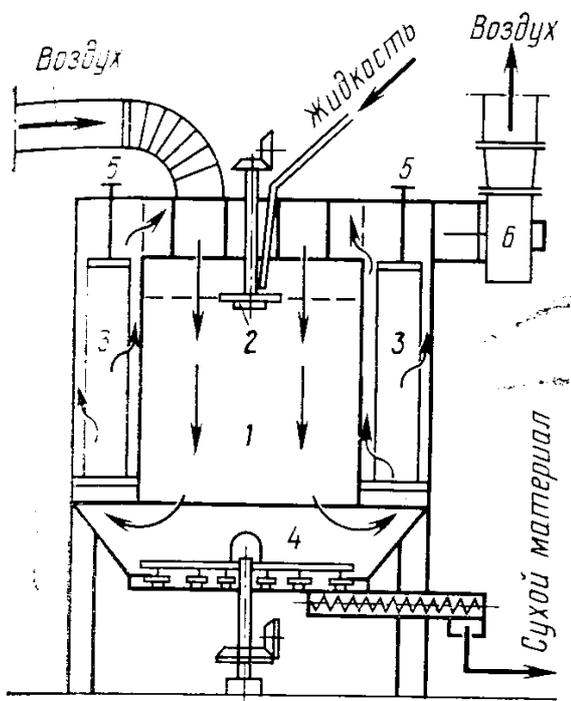


Рис.1.23.

*Распылительная сушилка.*

1—сушильная камера; 2 —  
распылительный диск; 3 —  
фильтры; 4 —скребки; 5—  
встряхивающий механизм;-6 —  
вентилятор

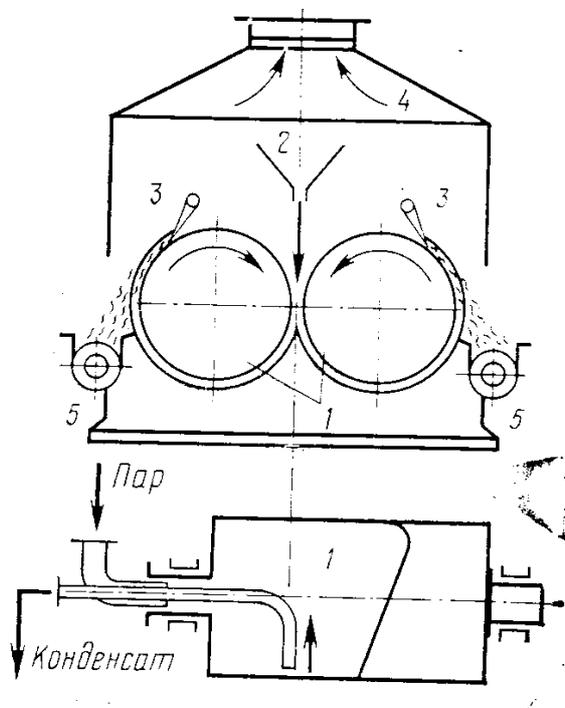


Рис.1.24.

*Схема двухвальцово́й сушилки*

1 — цилиндры; 2 - питатель; 3 —  
ножи; 4 — вытяжное  
устройство; 5 — шнеки

Благодаря высокой дисперсности материала в сушилке имеет громадную поверхность контакта с сушильным агентом (с воздухом или дымовыми газами), поэтому скорость сушки весьма велика. Сушильный агент имеет в сушилке малую скорость (0,2—0,4 м/с), но и при этой скорости он увлекает мелкие частицы материала. Для их улавливания воздух пропускается через фильтры. Высушенный материал падает на дно камеры и скребками подвигается к шнеку, которым отводится из сушилки.

Распылительные сушилки могут работать как при прямотоке, так и при противотоке сушильного агента и материала. Применяются сушилки, работающие с нормальным процессом и с возвратом отработавшего воздуха. Напряжение сушилок в зависимости от свойств материала и температуры воздуха колеблется в широких пределах—от 2 до 25 кг/(м<sup>3</sup> ч).

### 1.8.7. Кондуктивные сушилки

Кондуктивные сушилки могут быть атмосферными и вакуумными.

Атмосферные кондуктивные сушилки. В атмосферных кондуктивных сушилках тепло передается материалу путем непосредственного соприкосновения материала с поверхностью нагрева. На рис.1.24 представлена двухвальцовая барабанная сушилка. Такие сушилки предназначены для сушки жидких веществ (истинных и коллоидных растворов, суспензий). Они пригодны для тягучих вязких жидкостей и даже для пастообразных материалов. В пищевой промышленности кондуктивные сушилки применяют для сушки кормовых дрожжей в спиртовом производстве.

Сушилка имеет два полых барабана, вращающихся в противоположные стороны. Через полые цапфы в барабаны подается греющий пар, горячая вода или другой теплоноситель. Обогревающая среда отводится при помощи сифона через вторую полую цапфу. Высушиваемый материал подается сверху между вальцами и при их вращении растекается по их поверхности. Известны конструкции, вальцы которых погружены на некоторую глубину в

высушиваемую жидкость.

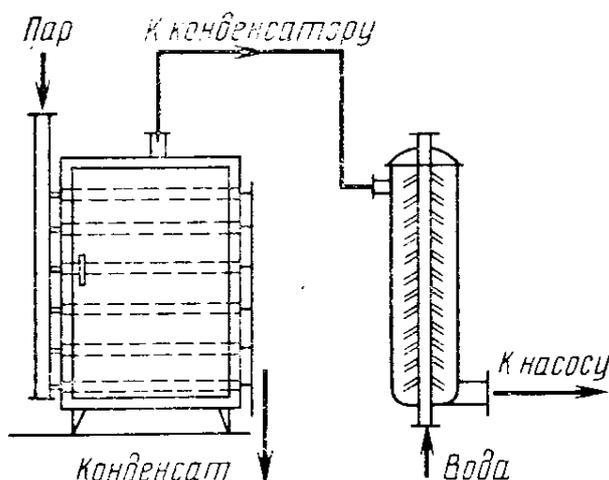


Рис.1.25.

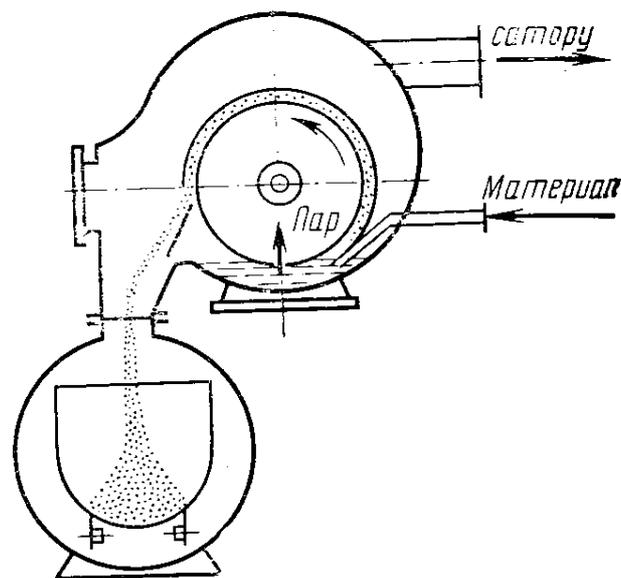


Рис.1.26.

*Схема установки для сушки в вакууме*

*Одновальцовая вакуум-сушилка*

Бараны сушилок делают 2—8 об/мин. Эффективность такой сушилки оценивается по напряжению ее поверхности, которое выражается в килограммах воды, выпариваемой за 1 ч с 1 м<sup>2</sup> ее поверхности.

При сушке вареного картофеля напряжение  $K = 75 \text{ кг}/(\text{м}^2 \text{ ч})$  при давлении пара 0,3—0,5 МПа.

При сушке дрожжей при  $p = 0,3—0,4 \text{ МПа}$  напряжение  $K = 35 \text{ кг}/(\text{м}^2 \text{ ч})$ , а при  $p = 0,1—0,2 \text{ МПа}$ —18 кг/(м<sup>2</sup>.ч).

Вакуумные кондуктивные сушилки. Наряду с атмосферными (т.е. работающими при нормальном давлении) кондуктивными сушилками в пищевых производствах применяются кондуктивные сушилки, работающие под вакуумом. Преимущество сушилки в вакууме в том, что повышается интенсивность сушки при низких температурах. Сушка при низких

температурах предотвращает нежелательные последствия высокого нагрева материала разложение и окисление. Однако конструкция сушилок сложна, они более дороги в изготовлении. В пищевой промышленности вакуумные сушилки применяются для сушки пекарских дрожжей, крахмала, фруктов, рафинада.

На рис.1.25 представлена схема установки для сушки в вакууме. Установка состоит из сушильной камеры с поверхностью нагрева, конденсатора (мокрого) и вакуум-насоса. Камера имеет герметически закрывающуюся дверь, однако все же неизбежен присос некоторого количества воздуха. Этот воздух отсасывается вакуум-насосом.

Процесс сушки под вакуумом имеет некоторые особенности. В первый период сушки (удаление свободной влаги) влага ударяется интенсивно. В этот период температура материала близка к температуре кипения воды при давлении, установившемся в камере. При сушке под вакуумом в порах многих материалов замечается кипение влаги (картофель). Во второй период сушки (удаление связанной воды) температура резко повышается, приближаясь к температуре горячей поверхности кондуктивной сушилки. Поэтому материалы, которые плохо переносят высокую температуру, не могут быть высушены до низкой влажности. Количество воздуха, которое должно быть удалено насосом, зависит от тщательности изготовления сушилки. В среднем на 1 кг влаги должно быть удалено около 1 м<sup>3</sup> воздуха (при давлении в сушилке).

Помимо периодически действующих камерных (шкафных) сушилок применяются вальцовые контактные вакуум-сушилки. На рис.1.26 показана схема одновальцовой вакуумной сушилки для жидких и пастообразных материалов. Нижний цилиндр служит для установки приемника, который периодически заменяется.

## 1.9. ОСОБЫЕ МЕТОДЫ СУШКИ

В последние годы в пищевой промышленности получают применение новые методы сушки в глубоком вакууме, инфракрасными лучами, в поле токов высокой частоты, в кипящем слое и во взвешенном состоянии.

### 1.9.1. Сушка в глубоком вакууме

Сушка в глубоком вакууме производится при остаточном давлении 13,3—133,3 Па (0,1—1,0 мм рт. ст.). При этом давлении сушка может протекать при отрицательных температурах, при которых вода будет находиться в состоянии льда. Следовательно, будет иметь место испарение твердого тела без плавления его — сублимация. Поэтому сушка в глубоком вакууме называется сушкой сублимацией. Основным преимуществом сушки сублимацией пищевых продуктов является возможность получить продукт высокого качества. При сушке сублимацией не происходит денатурации белков, не имеют места микробиологические процессы, сохраняются полностью все витамины, содержащиеся в свежем продукте. Весьма существенным является также и то, что высушенный продукт сохраняет первоначальный объем, приобретая при этом пористую структуру. При смачивании он легко поглощает воду и приобретает первоначальный вид.

Сушка сублимацией может быть применена к самым разнообразным пищевым продуктам: молоку, овощам, фруктам. Сушка в глубоком вакууме широко применяется при производстве антибиотиков пенициллина и стрептомицина, крови.

Сушилка, применяемая для высушивания материалов в глубоком вакууме, состоит из сушильной камеры, конденсатора и вакуум-насосной установки. На рис.1.27 представлена схема установки для сушки в глубоком вакууме. Сушильная камера представляет собой герметический шкаф с полками, обогреваемыми паром или горячей водой. Иногда обогрев производится путем инфракрасного облучения. Высушиваемый замороженный материал укладывают на полки. Таким образом, сушилка относится к группе

контактных. Выделяющиеся пары поступают на конденсацию. Конденсатор охлаждается жидкостью, при этом поверхность его покрывается льдом, который должен непрерывно удаляться. Вакуум-насосная система состоит из ротационных масляных вакуум-насосов. Применяются также многоступенчатые эжекторные паровые вакуум - установки. Эти установки создают остаточное давление 0,1—1,0 мм рт. ст., что обеспечивает сушку при  $t=-15^{\circ}\text{C}$

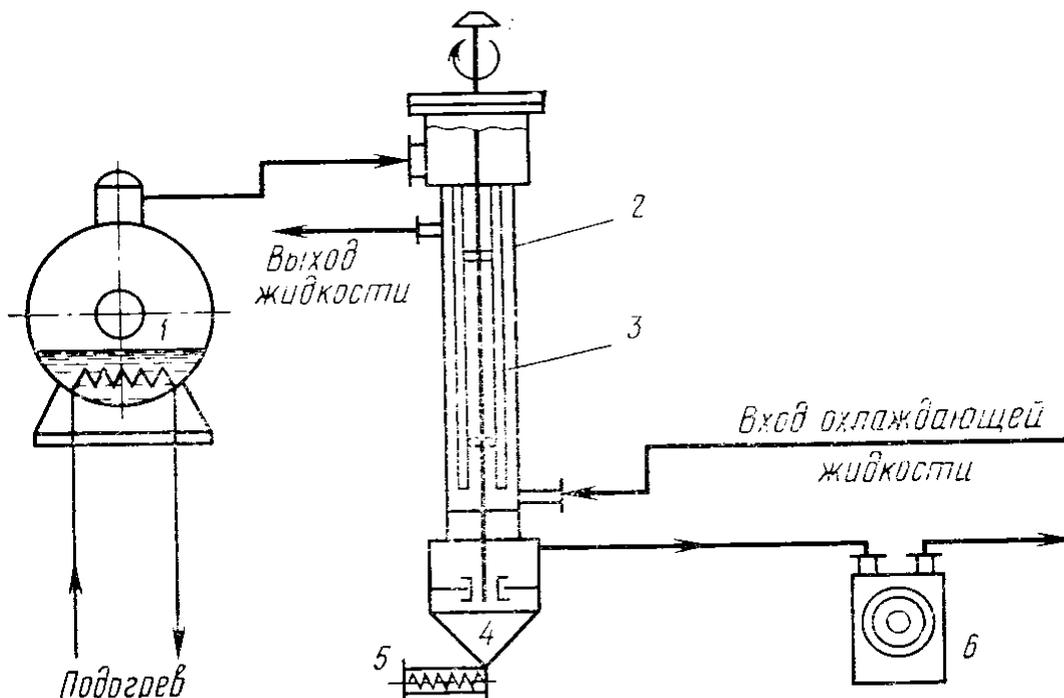


Рис.1.27.

*Схема установки для сушки в глубоком вакууме*

*1— камера; 2— конденсатор; 3—скребки для удаления льда; 4—сборник для снега; 5 — шнек для удаления снега; 6 — вакуум-насос*

Как показывают расчеты и эксплуатация установок большой производительности, сушка в глубоком вакууме по теплоэнергетическим показателям примерно равноценна сушке при атмосферном давлении или даже более экономична. Однако затраты на первоначальное устройство сушилки значительно выше.

### 1.9.2. Сушка инфракрасными лучами

В этих сушилках тепло для испарения влаги подводится термоизлучением. Генератором, излучающим тепло, являются специальные лампы или же нагретые керамические или металлические поверхности.

Специальные лампы инфракрасного излучения отличаются от обычных осветительных тем, что температура накала их 2500 вместо 2920К для обычных ламп. Около 80% электроэнергии, подводимой к этим лампам, преобразовывается в энергию инфракрасного излучения. Для направления пучка лучей лампы снабжают рефлекторами параболической формы.

Основное преимущество сушки инфракрасными лучами—более быстрое удаление влаги. Это ускорение процесса сушки объясняется тем, что лучистый поток тепла проникает частично внутрь капиллярно-пористых тел на глубину 0,1—2,0 мм. Попадая в капилляры тела, лучи почти полностью поглощаются вследствие ряда отражений от стенок. Поэтому при сушке термоизлучением коэффициент теплообмена имеет большую величину, и на единицу поверхности материала может быть передано в единицу времени значительно больше тепла, чем при сушке нагретыми газами или при контактной сушке. Ускорение процесса сушки может быть значительным. Так, например, продолжительность сушки инфракрасными лучами текстильных материалов уменьшается в 30—100 раз. Это имеет место при сушке других тонкослойных материалов. Сушилки этого типа получили распространение для сушки различных металлических окрашенных изделий, для изделий из картона, дерева, пластмассы.

На рис.1.28 представлена схема сушилки, оборудованной лампами, а на рис.1.29 — схема радиационной сушилки с излучателями, обогреваемыми газами.

Ламповые излучатели характеризуются высоким расходом, электроэнергии, что является основным препятствием к их внедрению. Однако в ряде случаев себестоимость ламповой сушки ниже, чем конвективной, за счет сокращения времени сушки и уменьшения капитальных

затрат.

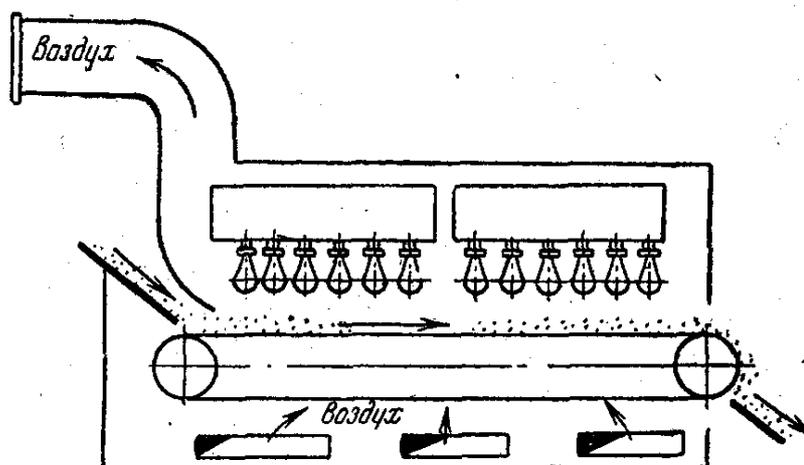


Рис.1.28.

*Схема ламповой сушилки*

Газовые радиационные сушилки проще по конструкции и дешевле, чем сушилки, оборудованные лампами. В них меньше расход энергии. Излучатели нагреваются газом, сжигаемым непосредственно под излучателями, или же топочными газами, поступающими внутрь излучателей. Вследствие интенсивного обогрева материала радиационным излучением в материале возникает значительный температурный градиент. Возникающий вследствие этого термодиффузионный поток влаги препятствует миграции влаги из глубины материала к его поверхности. Во избежание этого явления рекомендуется особый, прерывистый, режим сушки. Сушка в этом случае состоит из коротких периодов облучения (2—4 с) и длительных периодов (20—80 с) отлежки без облучения. В период облучения высушиваемому телу подводится тепло, а в период отлежки происходит движение влаги от центра тела к поверхности, так как в этот период, когда нет подогрева, температурный градиент изменяет направление.

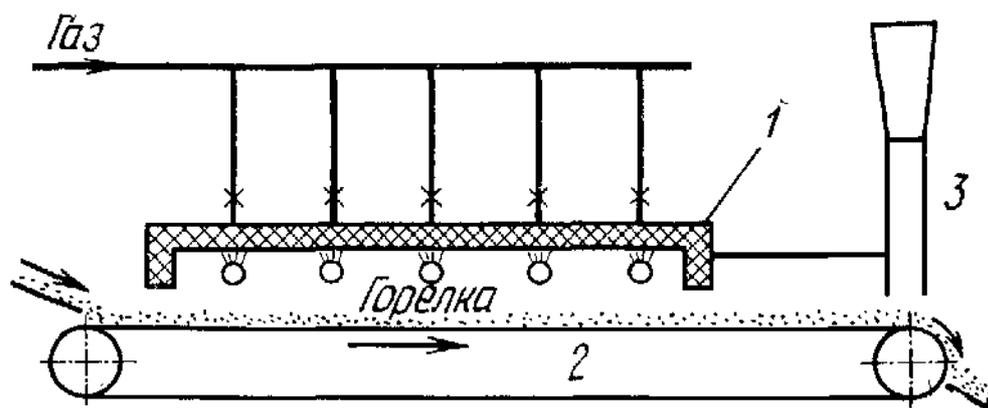


Рис.1.29.

*Схема радиационной сушилки с излучателями:*

1-излучатель; 2—конвейер; 3-вытяжное устройство

Прерывное облучение снижает конечную температуру сушки и уменьшает расход энергии. Общая продолжительность сушки при этом не увеличивается. Прерывистая сушка пищевых продуктов способствует сохранению витаминов. Для улучшения качества высушенных материалов рекомендуют также применять комбинированную сушку: радиационную и конвективную, т.е. одновременно с применением радиационного нагрева пропускать над материалом нагретый воздух.

### 1.9.3. Сушка в поле токов высокой частоты

Если высушиваемый материал поместить между двумя пластинами, к которым подводится ток высокой частоты, то материал будет нагреваться по всей его толщине. Объясняется это тем, что под влиянием переменного электрического поля молекулы вещества приходят в колебательное движение. Движение молекул приводит к нагреванию материала по всей его толщине, но так как наружные элементы тела отдают тепло в окружающее пространство, температура тела падает от центра к поверхности. В этом же направлении при сушке изменяется и влажность. В этом случае. Следовательно, температурный и влажностный градиенты совпадают по знаку и оба они способствуют миграции влаги от центра к поверхности.

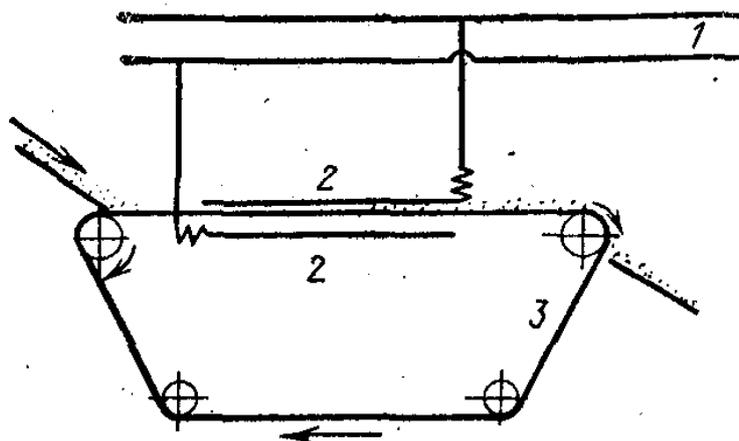


Рис.1.30.

*Схема установки для сушки токами высокой частоты:*

*1 — электросеть; 2 — электроды; 3 — транспортер*

Поэтому скорость высокочастотной сушки значительно выше скорости конвективной сушки. Так, при сушке древесины процесс ускоряется примерно в 10 раз при значительном уменьшении брака. Однако стоимость сушки токами высокой частоты выше стоимости конвективной сушки в 3—4

раза из-за высокого расхода энергии (2—5 кВт·ч на 1 кг испаренной влаги). Поэтому сушка в поле токов высокой частоты получила применение только для трудносохнувших толстых материалов. К таким материалам относится, например, древесина, сушка которой конвективным способом слишком продолжительная и связана с растрескиванием и порчей материала. На рис.1.30 представлена схема установки для сушки токами высокой частоты.

В целях снижения расхода энергии на сушку применяют комбинированную сушку — токами высокой частоты и нагретыми газами. В этом случае высокочастотная энергия расходуется только на подогрев материала и на создание температурного градиента. Удаление влаги с поверхности производится путем конвекции. Расход энергии в этом случае может быть значительно, почти в 3 раза, снижен.

В пищевых производствах проводили опыты по сушке токами высокой частоты сахара-рафинада, хлеба, овощей и фруктов. Однако широкого применения для сушки этих материалов токи высокой частоты еще не нашли.

#### **1.9.4. Сушка в кипящем слое и во взвешенном состоянии**

В работе /14/ изложено понятие о псевдооживленном слое и было указано на высокую интенсивность тепло- и массообмена в этом слое. Это свойство кипящего слоя используется в сушилках для сыпучих материалов. Такие сушилки предназначены для различных сыпучих и пастообразных материалов. В настоящее время созданы и работают сушилки, в которых в сыпучем слое высушивается уголь, зерно, овощи, органические красители и т.п.

Широкое применение получила также сушка сыпучих материалов во взвешенном состоянии, т.е. когда скорость движения газа выше второй критической скорости. Сушилки для сушки материалов в кипящем слое весьма разнообразны. Имеются сушилки непрерывного действия, периодические и полунепрерывные. На рис.1.31 представлена схема установки для сушки в кипящем слое. Влажный сыпучий материал поступает

из бункера 7 на решетку 3. Горячие газы поступают под решетку из газоподводящей коробки 1. Сушильная камера 5 имеет корытообразную форму, вследствие чего скорость течения газа уменьшается по мере подъема. Отработавшие газы уходят в газоотводящий коллектор 6. Своеобразная форма коллектора и решетки обеспечивает равномерную скорость частиц в сушилке и равномерную скорость сушки.

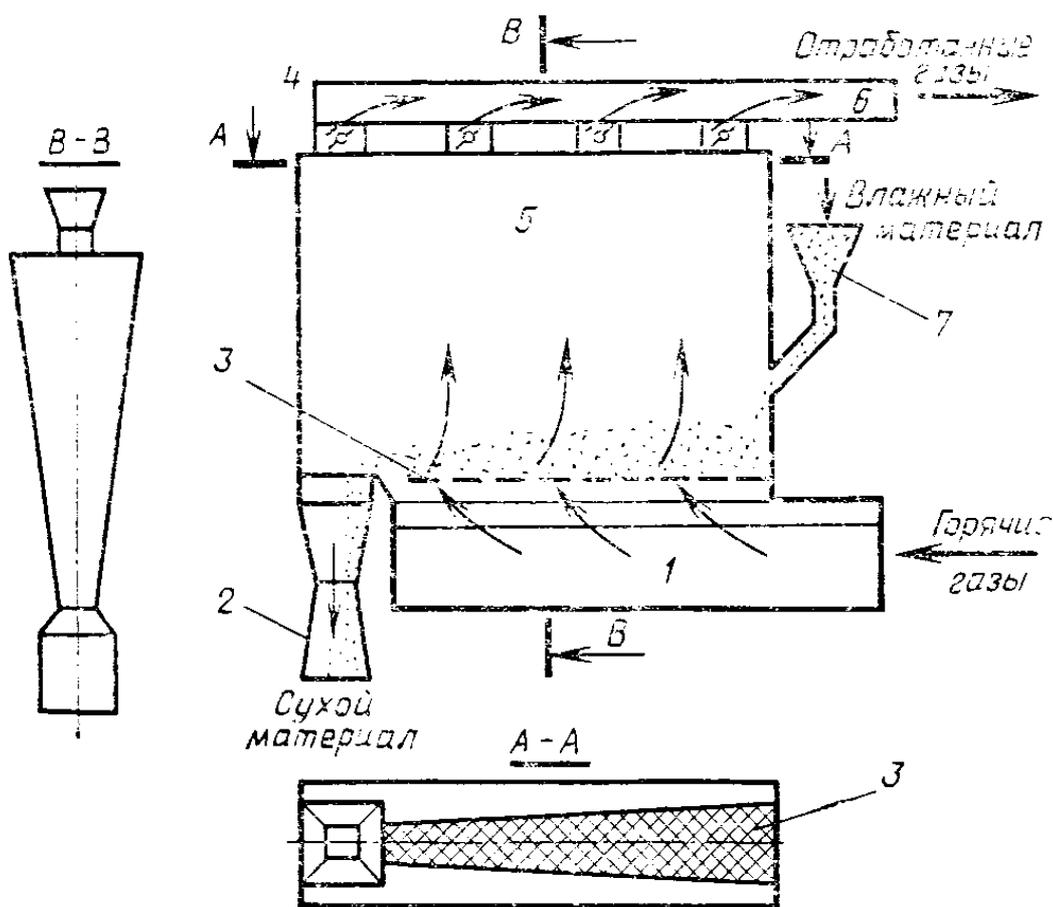


Рис.1.31

*Схема для сушки в кипящем слое:*

*1 — газоподводящая коробка; 2 — приемник высушенного материала; 3 — решетка; 4-заслонка; 5— камера; 6 — газоотводящий коллектор; 7 — загрузочный бункер*

Из разгрузочного бункера влажный материал поступает при помощи

вибратора.

