

СПЕЦИАЛЬНОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

МОДУЛЬ 1 ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ВЕДЕНИЯ ТЕПЛО-МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Лекция 2 АППАРАТЫ ДЛЯ СУШКИ ПИЩЕВЫХ СРЕД

**Лозовая Светлана Юрьевна, д.т.н., проф. кафедры
механического оборудования**

**г. Белгород,
2011 г.**

АППАРАТЫ ДЛЯ СУШКИ ПИЩЕВЫХ СРЕД

Изучить самостоятельно:

Способы сушки.

Научное обеспечение процесса сушки.

Классификация оборудования.

Машины и аппараты пищевых производств. В 2 кн.: Учебник для вузов [Текст]/С.Т.Антипов, И.Т. Кретов, А.Н.Остриков и др.; Под ред.акад. РАСХН В.А.Панфилова. – М.: Высшая школа, 2001.

БАРАБАННЫЕ СУШИЛЬНЫЕ АГРЕГАТЫ

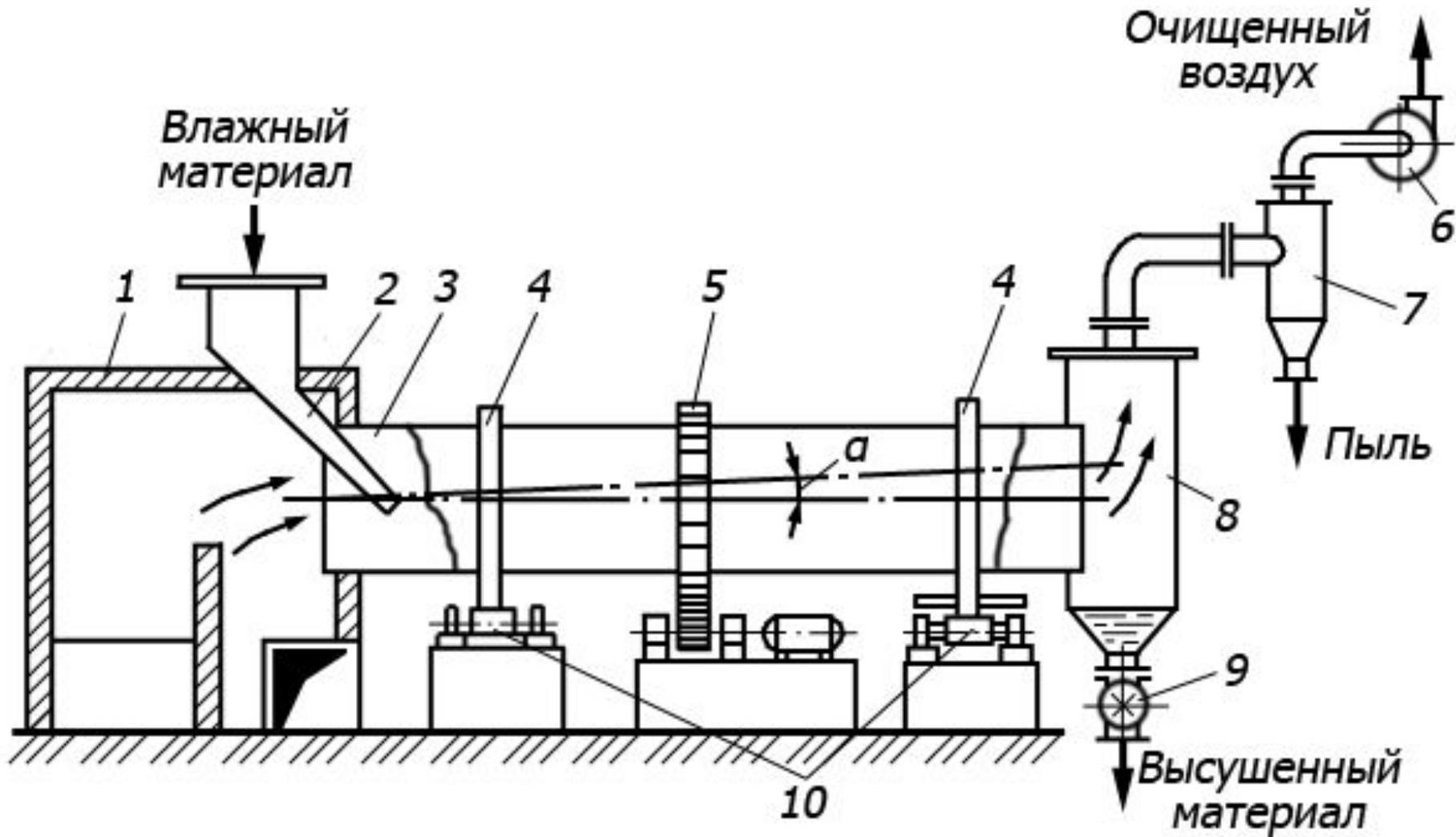
Барабанные сушилки применяются для сушки семян подсолнечника (одно- и двухбарабанные), зерна (СЗСБ-8), сахара-песка (СБУ-1), молочного сахара (СБА-1), отжатого жома (А2-ПСА), витаминной муки (АВМ) и других сыпучих материалов.

Основной характеристикой сушильного барабана является его влагонапряжение по испаренной влаге $A = 6...44 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$, величина которого зависит от степени заполнения и частоты вращения барабана, теплофизических свойств и размеров продукта, а также от температуры, влажности и скорости движения сушильного агента.

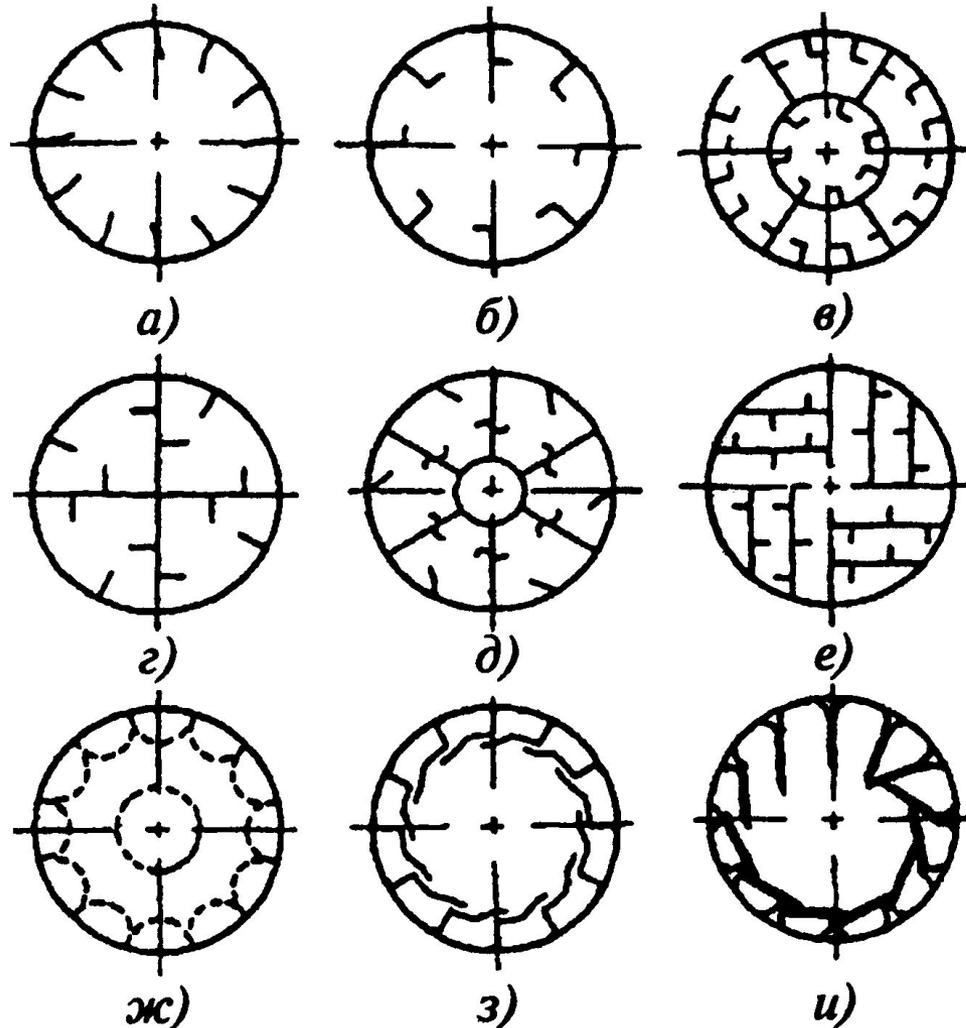
Основным элементом барабанных сушилок является горизонтальный или наклонный (под углом $\alpha = 3...50^\circ$) вращающийся цилиндрический барабан, внутри которого перемещается по длине, перемешивается и сушится сыпучий продукт.

Барабан приводится во вращение при помощи зубчатого венца, надетого на него. Венец находится в зацеплении с зубчатым колесом редуктора. Частота вращения барабана 1...8 мин-1.

Диаметр барабана зависит от производительности сушилки и составляет 600...2800 мм.

