

Энергосбережение при работе
теплообменного
оборудования на примере
сушильных агрегатов.

Энергосбережение (экономия энергии).

Это реализация правовых, организационных, научных, производственных, технических и экономических мер, направленных на эффективное (рациональное) использование (и экономное расходование) топливно-энергетических ресурсов и на вовлечение в хозяйственный оборот возобновляемых источников энергии.

Энергосбережение — важная задача по сохранению природных ресурсов.

Теплообменными аппаратами называются устройства, в которых осуществляется процесс передачи теплоты от одного теплоносителя к другому.

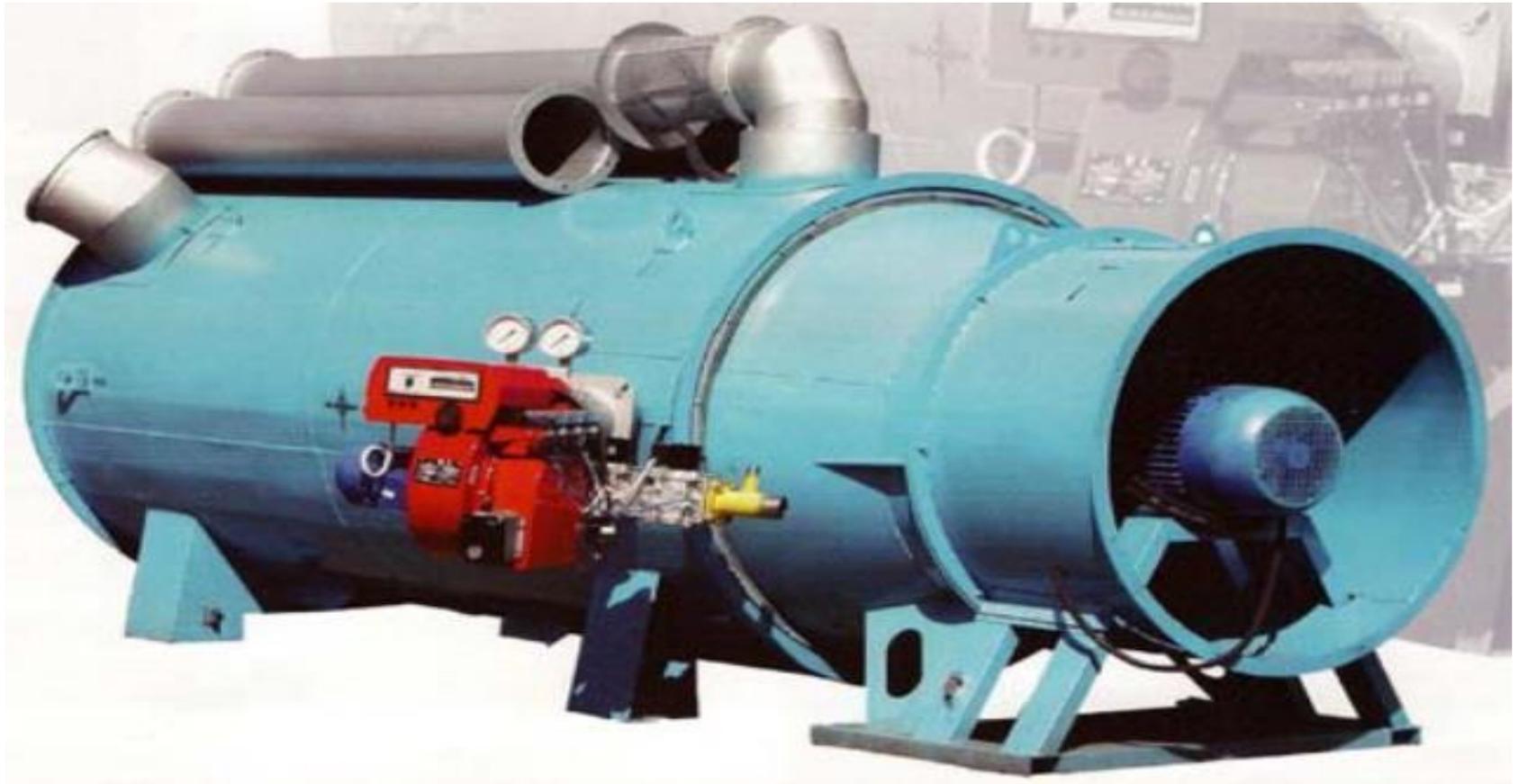
По принципу взаимодействия теплоносителей различают системы: жидкость-жидкость; пар-жидкость; газ-жидкость; пар-пар.