Вибрация бункера предотвращает залежание влажного материала в бункере и на решетке.

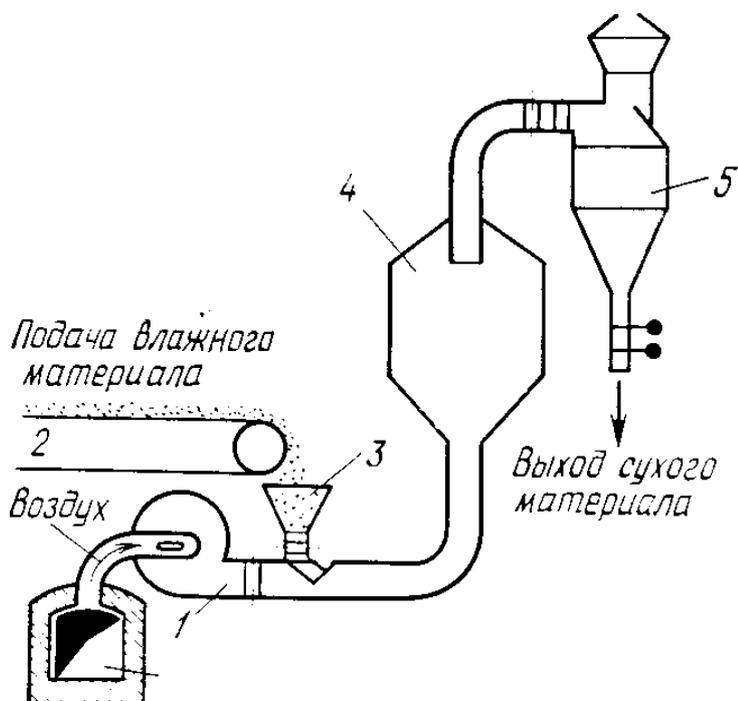


Рис.1.32.

*Схема аэрофонтанной сушилки:*

*1 — вентилятор; 2 - транспортер; 3 - воронка; 4 — камера; 5 — циклон*

На рис.1.32 представлена принципиальная схема установки для сушки сыпучих материалов во взвешенном состоянии. В этой сушилке материал «витают» в сушильном агрегате, который переносит его сначала в сушильную камеру 4, а затем в циклон 5. Такие сушилки получили применение для сушки опилок, хлопка, зерна и других материалов.

Сушилки отличаются высокой эффективностью; их достоинством является также незначительное время соприкосновения материала с сушильным агентом; поэтому при сушке материалов, чувствительных к температуре, можно применять горячие топочные газы.

## 2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА СУШИЛОК

### 2.1. МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОНВЕКТИВНЫХ СУШИЛОК

#### 2.1.1. Основные параметры теплоносителя

Наиболее распространенным сушильным агентом является воздух, поэтому кратко остановимся на его свойствах и определении основных параметров.

При расчете сушилок необходимо знать состояние атмосферного воздуха данного района (температуру  $t_0$  в °С и относительную влажность  $\varphi_0$  в %). Эти величины берут из таблиц [14 - 16]. Относительную влажность воздуха определяют по формулам:

при  $t < 100^\circ\text{C}$

$$\varphi = \frac{\gamma_{\text{п}}}{\gamma_{\text{н}}} \approx \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}}, \quad (2.1.)$$

при  $t > 100^\circ\text{C}$

$$\varphi \approx \frac{p_{\text{п}}}{B}; \quad (2.2.)$$

здесь  $\gamma_{\text{п}}$  и  $\gamma_{\text{н}}$  — удельный вес водяного пара соответственно в данных условиях и в состоянии насыщения;

$p_{\text{п}}$ ,  $p_{\text{н}}$  — парциальное давление водяного пара соответственно в данных условиях и в состоянии насыщения;

$B$  — барометрическое давление.

Удельный вес влажного воздуха, представляющего собой смесь воздуха и водяного пара,

$$\gamma_{\text{в.в}} = \frac{B}{29,27 \cdot T} - 0,0129 \cdot \frac{\varphi \cdot p_{\text{н}}}{T}, \quad (2.3.)$$

где  $\gamma_{\text{в.в}}$  — в кгс/м<sup>3</sup>;

$T$  — абсолютная температура в К.

Из формулы видно, что удельный вес влажного воздуха меньше удельного веса сухого воздуха.

Влагосодержание воздуха, т.е. количество в г водяного пара, приходящееся на 1 кг абсолютного сухого воздуха,

$$d = 622 \cdot \frac{\varphi \cdot \rho_{\text{H}}}{B - \varphi \cdot \rho_{\text{H}}}; \quad (2.4.)$$

при температуре выше  $100^{\circ}\text{C}$ , когда  $p_{\text{H}} = B$ ,

$$d = 622 \cdot \frac{\varphi}{1 - \varphi}. \quad (2.5.)$$

Давление насыщенного водяного пара  $p_{\text{H}}$  определяют по термодинамическим таблицам [17, 18].

Теплосодержание влажного воздуха в ккал на 1 кг сухого воздуха:

$$I = 0,24 \cdot t + (595 + 0,47 \cdot t) \cdot \frac{d}{1000}; \quad (2.6.)$$

здесь  $t$  — температура воздуха в  $^{\circ}\text{C}$ ;

$d$  — влагосодержание в г/кг.

Состояние влажного воздуха характеризуется также температурой мокрого термометра и точкой росы. Температура мокрого термометра — это температура, которую принимает испаряющаяся в воздух вода в конце процесса испарения. Этот показатель определяют при помощи прибора — психрометра. По температуре мокрого термометра с помощью психрометрических таблиц нетрудно определить относительную влажность. Относительную влажность воздуха можно найти и по температуре точки росы. При этой температуре (если охлаждать воздух при постоянном теплосодержании) воздух становится насыщенным, и водяной пар выпадает в виде росы. Температуру точки росы можно определить по таблицам или  $I$ — $d$  - диаграмме.

При известной температуре воздуха и относительной влажности по таблицам можно определить также влагосодержание и теплосодержание воздуха [19, 20]. Удельный объем влажного воздуха находят по таблицам [19, 20] в зависимости от  $t$  и  $\varphi$ .

Если в качестве сушильного агента используют дымовые газы, полученные при сжигании твердого топлива, то необходимо знать состав топлив, который определяет количество и качество дымовых газов. Данные

по составу топлива имеются в справочниках [19]. Для пересчета состава топлива из одной массы в другую (рабочую, органическую, сухую, горючую) можно использовать коэффициенты пересчета, указанные в табл. 2.1.

При расчетах высшую теплотворность в ккал на 1 кг твердого и жидкого топлива можно рассчитать по формуле Менделеева:

$$Q_H^P = 81 \cdot C^P + 300 \cdot H^P - 26 \cdot (O^P - S^P), \quad (2.7.)$$

где  $O^P, H^P, C^P, S^P$  — состав топлива в % масс.

Низшая теплотворность 1 кг топлива в ккал:

$$Q_H^P = Q_B^P - 6 \cdot (W^P + 9 \cdot H^P); \quad (2.8.)$$

$$Q_H^C = Q_B^C - 54 \cdot H^C; \quad (2.9.)$$

$$Q_H^G = Q_B^G - 54 \cdot H^G. \quad (2.10.)$$

Таблица 2.1

Исходная масса для пересчета	Коэффициент для пересчета на массу			
	рабочую	органическую	сухую	горючую
Рабочая	1	$\frac{100}{100 - (S_K^P + A^P + W^P)}$	$\frac{100}{100 - W^P}$	$\frac{100}{100 - W^P - A^P}$
Органическая	$\frac{100 - (S_K^P + A^P + W^P)}{100}$	1	$\frac{100 - S_K^C - A^C}{100}$	$\frac{100 - S_K^G}{100}$
Сухая	$\frac{100 - W^P}{100}$	$\frac{100}{100 - S_K^C - A^C}$	1	$\frac{100}{100 - A^C}$
Горючая	$\frac{100 - W^P - A^P}{100}$	$\frac{100}{100 - S_K^G}$	$\frac{100 - A^C}{100}$	1

*Примечание.*  $S_K, A, W$  – количество соответственно серы, золы и влаги в % масс; индексы р, с, г относятся соответственно к рабочей, сухой, горячей массе топлива.

Теплотворность газообразного топлива обычно принимают по справочным таблицам [19]. При отсутствии таких данных теплотворность 1 м<sup>3</sup> газа в ккал можно вычислить по формуле типа:

$$Q_H^C = 55,9 \cdot H_2S + 141,1 \cdot C_xH_y + 30,2 \cdot CO + 25,8 \cdot H_2 + \dots, \quad (2.11.)$$

где  $H_2S$ ,  $C_xH_y$ ,  $CO$  — содержание отдельных газов в смеси в % об.

Высшая теплотворность в ккал/кг:

$$Q_B^P = Q_H^P + 600 \cdot \sum \frac{0,09 \cdot y}{12 \cdot x + y} \cdot C_xH_y, \quad (2.12.)$$

где  $x$  и  $y$  — соответствуют индексам при  $C$  и  $H$  (например, для  $CH_4$ :  $x = 1$ ,  $y = 4$ ).

Теоретический расход в кг воздуха, необходимого для сжигания 1 кг твердого топлива определяют, исходя из реакций процесса горения, по формуле:

$$L_0 = \frac{2,67 \cdot C^P + 7,95 \cdot H^P + (S^P - O^P)}{23,2} = 0,115 \cdot C^P + 0,343 \cdot H^P + 0,043 \cdot (S^P - O^P). \quad (2.13.)$$

Расход в кг воздуха для сжигания 1 кг сухого газообразного топлива:

$$L_0 = 1,38 \cdot \left( 0,0179 \cdot CO + 0,248 \cdot H_2 + 0,44 \cdot H_2S + \sum \frac{x + \frac{y}{4}}{12 \cdot x + y} \cdot C_xH_y - O_2 \right), \quad (2.14)$$

где  $CO$ ,  $H_2$ ,  $H_2S$ ,  $C_xH_y$ ,  $O_2$  — количество составляющих газообразного топлива в % масс.

Действительный расход воздуха

$$L = \alpha \cdot L_0; \quad (2.15.)$$

здесь  $\alpha$  — коэффициент избытка воздуха (отношение количества воздуха, действительно подведенного в топку, к теоретически необходимому количеству).

Влагосодержание в г на 1 кг сухих дымовых газов:

$$d = \frac{1000 \cdot G_{B.П.}}{G_{C.Г.}}, \quad (2.16.)$$

где  $G_{B.П.}$  — количество водяных паров, поступающих в сушилку в кг на 1 кг топлива;

$G_{C.Г.}$  — количество сухих газов в кг на 1 кг топлива.

$$G_{\text{в.п}} = \frac{9 \cdot H^P + W^P}{100} + \frac{\alpha \cdot L_0 \cdot d_0}{1000} + W_T; \quad (2.17)$$

здесь  $W_T$  — количество водяного пара, применяемого для дутья.

При сжигании газообразного топлива количество водяных паров на 1 кг сухих газов:

$$G_{\text{в.п}} = \frac{\alpha \cdot L_0 \cdot d_0}{1000} + \sum \frac{0,09 \cdot y}{12 \cdot x + y} \cdot C_x H_y + W_T. \quad (2.18.)$$

Количество сухих газов в кг, получаемых при сжигании 1 кг твердого или жидкого топлива:

$$G_{\text{с.г}} = 1 + \alpha \cdot L_0 - \frac{A^P + 9 \cdot H^P + W^P}{100}, \quad (2.19.)$$

газообразного топлива:

$$G_{\text{с.г}} = 1 + \alpha \cdot L_0 - \sum \frac{0,09 \cdot y}{12 \cdot x + y} \cdot C_x H_y. \quad (2.20.)$$

В этих выражениях  $C_x H_y$  — количество составляющих газа в % масс.

Если составить уравнение теплового баланса на 1 кг топлива для состояния дымовых газов перед входом в сушилку, то после ряда преобразований получим выражение для коэффициента избытка воздуха:

для твердого и жидкого топлива:

$$\alpha = \frac{Q_B^P \cdot \eta_T + c_T \cdot t_T - \left( 1 - \frac{9 \cdot H^P + W^P + A^P}{100} \right) \cdot c_{\text{с.г}} \cdot t_{\text{г}} - \frac{9 \cdot H^P + W^P}{100} \cdot i_{\text{п}} + W_T \cdot (i'_{\text{п}} - i_{\text{п}})}{L_0 \cdot \left( c_{\text{с.г}} \cdot t_{\text{г}} + \frac{i_{\text{п}} \cdot d_0}{1000} - I_0 \right)}, \quad (2.21.)$$

для газообразного топлива:

$$\alpha = \frac{Q_B^P \cdot \eta_T + c_T \cdot t_T - \left( 1 - \sum \frac{0,09 \cdot y}{12 \cdot x + y} \cdot C_x H_y \right) \cdot c_{\text{с.г}} \cdot t_{\text{г}} - \left( \sum \frac{0,09 \cdot y}{12 \cdot x + y} \cdot C_x H_y \right) \cdot i_{\text{п}} + W_T \cdot (i'_{\text{п}} - i_{\text{п}})}{L_0 \cdot \left( c_{\text{с.г}} \cdot t_{\text{г}} + \frac{i_{\text{п}} \cdot d_0}{1000} - I_0 \right)} \quad (2.22.)$$

здесь  $c_T$  — удельная теплоемкость топлива в ккал/(кг·°C);

$t_T$  — температура топлива в °С;

$\eta_T$  — к. п. д. топки;

$i_{II}$  — теплосодержание пара при температуре сухих газов  $t_T$  в ккал/кг;

$I_0$  — теплосодержание атмосферного воздуха в ккал/кг;

$i'_{II}$  — начальное теплосодержание дутьевого пара в ккал/кг;

$c_{с.г}$  — удельная теплоемкость сухих газов в ккал/(кг·°С);

$d_0$  — влагосодержание атмосферного воздуха в г на 1 кг сухого воздуха.

$$c_{с.г} = \frac{G_{CO_2} \cdot c_{CO_2} + G_{SO_2} \cdot c_{SO_2} + G_{N_2} \cdot c_{N_2} + G_{O_2} \cdot c_{O_2}}{G_{с.г}}, \quad (2.23)$$

где  $c_{CO_2}$ ,  $c_{SO_2}$  — удельные теплоемкости составляющих газов;

$G_{с.г}$  — масса сухих газов [см. формулы (2.19) и (2.20)];

$G_{CO_2}$ ,  $G_{SO_2}$  — количество компонентов сухих газов.

Количество компонентов в кг на 1 кг топлива определяют по формулам:

для твердого и жидкого топлива:

$$G_{CO_2} = 0,0367 \cdot C^P; \quad (2.24.)$$

$$G_{SO_2} = 0,02 \cdot S^P; \quad (2.25.)$$

$$G_{N_2} = 0,768 \cdot \alpha \cdot L_0 + 0,01 \cdot N^P; \quad (2.26.)$$

$$G_{O_2} = 0,232 \cdot (\alpha - 1) \cdot L_0; \quad (2.27.)$$

для газообразного топлива:

$$G_{CO_2} = 0,01 \cdot CO_2 + 0,0157 \cdot CO + (44/(12 \cdot x + y)) \cdot (C_x H_y / 100); \quad (2.28.)$$

$$G_{N_2} = 0,768 \cdot \alpha \cdot L_0 + 0,01 \cdot N_2; \quad (2.29.)$$

$$G_{O_2} = 0,232 \cdot (\alpha - 1) \cdot L_0; \quad (2.30.)$$

здесь количества составляющих твердого и газообразного топлива — в % масс.

Теплосодержание дымовых газов в ккал на 1 кг сухих газов:

$$I_T = \frac{Q_B^P \cdot \eta_T + c_T \cdot t_T + \alpha \cdot L_0 \cdot I_0 + W_T \cdot i'_{II}}{G_{с.г}}. \quad (2.31)$$

Параметры дымовых газов на выходе из сушилки можно рассчитать по формулам (2.4.), (2.6).

### 2.1.2. Материальный баланс сушилки

Для расчета процесса сушки необходимо знать начальную  $\omega_1$  и конечную  $\omega_2$  влажность материала.

Влажность материала обычно выражается либо отношением общего количества  $W$  влаги в материале к количеству  $W + G_{\text{сух}}$  влажного материала («влажность  $\omega$  на общую массу»), либо отношением общего количества  $W$  влаги в материале к количеству  $G_{\text{сух}}$  абсолютно сухого вещества ( $\omega^a$ ).

В первом случае влажность материала в % можно записать, как:

$$\omega = \frac{W}{G_{\text{сух}} + W} \cdot 100. \quad (2.32.)$$

Абсолютная влажность в %:

$$\omega^a = \frac{W}{G_{\text{сух}}} \cdot 100. \quad (2.33.)$$

Для перехода от абсолютной влажности к общей и наоборот применяют формулы:

$$\omega^a = \frac{100 \cdot \omega}{100 - \omega} \% ; \quad (2.34.)$$

$$\omega = \frac{100 \cdot \omega^a}{100 + \omega^a} \% . \quad (2.35.)$$

Обозначим через  $G_1$ ,  $G_2$  и  $W$  — количество в кг/ч соответственно влажного материала, поступающего в сушилку, высушенного материала, уходящего из сушилки, и удаляемой в сушилке влаги.

Количество абсолютно сухого вещества:

$$G_{\text{сух}} = \frac{G_1(100 - \omega_1)}{100} = \frac{G_2(100 - \omega_2)}{100}. \quad (2.36.)$$

Из этого равенства можно определить количество высушенного вещества:

$$G_2 = G_1 \cdot \frac{100 - \omega_1}{100 - \omega_2} \quad (2.37.)$$

и поступающего на сушку влажного материала:

$$G_1 = G_2 \cdot \frac{100 - \omega_2}{100 - \omega_1}. \quad (2.38.)$$

Количество влаги, удаляемой в сушилке,

$$W = G_1 - G_2 = G_1 \cdot \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_2} \quad (2.39.)$$

или

$$W = G_2 \cdot \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_1} \quad (2.40.)$$

При расчетах сушилок приходится относить производительность сушилок по влаге или по высушенному веществу к единице поверхности нагрева или единице объема сушилки. Эта величина, зависящая от типа сушилки, влажности материала и других факторов, получила название напряжения сушилки. Если обозначить объем сушилки через  $V$  (в  $\text{м}^3$ ), а время сушки через  $\tau$  (в ч), то напряжение объема сушилки по влаге в  $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$  выразится формулой:

$$A_v = \frac{W}{\tau \cdot V}. \quad (2.41.)$$

Для сушилок контактного типа определяют напряжение поверхности нагрева по влаге в  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ :

$$A_F = \frac{W}{\tau \cdot F}, \quad (2.42.)$$

где  $F$  — площадь поверхности нагрева в  $\text{м}^2$ .

В формулах (2.41.), (2.42.)  $W$  — в кг.

**Баланс влаги в сушилке.** Исходя из уравнений материального баланса, можно определить расход воздуха в сушилке, для чего следует составить

уравнение баланса влаги.

При установившемся процессе сушки и отсутствии потерь влага поступает в сушилку с материалом и воздухом, а уходит из сушилки с высушенным материалом и воздухом. Запишем уравнение баланса влаги:

$$G_1 = \frac{w_1}{100} + L \cdot \frac{d_1}{100} = G_2 \cdot \frac{w_2}{100} + L \cdot \frac{d_2}{100}; \quad (2.43)$$

здесь  $L$  — количество абсолютно сухого воздуха, необходимого для сушки, в кг/ч;  $d_1$  и  $d_2$  — влагосодержание воздуха соответственно на входе в сушилку и выходе из нее в г на 1 кг сухого воздуха.

Обозначая удельный расход сухого воздуха (на 1 кг испаренной влаги) через  $l = L/W$ , найдем удельный расход сухого воздуха в кг на 1 кг влаги:

$$l = \frac{1000}{d_2 - d_1}. \quad (2.44)$$

Так как при нагреве воздуха в калорифере от температуры  $t_0$  до температуры  $t_1$  количество влаги в воздухе не изменяется ( $d_0 = d_1$ ), то формулу (2.44.) можно записать так:

$$l = \frac{1000}{d_2 - d_0}. \quad (2.45.)$$

**Тепловой баланс сушильной установки.** Уравнение теплового баланса сушильного процесса в действительной сушилке имеет вид:

$$\begin{aligned} L \cdot I_0 + W \cdot c_{\text{вл}} \cdot \vartheta_1 + G_2 \cdot c_M'' \cdot \vartheta_1 + G_{\text{ТР}} \cdot c_{\text{ТР}} \cdot t_{\text{ТР}}' + Q_K + Q_D = \\ = L \cdot I_2 + G_2 \cdot c_M'' \cdot \vartheta_2 + G_{\text{ТР}} \cdot c_{\text{ТР}} \cdot t_{\text{ТР}}'' + Q_{\text{П}} \end{aligned}, \quad (2.46.)$$

где  $I_0, I_2$  — теплосодержание наружного и отработанного воздуха в ккал/кг;

$c_{\text{вл}}, c_M'', c_{\text{ТР}}$  — удельная теплоемкость соответственно влаги, высушенного материала, транспортных устройств в ккал/(кг·°C);

$\vartheta_1$  — температура влаги и материала на входе в сушилку в °C;

$\vartheta_2$  — температура материала на выходе из сушилки в °C;

$G_2, G_{\text{ТР}}$  — масса высушенного материала и транспортных устройств в кг/ч;

$Q_K$  — приход тепла в калорифер в ккал/кг;

$Q_D$  — подвод тепла от дополнительных нагревателей в ккал/ч;

$Q_{\Pi}$  — потери тепла в окружающую среду в ккал/ч.

Уравнение теплового баланса на 1 кг испаренной влаги:

$$q_K + q_D = l \cdot (I_2 - I_0) + q_M + q_{TR} + q_{\Pi} - c_{ВЛ} \cdot \vartheta_1, \quad (2.47.)$$

а удельный расход тепла в калорифере в ккал/кг:

$$q_K = l \cdot (I_2 - I_0) + (q_M + q_{TR} + q_{\Pi}) - (c_{ВЛ} \cdot \vartheta_1 + q_D) \quad (2.48.)$$

или

$$q_K = l \cdot (I_2 - I_0) \quad (2.49.)$$

здесь  $I_1$  — теплосодержание воздуха на выходе из калорифера. Обозначая:

$$(c_{ВЛ} \cdot \vartheta_1 + q_D) - (q_M + q_{TR} + q_{\Pi}) = \Delta, \quad (2.50.)$$

получим уравнение баланса:

$$l \cdot (I_2 - I_0) = \Delta. \quad (2.51.)$$

Выражение (2.50.) характеризует отклонение действительного процесса сушки от теоретического и представляет собой внутренний баланс тепла в сушилке.

Для теоретической сушилки (сушилка без потерь, в которой  $\vartheta_1 = \vartheta_2 = 0$ ) уравнение теплового баланса имеет вид:

$$l \cdot (I_2 - I_0) = 0 \quad (2.52.)$$

$$\text{и } l \cdot I_1 = l \cdot I_2, \text{ т. е. } I_1 = I_2 = \text{const.}$$

В теоретической сушилке теплосодержание воздуха на входе и выходе постоянно.

### 2.1.3. Аналитический метод расчета сушилки

Аналитический метод расчета сушилки сводится к составлению уравнений материального и теплового балансов сушилки, с помощью которых определяют количество удаляемой влаги  $W$  и высушенного материала  $G_2$ , расход воздуха  $L$  и тепла  $Q$  на сушку. Сушилку рассчитывают в определенной последовательности: выбирают схему сушильного процесса, тип сушилки; определяют основные расчетные параметры  $t_0$ ,  $t_1$ ,  $\varphi_0$ ,  $d_2$  и задаются параметрами воздуха на выходе из сушилки  $t_2$  и  $\varphi_2$ ; составляют материальный баланс сушилки и предварительно определяют ее размеры из формул (2.41.), (2.42.). Затем составляют тепловой баланс сушилки для летних и зимних условий.

Если тепловой баланс не сходится, то следует задаваться новыми значениями  $t_2$  и  $\varphi_2$ . Более удобен графо-аналитический метод расчета, при котором задаются только одним параметром и нет необходимости прибегать к методу последовательных приближений.

Тепловой баланс на 1 кг удаляемой влаги составляют следующим образом.

*Приход тепла* в ккал/кг:

- 1) с сушильным агентом  $l \cdot I_0$ ;
- 2) с влагой материала  $c_{вл} \cdot \vartheta_1$ ;
- 3) с материалом  $(G_2/W) \cdot c_M'' \cdot \vartheta_1$ ;
- 4) с транспортными устройствами  $(G_{тр}/W) \cdot c_{тр} \cdot t_{тр}'$ ;
- 5) от источника тепла в калорифере  $q_k$ ;
- 6) от дополнительных источников тепла  $q_d$ .

*Расход тепла* в ккал/кг:

- 1) с уходящим воздухом  $l \cdot I_2$ ;
- 2) с высушенным материалом  $(G_2/W) \cdot c_M'' \cdot \vartheta_2$ ;
- 3) с транспортными устройствами  $(G_{тр}/W) \cdot c_{тр} \cdot t_{тр}''$ ;
- 4) потери тепла в окружающую среду  $q_p$ .

При сушке дымовыми газами исключается 5-й пункт прихода.

Тепло, расходуемое на нагрев материала, в ккал/кг

$$q_M = (G_2/W) \cdot c_M'' \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1), \quad (2.53.)$$

где  $c_M''$  — удельная теплоемкость высушенного материала в ккал/(кг·°C).

Теплоемкость влажного материала:

$$c_M = c_{\text{сух}} \cdot \frac{100 - \omega}{100} + \frac{\omega}{100}; \quad (2.54.)$$

здесь  $c_{\text{сух}}$  — удельная теплоемкость сухого материала в ккал/(кг·°C), определяемая по справочным данным [18, 20];

$\omega$  — влажность материала в %.

Тепло, расходуемое на нагрев транспортных устройств, в ккал/кг:

$$q_{\text{ТР}} = (G_{\text{ТР}}/W) \cdot c_{\text{ТР}} \cdot (t_{\text{ТР}2} - t_{\text{ТР}1}), \quad (2.55.)$$

где  $G_{\text{ТР}}$  — масса транспортных устройств в кг/ч;

$c_{\text{ТР}}$  — средняя теплоемкость материала транспортных устройств в ккал/(кг·°C);

$t_{\text{ТР}1}$  — начальная температура транспорта, равная температуре в цехе, в °C;

$t_{\text{ТР}2}$  — конечная температура, близкая к температуре воздуха в конце сушки, в °C.

Если транспортное устройство движется только внутри сушилки, то  $t_{\text{ТР}1} = t_{\text{ТР}2}$  и  $q_{\text{ТР}} = 0$ .