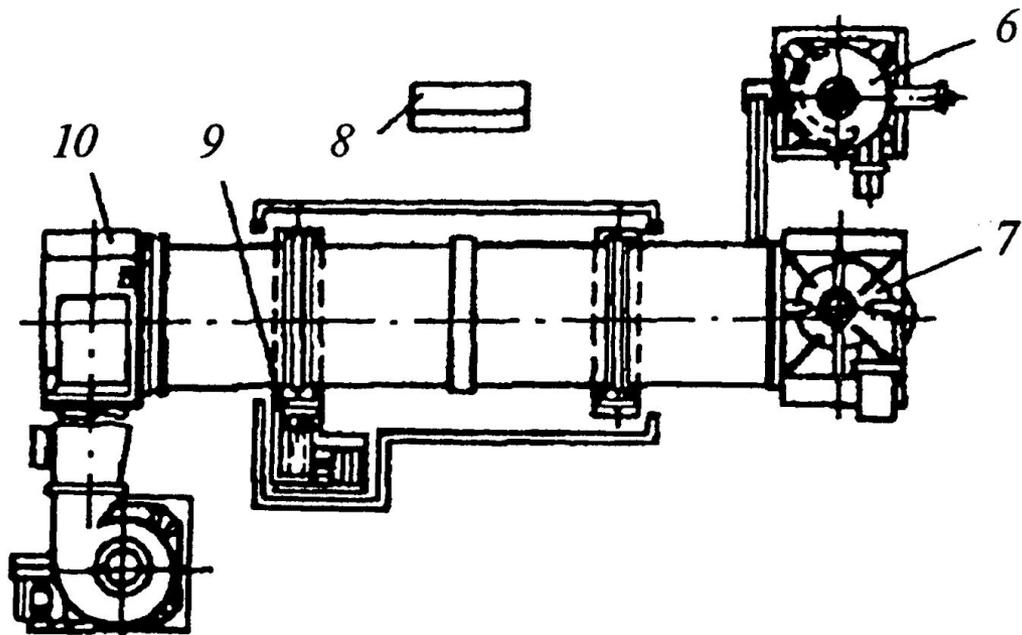
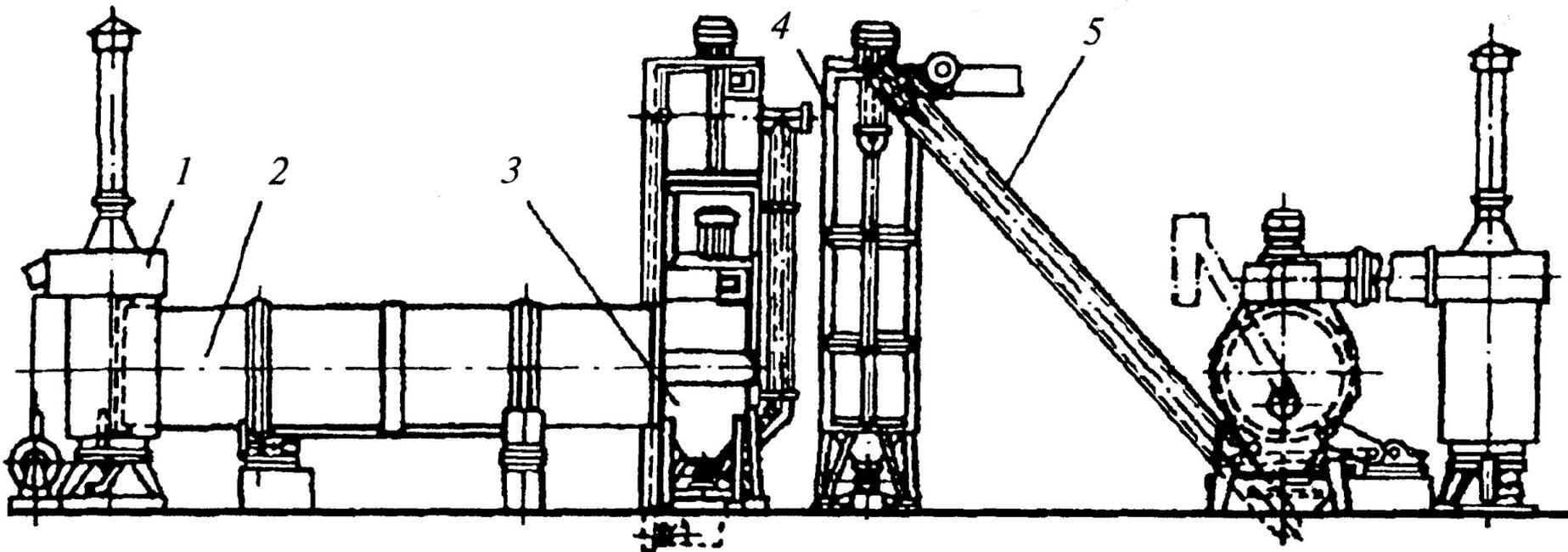


1 – топка; 2 – бункер; 3 – барабан; 4 – бандажы;
 5 – зубчатое колесо; 6 – вентилятор; 7 – циклон;
 8 – приемный бункер; 9 – шлюзовый питатель;
 10 – опорные ролики.



Внутри барабана установлены различного типа насадки, способствующие повышению эффективности процесса сушки. Конструкции насадок (внутренних устройств) выбираются в соответствии с требованиями технологического процесса (подъемно-лопастные – а, б, в; распределительные – д, е; концентрические – в, з; перфорированные – ж, ж; канальные – ж, з и и др.). Влажный материал поступает в сушилку через питатель. При вращении барабана материал движется. Теплоносителем являются топочные газы.

Сушильные газы и материал могут двигаться прямотоком или противотоком. При прямотоке удастся избежать перегрева материала, так как при этом горячие газы взаимодействуют с материалом высокой влажностью. Чтобы исключить большой унос пыли, газы просасываются через барабан вентилятором со скоростью 2...3 м/с. Перед выбросом в атмосферу отработанные газы очищаются в циклоне.



В барабанной зерносушилке СЗСБ-8 сушат зерновые культуры любой степени влажности и засоренности без предварительной очистки. Сушильный барабан шестисекционный с подъемно-лопастной системой внутренних устройств. В передней (конусной) части барабана шесть винтовых дорожек, подводящих материал к секторам.

Сушильный барабан заканчивается конусным патрубком, к наружному фланцу которого присоединено съемное подпорное кольцо с шестью люлькам, и имеет два бандаж, которыми опирается на металлические ролики, приводящие барабан в движение за счет приводного механизма 9. Зерно выгружается непрерывно при помощи шлюзового затвора разгрузочной камеры 3 и разгрузочного элеватора 5.

Охлаждающая колонка 4 вертикальная, образована из двух концентрических цилиндров, нижняя часть которой перфорирована, верхняя – сплошная. Кольцевое пространство между цилиндрами служит емкостью для зерна, в которой происходит охлаждение. К верхней части внутреннего цилиндра присоединен всасывающий патрубок вентилятора 6, который отводит отработанный воздух. Агент сушки, выходя из топки 1 и проходя через барабан 2, оmyивает сыпавшийся с пола материал, высушивает его и отводится вентилятором 7

Зерносушилка работает под разрежением во избежание утечки агента сушки через неплотности. Сочленение вращающегося барабана с загрузочной и разгрузочной камерами осуществляется через скользящие лабиринтовые уплотнения. Регулирование пропускной способности зерносушилки осуществляется с пульта управления 8.

Техническая характеристика: производительность по пшенице – до 8 т/ч; установленная мощность 28,2 кВт; расход условного топлива 95 кг/ч; испарительная способность – 560 кг испаренной влаги в час.

Расчет производительности и энергозатрат. Уравнение, связывающее основные параметры работы сушилки с вращающимся барабаном, имеет вид:

$$G = (4/3) \cdot \pi \cdot n(\phi + \psi \cdot \cos \alpha) / \sin \alpha (R^2 - r^2)^{3/2},$$

где: G – объемная пропускная способность барабана, м³/с;

n – частота вращения барабана, с⁻¹;

ϕ – угол наклона барабана, рад;

ψ – угол наклона материала к оси барабана, рад;

α – угол естественного откоса сыпучего продукта, рад;

R – внутренний радиус барабана, м;

r – радиус, касающийся слоя материала, м.

Производительность барабанной сушилки по готовому продукту, кг/ч :

$$P = 2 \cdot V_{\Pi} \cdot \rho / \tau,$$

где: V_{Π} – объем продукта, находящегося в барабане, м^3 ;

ρ – насыпная плотность продукта, кг/м^3 ;

τ – время пребывания сыпучего продукта в барабане, с.

Частота вращения барабана n (с^{-1}) при заданном угле наклона барабана φ равна:

$$n = k \cdot L / (\tau \cdot D \cdot \text{tg} \phi),$$

где: k – эмпирический коэффициент; L , D – длина и диаметр барабана, м.

Мощность N (кВт) электродвигателя привода барабана

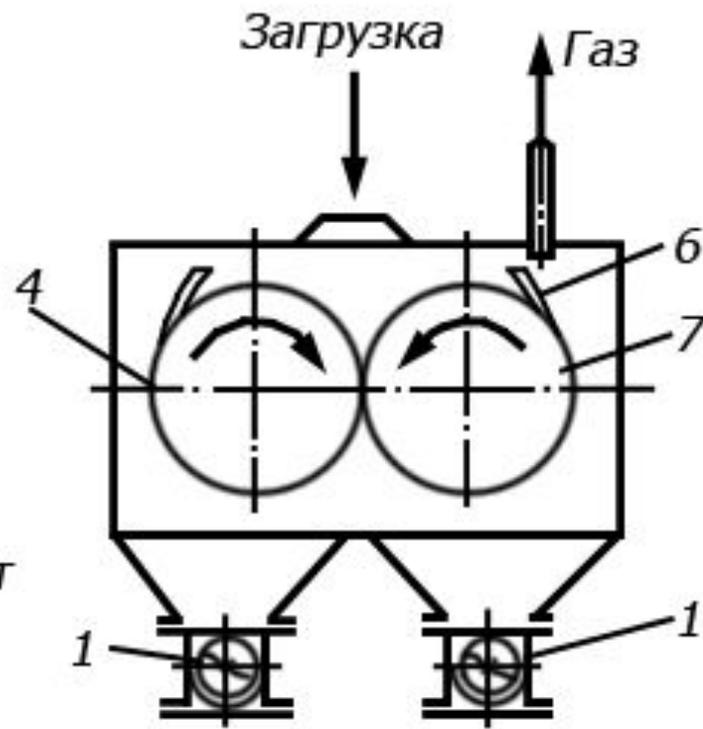
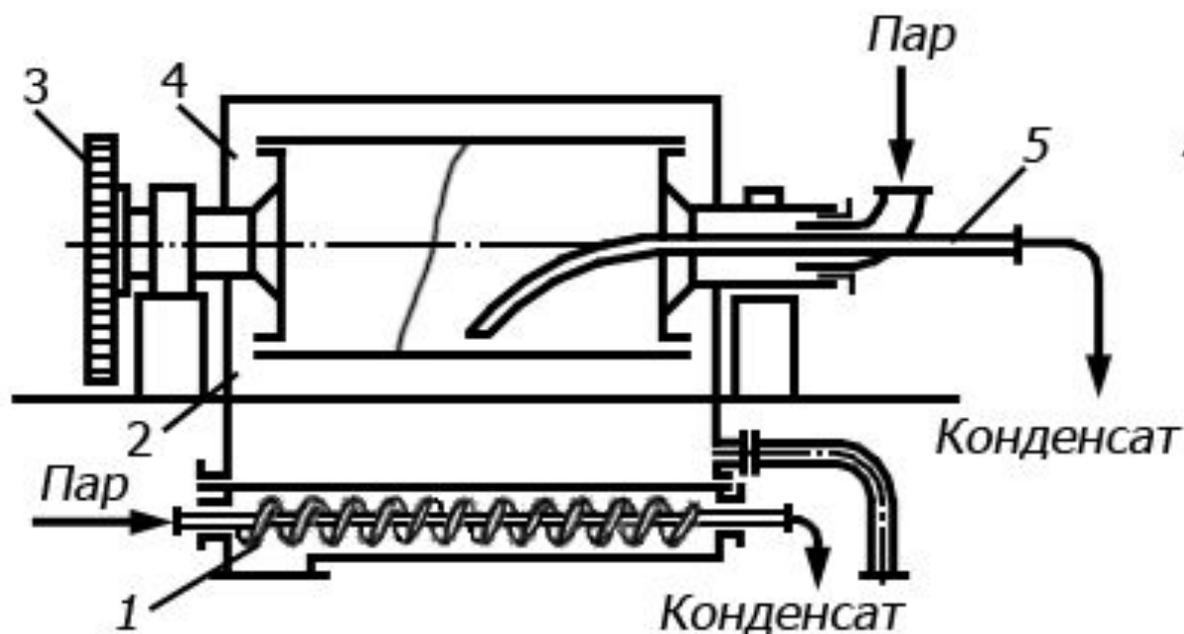
$$N = 0,078 \cdot D^3 \cdot L \cdot \rho \cdot k_3 \cdot n,$$