Потери тепла в окружающую среду в ккал/кг находят из основного уравнения теплообмена:

$$q_{\text{П}} = K \cdot F \cdot \Delta t_{\text{СР}} / W, \quad (2.56.)$$

где  $F$  — площадь наружной поверхности сушилки в м<sup>2</sup>;

$\Delta t_{\text{СР}}$  — средняя разность температур сушильного агента и окружающей среды в °C;

$K$  — коэффициент теплопередачи в ккал/(м<sup>2</sup>·ч·°C);

$W$  — количество испаряемой влаги в кг/ч.

Коэффициент теплопередачи  $K$  рассчитывают по формуле:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (2.57.)$$

Коэффициент теплоотдачи в  $\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C})$  от воздуха к стенке сушилки можно определить по формуле И.М.Федорова:

$$\alpha_1 = k \cdot (\alpha_1' + \alpha_1''); \quad (2.58.)$$

здесь  $k = 1,2 \div 1,3$  — поправочный коэффициент, учитывающий турбулизацию потока;

$\alpha_1'$  и  $\alpha_1''$  — коэффициенты теплоотдачи от воздуха к стенке за счет соответственно вынужденной и естественной конвекции.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1'$  определяют по формулам: при турбулентном режиме ( $Re_f > 10^4$ )

$$Nu_f = 0,018 \cdot Re_f^{0,8} \cdot \varepsilon_1, \quad (2.59.)$$

при ламинарном режиме ( $Re_f < 2 \cdot 10^3$ )

$$Nu_f = 0,13 \cdot Re_f^{0,8} \cdot Gr^{0,1}, \quad (2.60)$$

где  $\varepsilon_1$  — поправочный коэффициент, зависящий от  $Re$  и отношения  $L_c/D$  длины сушилки к ее диаметру.

В этих формулах все параметры берут при средней температуре воздуха в сушилке  $t_f = (t_1 + t_2)/2$ ; в качестве определяющего размера принят диаметр канала  $D$ . В формулах (2.59.), (2.60.)  $Nu_f = \alpha \cdot D/\lambda$  — критерий Нуссельта ( $\lambda$  — коэффициент теплопроводности воздуха в  $\text{ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C})$ );  $Re_f = \omega \cdot D/\nu$  — критерий Рейнольдса;  $Gr = g \cdot D^3 \cdot \Delta t / (\nu^2 \cdot T)$  — критерий Грасгофа ( $\Delta t = t_{\text{пот}} - t_{\text{ст}}$  — размерность средней температуры потока и стенки сушилки в  $^\circ\text{C}$ ;  $T = 273 + t_f$ ).

В случае переходного режима ( $Re_f = 2 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^4$ ).

Значения коэффициента теплоотдачи  $\alpha_1'$ , можно также приближенно найти из формул [21, 22]:

при  $Re < 16200$

$$Nu = 0,597 \cdot \sqrt{Re} ; \quad (2.61.)$$

при  $Re > 16200$

$$Nu = 0,0324 \cdot Re^{0,8}. \quad (2.62.)$$

При течении воздуха вдоль плоской стенки коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1'$  можно определить из выражений:

при  $Re < 16000$

$$Nu = 0,3 \cdot \sqrt{Re} ; \quad (2.63.)$$

при  $Re > 16000$

$$Nu = 0,0255 \cdot Re^{0,8}. \quad (2.64.)$$

В формулах (2.61.) — (2.64) за определяющую температуру принята начальная температура воздуха, а за определяющий размер — теплоотдающая длина плиты по направлению потока.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1''$  от воздуха к стенке за счет естественной конвекции определяют из формулы [23]

$$Nu_f = 0,47 \cdot Cr^{0,25}; \quad (2.65.)$$

физические параметры воздуха берут при средней температуре воздуха  $t_f$ .

С большей точностью значения  $\alpha_1''$  можно найти по формуле

$$Nu_m = c \cdot (Gr \cdot Pr)_m^n$$

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_2$  от наружной поверхности сушилки в окружающую среду:

$$\alpha_2 = \alpha_1' + \alpha_2'', \quad (2.66.)$$

где  $\alpha_1'$  — коэффициент теплоотдачи за счет естественной конвекции;

$\alpha_2''$  — коэффициент теплоотдачи за счет лучеиспускания.

$$\alpha_2'' = \frac{\varepsilon \cdot C_0 \cdot \left[ \left( \frac{T_{CT}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{CP}}{100} \right)^4 \right]}{T_{CT} - T_{CP}} ; \quad (2.67.)$$

здесь  $\varepsilon$  — степень черноты наружной поверхности сушилки, определяемая по справочным данным [15, 29];

$C_0 = 4,96$  ккал/(м<sup>2</sup>·ч·К<sup>4</sup>) — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела;

$T_{CT}$  и  $T_{CP}$  — абсолютная температура соответственно стенки и окружающей среды в К.

При расчете тепловых потерь надо стремиться к тому, чтобы получить значение коэффициента теплопередачи не больше 1,0 — 1,5 ккал/(м<sup>2</sup>·ч·°С), что достигается соответствующим выбором изоляции стенок. Значение средней разности температур  $\Delta t_{CP}$  сушильного агента и окружающей среды [формула (56)] можно найти по уравнению

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_M}{2,3 \cdot \lg \frac{\Delta t_6}{\Delta t_M}}$$

где  $\Delta t_6 = t_1 - t_{CP}$  — разность температур на входе воздуха в сушилку и окружающей среды в °С;

$\Delta t_M = t_2 - t_{CP}$  — разность температур на выходе воздуха из сушилки и окружающей среды.

#### 2.1.4. Графо-аналитический расчет сушилки по I-d-диаграмме

При графо-аналитическом расчете сушилки с помощью I—d-диаграммы удельный расход сушильного агента  $l$  и тепла в калорифере  $q_k$  определяют после построения процесса сушки. Для построения теоретического и действительного процессов сушки необходимо знать состояние наружного воздуха (параметры  $t_0$  и  $\phi_0$ ), температуру газа на входе в сушилку  $t_1$  и один из параметров теплоносителя на выходе из сушилки  $t_2$  или  $\phi_2$ .

Основные варианты процесса сушки в I—d-диаграмме представлены на рис. 2.1.

На рис. 2.1,а приведены схема и теоретический процесс сушки при дополнительном подводе тепла к сушильной камере. Процесс характеризуется ломаной линией ABC (AB — подогрев воздуха до температуры  $t_1$ ; BC — процесс сушки). Расход воздуха и тепла в кг на 1 кг влаги в простой калориферной сушилке можно определить по формулам:

$$l = 1000/(DC \cdot M_d) \quad (2.68.)$$

и

$$q_k = q_{\text{общ}} = m \cdot (AB/DC), \quad (2.69.)$$

где  $M_d$  — масштаб влагосодержаний;

$m = M_l/M_d$  — масштаб диаграммы; AB и DC в мм.

При подогреве воздуха до более низкой температуры (сушка с дополнительным подогревом) процесс сушки изображается ломаной AB'C. Для этого процесса расход воздуха определяют по формуле (2.68), а расход тепла в ккал на 1 кг влаги в калорифере по уравнению:

$$q_k = m \cdot (AB'/DC). \quad (2.70.)$$

Расход дополнительного тепла в сушилке в кг на 1 кг влаги:

$$q_d = B'B/DC. \quad (2.71.)$$

Общий, расход тепла в сушилке рассчитывают по формуле (2.69.).

Процесс сушки дымовыми газами характеризуется только линией сушки BC, так как период подогрева в этом случае отсутствует.

В сушилке с промежуточным подогревом воздуха (рис. 2.1,б) можно вести процесс при более низкой температуре теплоносителя. Сушилка делится на ряд зон-камер, через которые последовательно проходит материал. В каждой камере происходит обычный процесс сушки, представленный на диаграмме рис. 2.1,а.

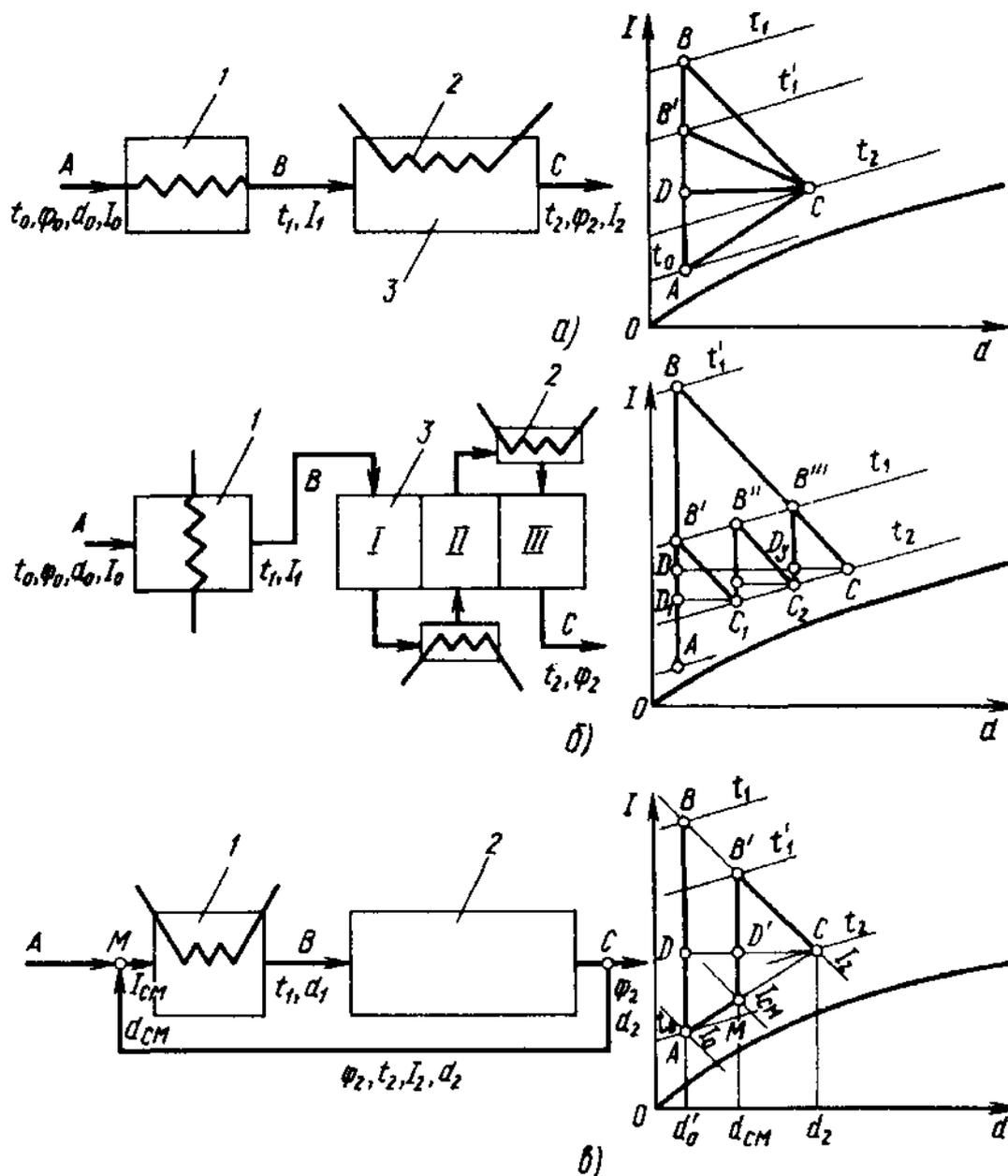


Рис. 2.1

*Основные варианты сушильного процесса в  $l-d$ -диаграмме;*

*а — с дополнительным подогревом; б — с промежуточным подогревом; в — с рециркуляцией; 1 — калорифер; 2 — дополнительный подогреватель; 3 — сушилка*

Процесс сушки в такой сушилке изображается ломаной  $AB'C_1B''C_2B'''C$  (рис. 2.1,б), где отрезки  $AB'$ ,  $C_1B''$ ,  $C_2B'''$  характеризуют процесс подогрева воздуха в промежуточных подогревателях, а отрезки  $B'C_1$ ,  $B''C_2$ ,  $B'''C$  — процесс сушки в отдельных камерах I, II, III. Для получения таких же параметров воздуха на выходе из сушилки без применения промежуточного подогрева следует подогреть воздух в калориферной сушилке до температуры  $t_1'$  (линия  $ABC$ ). Общий расход воздуха в сушилке одинаковый для всех зон сушилки  $L = l_1 \cdot W_1 = l_2 \cdot W_2 = \dots$ . Удельный расход воздуха находят по формуле (2.68), а полный расход тепла на сушку — по формуле (2.69). Расход тепла в ккал на 1 кг влаги в одной зоне определяют, как:

$$q_3 = m \cdot (AB'/DC). \quad (2.72.)$$

При проектировании сушилок с промежуточным подогревом желательно, чтобы точки  $B'$ ,  $B''$ ,  $B'''$  и  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C$  лежали на линиях одинаковых потенциалов сушки.

Процесс сушки с возвратом части отработанного воздуха (рециркуляцией) характеризуется ломаной  $AMB'C$  (рис. 2.1,в). В этих сушилках температура процесса ниже, чем в обычной калориферной сушилке, а влажность воздуха в сушильной камере можно регулировать. Процесс сушки легко построить в  $l-d$ -диаграмме по трем заданным точкам  $A$ ,  $M$  и  $C$ , которые должны лежать на одной прямой. На диаграмме линия  $AM$  соответствует процессу смешения отработанного воздуха (параметры — см. точку  $C$ ) со свежим воздухом (параметры — см. точку  $A$ ), линия  $MB'$  — процессу подогрева смеси в калорифере и линия  $B'C$  — процессу сушки. Расход воздуха в такой сушилке определяют по формуле (2.68.), а расход тепла, зависящий только от начальных и конечных параметров воздуха, по формуле (2.69.).

Расход циркулирующего воздуха в кг на 1 кг влаги:

$$l_{ц} = 1000 / (D'C \cdot M_d) \quad (2.73.)$$

и

$$l_{ц} = l/(1 + n) \quad (2.74.)$$

где  $n$  — коэффициент рециркуляции, который соответствует количеству килограммов отработанного воздуха, добавляемого на 1 кг свежего воздуха:

$$n = AM/MC = DD'/D'C.$$

На рис. 2.1. изображен теоретический процесс сушки. Построение действительного процесса сушки показано в примере расчета.

Существуют и другие варианты процесса сушки. Построение этих процессов сушки в  $I$ — $d$ -диаграмме описано в специальной литературе [22, 24, 25].

### 2.1.5. Выбор основных габаритных размеров сушилки

Выбор основных габаритных размеров сушилки определяется типом и конструктивными особенностями сушилки. При расчете барабанных сушилок задаются напряжением объема барабана по влаге  $A_v$  и по формуле (2.41.) находят объем барабана, а затем по нормам выбирают соответствующий аппарат.

При расчете туннельных сушилок по производительности и времени сушки находят емкость камер, а затем, после выбора размеров тележки, определяют емкость сушилки по числу тележек и рассчитывают длину камеры, зависящую от числа рядов тележек и числа тележек в ряду. Емкость сушилки по тележкам можно найти по формуле:

$$N = G_2 \cdot \tau / G_{M.T} \quad (2.75.)$$

где  $G_2$  — производительность сушилки в кг/ч;

$G_{M.T}$  — масса материала, располагаемого на тележке, в кг;

$\tau$  — время сушки в ч.

Длину в м ленточной сушилки при известном времени сушки  $\tau$  можно рассчитать по формуле:

$$L_{л} = (G \cdot \tau) / (\rho_H \cdot z') + l', \quad (2.76.)$$

где  $G$  — производительность сушилки в кг/ч;

$\rho$  — насыпная масса материала в кг/м<sup>3</sup>;

$z'$  — объем материала на 1 м длины ленты;

$l'$  — дополнительная длина, необходимая для установки транспортера.

При расчете распылительных сушилок площадь сечения камер рассчитывают по скорости газов (0,2 ÷ 0,5 м/с), а высоту камер — из отношения  $H_K/D_K$ , которое равно 0,8 ÷ 2,0 (в зависимости от типа распылительных устройств).

Площадь поверхности контактных сушилок (сушильные вальцы) находят

из основного уравнения теплообмена, а затем по нормалям выбирают соответствующую сушилку.

При расчете пневмосушилок диаметр трубы рассчитывают по уравнению расхода, а длину трубы — по формуле:

$$l_{\text{общ}} = l + l_p, \quad (2.77.)$$

где

$$l = \tau \cdot \omega_0, \quad (2.78.)$$

а

$$l_p \approx \omega_{\Gamma} \cdot d_{\text{ЭКВ}}. \quad (2.79.)$$

В этих выражениях  $\tau$  — время сушки в с;  $\omega_0 = \omega_{\Gamma} - \omega_{\text{ВИТ}}$  — относительная скорость частицы в м/с ( $\omega_{\Gamma}$  — скорость газа в трубе,  $\omega_{\text{ВИТ}}$  — скорость витания частицы [22, 26, 27])  $d_{\text{ЭКВ}}$  — эквивалентный диаметр частицы в мм.

Подробный расчет размеров различного типа сушилок приводится в специальной литературе [22, 25, 29, 29].

### 2.1.6. Определение продолжительности сушки

Как указано выше, в процессе сушки различают два периода, которые характеризуются постоянной (первый период) и падающей (второй период) скоростью сушки. В первом периоде, когда удаляется поверхностная влага, процесс аналогичен испарению со свободной поверхности жидкости и подчиняется закону Дальтона, который можно представить в виде:

$$M = dW/F \cdot dt = \beta_h \cdot (H-h), \quad (2.80.)$$

где  $M$  — количество влаги, удаляемой с  $1 \text{ м}^2$  поверхности жидкости в единицу времени, в  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ;

$H$  и  $h$  — соответственно упругость пара над материалом и парциальное давление пара в воздухе в мм рт. ст.;

$\beta_h$  — коэффициент испарения влаги в воздух (коэффициент интенсивности испарения) в  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{мм рт. ст.})$ :

$$\beta_h = 0,0229 + 0,0174 \cdot \omega_B; \quad (2.81.)$$

здесь  $\omega_B$  — скорость воздуха над материалом в м/с.

Во втором периоде сушки нарушается равновесие влаги в материале, возникает градиент влажности по толщине и влага движется к поверхности. Количество испаряющейся влаги непрерывно уменьшается. Закон перемещения влаги из внутренних слоев к поверхности можно описать уравнением:

$$i = i_1 + i_2 = -a' \cdot \rho_0 \cdot (\nabla U \pm \delta \cdot \nabla t), \quad (2.82.)$$

где  $i_1, i_2$  — плотность потока влаги за счет соответственно диффузии и термодиффузии в  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ;

$a'$  — коэффициент теплопроводности в  $\text{м}^2/\text{ч}$ ;

$\nabla U$  — градиент влажности по толщине в  $\text{кг}/(\text{кг} \cdot \text{м})$ ;

$\rho_0$  — плотность абсолютно сухого вещества в  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\delta$  — термоградиентный коэффициент в кг/(кг·°C);

$\nabla t$  — градиент температуры по толщине в °C/м.

Наглядно изменение скорости сушки можно изобразить графически (рис. 2.2.). На рис. 2.2, а представлена экспериментальная кривая сушки материала в виде зависимости  $\omega = f(\tau)$ . Из графика видно, что в начале сушки происходит прогрев материала и небольшое уменьшение влажности (участок АВ), затем (на участке ВС) влажность значительно снижается по линейному закону, и, наконец, процесс замедляется и идет по кривой CD. Точка С характеризует критическую влажность  $\omega_{кр}$ . При достижении равновесной влажности скорость сушки  $d\omega/d\tau = 0$ .

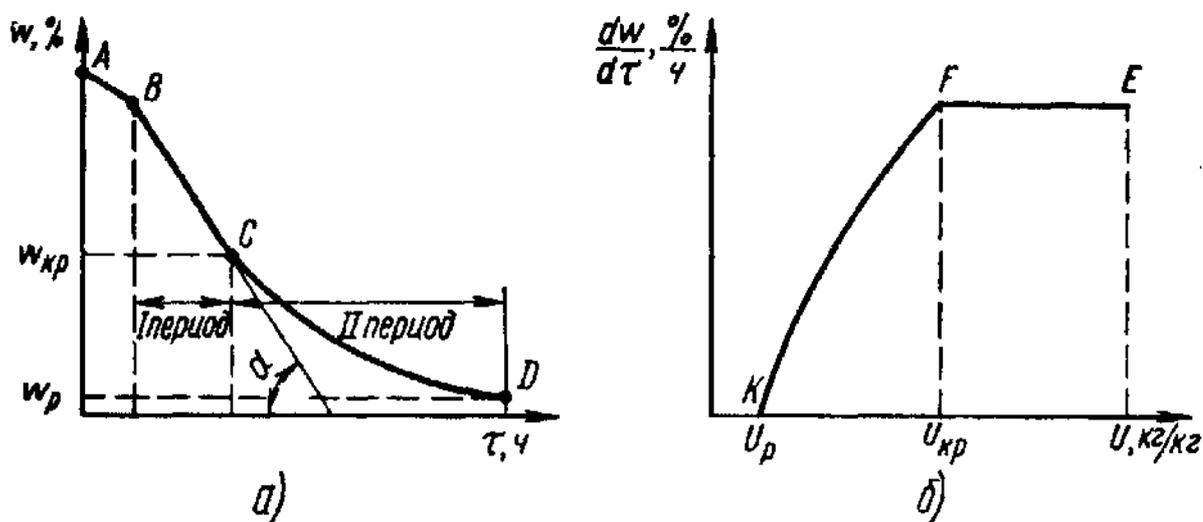


Рис. 2.2.

*Кривые сушки (а) и скорости сушки (б) материала*

Из графика зависимости  $\omega = f(\tau)$  можно графическим дифференцированием найти скорость сушки  $d\omega/d\tau$ . К произвольной точке кривой, характеризующей влажность в данный момент времени, проводим касательную до пересечения с осью абсцисс. Тангенс угла наклона касательной к оси абсцисс и определяет скорость сушки в данный момент. Откладывая на графике для каждого значения влажности  $\text{tg}\alpha = d\omega/d\tau$ , строим кривую скорости сушки в координатах  $d\omega/d\tau$  в %/ч —  $U$  в кг/кг (см. рис. 2.2,б); здесь  $U$  — влагосодержание материала в кг на 1 кг сухого вещества. В первый период сушки (прямая BC)  $\text{tg}\alpha$  — постоянная величина и скорость

сушки также постоянна (прямая EF}; далее  $\operatorname{tg}\alpha$  уменьшается и скорость сушки падает (кривая FK). Следует отметить, что кривые скорости сушки во втором периоде могут иметь различную конфигурацию, которая зависит от формы связи влаги с материалом и ряда факторов, влияющих на процесс сушки.

Математически интенсивность сушки в  $\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$  определяется зависимостью:

$$dW/F\cdot d\tau = G_{\text{сух}}\cdot(U_1-U_2), \quad (2.83.)$$

где  $U_1$  и  $U_2$  — соответственно начальное и конечное влагосодержание материала в кг на 1 кг сухого материала.

Спрямлением кривой скорости сушки во втором периоде можно получить приблизительные зависимости для расчета времени сушки.

Время сушки в ч в первом периоде можно рассчитать по формуле:

$$\tau_1 = \frac{G_{\text{сух}}}{100\cdot F\cdot M} \cdot (U_1 - U_{\text{кр}}), \quad (2.84.)$$

где  $G_{\text{сух}}$  — количество абсолютно сухого материала в кг;  $F$  — площадь поверхности высушиваемого материала в  $\text{м}^2$ ;  $M$  — интенсивность сушки в  $\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ ;

$U_{\text{кр}}$  — критическое влагосодержание материала в кг на 1 кг сухого материала.

Время сушки в ч. во втором периоде

$$\tau_2 = \frac{G_{\text{сух}}\cdot(U_{\text{кр}} - U_{\text{р}})}{100\cdot F\cdot M} \cdot \ln \frac{U_{\text{кр}} - U_{\text{р}}}{U_2 - U_{\text{р}}}, \quad (2.85.)$$

где  $U_{\text{р}}$  — равновесное влагосодержание материала.

Значения  $U_{\text{кр}}$  и  $U_{\text{р}}$  находят либо из опыта, либо по таблицам.

### 2.1.7. Вспомогательное оборудование сушильных установок

В комплект сушильной установки входит ряд вспомогательных устройств: пылеулавливающие устройства для улавливания частиц ценных или токсичных материалов, калориферы-теплообменники для подогрева теплоносителя и вентиляторы для просасывания газов через систему.

Расчет пылеулавливающих устройств рассмотрен в гл. I первого раздела, расчет подогревателей — в гл. I второго раздела. Эти устройства выбирают по каталогам [30]. Примеры их расчетов приведены в литературе [22, 29]. В качестве пылеулавливающих устройств в сушилках обычно используют циклоны, рукавные фильтры, лабиринтные камеры, пенные аппараты. Для подогрева теплоносителей применяют стальные пластинчатые калориферы или трубчатые подогреватели. Удобнее всего подбирать калориферы по таблицам, приведенным в справочниках [30].

Для подачи газов в систему применяют центробежные и осевые вентиляторы, которые выбирают с помощью графиков-характеристик [30] по значениям объемной производительности  $Q$  в м<sup>3</sup>/ч и общему сопротивлению системы  $H$  в кгс/м<sup>2</sup>:

$$H = \Delta h_{\text{ТР}} + \Delta h_{\text{М}} + \Delta h_{\text{Ц}} + \Delta h_{\text{К}} + \Delta h_{\text{СУШ}} + \Delta h_{\text{Д}}, \quad (2.86.)$$

где  $\Delta h_{\text{ТР}}$  — сопротивление трения в трубопроводе;

$\Delta h_{\text{М}}$  — местные сопротивления;

$\Delta h_{\text{Ц}}$  и  $\Delta h_{\text{К}}$  — сопротивление циклона и калорифера;

$\Delta h_{\text{СУШ}}$  — сопротивление сушилки;

$\Delta h_{\text{Д}}$  — динамические потери;

$$\Delta h_{\text{ТР}} = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \gamma_{\text{Г}} \cdot \frac{\omega_{\text{ГАЗ}}^2}{2 \cdot g}; \quad (2.87.)$$

$$\Delta h_{\text{М}} = \sum \xi \cdot \gamma_{\text{ГАЗ}} \cdot \frac{\omega_{\text{ГАЗ}}^2}{2 \cdot g}; \quad (2.88.)$$

$$\Delta h_{\text{д}} = \gamma_{\text{Г}} \cdot \frac{\omega_{\text{ГАЗ}}^2}{2 \cdot g}; \quad (2.89.)$$

В этих формулах  $\lambda, \xi$  — коэффициенты сопротивления;

$L$  и  $d$  — длина и диаметр трубопровода в м;

$\omega_{\text{ГАЗ}}$  — скорость газа в м/с;

$\gamma_{\text{Г}}$  — удельный вес газа в кгс/м<sup>3</sup>.

Сопротивление барабанной сушилки  $\Delta h_{\text{СУШ}} = 10 \div 20$  мм вод. ст., трубчатой  $\Delta h_{\text{СУШ}} = 3 \div 4$  мм вод. ст. Значения  $\Delta h_{\text{СУШ}}$  имеются в литературе [14, 22].