где: k_3 – коэффициент, зависящий от вида насадки и степени заполнения барабана;

ВАЛЬЦОВЫЕ СУШИЛКИ

Вальцовые сушилки предназначены для сушки жидких и пастообразных материалов (казеин, лактоза, кормовые дрожжи, различные пасты и другие материалы). Греющий пар поступает в вальцы, вращающиеся навстречу друг другу. Один из барабанов находится в подвижных подшипниках, что позволяет регулировать зазор между барабанами, а, следовательно, и толщину пленки высушиваемого материала.

- 1 – досушиватель;
- 2 – корпус;
- 3 – привод;
- 4 – ведущий валец;
- 5 – сифонная трубка;
- 6 – нож;
- 7 – ведомый валец.



Расчет производительности и энергозатрат. Производительность вальцовой сушилки Π (кг/с)

$$\Pi = \pi \cdot D_B \cdot h \cdot n \cdot \delta \cdot \rho,$$

где: D_B – диаметр вальцов, м;

h – ширина слоя продукта на вальцах, м;

n – частота вращения вальцов, с^{-1} ;

δ – толщина слоя продукта на вальцах, м;

ρ – плотность продукта, кг/м^3 .

Мощность привода вальцовой сушилки (кВт)

$$N = \frac{\delta \cdot D_B \cdot n \cdot P \cdot L \cdot z \cdot (1 + \mu \cdot \text{tg } \alpha)}{1000 \cdot \eta},$$

где: P – сила, потребная для срезания слоя на 1 м длины ножа, Н/м ($P = 300$ Н/м); L – длина вальца, м ($L = 1$ м); z – число вальцов ($z = 2$); μ – коэффициент трения ножа о вальцы ($\mu = 0,18$); α – угол наклона ножа к касательной вальца ($\alpha = 30 \dots 45^\circ$); η – КПД передачи ($\eta = 0,8 \dots 0,85$).

ЛЕНТОЧНЫЕ КОНВЕЙЕРНЫЕ МНОГОЯРУСНЫЕ СУШИЛКИ

Ленточные многоярусные конвейерные сушилки применяют для сушки макаронных изделий, сухарей, фруктов, овощей, крахмала и др. Число конвейерных лент может достигать пяти.

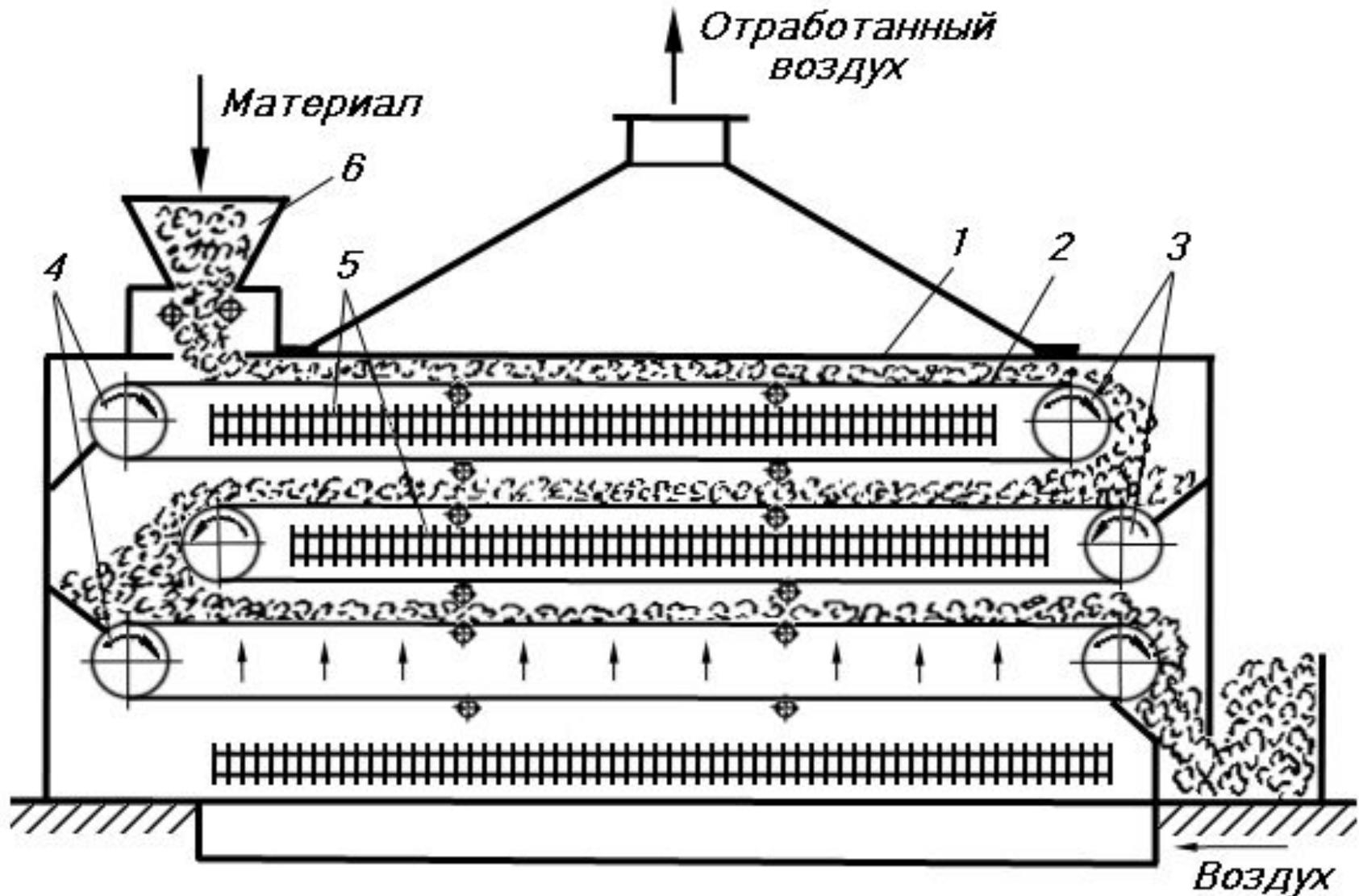
Каждый транспортер ленточной сушилки имеет индивидуальный привод, свободное сечение сетчатой ленты транспортера порядка 50%. Между ветвями транспортеров расположены калориферы – трубчатые ребристые подогреватели, обогреваемые паром. Воздух в сушилку подается вентилятором и проходит перекрестным по отношению к материалу потоком через ленты транспортеров. Отработанный воздух удаляется через зонт в трубу в верхней части сушилки. Скорость движения ленты транспортера регулируется вариатором в пределах 0,1...0,7 м/мин.

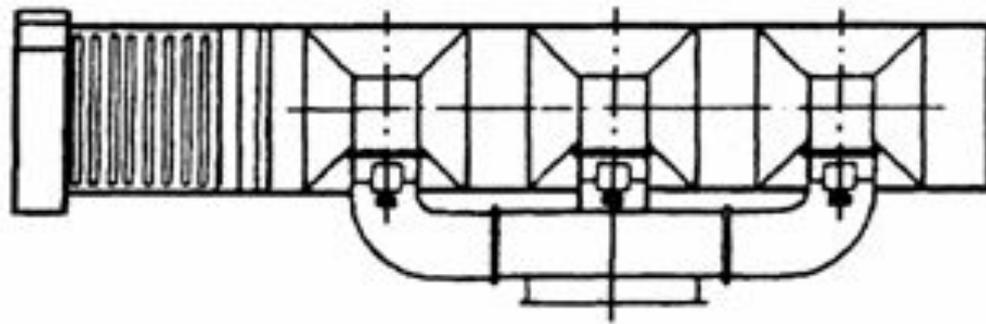
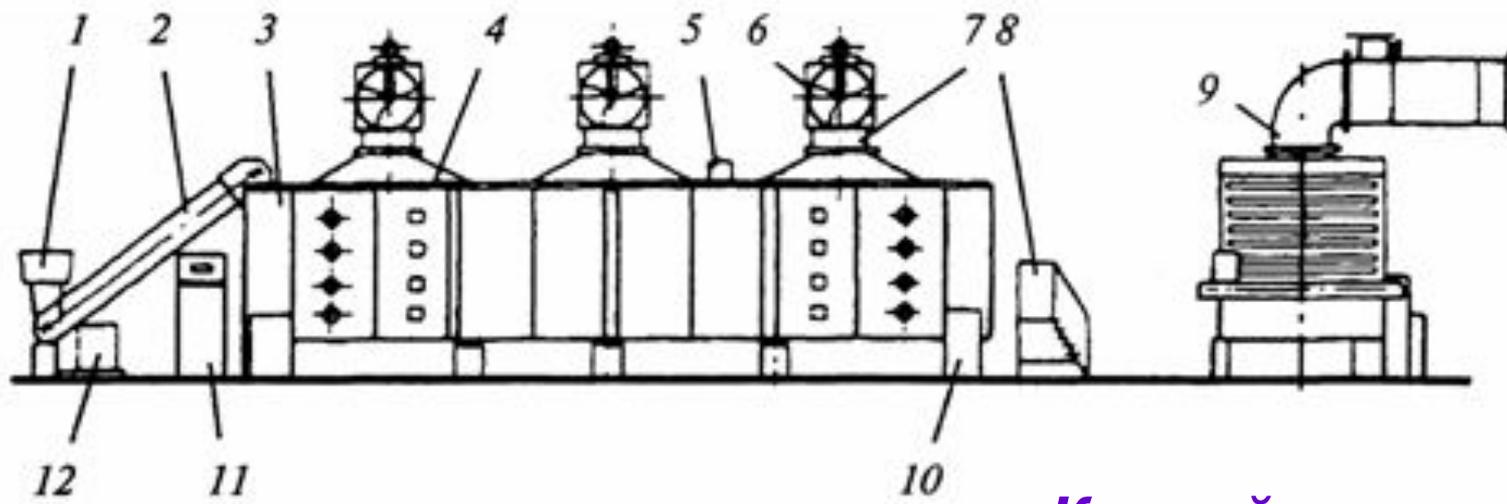
К конвейерным сушилкам относятся:

- Г4-КСК-90 (для сушки картофеля и овощей),**
- СКО-90 (для сушки овощей и фруктов),**
- СПК-4Г и ЛС-2А (для сушки короткорезанных и длинных макаронных изделий),**
- 4СП (для сушки скрученного чайного листа) и др.**

ЛЕНТОЧНАЯ СУШИЛКА

- 1 – корпус; 2 – ленточный конвейер; 3 – ведущие барабаны;
4 – ведомые барабаны; 5 – калориферы;
6 – бункер с загрузочным устройством.





Конвейерная ленточная сушилка Г4-КСК-90 имеет сварной металлический корпус 3, внутри которого расположены пять ленточных транспортеров.

Продукт загружается транспортером 2 на верхнюю ленту, последовательно перемещается с одной ленты на другую сверху вниз и выходит с нижней ленты со стороны, противоположной месту загрузки продукта в сушилку. На транспортере установлен раскладчик 1 скребкового типа, который приводится в движение от автономной приводной станции 12.

Для нагрева воздуха между линиями транспортера установлены подогреватели с собственным подводом пара и отводом конденсата. Воздух поступает под нижнюю ленту, а затем последовательно проходит через подогреватели и все вышерасположенные ленты. Влажный воздух удаляется через вытяжные камеры 4 с помощью осевых вентиляторов 6 через воздуховоды 9. Вытяжные камеры снабжены клапанами 7 для регулирования отвода сушильного агента. Для перемешивания продукта с целью равномерной сушки и предотвращения слипания в начале верхнего ленточного конвейера установлен ворошитель-разравниватель, приводимый в движение от автономного привода 5.

Для привода ленточных конвейеров сушильной камеры служат две станции 10, одна приводит в движение первый, третий и пятый, а другая – второй и четвертый конвейеры. Для удобства обслуживания сушилка комплектуется лестницей 8, а также предусмотрен щит управления 11.

Техническая характеристика: производительность по сухому картофелю – 0,046 кг/с; производительность по испаренной влаге – 670 кг/с; площадь рабочей поверхности – 90 м²; ширина ленты – 2 м; число конвейеров – 5; скорость движения конвейера – 0,1...0,6 м/мин; общая площадь поверхности подогревателей – 1465 м²; общий расход пара 2400 кг/с; мощность электродвигателей – 14,7 кВт.

Расчет производительности и энергозатрат. Масса высушенного продукта, выходящего из ленточной сушилки Π (кг/ч) рассчитывается по формуле

$$\Pi = G \left[\frac{100 - u_1}{100 - u_2} \right],$$

где: G – пропускная способность по влажному продукту, кг/ч;
 u_1 и u_2 – начальная и конечная влажность продукта, %.

Расход пара на сушку D (кг/с) рассчитывается по формуле

$$D = Q / (i - i_K),$$

где: Q – расход теплоты в воздухоподогревателе, Дж/кг;
 i и i_K – энтальпия греющего пара и конденсата, Дж/кг.

Камерные сушилки - конвективные сушилки периодического действия (корпус, внутри которого находятся вагонетки). На полках вагонеток размещают влажный материал (сухари, овощи, фрукты, макароны и т.п.). Подогретый в калорифере теплоноситель нагнетается в сушилку вентилятором и пронизывает слой материала снизу вверх. Они применяются в малотоннажных производствах для сушки материалов при невысоких температурах в мягких условиях. Имеют низкую производительность и отличаются неравномерностью сушки материала.

Непрерывнодействующие туннельные сушилки применяются для сушки тех же продуктов, что и камерные. Сушилки представляют собой удлиненный прямоугольный корпус, в котором по рельсам перемещаются тележки с материалом, расположенным на полках. Сушильный агент подается вентилятором через калорифер в сушильную камеру. Перемещение тележек происходит с помощью толкателя. Сушилка имеет самоотворяющиеся двери. Горячий воздух взаимодействует в сушилке с материалом в прямотоке либо в противотоке, в ряде случаев осуществляется рециркуляция воздуха и его промежуточный подогрев в сушильной камере. Калориферы и вентиляторы могут устанавливаться на крышке сушилки, сбоку или в тоннеле под сушилкой. Отработанный воздух из выбрасывается через газоход.

АГРЕГАТЫ С КИПЯЩИМ И ВИБРОКИПЯЩИМ СЛОЯМИ

Используются для сушки различных мелкозернистых продуктов. Внутри сушилок на одной или нескольких ступенчатых решетках продукт высушивается в кипящем или виброкипящем состояниях. Для обеспечения равномерного кипения частиц продукта сушильный агент подается под решетку равномерно и с соответствующей скоростью распределяется по всей площади. Сушка в виброкипящем слое характеризуется высокой интенсивностью, но сопряжена с повышенным расходом электроэнергии и высокими зарядами статического электричества.

Агрегаты с кипящим слоем могут иметь:

- прямоугольную;**
- цилиндрическую;**
- коническую форму.**

Кипящий слой бывает:

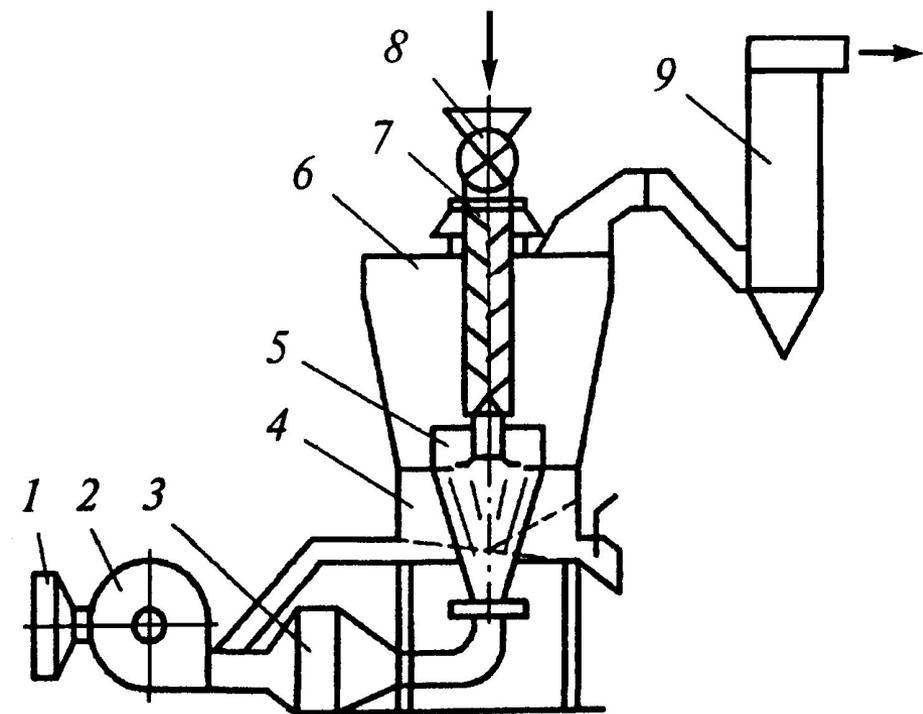
- фонтанирующий;**
- вихревой;**
- локально фонтанирующий.**

По способу теплоотвода конструкции агрегатов можно разделить на:

- агрегаты с подводом теплоты только с псевдоожигающим агентом;**
- с перегретым распыливаемым расстрвом;**
- кондуктивно – через теплообменник в слое.**

Сушилки РЗ-0СС применяются для сушки молочного сахара, сушилки А1-КВР-12 – для сушки круп и хлебопекарных дрожжей, сушилки А1-ОГК – для сушки казеина, установки А1-ФМУ – для сушки меланжа.

Сушилка РЗ-0СС состоит из сушильной камеры 6, виброколонки для подсушивания продукта 7, зоны 5 интенсивной сушки, зоны 4 охлаждения. Продукт загружается питателем 8, выгружается через выпускное устройство в нижней части охладителя. Воздух засасывается вентилятором 2 через фильтр 1 из атмосферы, нагнетается в калорифер 3 и отводится через скруббер 9.