Мощность вентилятора в кВт:

$$N = Q \cdot H / (3600 \cdot 102 \cdot \eta), \quad (2.90.)$$

где  $\eta$  — к.п.д. вентилятора, выбираемый по таблицам [30]. Мощность на валу двигателя в кВт:

$$N_{\text{ДВ}} = N / (\eta_{\text{П}} \cdot \eta_{\text{РЕД}}), \quad (2.91.)$$

где  $\eta_{\text{П}}$  и  $\eta_{\text{РЕД}}$  — к.п.д. соответственно подшипников и редуктора. Поскольку характеристики вентиляторов составлены для стандартных условий ( $t = 20^\circ\text{C}$ ,  $P = 760$  мм рт. ст.), то напор  $H$  следует пересчитать на стандартные условия:

$$H_{\text{СТ}} = H \cdot \gamma_{\text{СТ}} / \gamma_{\text{Г}}, \quad (2.92.)$$

где  $\gamma_{\text{СТ}} = 1,2$  кгс/м<sup>3</sup> — удельный вес воздуха при стандартных условиях;

$\gamma_{\text{Г}}$  — удельный вес газа при данных условиях в кгс/м<sup>3</sup>.

## 2.2. РАСЧЕТ КОНТАКТНЫХ СУШИЛОК

Наиболее широкое распространение в химической технологии в процессах контактной сушки получили вальцовые сушилки, используемые для сушки ряда химических продуктов.

Так, вальцовые сушилки применяют для сушки уксуснокислого кальция, который высушивается до состояния пасты, и углекислого никеля. Можно сушить на вальцовых сушилках пасты азокрасителей, однако сушилки этого типа дают высокую остаточную влажность материала ( $\omega_2 = 30 \div 40\%$  при сушке красителя прямого черного К), что требует досушки материала в сушилках других типов. Хорошо работают одновальцовые сушилки при подсушке таких паст красителей, как прямой черный З, прямой диазочерный С и др. (до конечной влажности 30 — 40% перед подачей их для окончательной сушки в ленточную сушилку).

Толщина слоя материала в вальцовых сушилках 0,1 — 2,0 мм. Высушивание нанесенного тонким слоем жидкого или пастообразного материала происходит за один оборот вальцов. При паровом обогреве давление пара в вальцах достигает 4 кгс/см<sup>2</sup>. Коэффициент теплопередачи по опытным данным  $K = 125 \div 400$  ккал/(м<sup>2</sup>·ч·°С). Напряжение поверхности вальцов по влаге достигает 70 кг/(м<sup>2</sup>·ч·°С). При работе вальцовых сушилок особое внимание должно быть уделено отводу конденсата и неконденсирующихся газов, так как условия работы цилиндров ухудшаются при попадании воздуха вместе с паром и плохом отводе конденсата.

При контактной сушке механизм переноса тепла довольно сложен. При сушке капиллярно-пористых тел тепло передается главным образом переносом массы поглощенного вещества. Процесс испарения в первом периоде происходит с открытой поверхности в определенном интервале температур вальца. При высоких температурах интенсивность сушки определяется скоростью фазового превращения и зависит от интенсивности внутреннего парообразования. Так как надежные уравнения для определения основных расчетных параметров отсутствуют, то вальцовые сушилки рассчитывают по приближенной методике, основанной на составлении уравнений теплового баланса сушильной установки.

Общее приближенное уравнение теплового баланса вальцовой сушилки имеет вид:

$$Q_{\text{ПАР}} = Q_{\text{ИСП}} + Q_{\text{Н}} + Q_{\text{П}} + Q_{\text{В}} \quad (2.93.)$$

где  $Q_{\text{ПАР}}$  — тепло конденсирующегося пара или горячей воды, подаваемой внутрь вальца;

$Q_{\text{ИСП}} = W_r$  — тепло, затраченное на испарение влаги ( $r$  — скрытая теплота парообразования в ккал/кг);

$Q_{\text{Н}} = G_1 \cdot c_m \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)$  — тепло; затраченное на нагрев материала;

$Q_{\text{П}}$  и  $Q_{\text{В}} = L \cdot I_2$  — потери тепла соответственно в окружающую среду и с уходящим воздухом в ккал/ч.

Тепло, отданное паром в ккал/ч:

$$Q_{\text{П}} = D \cdot (i_{\text{П}} - i_{\text{К}}), \quad (2.94.)$$

где  $D$  — расход пара в кг/ч;

$i_{\text{П}}$ ,  $i_{\text{К}}$  — теплосодержание соответственно греющего пара и конденсата в ккал/кг.

Тогда расход греющего пара в кг/ч:

$$D = (Q_{\text{ИСП}} + Q_{\text{Н}} + Q_{\text{П}} + Q_{\text{В}}) / r. \quad (2.95.)$$

По расходу тепла на сушку  $Q_{\text{ПАР}}$  определяют необходимую площадь в  $\text{м}^2$  поверхности сушильного вальца:

$$F = Q_{\text{ПАР}} / (K \cdot \Delta t \varphi), \quad (2.96.)$$

где  $\varphi = 0,75$  — коэффициент, учитывающий степень активного контакта между поверхностью вальца и материалом;

$K$  — общий коэффициент теплопередачи от конденсирующегося пара к воздуху, рассчитываемый по формуле (2.57.).

Коэффициент теплоотдачи от испаряющейся влаги к воздуху  $\alpha_2$  можно

найти из соотношения для количества тепла в ккал/(м<sup>2</sup>·ч), сообщаемого воздуху испаряющейся влагой,

$$Q = M \cdot r = \alpha_2 \cdot (\vartheta - t_B), \quad (2.97.)$$

где  $M$  — интенсивность испарения воды с влажной поверхности материала в кг/(м<sup>2</sup>·ч);

$\vartheta$  — температура поверхности материала в °С;

$t_B$  — температура воздуха в °С.

Интенсивность испарения в кг/(м<sup>2</sup>·ч) воды [31]:

$$M = 0,04075 \cdot \omega_M^{0,8} \cdot \Delta P; \quad (2.98.)$$

здесь  $\omega_M$  — скорость воздуха над материалом в м/с;

$\Delta P = P_{\text{НАС}} - P_B$  — разность парциальных давлений насыщенного водяного пара над материалом и в протекающем воздухе в мм рт. ст.

Температуру поверхности материала можно проверить по формуле:

$$\vartheta = t_B + \Delta t', \quad (2.99.)$$

где  $t_B$  — средняя температура воздуха;

$\Delta t'$  — разность температур материала и воздуха:

$$\Delta t' = K \cdot \Delta t / \alpha_2. \quad (2.100)$$

После расчета поверхности сушилки вальцы выбирают по каталогам.

### 2.3. РАСЧЕТ РАДИАЦИОННЫХ СУШИЛОК

Метод сушки инфракрасными лучами применяют в химической промышленности для подсушки таблеток, пресспорошков и термопластов.

При сушке полимеров, киноплёнки используют комбинированные методы сушки, например совмещение инфракрасного нагрева с конвективной сушкой, псевдооживления с передачей тепла радиацией (сушка нитрофоски, поликапролактама).

При радиационной сушке тепло передается высушиваемому материалу лучистой энергией. Обычно в сушильной технике используют инфракрасные лучи с длиной волн от 0,4 до 10 мкм. Энергия излучения видимых лучей с длиной волн от 0,4 до 0,76 мкм незначительна.

При сушке инфракрасными лучами интенсивность испарения возрастает в десятки раз. Мощность теплового потока (по сравнению с конвективной сушкой) увеличивается в 30—70 раз.

Недостатком радиационной сушки является возможность сушки только тонких слоев материала.

В качестве источников инфракрасного излучения обычно используют электрические (в виде ламп, панелей, трубок с электрообогревом) или газовые излучатели. Наиболее широко распространены ламповые нагреватели, отличающиеся безинерционностью.

При тепловом расчете радиационных сушилок необходимо определить число ламп и схему их размещения в сушильной камере (для ламповых сушилок) или поверхность термоизлучателя (для сушилок газового типа и с электропанелями). Если сушилка открытого типа, то следует рассчитать систему вентиляции воздуха в помещении. Для сушилок закрытого типа расход воздуха находят по максимально допустимой концентрации паров растворителя в воздухе. Расход электроэнергии рассчитывают по формулам для лучистого теплообмена.

По данным теплового расчета определяют мощность и необходимое число ламп (для ламповой сушилки). Продолжительность сушки рассчитывают по формулам, полученным из уравнения теплового баланса.

При расчете ламповых излучателей плотность облучения или количество тепла, переданного единице поверхности, при расположении ламп по вершинам прямоугольника можно найти по формуле [25, 32]:

$$E = P \cdot U_{\text{э}} \cdot a / l^2 ,$$

а расстояние между лампами

$$l = \sqrt{\frac{P \cdot U_{\text{э}} \cdot a}{E}} ,$$

где  $E$  — плотность облучения в Вт/м<sup>2</sup>;

$l$  — в м;

$P$  — мощность лампы в Вт;

$U_{\text{э}} \approx 0,70 \div 0,85$  — коэффициент эффективности источника излучения;

$a$  — коэффициент многократных отражений.

$$a = \frac{1}{1 - \rho_{\text{к}} \cdot \rho_{\text{п}} \cdot \psi} ;$$

здесь  $\rho_{\text{к}} \approx 0,2$  — коэффициент отражения камерой;

$\rho_{\text{п}} = 0,5$  — коэффициент отражения материалом;

$\psi = 0,7 \div 0,8$  — доля потока, отраженного камерой.

При шахматном расположении ламп:

$$E = P \cdot U_{\text{э}} \cdot a / (0,87 \cdot l^2) ,$$

откуда

$$l = 0,93 \cdot \sqrt{\frac{P \cdot U_3 \cdot a}{E}}$$

По плотности облучения  $E$  определяем количество ламп:

$$n = \frac{F_0 \cdot E}{P \cdot \eta \cdot U_3 \cdot a}$$

где  $F_0$  — площадь облучаемой поверхности изделий;

$\eta = 0,70 \div 0,75$  — энергетический к. п. д. лампы.

При расчете излучателя панельного типа мощность его в Вт можно найти по формуле:

$$P = F_0 \cdot E / \eta_{\text{ТЕМ}},$$

где  $\eta_{\text{ТЕМ}} = 0,8 \div 0,9$  — к. п. д. темного излучателя.

Плотность облучения в Вт/м<sup>2</sup> определяют также по формуле:

$$E = 5,68 \cdot \varepsilon \cdot \left( \frac{T_{\text{ИЗ}}}{100} \right)^4,$$

где  $\varepsilon$  — степень излучателя;

$T_{\text{ИЗ}}$  — температура излучателя в К.

Температуру излучателя рассчитывают из основного уравнения подвода тепла радиацией:

$$Q_{\text{ИЗ}} = 4,96 \cdot \varepsilon_{\text{ПР}} \cdot \varphi \cdot F_0 \cdot \left[ \left( \frac{T_{\text{ИЗ}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{МАТ}}}{100} \right)^4 \right],$$

где  $Q_{\text{ИЗ}}$  — тепло излучения в ккал/ч;

$\varepsilon_{\text{ПР}}$  — приведенная степень черноты системы нагреваемое тело — излучатель;

$T_{\text{МАТ}}$  — абсолютная температура материала в К.

$$\varepsilon_{\text{ПР}} = \frac{1}{\left( \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 2 \right) \cdot \varphi - 1};$$

здесь  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  — степень черноты соответственно материала и излучателя;

$\varphi$  — геометрический параметр, зависящий от формы и взаимного расположения тел и определяемый по таблицам и графикам [15, 23, 25].

При известном коэффициенте теплоотдачи  $\alpha$  и плотности излучения в Вт/см<sup>2</sup> можно найти по формуле:

$$E = \frac{\alpha \cdot F' \cdot (t_{\text{МАТ}} - t_{\text{В}})}{0,86 \cdot A},$$

где  $F' = F/F_0$  - отношение площадей полной поверхности к облучаемой ее части;

$t_{\text{МАТ}}$  — максимальная или установившаяся температура материала в °С;

$t_{\text{В}}$  — температура окружающей среды в сушилке в °С;

$A$  — коэффициент поглощения излучения.

Температуру нагрева тела и продолжительность сушки рассчитывают из уравнения кинетики облучаемого тела, полученного из уравнения теплового баланса сушки [25],

$$\tau = \frac{1}{D'} \cdot \ln \frac{B + D' \cdot (t_{\text{МАТ}} - t_{\text{В}})}{B + D' \cdot (t_0 - t_{\text{В}})},$$

где

$$D' = \frac{\alpha \cdot \sigma}{c \cdot \rho};$$

$$B = \frac{0,86 \cdot A \cdot E \cdot \sigma}{c \cdot \rho \cdot F}.$$

В этих выражениях:  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи в ккал/(м<sup>2</sup>·°С);

$\sigma = F/V$  — отношение площади поверхности облучаемого тела к его объему;

$c$  — теплоемкость облучаемого тела в ккал/(кг·°С);

$\rho$  — плотность облучаемого тела в кг/м<sup>3</sup>;

$t_0$  — начальная температура материала в °С.

## 2.4. АЛГОРИТМ КОНСТРУКТИВНОГО РАСЧЕТА БАРАБАННОЙ СУШИЛКИ

Из уравнения материального баланса сушилки определим расход влаги  $W$ , удаляемой из высушиваемого материала:

$$W = G_k (\omega_n - \omega_k) / (100 - \omega_n)$$

Основные размеры барабана выбирают по нормативам и каталогам-справочникам в соответствии с объемом сушильного пространства. При отсутствии расчетных зависимостей определения коэффициентов массо- и теплопередачи объем сушильного барабана может быть ориентировочно определен с помощью объемного напряжения по влаге  $A_v$ . При использовании величины  $A_v$  объем сушильного барабана рассчитывают по уравнению:

$$V = 3600 W / A_v$$

Значение  $A_v$  для некоторых материалов, полученные из опытов, приведены в таблице 2.4.1.

Опытные данные по сушке некоторых материалов в барабанных сушилках.

Таблица 2.4.1.

Материал	$\omega_n, \%$	$\omega_k, \%$	$t_1, \text{C}$	$t_2, \text{C}$	$A_v, \text{кг/м}^3\text{ч}$	Тип внутренних устройств
Жом свекловичный	84	12	750	100-125	185	Распределительная
Зерно (пшеница)	20	14	200	50-80	20-30	Распределительная
Мезга кукурузная	68	12	300	100	40-50	Распределительная
Сахарный песок	3,0	0,15	100	40	8-9	Подъемно-
Соль	4-6	0,2	200	-	7	лопастная

Далее по справочным данным находим основные характеристики барабанной сушилки – длину и диаметр.

В таблице 2.4.2 приведены основные характеристики барабанных сушилок, выпускаемых заводами «Уралхиммаш» и «Прогресс».

Основные характеристики барабанных сушилок заводов «Уралхиммаш» и «Прогресс».

Таблица 2.4.2.

Показатели	Заводской номер					
	7450	7119	6843	6720	7207	7208
Внутренний диаметр барабана, м	1,5	1,8	2,2	2,2	2,8	2,8
Длина барабана, м	8	12	12	14	12	14
Толщина стенок, мм	10	12	14	14	14	14
Объем сушильного пространства, м <sup>3</sup>	14,1	30,5	45,6	53,2	74,0	86,2
Число ячеек, шт.	25	28	28	28	51	51
Частота вращения барабана, об/мин.	5	5	5	5	5	5
Общая масса, т.	13,6	24,7	42	45,7	65	70
Потребляемая мощность двигателя, кВт.	5,9	10,3	12,5	14,7	20,6	25,8

Рабочая скорость сушильного агента в барабане зависит от дисперсности и плотности высушиваемого материала. Для выбора рабочих скоростей ( $w, м/с$ ) при сушке монодисперсных материалов можно руководствоваться данными, приведенными в таблице 2.4.3.

## Выбор рабочей скорости газов в сушильном барабане

Таблица 2.4.3.

Размер частиц, мм	Значение $w$ , м/с, при $\rho_m$ , кг/м <sup>3</sup>				
	350	1000	1400	1800	2200
0,3-0,2	0,5-1	2-5	3-7,5	4-8	5-10
Более 2	1-3	3-5	4-8	6-10	7-12

Определим среднее время пребывания и материала в сушилки:

$$\tau = G_m / (G_k + W/2)$$

Количество находящегося в сушилки материала (в кг) равно:

$$G_m = V\beta\rho_m$$

Зная время пребывания, рассчитаем угол наклона барабана:

$$\alpha = \left[ 30l / (dn\tau) + 0,007w_D \right] (180 / \pi)$$

Если полученное значение  $\alpha$  мало (меньше 0,5), число оборотов барабана уменьшают и расчет повторяют сначала.

Далее необходимо проверить допустимую скорость газов, исходя из условия, что частицы высушиваемого материала наименьшего диаметра не должны уноситься потоком сушильного агента из барабана. Скорость уноса, равную скорости свободного витания  $w_{с.в.}$ , определяют по уравнению:

$$w_{с.в.} = \frac{\mu_{cp}}{d\rho_{cp}} \left( \frac{Ar}{18 + 0,575\sqrt{Ar}} \right)$$

где  $\mu_{cp}$  и  $\rho_{cp}$  - вязкость и плотность сушильного агента при средней температуре;  $d$  - наименьший диаметр частиц материала, м;  
 $Ar \approx d^3 \rho_c \rho_{cp} g / \mu_{cp}$  - критерий Архимеда;  $\rho_c$  - плотность частиц высушиваемого материала.

Рабочая скорость сушильного агента в сушилке должна быть меньше, чем скорость уноса частиц. При этом условии расчет основных размеров сушильного барабана заканчивается. В противном случае уменьшают принятую в расчете скорость сушильного агента и повторяют расчет.

Кроме основных размеров сушильного барабана расчету подлежат основные узлы и детали сушильного агрегата.

## 2.5. АЛГОРИТМ КОНСТРУКТИВНОГО РАСЧЕТА ТОННЕЛЬНОЙ СУШИЛКИ

При конструктивном расчете тоннельной сушилки определяются ее габаритные размеры.

Задано: производительность сушилки  $G$ , количество тоннелей  $N$  (кратное 2), продолжительность сушки  $\tau$ , ч.

Вместимость одного тоннеля:

$$G_M^T = G / (N \cdot 24 / \tau) = G\tau / (N \cdot 24)$$

Определение числа вагонеток:

$$n = G_T^M / q_{ваг}^M = G\tau / (N \cdot 24 q_{ваг}^M)$$

$q_{ваг}^M$  - вместимость вагонетки, кг; произведение числа полок числа кассет на полке и вместимости кассеты.

Длина тоннеля:

$$L_T = n L_{ваг} + L_0$$

$L_{ваг}$  - длина вагонетки, мм

$$L_0 = 0,5L_{ваг}$$

Тоннель должен иметь такую ширину и высоту, чтобы пространство для свободного прохода воздуха было минимальным.

Ширина тоннеля:

$$B_T = B_{ваг} + (40 \div 70) мм$$

$B_{ваг}$  - ширина вагонетки, мм

Высота тоннеля определяется высотой вагонетки и конструкции перекрытия сушильной камеры.

По данному алгоритму расчета тоннельной сушилки составлена блок-схема и программа расчета.

## 2.6. АЛГОРИТМ КОНСТРУКТИВНОГО РАСЧЕТА ШАХТНОЙ ЗЕРНОСУШИЛКИ

В ходе расчета определяются конструктивные размеры шахты зерносушилки при заданной скорости газа (сушильного агента), расходах сушильного агента и холодного воздуха для охлаждения, геометрических размерах коробов пятигранной формы (a,b,d).

Площадь отводящих коробов для зон сушки  $F_c$  при общем расходе агента сушки  $V_{c.a}$ :

$$F_c = \frac{V_{c.a}}{3600V_{\Gamma}}$$

Для зоны охлаждения  $F_{охл}$  при расходе холодного воздуха  $V_{x.в.}$ :

$$F_{охл} = \frac{V_{x.в.}}{3600V_{\Gamma}}$$

Площадь сечения короба:

$$f = ab + 0,5 ad$$

Предварительное число отводящих коробов:

$$n'_{np} = \frac{F}{f}$$

Задаемся числом коробов в ряду  $k$ . Определяем предварительное число рядов отводящих коробов:

$$N'_{np} = \frac{n'_{np}}{k}$$

Принимаем фактическое число рядов  $N'$  округлением до целого значения.

Фактическое число отводящих коробов:

$$n' = N' \cdot k$$

Фактическая скорость сушильного агента:

$$V_{\Phi} = \frac{V_{\text{общ.}}}{3600znf}$$

Фактическая скорость сушильного агента не должна превышать 6 м/с.

Зная шаг коробов  $t_{\Gamma}$  по горизонтали и число их в ряду определяем ширину шахты:

$$B = t_{\Gamma} \cdot k$$

Принимаем длину короба  $l_k$  определяем размер шахты в глубину.

Находим высоту шахт сушильных и охлаждающих зон:

$$H' = \frac{t_{\epsilon} (N'_0 + N'_{II})}{z}$$

где  $t_{\epsilon}$  – шаг коробов по вертикали, мм

$z$  – число шахт.

$$H'' = t_B (n_{\text{охл}} + n_{\text{охл}})$$

Общая высота шахты:

$$H_{\text{общ}} = H' + H'' + 1000$$

Во избежание подсоса воздуха между охлаждающей (работающей на всасывание) и сушильной (нагнетающей) зонами шахт располагают зерновую подушку 1000 мм.

## 2.7. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШИЛКИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО РАСПЫЛЕНИЯ

### 2.7.1. КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ

Расчет заключается в определении конструктивных размеров сушильной камеры – ее диаметра и высоты. Расчет ведется в следующей последовательности:

1) определение среднего и максимального диаметра капель по формуле Фрассера

$$\delta_{cp(3.2)} = 0,55 \left( G_{vж} / D_{д} \right)^{0,2} \left( 1/n \right)^{0,6} \left( 1/\rho_{ж} \right)^{0,3} \left( \delta_{ж} / \Pi \right)^{0,1}$$

$$\delta_{макс.} = (2,5 \div 3) \delta_{cp(3.2)}$$

$G$  – расход жидкости

$D_{д}$  – диаметр диска, м

$n$  – частота вращения диска, об/сек.

$\nu_{ж}$  – кинематическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с

$\rho_{ж}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>

$\Pi$  – смоченный периметр диска, м

$\delta_{ж}$  – поверхностное натяжение жидкости

$$\delta_{ж} \approx (75,4 \div 102) \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$$

2) определение радиуса факела распыления и радиуса сушильной камеры по формуле Борде

$$R_{\phi} / \delta_{макс.} = 1,995 \cdot 10^3 \text{ Re}^{1,13} \left[ r \eta_{Г} / (\lambda_{Г} (t_{Г} - t_{н})) \right]^{0,4}$$

$$Re = \frac{V_{\Gamma} \delta_{\text{макс.}}}{\nu}$$

$\nu$  - кинематическая вязкость газа, м<sup>2</sup>/с

$\eta_{\Gamma}$  - динамическая вязкость газа

$\lambda_{\Gamma}$  - коэффициент теплопроводности газа

$r$  – удельная теплота парообразования

$t_{\Gamma}-t_{\text{н}}$  – начальная разность температур газа и частицы (капли)

3) расчет рабочего объема сушильной камеры по величине напряжений по испаренной влаге  $Av$

$$V_k = 3600 W / Av$$

Расход влаги  $W$  определяется из уравнения материального баланса

$$W = G(\omega_{\text{н}} - \omega_{\text{к}}) / (100 - \omega_{\text{н}})$$

напряжение по испаренной влаге  $Av$  ориентировочно рассчитывается по эмпирическим формулам в зависимости от максимального размера частиц, температуры входящего воздуха и диаметра камеры:

$$\text{при } D_{\text{к}} = 2 \div 5 \text{ м; } t_1 = 150 \div 200^{\circ}\text{C}; \delta_{\text{макс.}} = (50 \div 400) \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$Av \approx (1,8 \div 2,2) \cdot 10^{-4} \delta_{\text{макс.}}^{-0,33}, \text{ кг}/(\text{м}^3 \text{ с})$$

$$\text{при } D_{\text{к}} = 1 \div 9 \text{ м; } t_1 = 120 \div 220^{\circ}\text{C}; \delta_{\text{макс.}} = (50 \div 500) \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$Av \approx (2,5 \div 3) \cdot 10^{-3} [t_1 D_{\text{к}} / (\delta_{\text{макс.}} \cdot 10^6)]^{0,2}$$

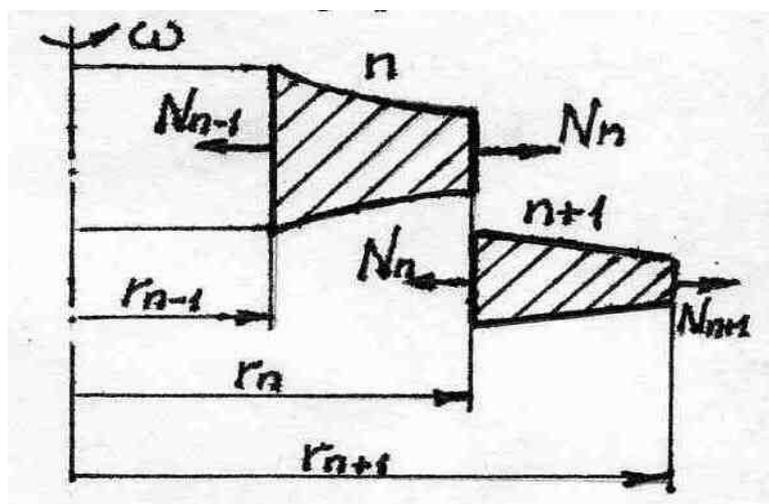
4) расчет рабочей высоты сушильной камеры

$$H_k = 4V_k / \pi D_k^2$$

Обычно для камер с форсуночным распылением  $H_k / D_k = 1,5 \div 2,5$  м. Чем меньше начальная влажность раствора и чем больше производительность установки, тем меньше отношение  $H_k / D_k$ . При необходимости получения продукта в виде гранул (грубый распыл)  $H_k / D_k \geq 5$ . По нормам НИИХИММАШа рекомендуется отношение  $H_k / D_k \approx 2,5$ . Для камер с дисковым распылением  $H_k / D_k = 0,8 \div 1,0$  м. Диск обычно расположен на расстоянии  $1,0 \div 1,5$  м от верхнего перекрытия камеры.

### 2.7.2. РАСЧЕТ ДИСКА РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКИ

Расчет диска даже постоянного сечения представляет собой сложную задачу. Однако на практике встречаются диски сложного профиля, например диски распылительных сушилок, колеса центробежных насосов и т.д.



Для расчета быстровращающихся дисков сложных профилей возможно применять метод трех усилий.

Рассмотрим два произвольных смежных участка  $n$  и  $n+1$  (рис.10). на единицу длины окружности приходится радиальные усилия:  $N_{n-1}$ , приложенное к внутреннему контуру  $n$ -го участка;  $N_n$ , приложения к наружному контуру  $n$ -го участка и внутреннему контуру  $(n+1)$ -го участка.