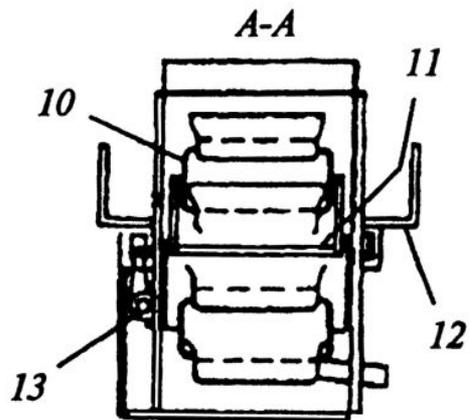
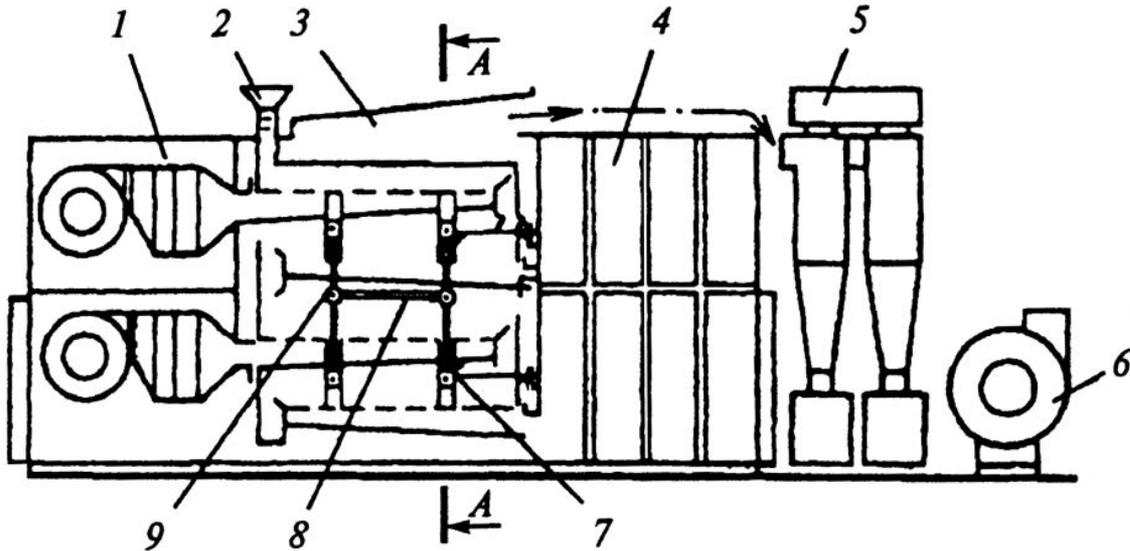


Молочный сахар питателем подается в виброподсушиватель 7, затем попадает в зону сушки и далее в зону охлаждения. Техническая характеристика: производительность по сухому продукту влажностью 3% – 200...250 кг/ч; начальная влажность продукта 10...13%; расход пара – 50 кг/ч; установленная мощность – 8,3 кВт.

Сушилка А1-ОГК с

вертикальной вибрацией

содержит сушильную камеру 3 с питателем 2 для подвода исходного сырья, калориферно-вентиляционные станции первого и третьего коробов 1 и второго и четвертого коробов 4, циклонную



установку 5 и отсасывающий вентилятор 6. Вибропривод 8 сушильной установки расположен между вторым и третьим коробами сушилки. Короба попарно крепятся стяжками 10. Эксцентровые валы снабжены маховиками, установленными в подшипниках и при помощи двух пар эксцентриков (сдвинутых по фазе на 180°) шатунов 9 и пальцев передают вибрацию парам коробов, соединенных с

пластинчатыми и роликовыми направляющими 7, благодаря чему обеспечивается. Обслуживающие площадки 12 вынесены наружу, а стенки сушильной камеры приближены к стенкам коробов. Шатуны снабжены резинометаллическими шарнирами, что повышает надежность работы соединений.

Производительность и энергозатраты. Средний объемный расход воздуха в сушилке, м³/ч $L = F \cdot V$,

где: F – площадь газораспределительной решетки аппарата, м²;

V – средняя скорость сушильного агента в аппарате, м/с.

Теплота, полезно используемая в сушилке, кДж/ч

$$Q = 3,6 \cdot S \cdot \alpha \cdot \Delta t,$$

где: S – поверхность дисперсного продукта в сушилке, м²;

α – коэффициент межфазового теплообмена, Вт/м²·К;

Δt – средний температурный напор теплоносителя, °С.

Производительность сушилки, кг/ч

$$\Pi = [d / (\varphi \cdot (1 - \varepsilon) \cdot V)] \cdot S,$$

где: d – средний диаметр частиц продукта, м;

φ – коэффициент формы частиц продукта;

ε – средний коэффициент порозности слоя ($\varphi = 0,55 \dots 0,7$);

V – объем слоя высушиваемого продукта, м³.

ВАКУУМ-СУБЛИМАЦИОННЫЕ СУШИЛКИ

Обезвоживание пищевых продуктов в глубоком вакууме производится при остаточном давлении в сушильной камере 13,3...133,3 Па (0,1...1,0 мм.рт.ст.). При этом давлении сублимационная сушка протекает при отрицательных температурах, а вода находится в состоянии льда. Процесс сублимации льда и десублимации паров воды происходит при давлении и температуре ниже тройной точки фазового равновесия воды, которой соответствует температура 0,098°C и парциальное давление водяных паров 613,2 Па (4,58 мм.рт.ст.).

При сублимационной сушке продукты сначала быстро замораживают, а потом помещают в вакуумную камеру, где производится откачка давления остаточных газов до 2,7...8,0 Па. В вакууме происходит интенсивное испарение льда с поглощением теплоты. Испаряемая влага не откачивается насосами, а конденсируется на десублиматорах, охлаждаемых до температуры ниже -55°C.

При сушке сублимацией в период охлаждения и самозамораживания (первый период) испаряется 5...20% влаги, в период сушки сублимацией (второй период) из продукта в замороженном состоянии удаляется 75...80% влаги, тепловой сушкой (вакуумная досушка) удаляется 5...15% влаги. Продолжительность сублимационной сушки длительная и колеблется 8...20 ч (в зависимости от режима сушки).

Сублимационная сушилка периодического действия.



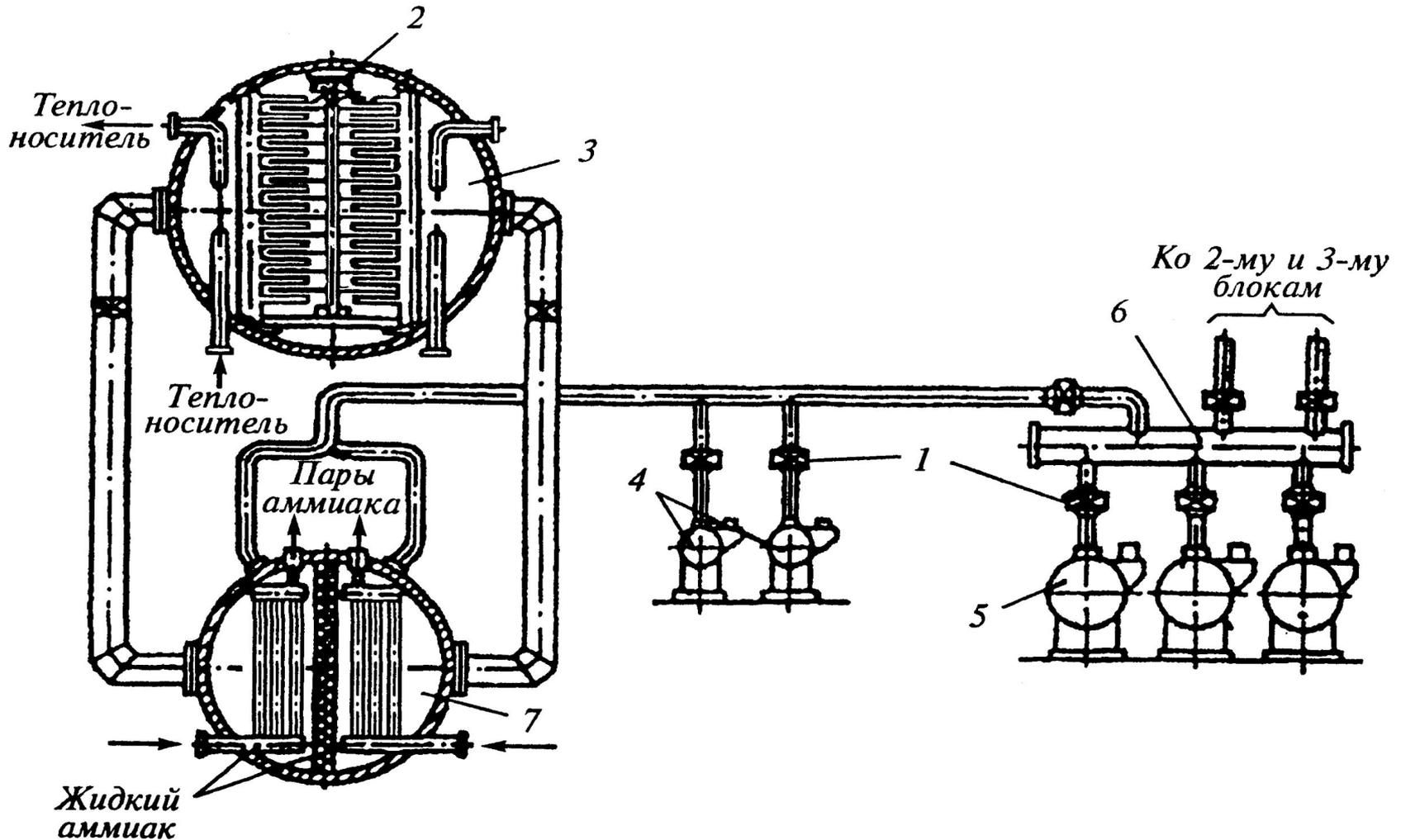
Применяются для сушки ценных пищевых продуктов с высокими требованиями в отношении хранения.

Сушилка состоит из сушильной камеры (сублиматора) 1, в которой расположены пустотелые плиты и конденсаторы вымораживатели 4. В плитах 2

циркулирует горячая вода. Высушиваемый материал размещается на плитах 2 в противнях со специальными бортиками 3, которые обеспечивают воздушную прослойку между плитами и противнями. Паровоздушная смесь из сублиматора поступает в конденсатор-вымораживатель – кожухотрубный теплообменник, в межтрубном пространстве которого циркулирует хладагент – аммиак.

Конденсатор-вымораживатель включается в циркуляционный контур с испарителем аммиачной холодильной установки, и соединяется с вакуум-насосом, предназначенным для откачивания несконденсировавшихся газов. В трубах конденсатора происходят конденсация и вымораживание водяных паров. Сушилки имеют два поочередно работающих конденсатора. В то время как в одном конденсаторе происходит конденсация и замораживание, другой размораживается для удаления льда.

Вакуум-сублимационная установка УСС-5 предназначена для сушки пищевых продуктов широкого ассортимента (творог с фруктовыми добавками, лук репчатый, шампиньоны, закусочные блюда, соки, напитки, первые и вторые кулинарные готовые блюда и др.) путем замораживания и последующего перехода в пар (минуя жидкую фазу) при нагревании под вакуумом.



Установка состоит из трех блоков-модулей, каждый из которых включает в себя сублиматор 3 и выносной десублиматор 7. Системы холодоснабжения, вакуумирования, подачи жидкого теплоносителя, автоматического контроля, регулирования и управления процессом являются общими для всей установки.

Сублиматор - цилиндрический горизонтально установленный корпус с полусферическими крышками на торцах, внутри которого размещены горизонтальные нагревательные элементы 2 в виде набранных в секции плит в количестве 256 шт, по которым циркулирует высокотемпературный органический теплоноситель – дефинильная смесь (ДФС). В сублиматор загружается восемь тележек, выполненных в виде двусторонних консольных этажерок, на которых помещаются противни с продуктами. Крышки сублиматоров всех трех блоков открываются при помощи гидропривода.

Десублиматор установки – выносного типа выполнен в виде горизонтального цилиндрического аппарата с вертикальной перегородкой, разделяющей его объем на две половины. В каждой из них размещены по четыре вертикальных трубных секции, рабочая поверхность которых позволяет удалить влагу в течении 1...2 циклов сушки. Жидкий аммиак подается последовательно в любую секцию. Предусмотрена возможность работы одной половины десублиматора в режиме оттаивания, а второй – в режиме вымораживания водяных паров. Оттаивание секций осуществляется путем заполнения водой соответствующего объема десублиматора.

Каждый из отсеков соединен с сублиматором двумя вакуум-приводами диаметром 1200 мм, с установленными на них вакуумными затворами.

Вакуум-насосная станция включает три насоса 5, работающих только в пусковой период, три основных и три резервных насоса 4, вакуумный коллектор 6, группу вакуумных затворов 1, обеспечивающих возможность работы насосов 4 и 5 на один блок и на всю систему.

Система холодоснабжения включает пять аммиачных двухступенчатых агрегатов общей холодо производительностью 3142500 кДж/ч. Каждый агрегат комплектуется компрессором с электродвигателем. Питание жидким аммиаком потребителей холода предусмотрено аммиачно-циркуляционной системой с нижней подачей жидкого аммиака.

Техническая характеристика:

загрузка – 2700...3900 кг; продолжительность цикла сушки – 10...15 ч; количество циклов в сутки – 2; производительность по сухому продукту – 1,5 т/сут; температура нагревателей – 180°C; рабочая площадь поверхности десублиматора – 176 м²; рабочее давление в сублиматоре – 60 Па; установленная мощность 310 кВт.

Расчет производительности и энергозатрат. Общее количество влаги, удаленной из продукта за время сублимационной сушки $W_{об}$ (кг), определяется как

$$W_{об} = G_1 (1 - n/m) = G_2 (u_1 - u_2) / (100 - u_2),$$

где: G_1 – масса загружаемого продукта, кг;

G_2 – масса сухого продукта, кг;

n и m – начальное и конечное содержание сухих веществ в продукте, %;

u_1 и u_2 – начальная и конечная влажность продукта, %.

Количество влаги, испарившейся в период самозамораживания W_1 (кг), рассчитывается по формуле

$$W_1 = [W_{об} \cdot C_{ж} (t_1 - t_0) + W \cdot C_a (t_0 - t_2) + W \cdot r_n + G_2 \cdot C_0 (t_1 - t_2)] \cdot r_{исх}.$$

где: $C_{ж}$, C_a и C_o – соответственно теплоемкость влаги, льда и сухого продукта, Дж/(кг·К);

t_0 , t_1 и t_2 – температура затвердевания, начальная и конечная температура продукта, К;

W' – количество самозамораживающейся влаги при температуре -15°C , кг ($W' = 0,8 W_{об}$);

r_m и $r_{исп}$ – теплота плавления льда и испарения при средней температуре продукта, Дж/кг.

Количество влаги, испарившейся в период сушки сублимацией W_2 (кг), составляет

$$W_2 = (0,75 \dots 0,85) \cdot W_{об}.$$

Количество влаги, удаляемой в период вакуумной сушки W_3 (кг), равно

$$W_3 = W_{об} - (W_1 + W_2).$$

Расход теплоты за время сублимации и период тепловой сушки Q (Дж)

$$Q = W_2 \cdot r_c + W_3 \cdot r_{исп},$$

где: r_c – теплота сублимации, Дж/кг.

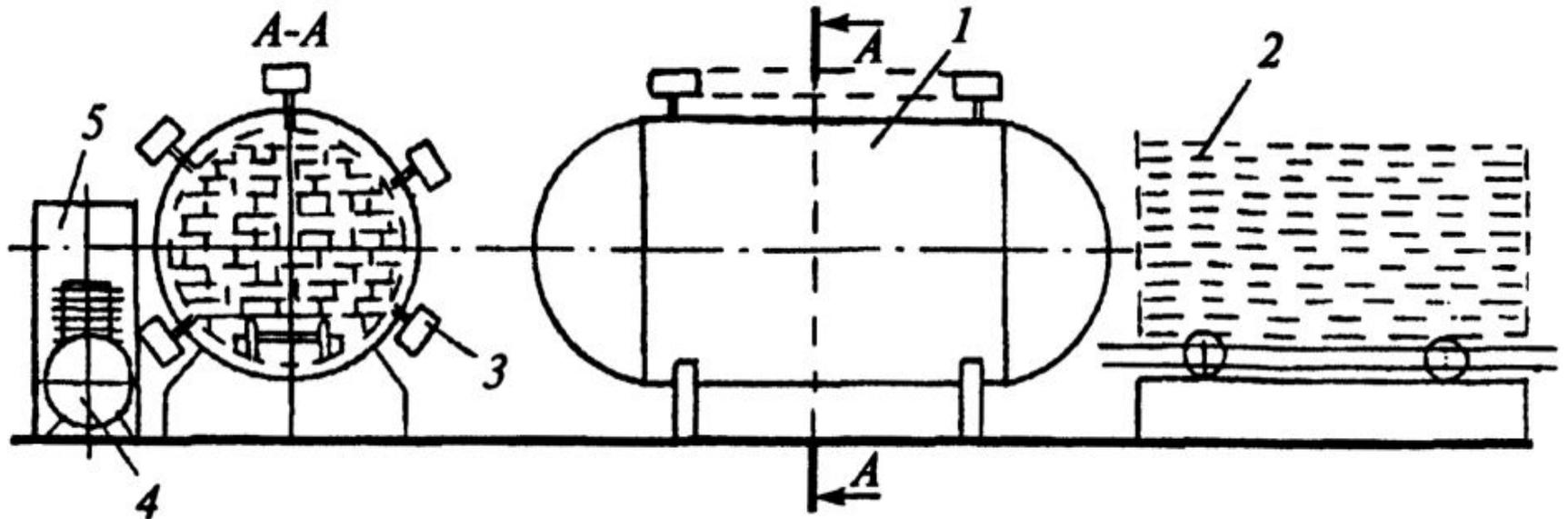
Микроволновые сушильные установки

Все пищевые продукты – диэлектрики, имеющие высокую диэлектрическую проницаемость и низкую электропроводность. Поэтому пищевые среды могут подвергаться диэлектрическому нагреву, связанному с дипольной поляризацией. Эффекты поляризации в переменных высокочастотных электромагнитных полях связаны с затратой энергии поля, поскольку непрерывное изменение направления поляризации сопровождается выделением тепловой энергии в веществе.

Диэлектрический нагрев пищевых сред и их обезвоживание наиболее эффективны в СВЧ-диапазоне электромагнитных волн длиной 0,3...0,003 м. Для промышленного применения микроволновой сушки пищевых продуктов разрешено использование СВЧ-диапазона волн с частотами 915 ± 25 и 2450 ± 50 МГц. Причем для различных пищевых материалов глубина проникновения электромагнитной волны зависит от её частоты, диэлектрической проницаемости и тангенса угла магнитных потерь.

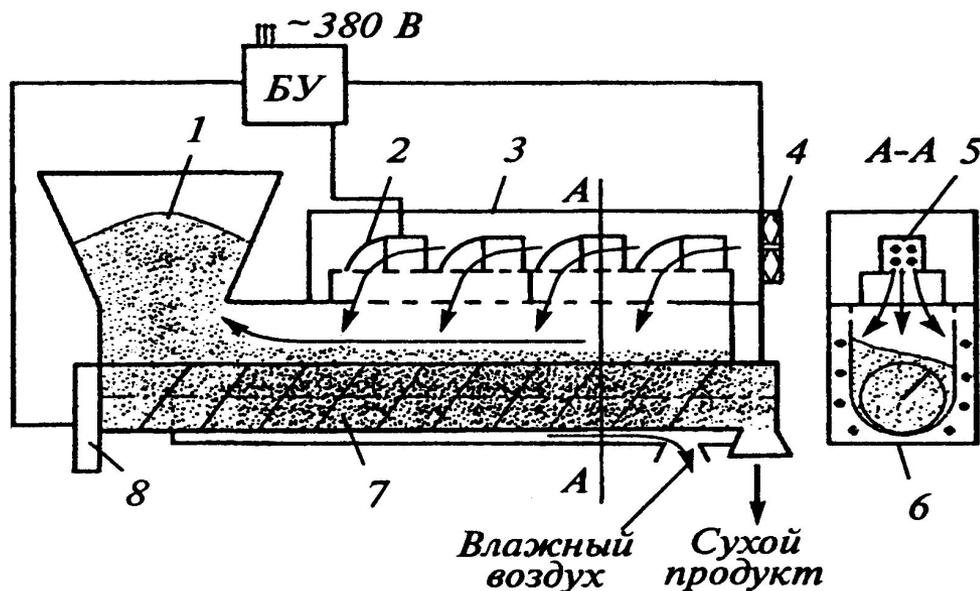
Микроволновая вакуумная барабанная сушилка сушит штучные материалы, где удаление влаги производится с помощью градиента давления, температурного градиента и градиента влагосодержания. При этом кипение воды в материале достигается при температуре $50...60^{\circ}\text{C}$. Установка состоит из сушильной камеры 1 барабанного типа, штабелирующего устройства 2, магнетронов 3 (расположенных на обечайке барабана), вакуум-насоса 4 и системы контроля и управления 5.