Хотя резкое изменение толщины диска на границах  $n$  и  $(n+1)$ -го участков приводит к скачку радиальных и окружных напряжений, усилие  $N$  и радиальное перемещение здесь не изменяются. Основываясь на равенство радиальных перемещений в смежном сечении  $n$  и  $(n+1)$  участков, напишем условия совместной работы этих участков.

$$\delta_{n,n-1} N_{n-1} + \delta_{nn} N_n + \Delta_n = \delta'_{nn} N_n + \delta'_{n,n+1} N_{n+1} + \Delta'_n,$$

где  $\delta_{n,n-1}$  и  $\delta_{nn}$  - радиальные перемещения наружного края  $n$ -го участка под действием единичных радиальных усилий, приложенных к внутреннему и наружному краям  $n$ -го участка;  $\delta'_{nn}$  и  $\delta'_{n,n+1}$  - радиальные перемещения внутреннего края  $(n+1)$ -го участка под действием единичных радиальных усилий, приложенных к внутреннему и наружным краям  $(n+1)$ -го участка;  $\Delta_n$  и  $\Delta'_n$  - радиальные перемещения наружного края  $n$ -го участка и внутреннего края  $(n+1)$ -го участков, вызванные действием центробежных сил инерции на материал диска.

Единичные перемещения  $\delta_n$  определяют следующим образом. Рассмотрим случай, когда к внутреннему контуру кольцевого диска приложена сила  $H=1$ . Для определения перемещения наружного края воспользуемся уравнениями.

$$\delta_r = \delta_{r \cdot 0 \cdot \psi \cdot r \cdot r} + \delta_{t \cdot 0 \cdot \psi \cdot r \cdot t} + \frac{H}{S} \cdot \psi_{r \cdot m}$$

$$\delta_t = \delta_{r \cdot 0 \cdot \psi \cdot t \cdot r} + \delta_{t \cdot 0 \cdot \psi \cdot t \cdot t} + \frac{H}{S} \cdot \psi_{t \cdot m}$$

$$\frac{Eu}{1 - \mu^2} = \delta_{r \cdot 0} r_{\psi \cdot \Phi \cdot r} + \delta_{t \cdot 0} r_{\Phi \cdot \psi \cdot t} + \frac{H_i}{S} \psi_{\Phi \cdot m}$$

Из уравнения найдем  $\delta_{t0}$ , используя условие  $(\delta_r)_{r=R} = 0$ ,

$$0 = -\frac{1}{S} \psi_{rr}(r_0 / R) + \delta_{t0} \psi_{rt}(r_0 / R),$$

откуда

$$\delta_{t0} = \frac{1}{S} \frac{\psi_{rr}(r_0 / R)}{\psi_{rt}(r_0 / R)}$$

Учетом последнего равенства из уравнения получаем

$$\frac{E\delta_{11}}{1 - \mu^2} = -\frac{1}{S} r_{\psi\Phi r} \left( \frac{r_0}{R} \right) + \frac{1}{S} \frac{\psi_{rr}(r_0 / R)}{\psi_{rt}(r_0 / R)} r_{\psi\Phi r} \left( \frac{r_0}{R} \right)$$

$$\delta_{11} = \frac{r(1 - \mu^2)}{ES} \left[ \frac{\psi_{rr}(r_0 / R)}{\psi_{rt}(r_0 / R)} \psi_{\Phi t}(r_0 / R) - \psi_{\Phi t}(r_0 / R) \right]$$

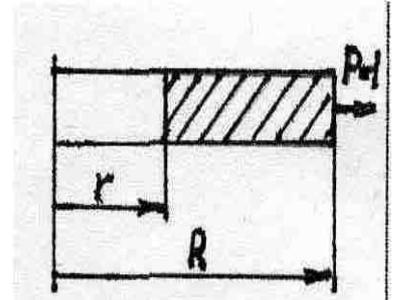
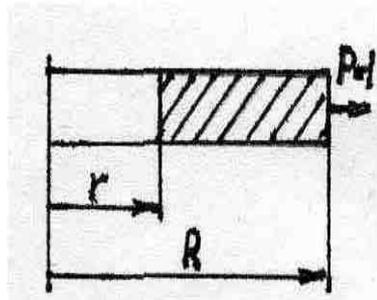
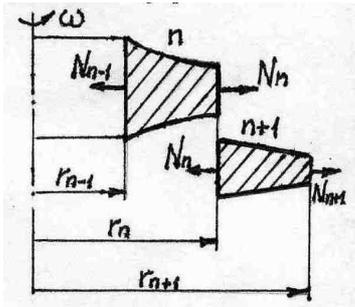
Аналогично находим перемещение наружного края сплошных дисков, заделанных по внутреннему контуру.

Радиальное перемещение края диска под действием центробежных сил инерции определяем по формулам (3.4.16) и (3.4.17).

$$\Delta R = \frac{\rho \omega^2 R^3}{4E} \left[ (1 - \mu) + \frac{r_0}{R} (3 + \mu) \right]$$

$$\Delta R = (1 - \mu) \rho \omega^2 R^2 / 4E$$

Формулы перемещений, входящих в эти формулы приведены ниже.



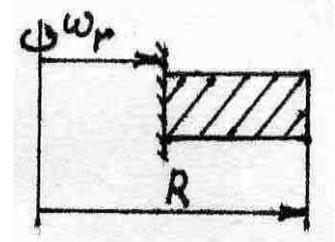
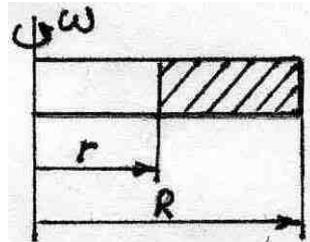
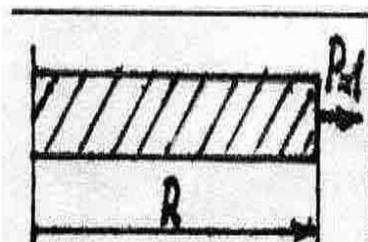
$$\delta_H = \frac{r}{ES} A_a$$

$$\delta_k = \frac{R}{ES} B_a$$

$$\delta_H = \frac{R}{ES} (1 - \mu)$$

$$\delta_H = \frac{r}{ES} A_b$$

$$\delta_k = \frac{R}{ES} B_b$$

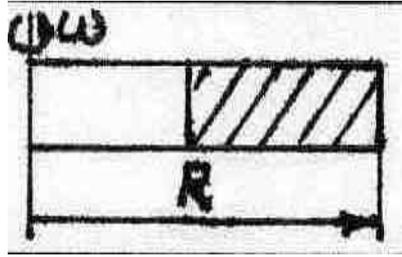


$$\delta_k = \frac{R}{ES} B'_b$$

$$\Delta_H = \frac{kr^3}{E} A_w$$

$$\Delta_k = \frac{kR^3}{E} B_w$$

$$\Delta_k = \frac{kR^3}{E} \frac{1 - \mu}{4}$$



$$\Delta_k = \frac{kR^3}{E} B_w$$

Примечание.  $\delta_n$  и  $\delta_k$  - перемещения от единичных радиальных усилий в начале и в конце участков, м;  $\Delta_n$  и  $\Delta_k$  - перемещение от центробежных сил инерции в начале и в конце участков, м;  $E$  - модуль продольной упругости, МПа;  $s$  - толщина диска, м;  $\mu$  - коэффициент Пуассона;  $A$  и  $B$  - коэффициенты соответственно для начала и конца участка;  $a$  и  $b$  - индексы, указывающие место приложения единичного усилия;  $\omega$  - индекс, отражающий инерционное воздействие,  $k = \rho \omega^2$  (здесь  $\omega$  - угловая скорость, м/с;  $\rho$  - плотность материала диска, кг/м<sup>3</sup>).

Используя формулы приведенные выше и преобразовывая уравнение трех усилий, окончательно получим:

$$N_{n-1} B_a + N_n \left( B_b - \frac{s_n}{s_{n+1}} A_a \right) - N_{n+1} \frac{s_n}{s_{n+1}} A_b = \rho \omega^2 s_n r_n^2 (A_w - B_w)$$

или

$$N_{n-1} (B_a)_{rn-1} + N_n \left[ (B_b)_{rn-1, rn} - \frac{s_n}{s_{n+1}} (A_a)_{rn, rn+1} \right] -$$

$$- N_{n+1} \frac{s_n}{s_{n+1}} (A_b)_{rn, rn+1} = \rho \omega^2 s_n r_n^2 \left[ (A_w)_{rn, rn+1} - (B_w)_{rn-1, rn} \right]$$

Приведем полученные после преобразований формулы для коэффициентов:

$$A_a(\lambda) = -\mu - \frac{1 + \lambda^2}{1 - \lambda^2}$$

$$B_a(\lambda) = -2\lambda^2 / (1 - \lambda^2)$$

$$A_b(\lambda) = 2 / (1 - \lambda^2)$$

$$B_b(\lambda) = \frac{1 - \mu + (1 + \mu)\lambda^2}{1 - \lambda^2}$$

$$A_w(\lambda) = \frac{1}{4} \left( 1 - \mu + \frac{3 + \mu}{\lambda^2} \right)$$

$$B_w(\lambda) = \frac{1}{4} [1 - \mu + (3 + \mu)\lambda^2]$$

Каждое уравнение включает три неизвестных величины. Известные усилия на внутреннем и наружном контурах диска входят в первое и последнее уравнения, число которых меньше числа участков на единицу.

Если найдены радиальные усилия, то можно определить радиальные и окружные напряжения. Первым этапом расчета этих напряжений являются определение напряжений при усредненных толщинах участков по следующим зависимостям:

$$\delta_{rHi} = N_i / s_i$$

$$\delta_{rbi} = N_{i-1} / s_i$$

$$\delta_{tbi} = \left[ \delta_{rHi} - \delta_{rbi\psi rr} \left( \frac{r_i - 1}{r_i} \right) - \rho \omega^2 r_{i\psi rw}^2 \left( \frac{r_i - 1}{r_i} \right) \right] / \psi rt \left( \frac{r_i - 1}{r_i} \right)$$

$$\delta_{tHi} = \delta_{rbi\psi tr} \left( \frac{r_i - 1}{r_i} \right) + \delta_{tbi\psi tt} \left( \frac{r_i - 1}{r_i} \right) + \rho \omega^2 r_i^2 \psi tw \left( \frac{r_i - 1}{r_i} \right)$$

где  $\delta_{rHi}$  и  $\delta_{rbi}$  - радиальное напряжение на наружном и внутреннем контурах;  $\delta_{tbi}$  и  $\delta_{tHi}$  - окружное напряжение на внутреннем и наружном контурах;  $\psi_{ij}$  - сопровождающие функции.

$$\psi_{rr} = \frac{1}{2}(1 + \lambda^2)$$

$$\psi_{rt} = \frac{1}{2}(1 - \lambda^2)$$

$$\psi_{tr} = \frac{1}{2}(1 - \lambda^2)$$

$$\psi_{tt} = \frac{1}{2}(1 + \lambda^2)$$

$$\psi_{\frac{rw}{tw}} = \left[ 2(1 + \mu)(1 - \lambda^2) \pm (1 - \mu)(1 - \lambda^4) \right] \frac{1}{8}$$

Вторым этапом расчета является «сглаживание» напряжений в сечениях, в которых в реальных конструкциях нет резких изменений толщин.

В результате деления радиальных усилий на текущую толщину диска в сечениях вновь определяем радиальные напряжения.

Для выравнивания окружных напряжений целесообразно воспользоваться формулой линейной интерполяции:

$$\delta'_{tHi} = \delta'_{tbi} = \delta_{tHi} + (s_{Hi} - s_i) \frac{\delta_{tbi+1} - \delta_{tHi}}{s_{i+1} - s_i}$$

### 3. ПРОМЫШЛЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СУШКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Сушка — это сложный технологический тепло- и массообменный процесс, который во многих случаях должен не только обеспечить сохранение ряда свойств продукта, но и улучшить эти свойства. Сушка применяется также в тех случаях, когда необходимо обеспечить длительную сохранность продукта, т.е. законсервировать его. В пищевой промышленности чаще всего применяют конвективный способ сушки, при котором воздух, имеющий более высокую температуру, соприкасается с продуктом, отдает часть теплоты и воспринимает влагу из продукта.

#### 3.1. Ленточные сушилки.

Используются они для сушки растительного сырья.

Паровая 5-ленточная сушилка СПК (рис. 3. 1) используется для сушки овощей и плодов, короткорезанных макаронных изделий и других пищевых продуктов. Она представляет собой камеру, закрытую металлическими щитами и дверьми.

Опорной частью сушилки является станина 2, внутри которой расположено пять пар барабанов 12. Каждая пара барабанов несет на себе бесконечную сетчатую проволочную ленту 10 из нержавеющей стали. Один из барабанов в каждой паре является ведущим, в другой - натяжным.

Привод 1 состоит из приводной колонки, включающей электродвигатель, вариатор, червячный редуктор. От редуктора вращение на звездочки ведущих барабанов передается цепной передачей. Диаметры звездочек ведущих барабанов различны следовательно, различны скорости движения лент и время на хождения продукта в отдельной зоне температур.

Наклонный конвейер 4, установленный под углом 40°, служит для подачи продукта в сушилку. Конвейер состоит из каркаса, верхнего (приводного) и нижнего (натяжного) барабанов. На барабанах устанавливается бесконечная сетчатая проволочная лента из нержавеющей стали. На ленте конвейера закреплены специальные планки, удерживающие продукт от сползания.

Калориферы 11 с ребристой поверхностью служат для нагрева воздуха, уносящего влагу продукта. Секции паровых калориферов расположены в пространстве между ветвями каждой конвейерной ленты. В калориферы через коллектор 14 подается пар давлением 0,3—0,8 МПа. Давление поступающего пара контролируется манометром 13, температура среды над каждой лентой — ртутными термометрами 7, влажность среды сушилки — психрометром 6, который устанавливается над верхней конвейерной лентой.

Конденсат выводится через коллектор 8 и конденсатоотводчик 15. Вытяжное устройство 5 служит для удаления влажного воздуха из сушилки. Интенсивность вытяжки воздуха можно регулировать специальным клапаном через рычаги 9. Вытяжное устройство 5 состоит из вытяжной камеры и вентилятора. Забор воздуха в сушилку осуществляется из помещения через подвижные шторы в нижней части сушилки.

Ленточная конвейерная сушилка СКО-90 с огневыми калориферами на жидком топливе предназначена для сушки овощей, фруктов и другого растительного сырья, допускающего пересыпание высушиваемого продукта с одной конвейерной ленты на другую. Такие сушилки работают на предприятиях, не имеющих промышленного пара. Производительность по испаренной влаге в них составляет 630 кг/ч. по высушенному продукту для яблок кружками и груш четвертушками — 75, для слив — 80, для вишен — 120 кг/ч.

Сушилка (рис. 3. 2, а) состоит из корпуса 4, представляющего собой закрытую теплоизолированную сушильную камеру 7, внутри которой расположено один над другим пять бесконечных ленточных конвейеров. Со всех сторон корпуса имеются теплоизолированные двери, обеспечивающие доступ к лентам во время осмотра, чистки и ремонта. Две двери на лицевой стороне корпуса (сушильной камеры) имеют по четыре открывающихся застекленных люка, а две другие двери—по четыре лампы для подсвечивания. Через люки наблюдают за состоянием продукта во время работы и отбирают пробы. Каждый ленточный конвейер смещен относительно другого по длине сушильной камеры для пересыпания продукта с одной ленты на другую.

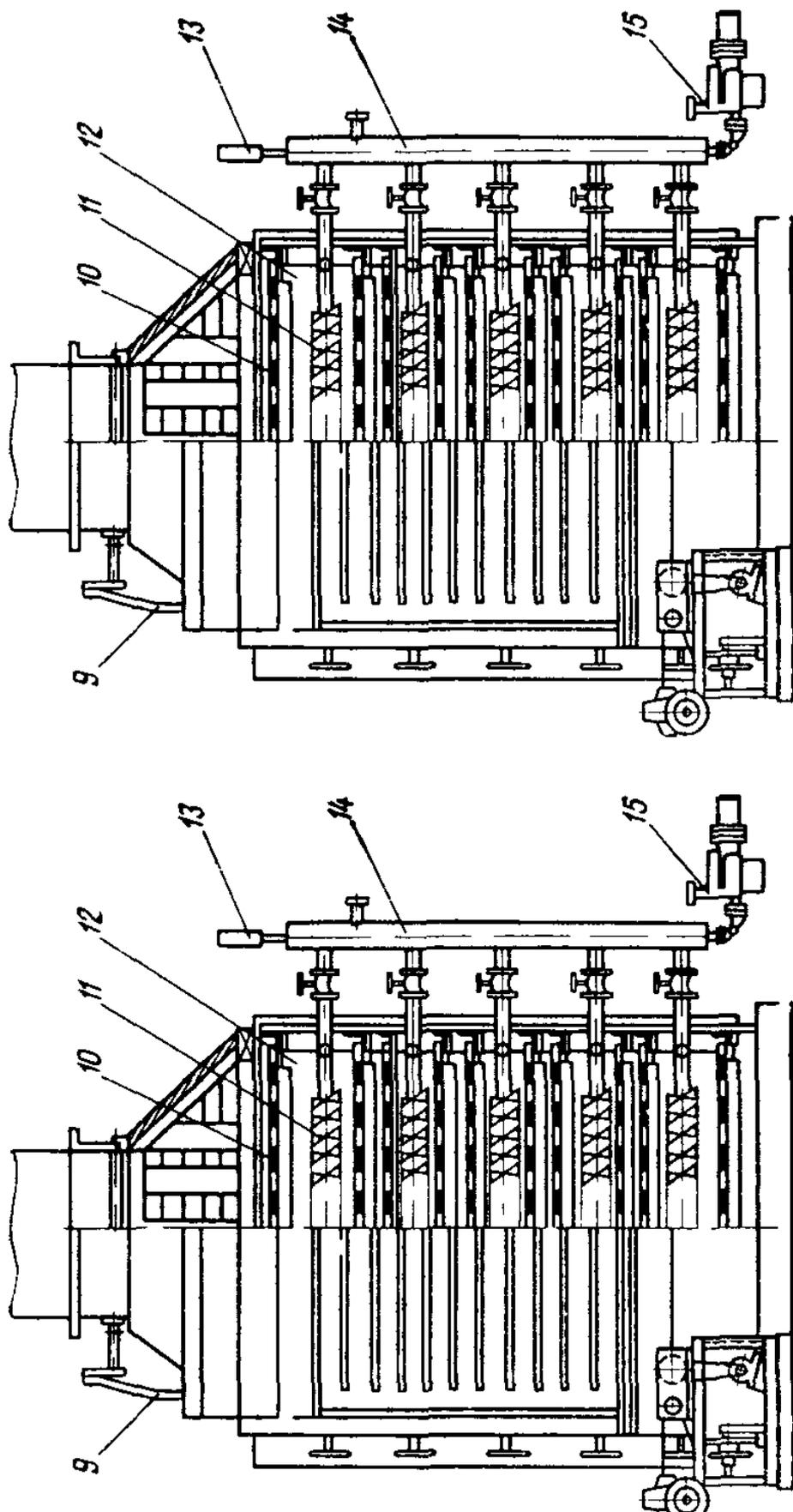


Рис. 3. 1. Паровая 5-ленточная сушка СПК

Для загрузки продукта в сушильную камеру и равномерного распределения его по ширине ленты предусмотрен загрузочный конвейер 3, который приводится в движение от автономной приводной станции 2.

Над верхними ветвями трех ленточных конвейеров установлены ворошители. Для очистки лент от налипшего продукта под нижними ветвями двух верхних ленточных конвейеров установлены щетки. Для очистки поверхностей барабанов от налипшего продукта у барабанов приводных 1, 3 и 5-го конвейеров и барабанов натяжных 2-го и 4-го ленточных конвейеров установлены скребки, прижимаемые пружинами. Две приводные станции 1, которые приводят в движение ленточные конвейеры, ворошители и щетки, расположены в начале сушилки.

Приводные станции состоят из электродвигателя, вариатора скорости, двух редукторов и промежуточного вала, собранных на одной раме. Вариатор скорости обеспечивает бесступенчатую регулировку скорости движения конвейерных лент.

Теплогенераторы 9 предназначены для нагревания сушильного агента (воздуха) без непосредственного контакта его с продуктами сгорания топлива (нагревание осуществляется через стенку теплообменника). Теплогенераторы соединены между собой последовательно (попарно в каждом контуре теплоносителя).

Система циркуляции сушильного агента представляет собой два замкнутых контура, в каждый из которых входят центробежные вентиляторы 8, цилиндрические воздуховоды 10, коллекторы 5, коробка б, сушилка 7 и Теплогенераторы 9. Для выброса части отработавшего сушильного агента и подсоса свежего воздуха в системе воздуховодов установлены ручной и автоматический клапаны.

Продукт, подлежащий сушке, подается в бункер загрузочного конвейера, из которого равномерно распределяется по ширине его ленты и поступает на первую ленту в сушильную камеру. С первой ленты подсушенный продукт пересыпается на вторую, со второй — на третью и т. д. до выхода высушенного продукта из сушилки. Движущийся на ленточных конвейерах продукт перемешивается ворошителями. Во время сушки подогретый воздух проходит через продукт сверху вниз.

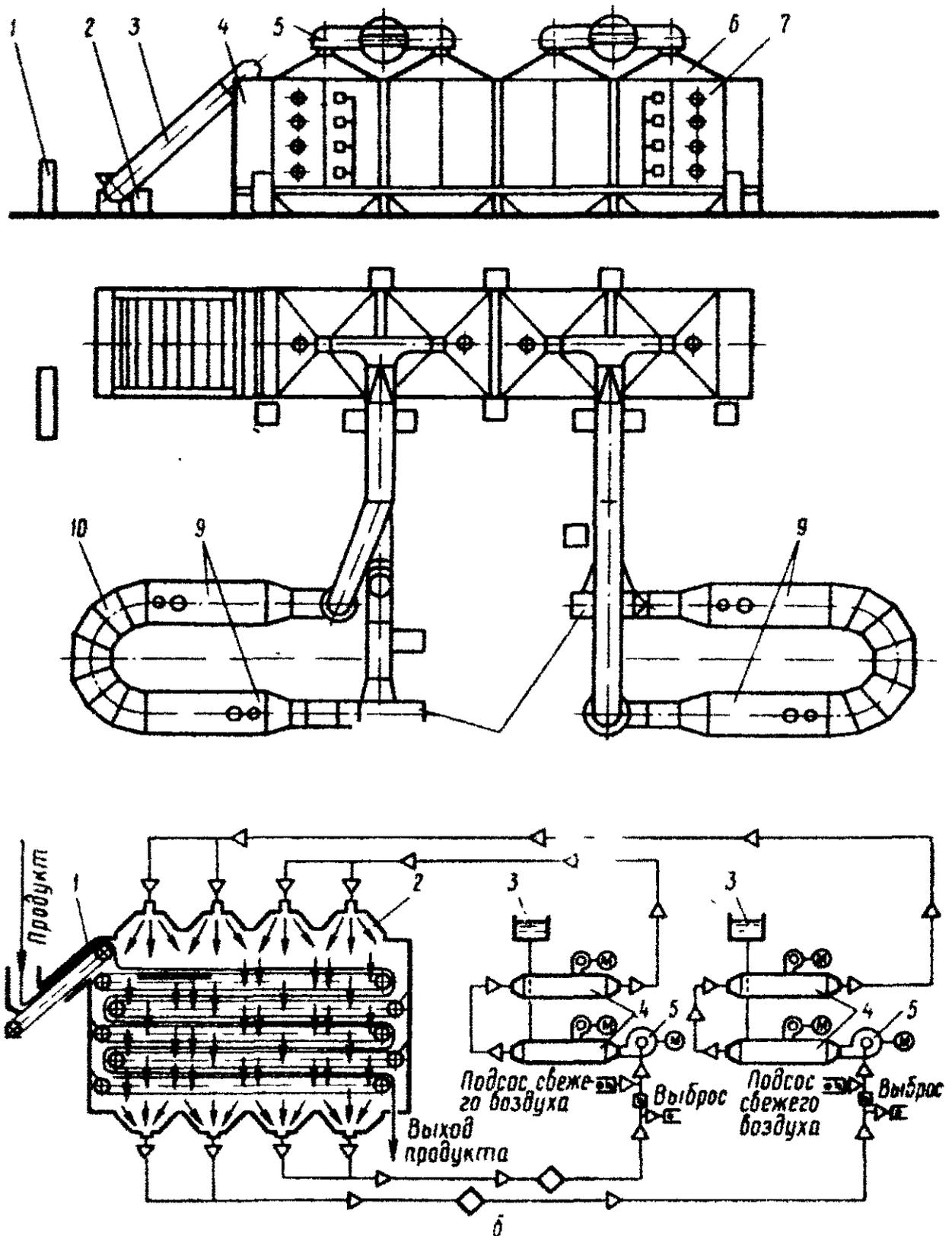


Рис.3. 2.

Ленточная конвейерная сушилка СКО-90

а — общий вид;

б — схема циркуляции сушильного агента

Схема циркуляции сушильного агента в сушилке СКО-90 приведена на рис. 3.2,б. Воздух центробежными вентиляторами 5 направляется в теплогенераторы 4, где нагревается до требуемой температуры, и поступает в верхнюю зону сушильной камеры 2. При прохождении сверху вниз через продукт, находящийся на ленточных конвейерах 1, температура сушильного агента ступенчато снижается. Часть сушильного агента возвращается на рециркуляцию, часть выбрасывается в атмосферу. Одновременно из атмосферы подсасывается воздух в количестве, равном выбрасываемому.

Поддержание заданной температуры сушильного агента на входе в сушильную камеру обеспечивается количеством топлива, подаваемого на сгорание из топливного бака 3, а также подачей различного количества воздуха из атмосферы в рециркуляционный контур. Контроль за влажностью сушильного агента осуществляется психрометрами, установленными на входе и выходе сушильной камеры. Система КИПиА обеспечивает измерение, контроль и автоматическое регулирование основных параметров сушильного процесса. Зажигание и контроль наличия факела также регулируются автоматически.

### **3.2. Шахтные сушилки.**

Они имеют несколько зон для подогрева, сушки и охлаждения высушиваемого продукта, разделенных перегородками.

*Шахтная конвективная сушилка ВИС-42Д* применяется для сушки сыпучих продуктов—зерна, крупы, семян томатов и др. Это шахтная непрерывно-действующая сушильная установка, конвективная, атмосферная, с принудительной циркуляцией воздуха и поворотным подом.

Сушильная камера (рис. 3.3) имеет две зоны: нижнюю и верхнюю, разделенные перегородкой 3; горячий воздух подается двумя вентиляторами 6 и 7 через два отдельно поставленных калорифера 5. Нагретый воздух поступает одновременно в пространство между верхними полками. Поворачиваясь в воздушных каналах на 180°, теплоноситель проходит под полками средней части сушильной камеры и через батарею циклонов 9 отсасывается вентилятором 10, а пыль оседает в бункерах 8

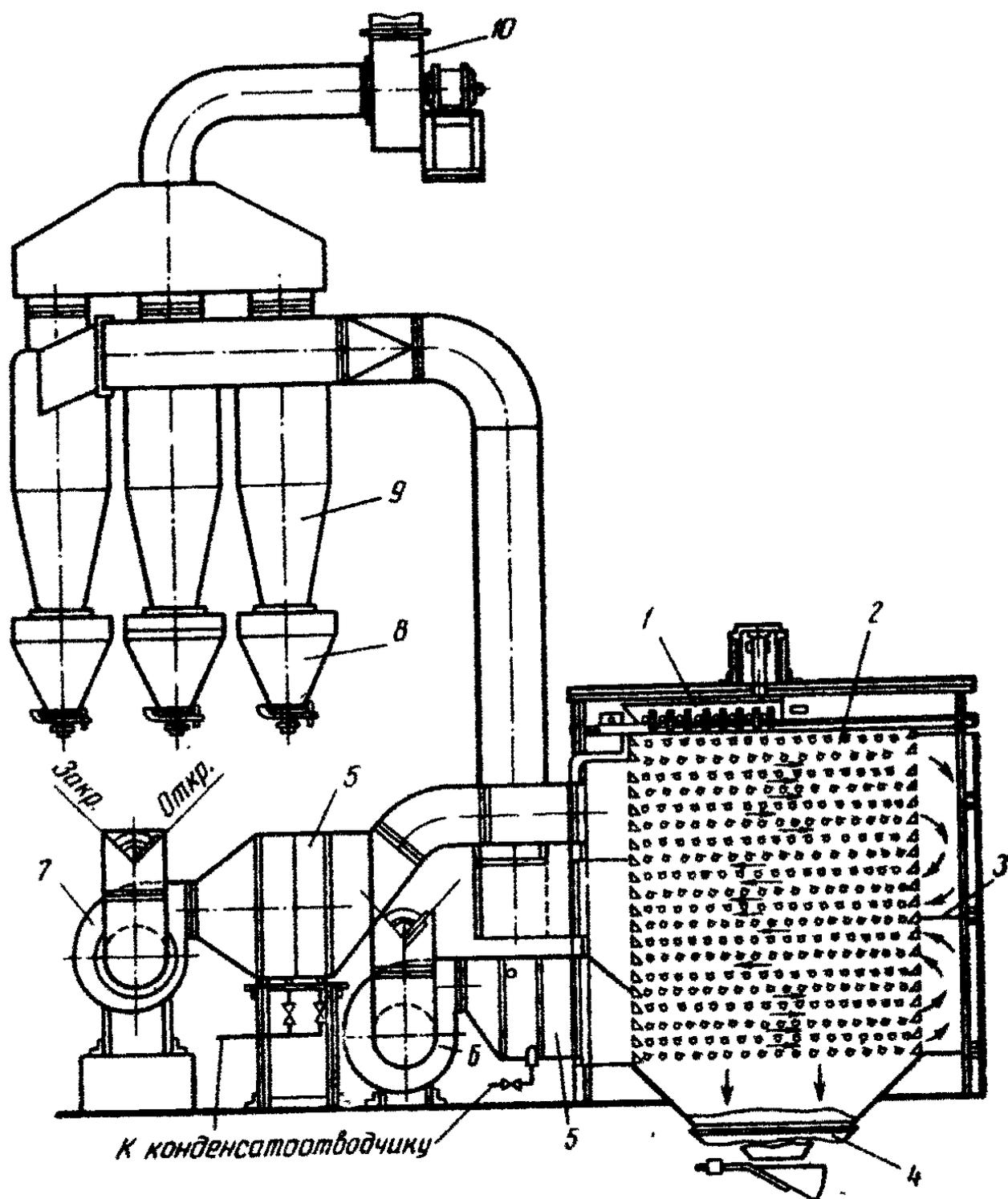


Рис. 3.3.

*Шахтная сушилка ВИС-42Д 1-1*

Камера сушилки представляет собой каркас из углового железа, обшитый листовым железом и покрытый снаружи теплоизоляционным слоем. В камере имеется 20 полок 2, которые расположены горизонтально на

равном расстоянии (120 мм) одна от другой. Верхняя зона сушилку' состоит из 12 полок, нижняя—из 8. Каждая полка собрана из 16 пластин, которые удерживаются в горизонтальном положении пружинами. Каждая пластина полки перекрывает соседнюю на 10 мм, то исключает осыпание продукта с верхних полок на нижние.

Приводная станция с механизмом для поворота пластин получает движение от электродвигателя. Механизм для поворота пластин имеет цепь, которая движется вертикально по направляющим угольникам. Со стороны задней стенки осей пластин укреплены рычаги с пальцами. При движении пальца вверх вертикально становятся секторы нечетного ряда полок, а при движении его вниз—четного ряда. Такой способ сбрасывания высушиваемого продукта с полки на полку предупреждает смещение его в одну сторону сушильной камеры. Осыпание продукта с полки на полку и с нижней полки в разгрузочную воронку 4 происходит автоматически через строго определенные интервалы времени, равные  $1/20$  до всего периода сушки.

Загрузка продукта в сушилку производится с помощью устройства 1, состоящего из каретки и двух ленточных конвейеров, расположенных один над другим. Верхний конвейер подает крупку на нижний, который перемещается синхронно с кареткой. Каретка совершает по рельсам возвратно-поступательное движение. Так как нижний распределяющий конвейер движется радиально в горизонтальной плоскости, продукт распределяется на верхней полке сушилки равномерно. Загрузочная каретка заполняет сырым продуктом верхнюю полку за время одного оборота вертикальной цепи.

Разгрузочная воронка, расположенная под камерой сушилки, имеет люк, который закрывается клапаном с противовесом. Положение груза на штоке противовеса определяет предельную нагрузку на клапан. Когда масса продукта превышает усилие, создаваемое противовесом, происходит частичная разгрузка бункера, после чего клапан возвращается противовесом в горизонтальное положение.

Двухканальная четырехзонная вертикальная сушилка ЛСХА  
предназначена для сушки солода. Солод, приготовляемый в пивоварении, после ращения ячменя подвергается сушке. Цель сушки состоит в том, чтобы

снизить его влагосодержание с 43—45 до 3—3,5% к общей массе и придать ему специфический вкус, цвет и аромат. Часть содержащихся в солоде высокомолекулярных белков при тепловой обработке свертывается, что в дальнейшем благоприятно сказывается на процессах осветления сусла и пива. Солодовые ростки, имеющие неприятный горький вкус, становятся хрупкими и легко удаляются.

Сушилка ЛСХА (рис. 3.4) состоит из камеры подвяливания 11, корпуса 16, в котором расположены вертикальные ситчатые сушильные шахты 13 и воздушные каналы 14 и 15, приемного бункера 19 для высушенного солода, вентиляторов, калориферов и воздухопроводов.

Свежепроросший солод поступает по трубе 10 и равномерно распределяется разбрасывателем 9 по камере подвяливания 11. Вентилятор 8 нагнетает в камеру подвяливания воздух из помещения. Солод из камеры подвяливания вальцами 7 подается в загрузочные шахты 12, из которых переходит в сушильные шахты 13. Перпендикулярно движению солода из каналов 14 и 15 поступает горячий воздух. Холодный воздух вентилятором 3 продувается через паровой калорифер 2, нагревается до температуры 75—105°С и нагнетается в корпус сушилки 16. Воздушные каналы разделены по высоте на части воздухоподводящими коробами 4 и перегородкой 5, благодаря которым теплый воздух 4 раза проходит сквозь слой солода (на рисунке это показано стрелками). Через короба 4 при необходимости подсасывается холодный воздух, смешиваемый с теплым воздухом. Отработанный воздух отсасывается вентилятором 6. Сырье, находящееся в загрузочных вахтах 12 и разгрузочных 17, препятствует прорыву теплого воздуха в камеру подвяливания и разгрузочный бункер. Заслонки 1 в разгрузочных шахтах 17 служат для прекращения выпуска солода из сушильных каналов. На выходе из шахт 17 установлены валки 18, создающие условия для равномерного выпуска сушеного солода в разгрузочный бункер 19 откуда солод направляется на дальнейшую обработку.

Большая часть влаги удаляется из солода в сушилке при относительно низких температурах. Для этой цели в начальный период сушки (I зона) солод интенсивно проветривается воздухом, нагретым до температуры 40—50 °С. В конечный период сушки (IV зона) количество удаляемой влаги

невелико, но для тепловой обработки солода температура воздуха повышается до 75—105°C (в зависимости от типа вырабатываемого солода). Поэтому рационально эксплуатируемые сушилки для солода рассчитаны на работу с переменным количеством воздуха в зонах:

в калорифер и нижнюю зону подается ограниченное количество воздуха;

в средней и верхней зонах к воздуху, выходящему из нижней зоны, подмешивается холодный воздух в таком количестве, чтобы получалась смесь требуемой температуры. Общая продолжительность сушки солода 10—12 ч.

Одноканальные сушилки применяются также для обработки какао-бобов. В них осуществлен замкнутый цикл движения теплоносителя — горячего воздуха. В верхней горячей зоне какао-бобы подвергаются обработке теплоносителем - воздухом, нагретым в паровых калориферах, а в нижней зоне какао-бобы охлаждаются воздухом, подаваемым из цеха спаренным вентилятором. Какао-бобы непрерывно поступают из установленного над сушилкой бункера и заполняют вертикальный коробчатого профиля канал, стенки которого выполнены из специальной сетки. Параллельно каналу установлены оребренные паровые батареи — калориферы, а с противоположной стороны — сетчатые фильтры для очистки воздуха. Благодаря наличию фильтров сушилки такого типа не нуждаются в циклонах для очистки воздуха от пылевидных частиц.

Непрерывная рециркуляция воздуха в горячей зоне непосредственно через слой движущегося сверху вниз продукта обеспечивается двумя вентиляторами. Создаваемый ими поток воздуха нагревается паровыми калориферами и, проходя в горизонтальном направлении через вертикальный канал сушилки, отдает теплоту продукту. После очистки от мелких частиц, задерживаемых фильтром, цикл повторяется.

В процессе работы сушилки в нее поступает свежий воздух, а часть воздуха, насыщенного парами воды, отводится из сушилки. Количество выбрасываемого из сушилки воздуха регулируется заслонкой.

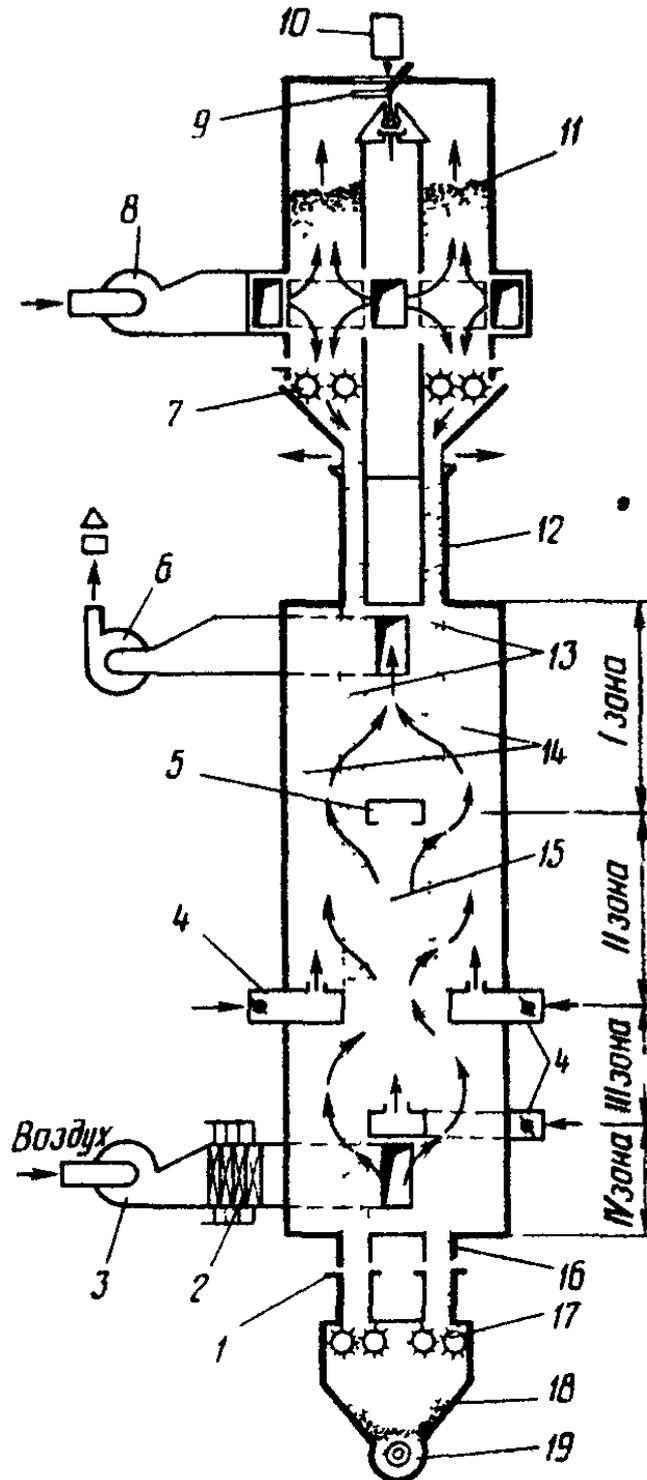


Рис 3. 4

*Двухканальная сушилка ЛСХА*

Какао-бобы, прошедшие термическую обработку, поступают в холодную зону канала, которая может отделяться от горячей зоны управляемой вручную заслонкой. Положение последней регулируется

специальным рычагом. Такое разделение обязательно в начале работы установки. Оно исключает заполнение нижней зоны продуктом, не прошедшим тепловую обработку. Вентилятор этой зоны засасывает через закрытое сеткой окно наружный воздух, который проходит через слой продукта и охлаждает его. Нагревшийся при этом воздух проходит через фильтр и частично направляется в вертикальный канал для обновления, а частично удаляется из сушилки через патрубок.

По вертикальному каналу сушилки продукт движется самотеком. Скорость его движения регулируется шлюзовым затвором, имеющим самостоятельный привод и вариатор скорости, штурвал управления которыми выведен на рабочую сторону корпуса сушилки. С этой же стороны располагаются пульт управления с приборами, пробоотборник и рычаг заслонки, отделяющий зону термообработки от зоны охлаждения.

Температурный режим термообработки регулируется в пределах 80—150°С и поддерживается на заданном уровне автоматически. Вариатором скорости регулируется также продолжительность нахождения продукта в зонах.

Сушилки этого типа обеспечивают равномерную обжарку какао-бобов. Качество обжарки контролируется с помощью пробоотборника

Ситчатые каналы, фильтры и калориферы легко очищаются (фильтры очищают ежедневно, сетки и калориферы—еженедельно). Хорошая тепловая изоляция поверхности сушилки позволяет устанавливать ее вместе с машинами для первичной переработки какао-бобов.

### **3.3. Барабанные сушилки.**

Для сушки фруктово-ягодных выжимок с целью получения из них в дальнейшем фруктовых порошков или кормовой муки предназначен барабанный сушильный агрегат АВМ-04. Рабочим органом агрегата (рис.3.5,а) является сушильный барабан 4, вращающийся с частотой 1-8 об/мин. В зависимости от производительности диаметр барабана равняется 1200 мм и более, отношение длины к диаметру составляет (3,5 – 7,0): 1

Кроме сушильного барабана в агрегат входят подающий конвейер 5, топочная часть 6, циклон 2, мельница 3 и распределительный шнек 1.

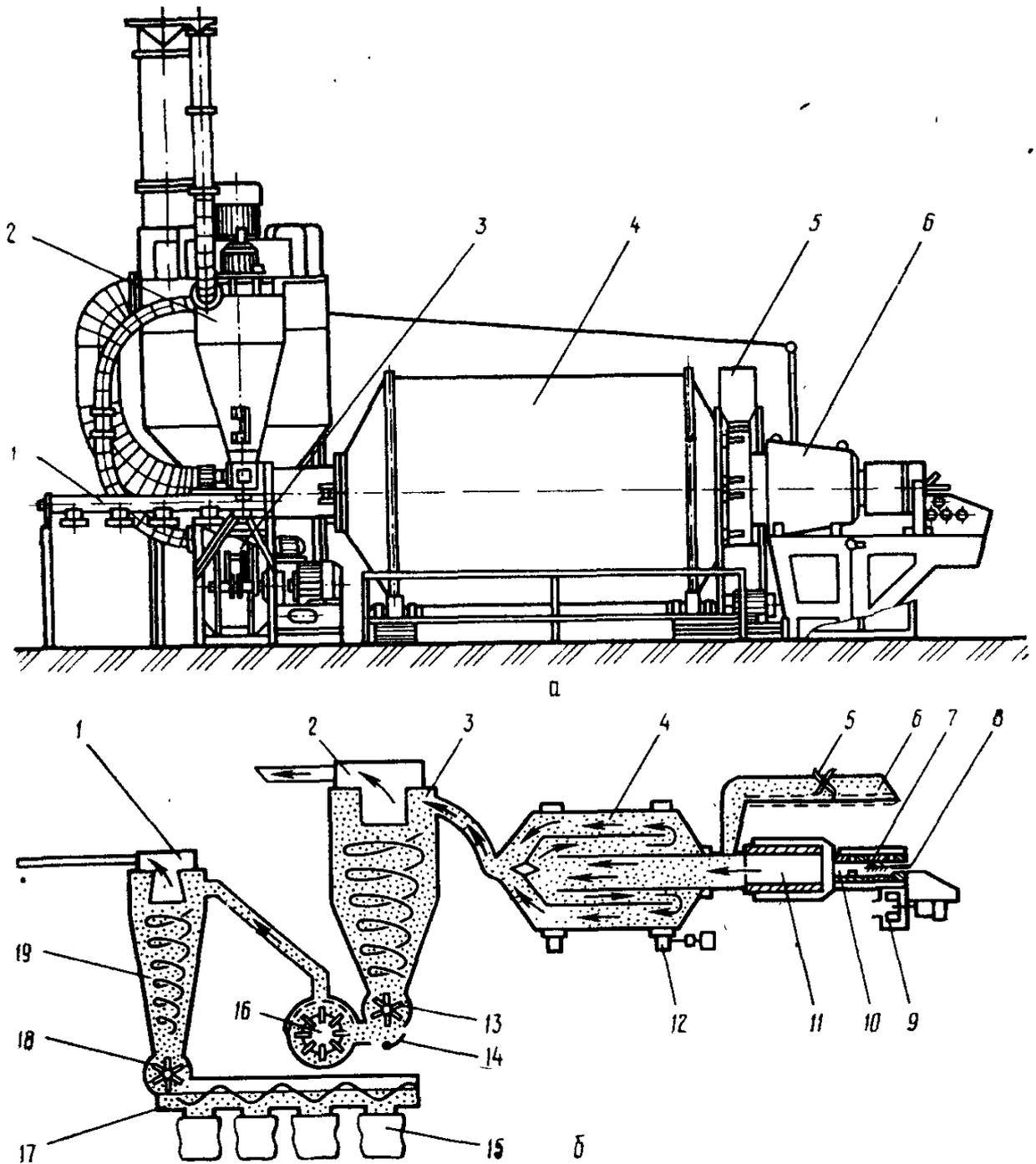


Рис. 3. 5

*Сушильный агрегат ЛВМ-0,4*

Процесс сушки и переработки выжимок представлен на рис 3.5,б. Выжимки конвейером 6 транспортируется через выравниватель толщины 5 в барабан 4, состоящий из нескольких цилиндров, благодаря чему

увеличиваются путь продукта в барабан и эффективность сушки.

Топочная часть состоит из камеры газификации 7 и камеры дожигания 10. В камере 7 установлена форсунка 8 для подачи жидкого топлива. Сюда же вентилятором 9 подается воздух, обогащающий впрыснутое топливо кислородом. Обогащенная смесь воспламеняется от электрической свечи, причем избыток топлива из жидкой фракции переходит в газообразную, эта смесь переходит в камеру 10 и сгорает. Окончательное сгорание топлива и образование топочных газов происходит в топке 11. В смеси с воздухом, засасываемым вентилятором 2, газы являются теплоносителем.

В барабане 4, получающем вращение от привода 12, выжимки постепенно высушиваются от начальной влажности 65 — 80 % до конечной 8 - 10%. Высушенные частицы засасываются вентилятором 2 в циклон 3, где отделяются от теплоносителя, осаждаются и шлюзовым затвором - дозатором 13 подаются в молотковую мельницу 16. Перед измельчением из высушенного продукта в отборнике 14 удаляются тяжелые частицы.

Измельченная сухая масса отсасывается вентилятором 1 из мельницы 16 в циклон 19, осаждается в нем и шлюзовым затвором-дозатором 18 подается в распределительный шпек 17, снабженный люками с надетыми на них мешками 15.

Процесс сушки и размола длится несколько минут. Производительность агрегатов типа АВМ 400—1900 кг/ч.

#### **3.4. Установки для сушки в кипящем слое.**

Сущность способа сушки и охлаждения продукта в кипящем слое состоит в том, что если через слой твердого зернистого материала пропускать с определенной скоростью воздух, то слой вначале разрыхляется, а затем переходит в состояние, напоминающее кипящую жидкость. Это состояние называется псевдооживленным, а слой материала — кипящим. В этом состоянии продукт интенсивно перемешивается и высушивается горячим воздухом или охлаждается холодным. Сушка и охлаждение в таких аппаратах совмещаются с транспортированием продукта.

Наибольшее распространение эти установки получили в сахарном производстве. В аппаратах, работающих с применением способа кипящего

слоя, сахар высушивается до влажности от 1 до 0,03% и охлаждается от 60 до 25°C при измельчении кристаллов, в 3 раза меньшем, чем в барабанных сушилках.

Аппарат СПС 20, работающий по принципу кипящего слоя, входит в установку, схема которой показана на рис 3.6,а. В сушильную камеру 4 аппарата воздух, очищенный в фильтре 1 и нагретый в калорифере 3, подается вентилятором 2. Охлаждающий воздух (из помещения или наружный), очищенный в фильтре 9, подается в аппарат вентилятором 10. Отработавший воздух отсасывается из аппарата вентилятором 7, предварительно пройдя "сухие" циклоны 5 и "мокрые" циклоны - скрубберы 6.

В "мокрые" циклоны подаются вода или фильтрованный сок второй сатурации для окончательного улавливания сахарной пыли. Раствор сахара из этих циклонов и сахарной пыли из "сухих" циклонов (через шлюзы затвор 8) отводятся в клеровочную мешалку, из которой клеровка затем откачивается в варочно - кристаллизационное отделение завода.

Сушильно-холодильный аппарат СПС-20 (рис. 3.6,б) выполнено из листовой стали в виде призматического корпуса, который внутри перегородками разделен на две камеры сушильную 4 и охлаждающую 8. В нижней части камеры размещены одна над другой две решетки. Верхние 2 и 13 служат для поддержания слоя транспортируемого сахара, нижние 1 и 14 — для более равномерного распределения воздуха, подаваемого вентиляторами под слой сахара.

Поддерживающая решетка представляет собой плоское полотно из специально изогнутых из нержавеющей проволоки и проштампованных профильных элементов с зазорами 0,3 мм для прохода воздуха. Живое сечение решетки 8%, установлено оно с небольшим уклоном (2—3°) в сторону движения сахара. Распределительные решетки выполнены из листовой стали с круглыми отверстиями диаметром 9 мм, которые размещены в шахматном порядке с шагом 20 мм. К решеткам снизу подсоединены коллекторы 18 и 15 для подачи соответственно подогретого воздуха в сушильную и холодного воздуха в охлаждающую камеру аппарата. В конце

поддерживающей решетки сушильной камеры расположен секторный шибер 16, с помощью которого можно регулировать толщину псевдооживленного слоя сахара от 250 до 450 мм. Он позволяет также без остановки аппарата удалять из сушильной камеры образовавшиеся комки сахара, накапливающиеся на решетке при неудовлетворительной работе центрифуг. При поворотешибера вверх образуется щель между ним и поддерживающей решеткой, через которую комки попадают в охлаждающую камеру. Из нее их удаляют секторным шибером 10, установленным в конце поддерживающей решетки. Изменением угла наклона этогошибера регулируется также высота псевдооживленного слоя сахара в охлаждающей камере в пределах 80—120 мм.

Верхняя часть призматического корпуса аппарата расширена и оборудована двумя аспирационными коллекторами:

5, служащего для удаления отработавшего воздуха из сушильной камеры,

9—из охлаждающей.

Из коллекторов воздух попадает в патрубок 7 и удаляется из аппарата.

Равномерный отвод отработавшего воздуха обеспечивается особой формой и сечением отсасывающих патрубков в коллекторах.

Сахар в аппарат поступает через шлюзовой затвор, подсоединенный к трубе 3, который обеспечивает герметизацию аппарата при загрузке. Псевдооживленный слой сахара перемещается вдоль поддерживающей решетки сушильной камеры потоком подогретого воздуха, подаваемого под решетку, давлением 250—350 Па. Изменяя высоту слоя сахара шибером, меняют продолжительность пребывания его в сушильной камере, что необходимо, например, при подаче на сушку более влажного сахара. Указанное давление позволяет поддерживать здесь вихревое кипение, способствующее интенсивной подсушке и перемещению сахара из сушильной камеры в охлаждающую через секторный шибер, а также предотвращает образование комков.