Техническая характеристика: производительность – $3,0 \text{ м}^3/\text{сут}$; объем загрузки – $3,0 \text{ м}^3$; объем рабочей камеры – $6,2 \text{ м}^3$; время сушки – $10...15 \text{ час}$; энергозатраты – $220 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$; мощность СВЧ-генератора – 34 кВт ; глубина вакуума – $0,06 \text{ МПа}$; установленная мощность – 70 кВт .



Микроволновая шнековая сушилка предназначена для сушки сыпучих материалов (зерно, крупы и др.). Установка состоит из корпуса 6, внутри которого размещен шнек 7, приводимый во вращение от привода 8. Над шнеком 7 размещены магнетроны 5, обеспечивающие микроволновое воздействие на движущийся продукт и состоящие из воздуховода магнетрона 2 и внешнего воздуховода 3. На выходе корпуса 6 размещен вентилятор 4, продувающий движущийся слой высушиваемого продукта. На входе установлена загрузочная камера 1 и блок управления.

Техническая характеристика: производительность 200...250 кг/ч; влажность продукта, начальная – 10...12%, конечная – 5...6%; потребляемая мощность – 15,0 кВт.



Определение энерготрат. Удельная мощность P (Вт/м³), выделяемая в единице объема диэлектрика (пищевого сырья), определяется по формуле

$$P = 0,555 \cdot 10^{-10} \cdot \varepsilon'' \cdot f \cdot E^2,$$

где: ε'' – фактор потерь, равный произведению относительной диэлектрической проницаемости вещества ε' на тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta$; f – частота электромагнитного поля, Гц; E – напряженность электромагнитного поля, Вт/м.

Длина волны λ (м) рассчитывается по формуле

$$\lambda = c / f \sqrt{\varepsilon' \cdot \mu},$$

где: c – скорость света в вакууме, м/с; ε' и μ – относительная диэлектрическая и магнитная проницаемость среды.

Глубина проникновения электромагнитного поля Δ (м) в пищевой продукт определяется по формуле

$$\Delta = 9,55 \cdot 10^7 / (f \sqrt{\varepsilon' \cdot \operatorname{tg} \delta}).$$

Распылительные сушилки

Используются для сушки жидких и пастообразных продуктов (молоко, меланж, соки, экстракты, ферменты, витамины и др.). По способу распыления они подразделяются на дисковые и форсуночные. Вследствие распыления продукта на мелкие частицы в этих аппаратах создается большая поверхность контакта продукта с горячим воздухом, при этом процесс сушки протекает в течении нескольких секунд, а продукт при высушивании находится во взвешенном состоянии.

Распыление может осуществляться с помощью:

- гидравлических (механических);**
- пневматических форсунок;**
- центробежных (дисковых) распылителей.**

Механические форсунки работают по принципу истечения из отверстия струи жидкости, подаваемой в форсунку под давлением 2...20 МПа ($P > 4000$ кг/ч). Достоинства механических форсунок – простота изготовления и обслуживания, низкие энергозатраты на распыление, невысокие эксплуатационные расходы. Основной недостаток – трудность регулирования производительности и ненадежная работа при распылении суспензий, вследствие забивания канавок твердыми частицами и эрозионного износа сопла.

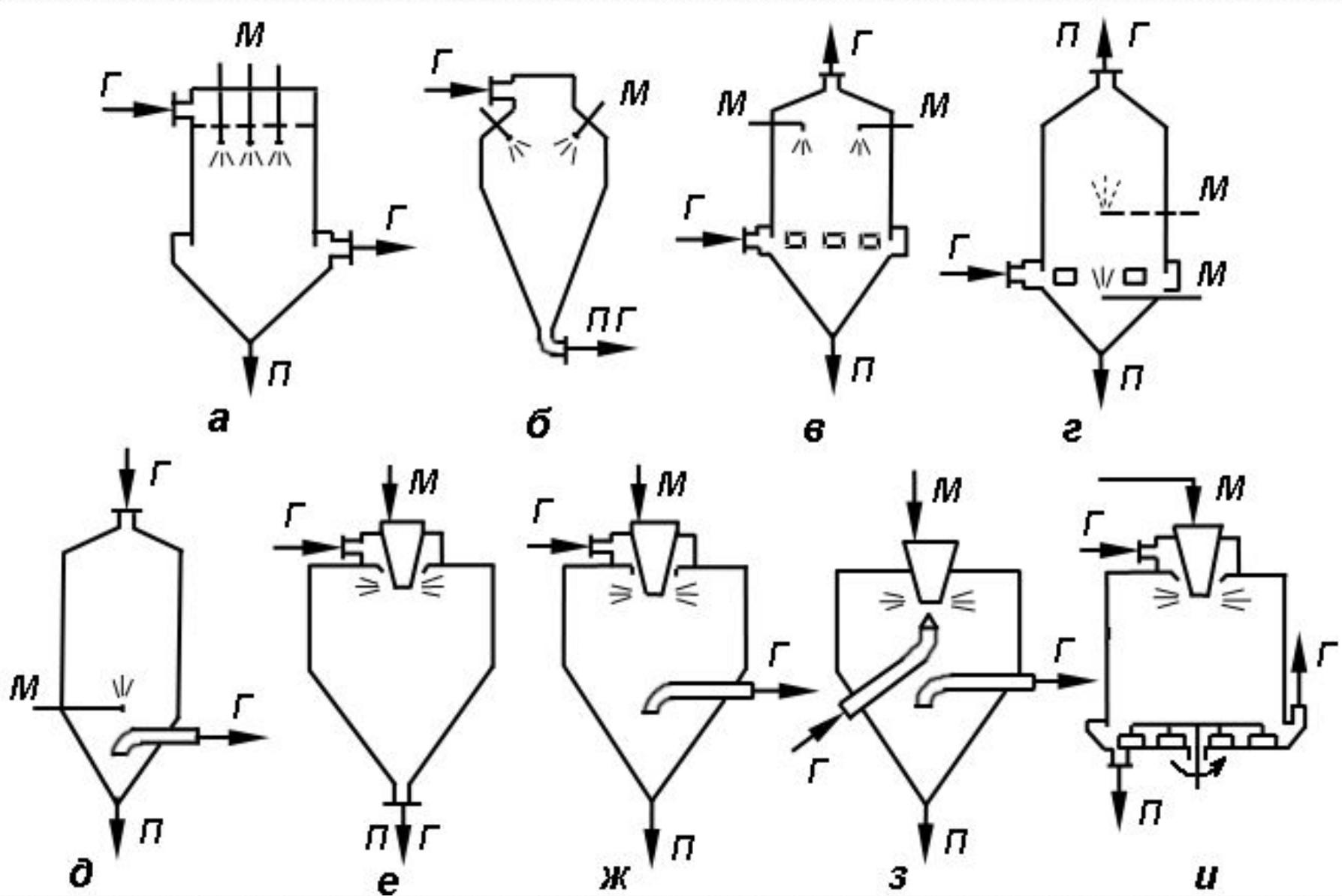
Для уменьшения эрозионного износа применяются сопловые вкладыши из твердого материала (карбида, вольфрама, рубина, сапфира). В высокопроизводительных форсунках с соплом большего диаметра эрозионный износ мало влияет на показатели работы. Механические форсунки непригодны для распыления высоковязких растворов и паст.

Пневматические форсунки работают по принципу распыления жидкости высокоскоростной струей газа или пара, подаваемого под давлением 0,1...1,0 МПа ($G=12000$ кг/ч). Они отличаются высокой универсальностью в отношении регулирования формы факелы, производительности, дисперсности распыла и возможностей распыления высоковязких паст и суспензий.

В центробежных дисках распыление жидкости происходит вследствие выброса её в виде пленки или струек в относительно неподвижный воздух. Частота вращения дисков – 4000...20000, но может достигать 50000 мин⁻¹ и более. По конструкции диски могут быть лопаточными и сопловыми диаметром от 50 до 350 мм. Производительность промышленных центробежных распылителей достигает 40000 кг/ч и более. Пневматические и механические форсунки могут быть установлены по одной или объединены в блоки (до 50 шт.). Центробежные распылители всегда устанавливаются по одному.

Схемы сушильных камер:

Г – газ; М – исходный материал; П – высушенный продукт.



Использование той или иной конструкции сушилки обусловлено технологическими требованиями и свойствами высушиваемого материала. Сушильные камеры бывают:

- 1) Прямоточные сушилки с форсуночным распылом и движением газа и материала сверху вниз с равномерным распределением газа и отдельным выводом газа и продукта (а).**
- 2) Прямоточные сушилки с форсуночным распылом и движением газа и материала сверху вниз с тангенциальным подводом газа и совместный вывод отработанного теплоносителя и сухого продукта (б) (Н. При закручивании всего потока газа в камере возникают значительные перепады давлений с понижением давления в направлении к осевой линии и верхней части сушилки. Вследствие этого в камере создаются мощные циркуляционные потоки выносящие сухой продукт в зону высоких температур в верхней части камеры, где возможны перегрев и деструкция продукта).**
- 3) Сушилки с противоточным движением фаз (в), когда сушильный агент движется снизу вверх, а диспергированный материал – сверху вниз. Такое движение потоков достигается при условии достаточно грубого распыла, обеспечивающего получение частиц, скорость витания которых превышает скорость газа. Противоток применяется для термостойких продуктов, когда требуется увеличить насыпную плотность порошка или совместить сушку и прокалку продукта или глубокой сушки материалов с трудноудаляемой влагой.**

4) Сушилка с восходящим прямотоком (з). При распылении материала происходит фракционирование частиц в восходящем потоке сушильного агента, причем мелкие частицы увлекаются вверх и удаляются из камеры вместе с отработанным теплоносителем, а крупные оседают на дно камеры. Средние по размерам частицы перемещаются сначала вниз, а после высушивания – вверх. Частицы, оседающие на дно камеры попадают в зону высоких температур и подвергаются тепловому воздействию таким же образом, как и в противоточных камерах. В результате все частицы подвергаются приблизительно одинаковому тепловому воздействию со стороны сушильного агента, что обеспечивает широкие возможности при сушке термолабильных продуктов.