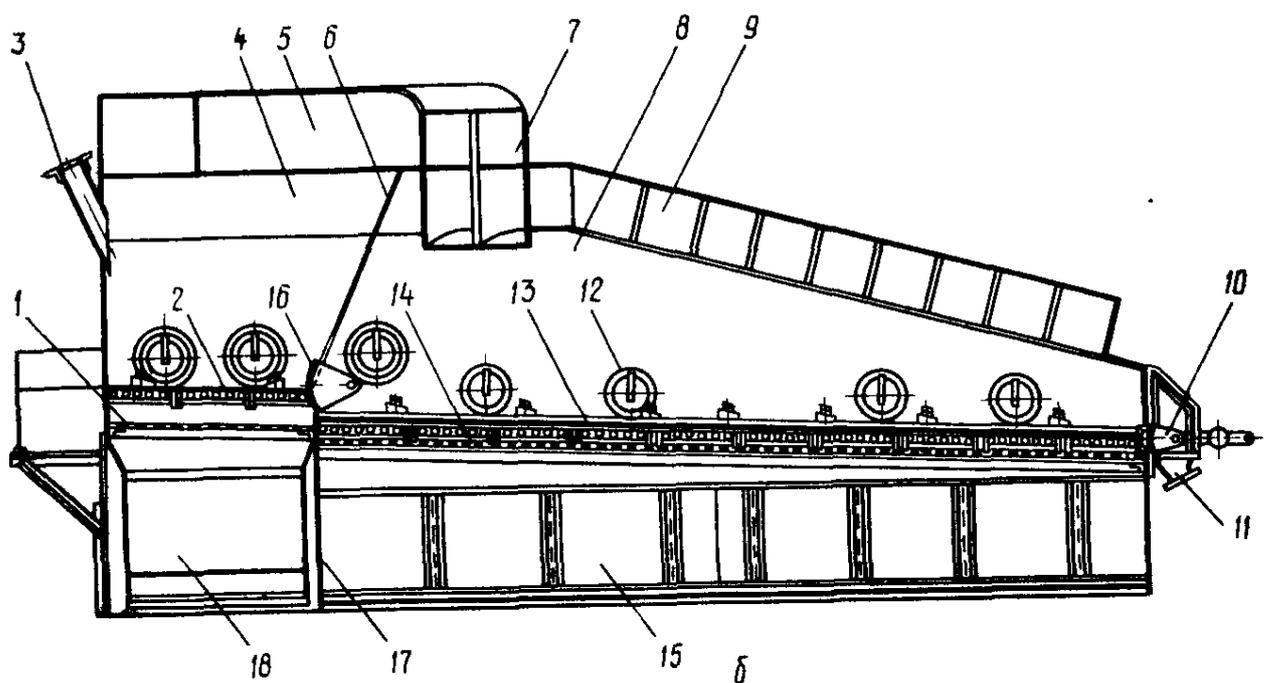
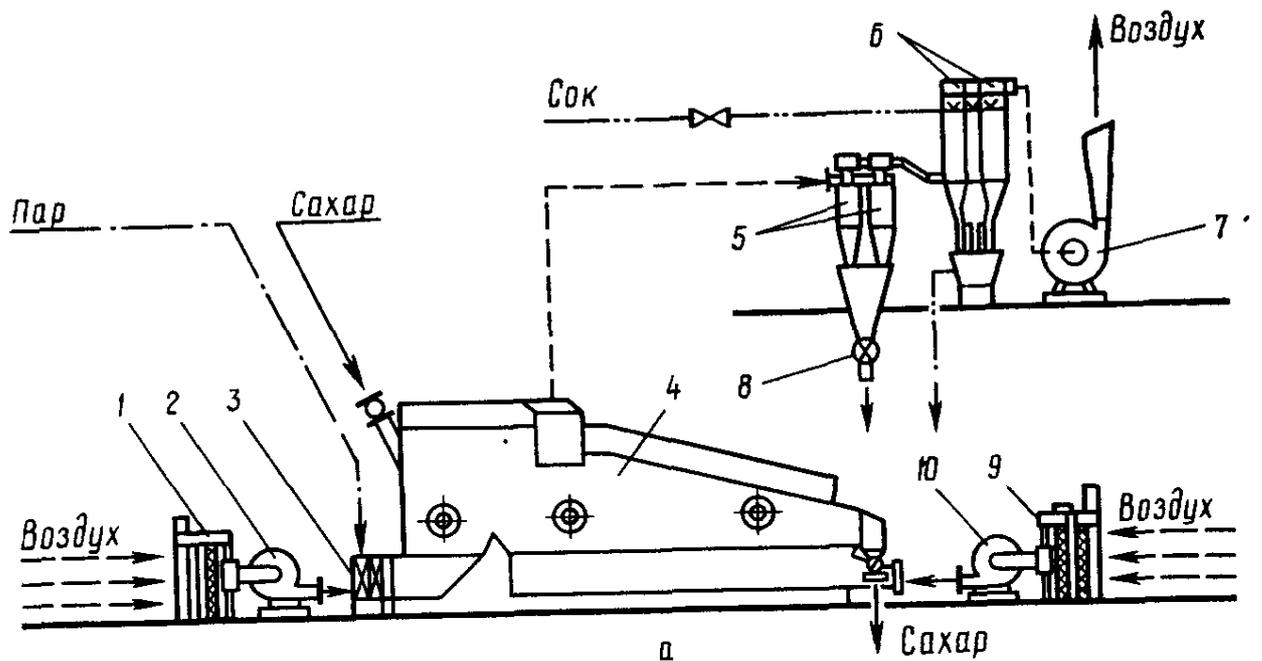


Рис. 3. 6

*Сушильно-охладительный аппарат СПС 20*

*а - схема установки,*

*б - общий вид.*

В охлаждающей камере при меньшем давлении воздуха (80—120 Па) и меньшей высоте слоя масса сахара «сжижается» и течет вдоль решетки во взвешенном состоянии. Из охлаждающей камеры сахар самотеком

транспортируется через секторный шибер и выходит через патрубок 11, к которому подсоединен шлюзовой затвор. Для наблюдения за процессами сушки, охлаждения и транспортирования сахара на корпусе аппарата имеются смотровые окна 12.

В модернизированных аппаратах этого типа в сушильной части установлены специальный ворошитель, предотвращающий образование комков сахара.

Производительность аппарата по сухому сахару-песку 20т/ч.

Перед пуском рассмотренных сушилок после монтажа и ремонта необходимо предварительно прогреть аппарат следующим образом:

продуть паровые батареи (для удаления из них воздуха) и пропустить весь конденсат по обводным конденсатопроводам (в обход конденсационных горшков);

пар при продувке впускать в батареи постепенно, медленно поворачивая вентиль, во избежание гидравлических ударов;

при появлении пара в продувочных вентилях обводных конденсатопроводов закрыть обводные конденсатопроводы и включить конденсационные горшки;

постепенно поднять давление пара в батареях сушилки до избыточного (0,6 МПа) и просмотреть всю нагревательную систему.

После прогрева прекратить подачу пара, дать батареям остыть, затем подтянуть все болты фланцевых соединений, а также открыть и очистить конденсационные горшки;

проверить, в достаточном ли количестве заполнены маслом редукторы и вариаторы скоростей;

плотно закрыть заслонками боковые стороны сушильной камеры, а щитами — торцовые, чтобы исключить всякую возможность подсоса воздуха через неплотности, так как воздух, поступающий в сушилку через неплотности заслонок, не проходит через калориферы, мало нагревается и почти не участвует в сушке, создаваемая же подсосыванием воздуха излишняя нагрузка на вентиляторы уменьшает поступление в сушилку нагретого воздуха, что замедляет сушку и затрудняет получение равномерно высушенного продукта

По окончании подготовки сушилки к пуску приступают к ее нагреву.

Перед пуском пара в батарее открывают вентиль на обводном конденсатопроводе (для спуска конденсата в обход конденсационного горшка). Затем медленно пускают пар в батарею и продувают их, не допуская гидравлических ударов. Продувка продолжается до тех пор, пока в продувном кране не покажется пар. Тогда закрывают обводной конденсатопровод, включают конденсационный горшок и при медленной подаче пара поднимают давление. Когда давление пара достигнет установленной нормы, включают вентиляторы и начинают подавать продукт на сушку.

Во время сушки необходимо следить, чтобы вентиляторы как на отсосе отработанного воздуха, так и на подаче его в аппарат работали на полную мощность, так как от этого зависят производительность сушилки и качество продукта

Конденсат, образующийся в процессе сушки из насыщенного водяного пара, должен непрерывно удаляться, иначе он может заполнить батарею. Тогда прекратится поступление пара в калорифер и приостановится обезвоживание продукта. Спуск конденсата должен производиться через конденсационные горшки, в которых жидкость отделяется от пара и уходит в конденсатопровод. При спуске конденсата в обход горшка уходит и неиспользованный пар, вследствие чего непроизводительно теряется много теплоты.

На паропроводах сушилок должны быть установлены манометры, предохранительные клапаны и термометры. Клапан должен быть закрыт кожухом или колпаком, исключая возможность произвольного его перемещения. При продувке клапана вручную струю направляют в сторону от рабочего места, чтобы исключились ожоги людей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

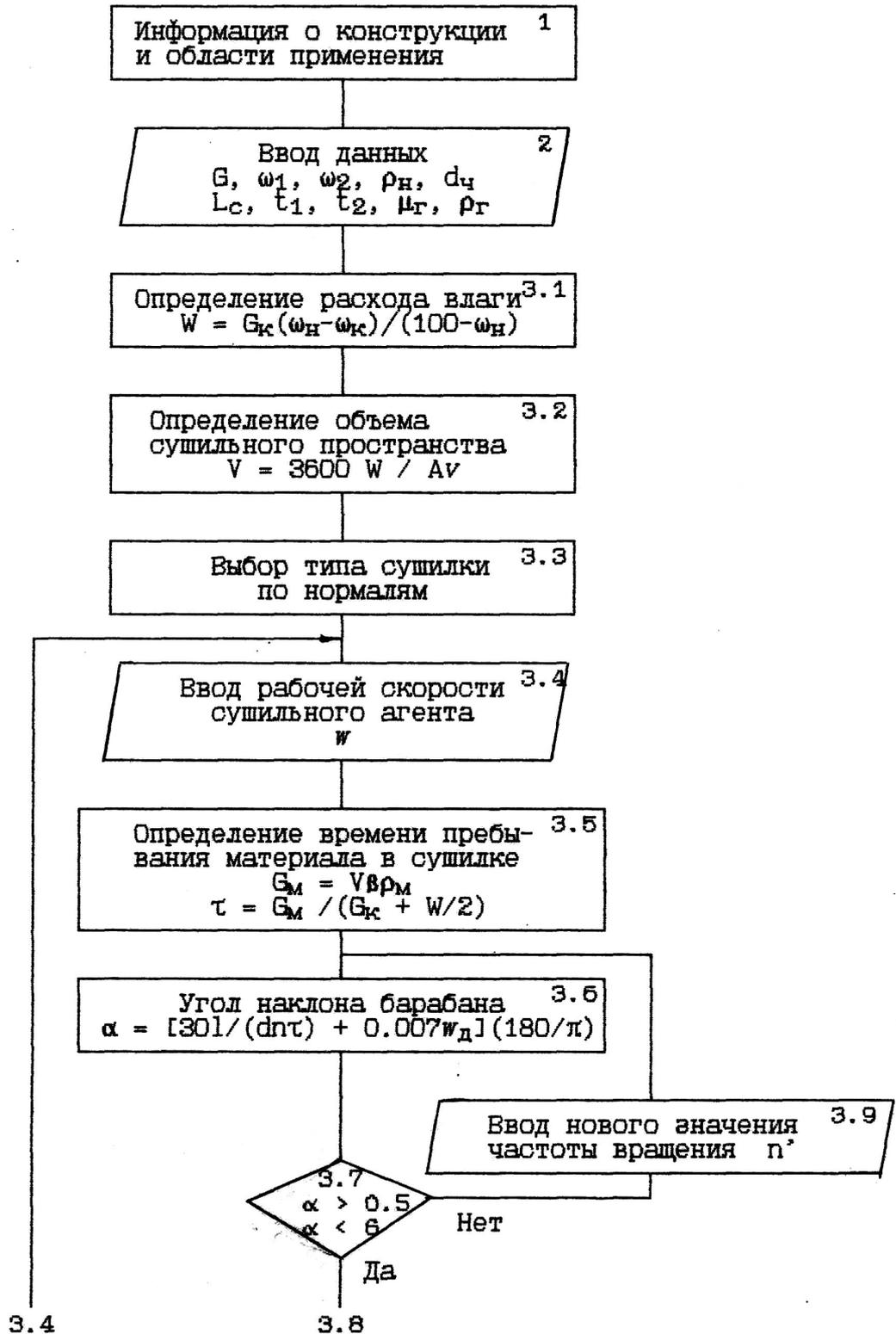
1. Азрилевич М.Я. Оборудование свеклосахарных заводов. - 3-х изд. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. - 288 с.
2. Балашов В.Е. Дипломное проектирование предприятий по производству пива и безалкогольных напитков. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. - 288 с.
3. Головань К.П., Ильинский Н.А. Технологическое оборудование хлебопекарен предприятий. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1979 - 384 с.
4. Гребенюк С.М. Технологическое оборудование сахарных заводов . - 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. - 520 с.
5. Зайчик Ц.Р. Оборудование предприятий винодельческой промышленности. - 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1977. - 400 с.
6. Котельников А.Ф., Евраменко Е.П., Колесник Е.И. Современные закаточные машины для металлической и стеклянной тары. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. - 152 с.
7. Лунин О.Г., Драгилев А.И., Черноиванник А.Я. Технологическое оборудование предприятий кондитерской промышленности. - 3-е изд. перераб. и доп. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. - 384 с.
8. Маршалкин Г.А. Технологическое оборудование кондитерских фабрик. - 3-е изд. перераб. и доп. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. - 484 с.
9. Мороз В.К. Курсовое и дипломное проектирование по курсу "Эксплуатация оборудования предприятий пищевой промышленности". - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. - 200 с.
10. Самсонова А.Н., Ушева В.Б. Фруктовые и овощные соки (техника и технология). - М.: Пищевая промышленность, 1976. - 276 с.
11. Ситников Е.Д., Качанов В.А. Оборудование консервных заводов. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. - 246 с.
12. Чернов М.Е. Оборудование предприятий макаронной промышленности. - М.: Пищевая промышленность, 1978. - 232 с.

13. Устройство и эксплуатация оборудования предприятий пищевой промышленности /Под ред. А.И. Драгилева. - М.: Пищевая промышленность. 1979. - 304 с.
14. Левин Д. М. Термодинамическая теория и расчет сушильных установок. М., Пищепромиздат, 1968, -168 с.
15. Павлов К. Ф.; Романков П. Г., Носков А. А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. М.— Л., «Химия» 1964, -634 с.
16. Справочник химика. Т. 1. М.—Л., «Химия», 1968, -974 с.
17. Вукалович М.П., Ривкин С.Л., Александров А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. М-, Изд-во стандартов, 1968, -408 с.
18. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Физматгиз, 1963, -708 с.
19. Справочник машиностроителя. Т. 2. М., «Машгиз», 1954, -560 с.
20. Стабников В.Н. Расчет и конструирование ректификационных аппаратов. М., «Машиностроение», 1965, -356 с.
21. Чернобыльский И.И., и др. Машины и аппараты химических производств. Изд. второе, Киев, Машгиз, 1961, -491 с.
22. Чернобыльский И.И., Тананайко Ю.М. Сушильные установки химической промышленности. Киев. «Техника», 1969, -279 с.
23. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М., «Энергия», 1969, -439 с.
24. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М., «Химия», 1973, -752 с.
25. Лебедев П.Д., Расчет и проектирование сушильных установок. М., Госэнергоиздат, 1963, -320 с.
26. Романков П.Г., Носков А.А. Сборник расчетных диаграмм по курсу процессов и аппаратов химической технологии. М.— Л., «Химия», 1966, -24 с.
27. Романков П.Г., Рашковская Н.Б. Сушка во взвешенном состоянии. Л., «Химия», 1968, -357 с.
28. Кремнев О.А. и др. Скоростная сушка. Киев, Гостехиздат, УССР, 1963, -381 с.

29. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.. «Энергия» 1973, -319 с.
30. Рысин С.А. Вентиляционные установки машиностроительных заводов. М., «Машиностроение», 1964, -704 с.
31. Лыков А.В. Теория сушки. М., «Энергия», 1968, -470 с.
32. Лебедев П.Д., Щукин А.А. Теплоиспользующие установки промышленных предприятий. М., «Энергия», 1970, -408 с.

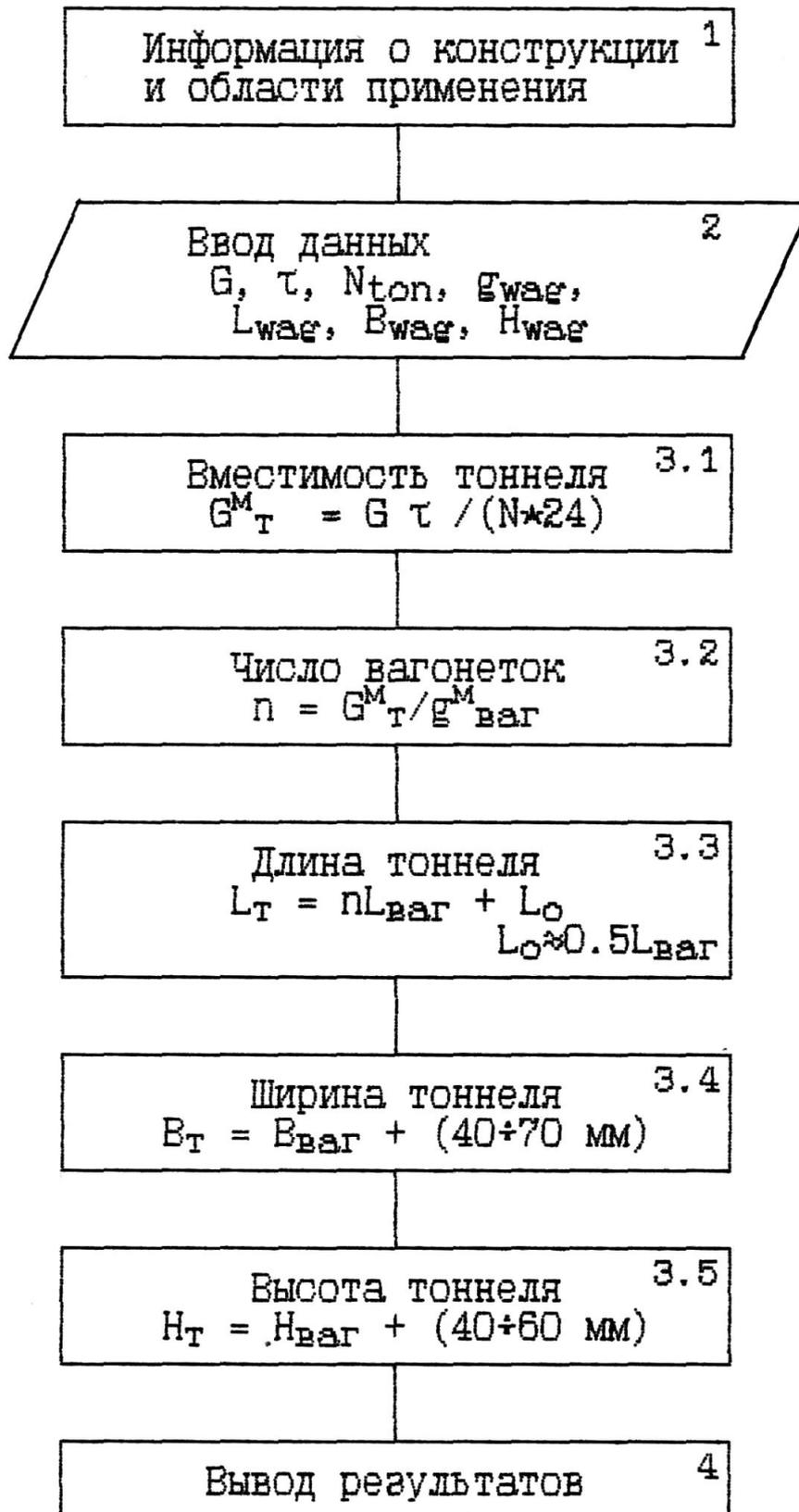
## 4. Приложения

### 4.1. Блок-схема алгоритма конструктивного расчета барабанной сушилки

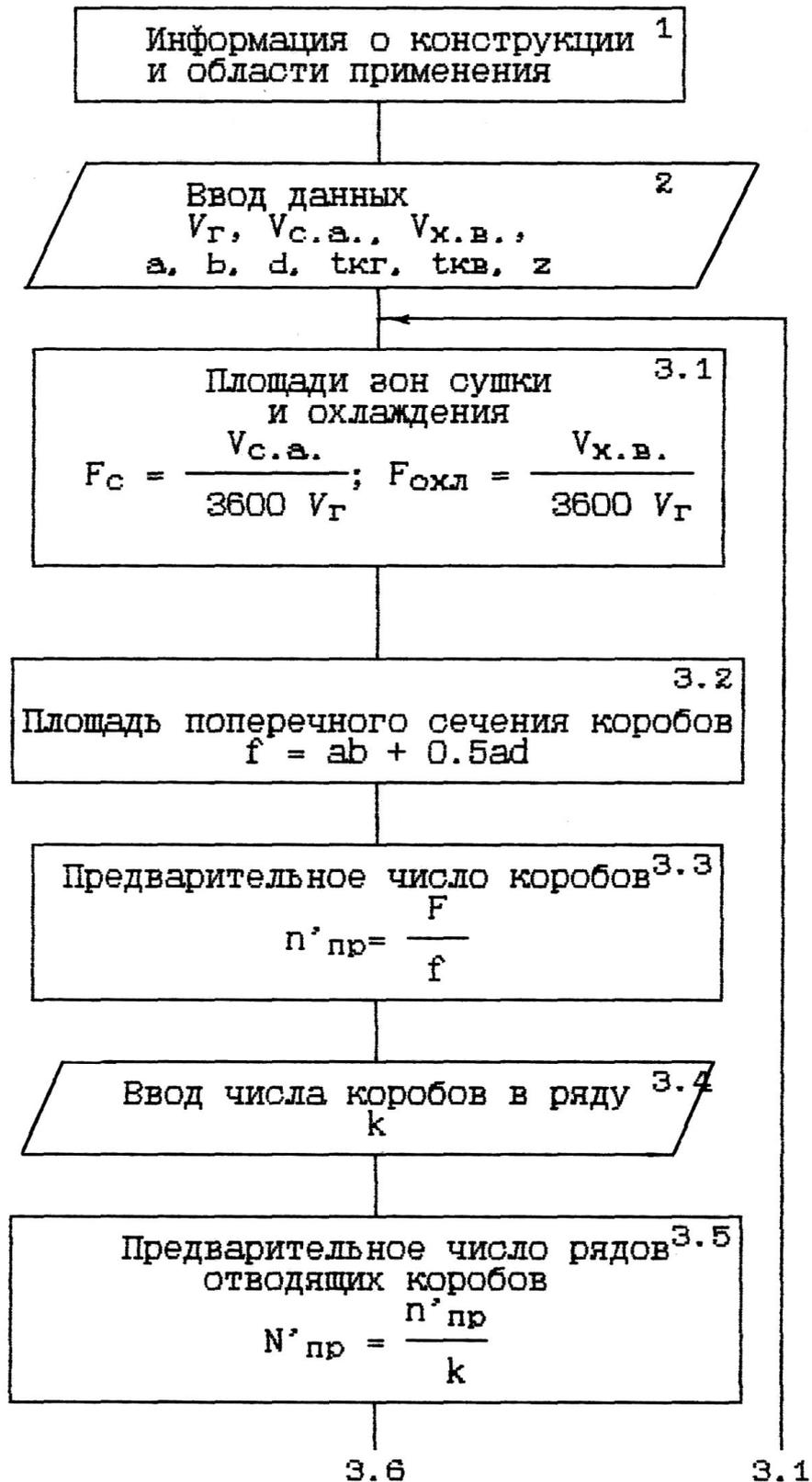


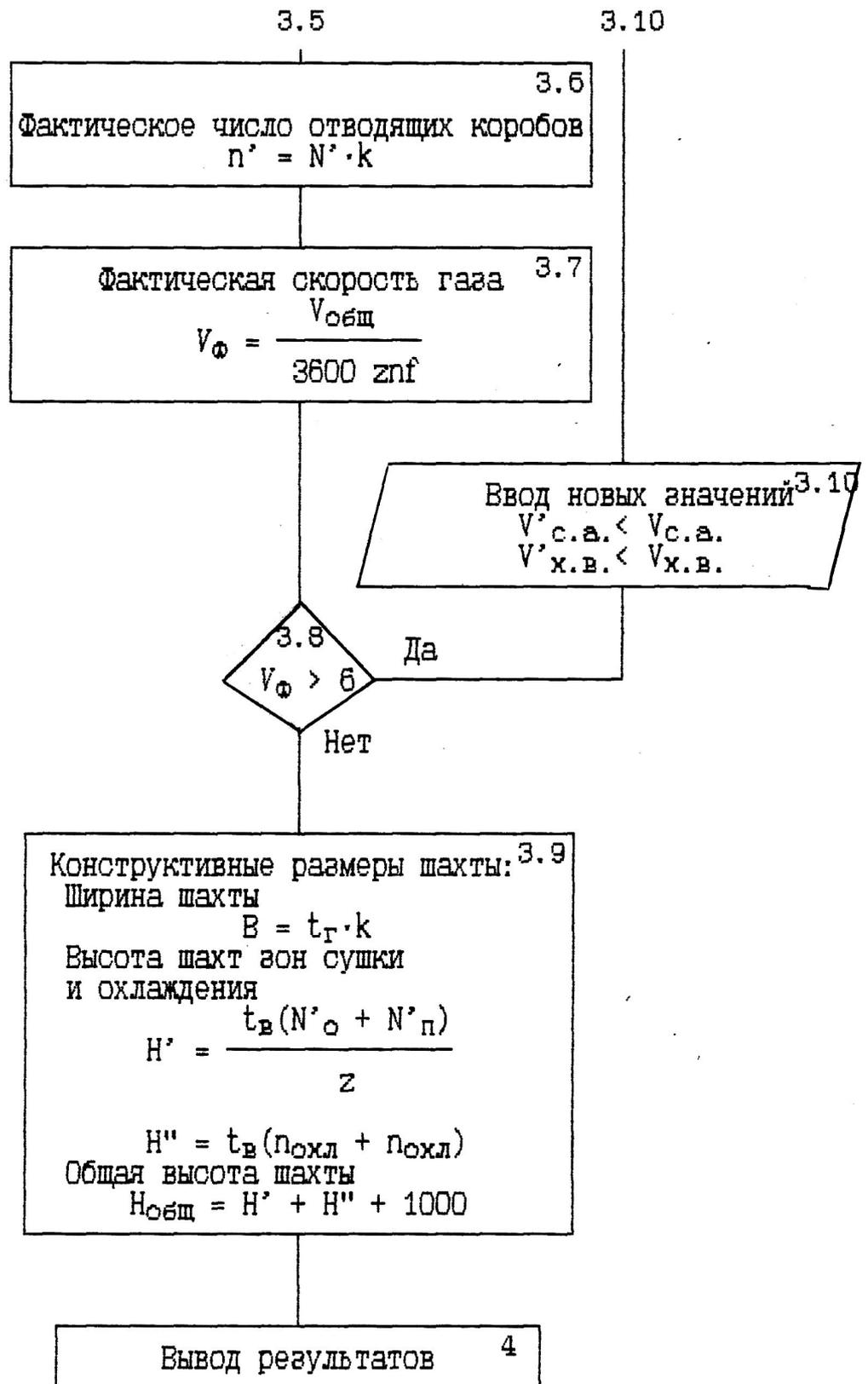


4.2. Блок-схема алгоритма конструктивного расчета  
тоннельной сушилки

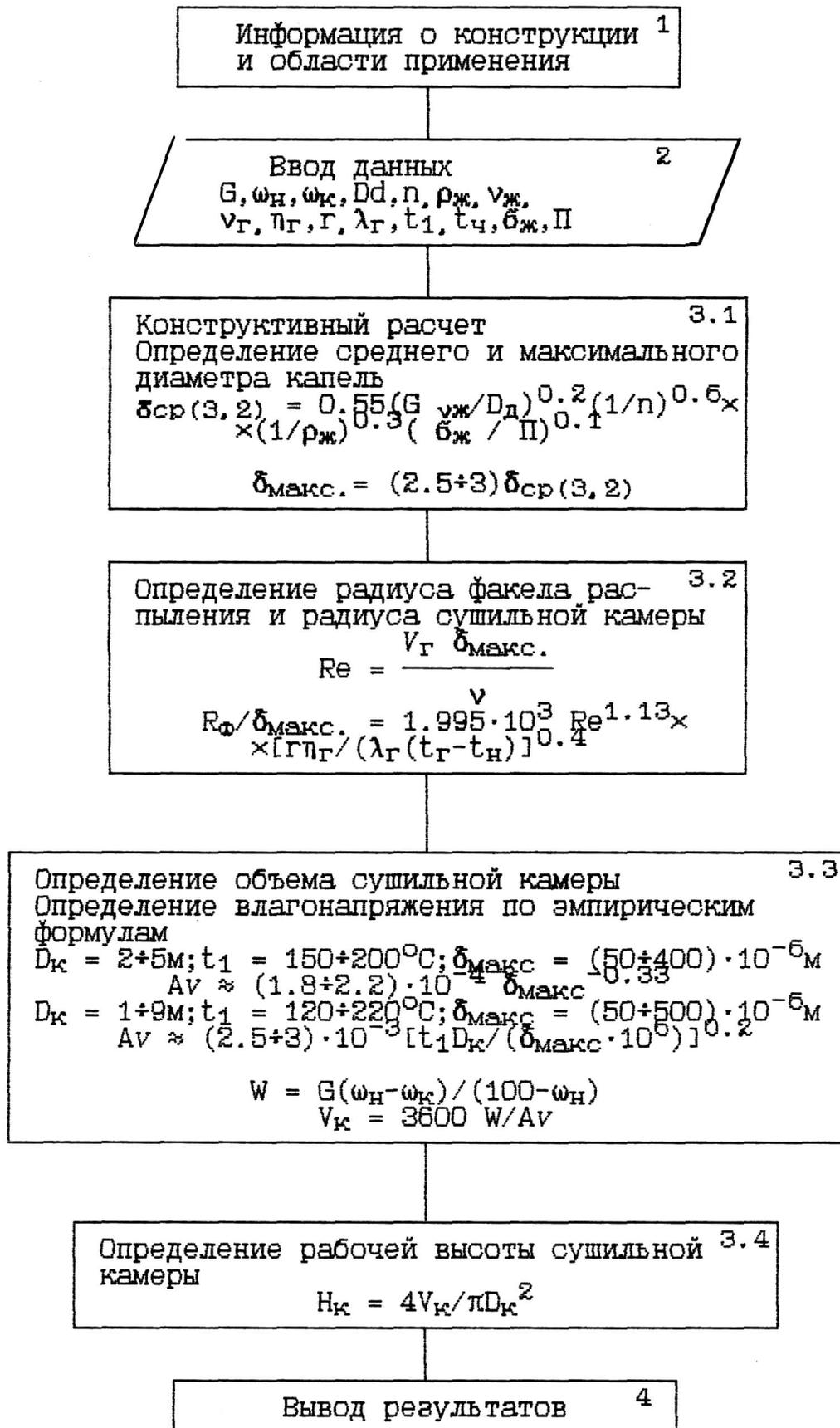


4.3. Блок-схема алгоритма конструктивного расчета шахтной сушилки

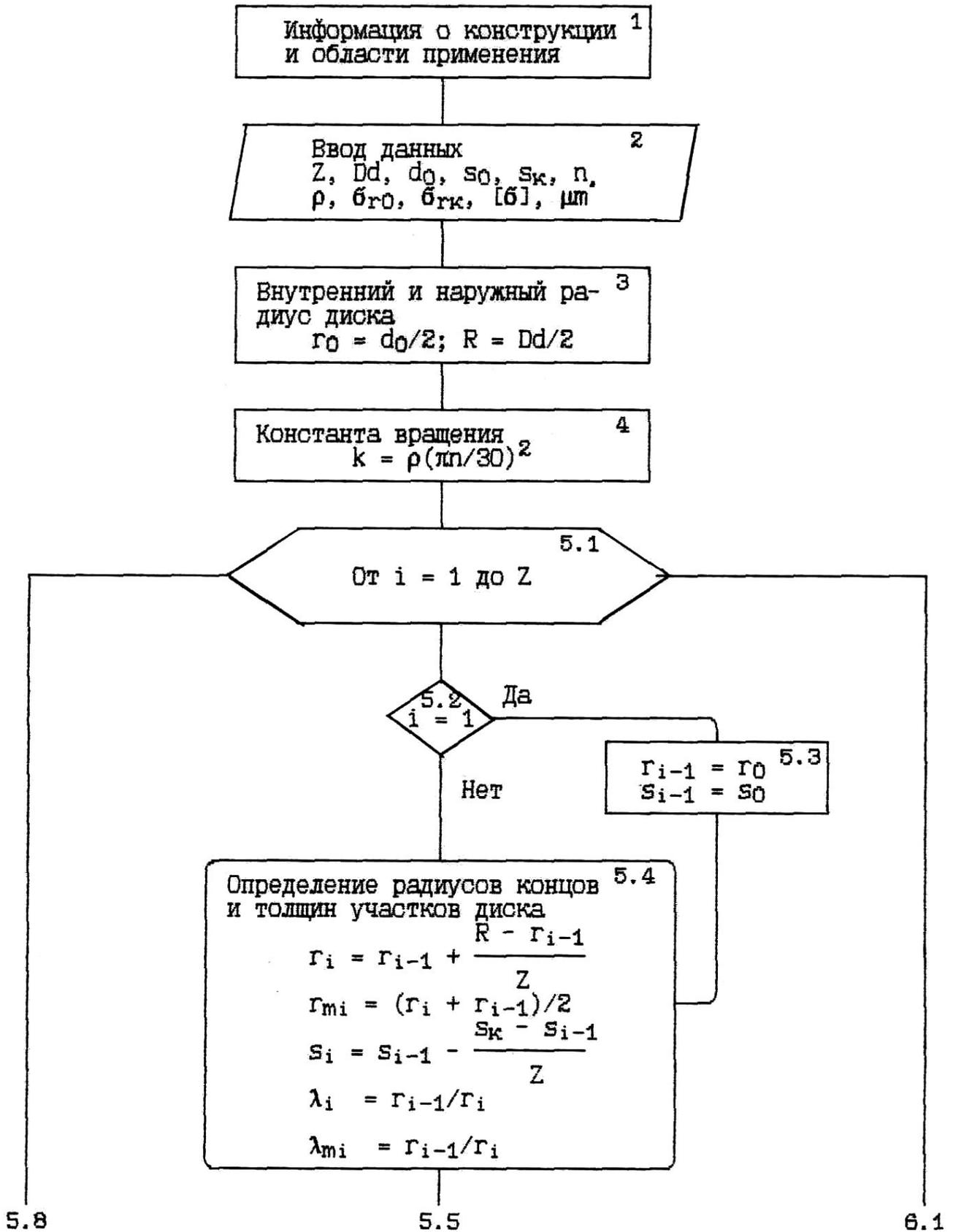




#### 4.4. Блок-схема алгоритма конструктивного расчета распылительной сушилки



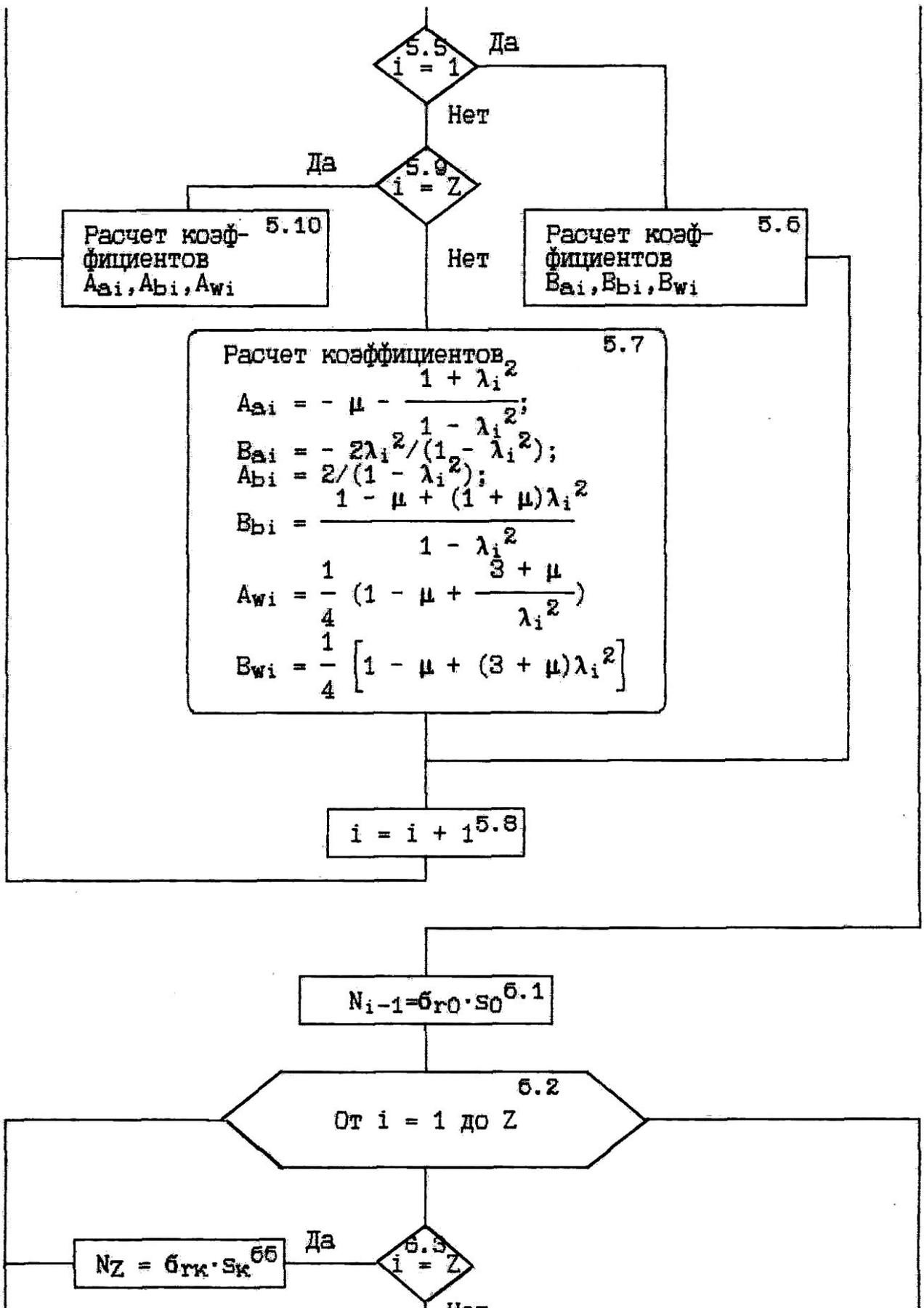
4.5. Блок-схема алгоритма расчета диска  
распылительной сушилки



5.1

5.4

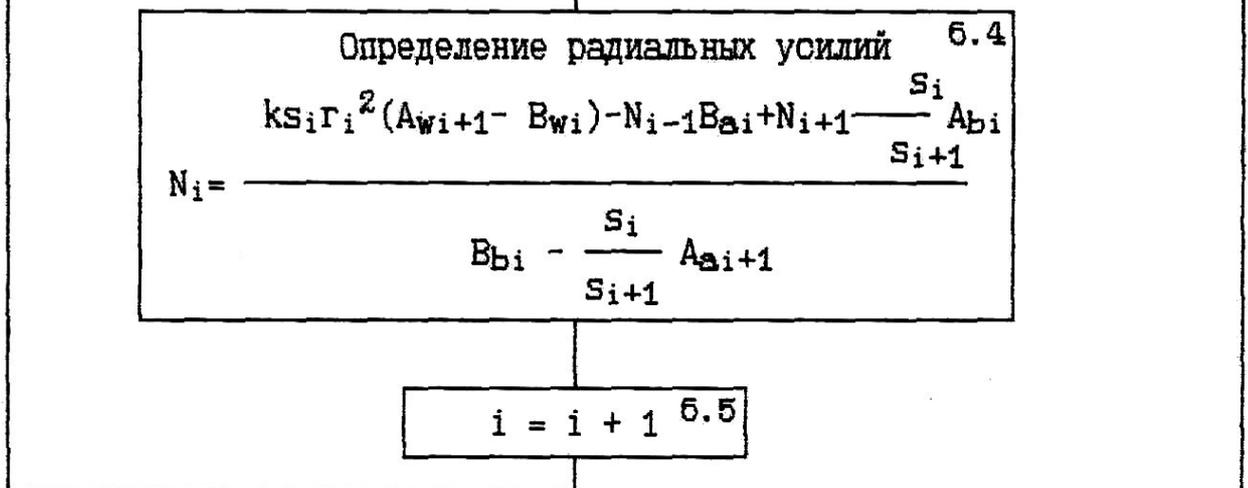
5.1



6.2

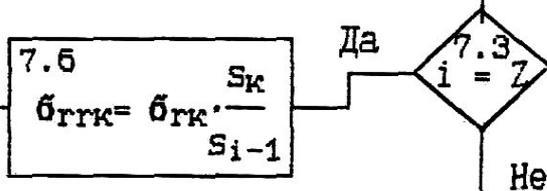
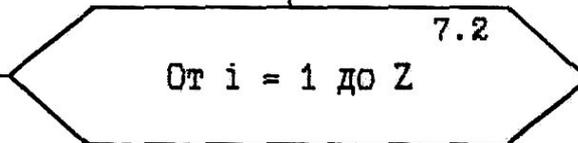
6.3

6.2



7.1

$$\sigma_{rr0} = \sigma_{r0} \frac{s_0}{s_1}$$



7.6

$$\sigma_{rrk} = \sigma_{rk} \frac{s_k}{s_{i-1}}$$

7.4

Определение радиальных напряжений

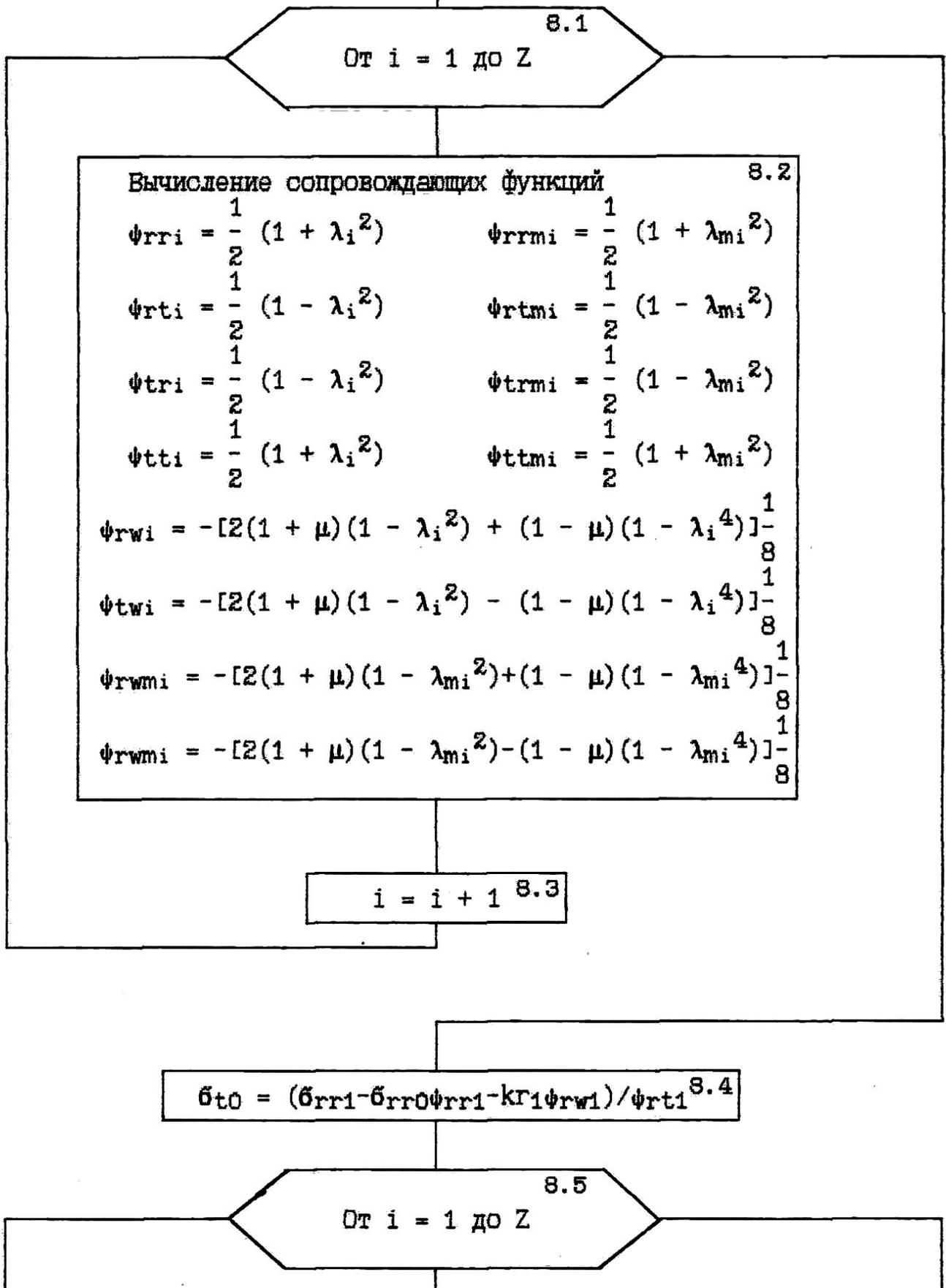
$$\sigma_{rri} = N_i / s_i$$

$$\sigma'_{rri} = N_i / s_{i+1}$$

7.5

$i = i + 1$

7.2



Вычисление сопровождающих функций 8.2

$$\psi_{rri} = \frac{1}{2} (1 + \lambda_i^2) \quad \psi_{rrmi} = \frac{1}{2} (1 + \lambda_{mi}^2)$$

$$\psi_{rti} = \frac{1}{2} (1 - \lambda_i^2) \quad \psi_{rtmi} = \frac{1}{2} (1 - \lambda_{mi}^2)$$

$$\psi_{tri} = \frac{1}{2} (1 - \lambda_i^2) \quad \psi_{trmi} = \frac{1}{2} (1 - \lambda_{mi}^2)$$

$$\psi_{tti} = \frac{1}{2} (1 + \lambda_i^2) \quad \psi_{ttmi} = \frac{1}{2} (1 + \lambda_{mi}^2)$$

$$\psi_{rwi} = -[2(1 + \mu)(1 - \lambda_i^2) + (1 - \mu)(1 - \lambda_i^4)] \frac{1}{8}$$

$$\psi_{twi} = -[2(1 + \mu)(1 - \lambda_i^2) - (1 - \mu)(1 - \lambda_i^4)] \frac{1}{8}$$

$$\psi_{rwm_i} = -[2(1 + \mu)(1 - \lambda_{mi}^2) + (1 - \mu)(1 - \lambda_{mi}^4)] \frac{1}{8}$$

$$\psi_{twm_i} = -[2(1 + \mu)(1 - \lambda_{mi}^2) - (1 - \mu)(1 - \lambda_{mi}^4)] \frac{1}{8}$$

8.3  
 $i = i + 1$

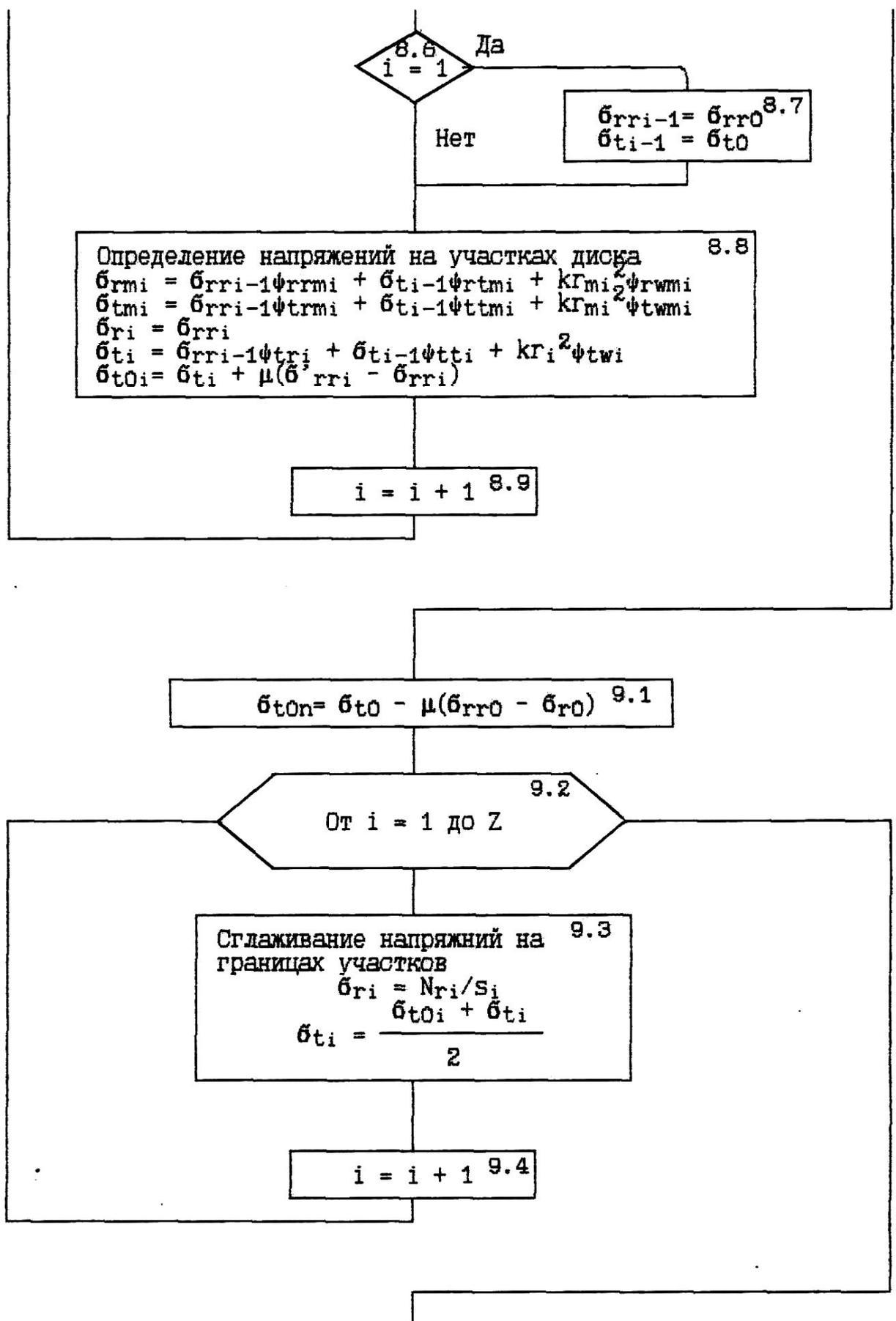
8.4  
 $\delta_{t0} = (\delta_{rr1} - \delta_{rr0} \psi_{rr1} - k \gamma_1 \psi_{rw1}) / \psi_{rt1}$

8.5  
От i = 1 до Z

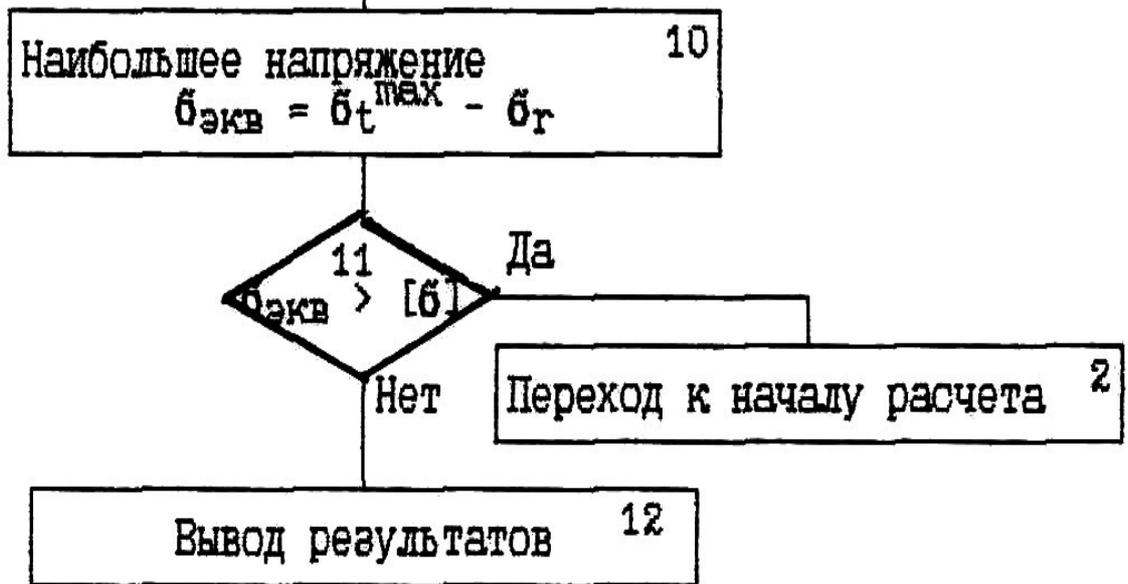
8.5

8.5

8.5



9.2



## Содержание

1.	СУШКА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ	3
1.1.	Способы обезвоживания	3
1.2.	Общая характеристика сушки	3
1.3.	Значение процесса сушки для пищевой промышленности	4
1.4.	ВЛАЖНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	5
1.4.1.	Виды влажных материалов	5
1.4.2.	Виды связи влаги с материалом	6
1.4.3.	Концентрация влаги	8
1.4.4.	Равновесная влажность	8
1.5.	КИНЕТИКА СУШКИ	9
1.5.1.	Влагопроводность и термовлагопроводность	9
1.5.2.	Кривые сушки и кривые скорости сушки	12
1.5.3.	Уравнения скорости сушки	16
1.5.4.	Усадка и коробление продуктов	19
1.6.	ОСНОВЫ РАСЧЕТА СУШИЛОК	20
1.6.1.	Нормальный теоретический сушильный процесс	20
1.6.2.	Материальный и тепловой балансы реального процесса сушки	23
1.6.3.	Нормальный действительный процесс сушки на $i$ — $x$ - диаграмме	27
1.7.	ВАРИАНТЫ СУШИЛЬНОГО ПРОЦЕССА	31
1.7.1.	Сушилка с подогревом воздуха в сушильной камере	31
1.7.2.	Сушилка с промежуточным подогревом воздуха	33
1.7.3.	Сушилка с возвратом отработавшего воздуха	35
1.8.	УСТРОЙСТВО СУШИЛОК	37
1.8.1.	Классификация сушилок	37
1.8.2.	Барабанные сушилки	38
1.8.3.	Туннельные сушилки	42
1.8.4.	Ленточные сушилки	44
1.8.5.	Шахтные сушилки	45
1.8.6.	Распылительные сушилки	47
1.8.7.	Кондуктивные сушилки	48
1.9.	ОСОБЫЕ МЕТОДЫ СУШКИ	51
1.9.1.	Сушка в глубоком вакууме	51

1.9.2.	Сушка инфракрасными лучами	53
1.9.3.	Сушка в поле токов высокой частоты	56
1.9.4.	Сушка в кипящем слое и во взвешенном состоянии	57
2.	МЕТОДИКА РАСЧЕТА СУШИЛОК	60
2.1.	МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОНВЕКТИВНЫХ СУШИЛОК	60
2.1.1.	Основные параметры теплоносителя	60
2.1.2.	Материальный баланс сушилки	67
2.1.3.	Аналитический метод расчета сушилки	71
2.1.4.	Графо-аналитический расчет сушилки по I-d-диаграмме	76
2.1.5.	Выбор основных габаритных размеров сушилки	80
2.1.6.	Определение продолжительности сушки	82
2.1.7.	Вспомогательное оборудование сушильных установок	85
2.2.	РАСЧЕТ КОНТАКТНЫХ СУШИЛОК	87
2.3.	РАСЧЕТ РАДИАЦИОННЫХ СУШИЛОК	90
2.4.	АЛГОРИТМ КОНСТРУКТИВНОГО РАСЧЕТА БАРАБАННОЙ СУШИЛКИ	95
2.5.	АЛГОРИТМ КОНСТРУКТИВНОГО РАСЧЕТА ТОННЕЛЬНОЙ СУШИЛКИ	99
2.6.	АЛГОРИТМ КОНСТРУКТИВНОГО РАСЧЕТА ШАХТНОЙ ЗЕРНОСУШИЛКИ	101
2.7.	АЛГОРИТМ РАСЧЕТА РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШИЛКИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО РАСПЫЛЕНИЯ	103
2.7.1.	Конструктивный расчет	103
2.7.2.	Расчет диска распределительной сушилки	105
3.	ПРОМЫШЛЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СУШКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ	112
3.1.	Ленточные сушилки	112
3.2.	Шахтные сушилки	117
3.3.	Барабанные сушилки	123
3.4.	Установки для сушки в кипящем слое	125
	Список литературы	131
	Приложения	134