5) Сушилка с движением распыленного материала осуществляется фонтанообразно навстречу подаваемому сверху сушильному агенту (д). При этом объем сушильной камеры используется дважды: при движении материала вверх (противоток) и при движении его вниз (прямоток). Таким образом, камеры данного типа обеспечивают максимальное время пребывания материала в зоне сушки и высокие напряжения камеры по испаренной влаге. Вследствие сепарации частиц различного размера мелкие частицы проходят меньший путь и быстрее покидают зону сушки. Тем самым достигается равномерная и интенсивная сушка материала, что особенно важно для термолабильных продуктов.

Сушилки (г, д) широко применяются для сушки высококонцентрированных суспензий.

6) Сушилки с центробежными дисковыми распылителями (е-и)

работают по прямоточной схеме. Применение дискового распылителя обуславливает большой диаметр сушильной камеры и, как следствие – высокую скорость газа по сечению камеры. Специфику процесса в данном случае составляет создание интенсивных радиальных потоков газа от диска к стенкам камеры и от стенок к диску за счет вентиляционного эффекта последнего. При этом в плоскости факела возникают разряжения, вызывающие подсосы и циркуляцию газа как из зоны над факелом, так и из нижней зоны. Если диск расположен вблизи от потолка камеры, то при недостаточном подводе сушильного агента в зону между потолком и факелом, там создается разряжение, вызывающее искривление траектории полета капель и частиц и отложение материала на потолке камеры.

7) При сушке термолабильных продуктов газ подводят к нижней стороне факела распыла (з) или же охлаждают потолок, подавая в специальную полость холодный воздух или воду.

Наиболее благоприятные условия возникают при движении газа к корню факела распыла, так как при этом максимально используется горизонтальный участок полета капель с большой скоростью, сокращается диаметр факела и обеспечивается подача газа к диску для компенсации эффекта самовентилиации. Такая схема газовода стала в настоящее время классической.

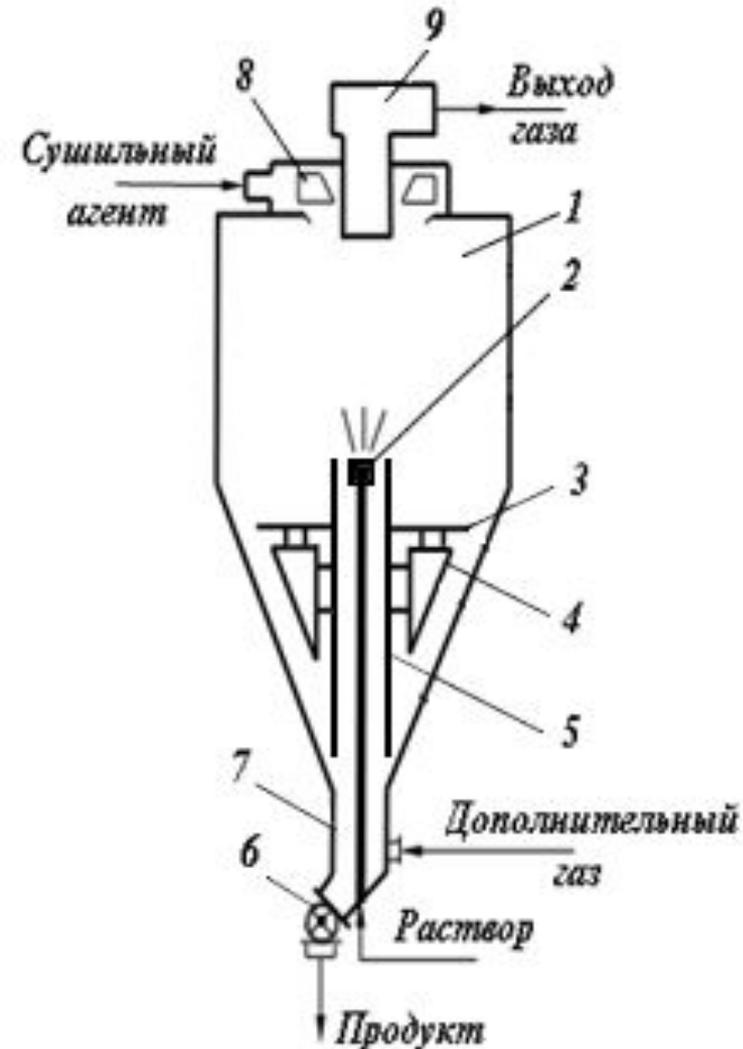
Как при верхнем, так и при нижнем способе ввода газа поток его закручивается с помощью распределительных лопаток. Направление закручивания должно совпадать с направлением вращения диска, в противном случае получается неблагоприятная форма факела распыла за счет резкого отклонения траектории капель от горизонтальной плоскости вверх или вниз.

Большой диаметр камер с дисковыми распылителями влечет за собой значительное увеличение габаритов конической части, что вызывает неудобства при размещении в производственном помещении и удорожает конструкцию. В связи с этим днища сушильных камер высокой производительности стремятся обычно делать плоскими или с небольшим углом конуса, используя специальные устройства для эвакуации осевшего сухого продукта.

8) Сушилка, в которой сухой продукт отводится с помощью гребковых элементов, установленных на вращающихся штангах (и). Иногда сбор продукта с плоского днища камеры осуществляется с помощью вращающегося пылесоса.

Распылительным сушилкам присущи существенные недостатки, связанные со спецификой процесса: сравнительно небольшая удельная производительность, большой удельный расход сушильного агента, высокая дисперсность высушиваемого продукта, обуславливающая большие капитальные затраты на сооружение установок пылеулавливания и высокие эксплуатационные расходы.

Проблему получения непылящегося сухого продукта решают различными путями агломерирования продукта в процессе сушки. Наиболее распространен метод вдува в факел распыла мелкой пыли продукта, взятой из первой ступени пылеулавливания.



Вихревая распылительная сушилка с устройством для одновременной агломерации продукта МТИММП Ю.В. Космодемьянским.

Сушильная камера 1 разделена горизонтальной перегородкой 3 на две зоны: верхнюю цилиндрическую и нижнюю – коническую.

Сушильный агент подается в верхнюю зону закрученным потоком через газоподводящее устройство 8 навстречу фронтальнообразно распыленному форсункой 2 материалу. Высушенный продукт за счет центробежных сил отбрасывается к стенкам камеры и ссыпается через зазор между корпусом и перегородкой 3 в коническую часть сушилки. В нижней зоне вращению потока газа препятствуют демпфирующие лопасти 4.

Вследствие разности статических составляющих напора газ из нижней зоны через центральную трубу 5 рециркулирует в верхнюю зону, увлекая с собой мелкие фракции продукта, которые таким образом доставляются непосредственно к факелу распыла и агломерируются. Дополнительно продукт сепарируется в сепарационной трубе 7 за счет подсоса через неё дополнительного количества воздуха, которое можно регулировать в зависимости от скорости витания частиц требуемого предельно минимального размера.

Агломерированный сухой материал в виде готовой продукции выгружается через секторный затвор 6, а мелкий продукт возвращается на факел распыла.

Достоинствами аппарата является закручивание потока (элементы с активной гидродинамикой), эффективное использование объема камеры (фонтанообразный факел распыла) и отсутствие уноса пыли. Сочетание всех этих положительных качеств делает сушилку перспективной для применения в производстве гранулированных (размером 2...5 мм) сухих продуктов молока, дрожжей, сухого бульона и т.п.

Расчет производительности и энергозатрат. Продолжительность распылительной сушки τ_c (с) определяется по формуле

$$\tau_c = 0,167 \cdot Q \cdot \rho_{\Pi} \cdot d_{cp} / (\alpha \cdot \Delta t_{cp} \sigma_1),$$

где: Q – количество теплоты, отдаваемой продукту воздухом, Дж/с; α – коэффициент теплоотдачи от воздуха к поверхности частицы, Вт/(м²·К); Δt_{cp} – средняя разность между температурами продукта и воздуха, К;

$$\Delta t_{cp} = (t_1 - t_2) / \ln [(t_1 - t_M) / (t_2 - t_M)],$$

где: t_1 и t_2 – начальная и конечная температура воздуха, К; t_M – средняя температура мокрого термометра, К.

Средний диаметр частиц продукта d_{cp} (м), получаемый при дисковом распылении

$$d_{cp} = (1/\omega) \sqrt{\sigma / (R \cdot \rho_{\Pi})},$$

где: ω – угловая скорость вращения диска, рад/с; σ – поверхностное натяжение продукта, Н/м; R – радиус диска, м; ρ_{Π} – плотность продукта кг/м³.

при форсуночном распылении

$$d_{cp} = 8 \cdot k \cdot G \cdot g / (\rho_B \cdot V_{\Pi}),$$

где: k – коэффициент, зависящий от свойств распыляемого продукта; ρ_B – плотность воздуха, кг/м³; V_{II} – скорость струи продукта, входящего в сопло, м/с.

Количество теплоты Q (Дж/с), передаваемой от воздуха к продукту

$$Q = W \cdot r + G_1 \cdot C_1 (T_2 - T_1),$$

где: W – количество испаренной влаги, кг/с; r – теплота испарения влаги, Дж/кг; C_1 – теплоемкость продукта, Дж/(кг·К); T_1 и T_2 – начальная и конечная температура продукта, К.

Напряжение объема сушильной камеры по испаренной влаге A [кг/(м³·с)] определяется по формуле

$$A = \alpha_V \cdot \Delta t_{cp} / r,$$

где: α_V – объемный коэффициент теплообмена, Вт/(м³·К);

$$\alpha_V = \alpha \cdot F (V_K),$$

где: V_K – объем сушильной камеры, м³.

Общая площадь поверхности частиц F (м²) в конце распылительной сушки определяется как

$$F = 6 \cdot G_1 / (d_{cp} \cdot \rho_{II}).$$

Производительность распылительной сушилки по испаренной влаге

$$W = A \cdot V_K.$$