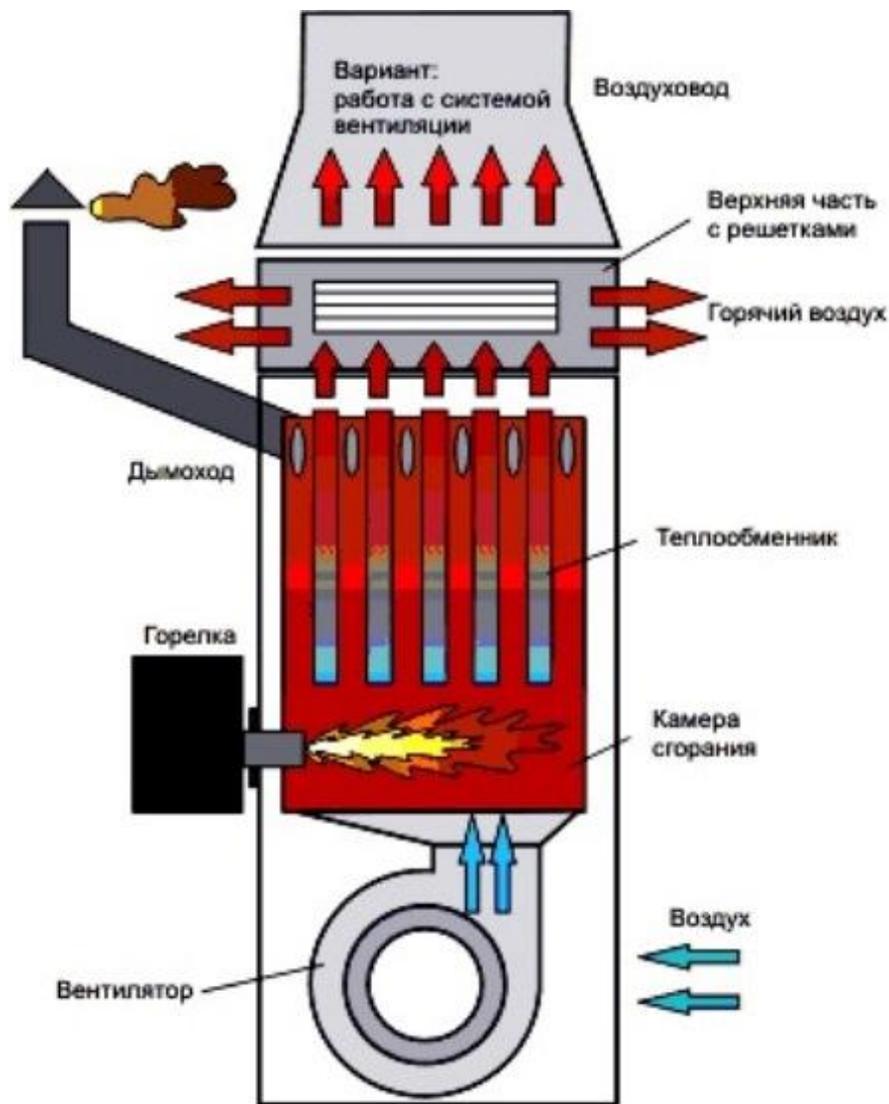
По принципу действия теплообменники могут быть разделены на рекуперативные и регенеративные. Особое место занимают теплообменники с внутренними источниками энергии: электронагреватели, реакторы.

Воздушный теплогенератор — оборудование, которое обогревает воздушные массы за счет электрической энергии или энергии сжигания различных видов топлива. Их мощность может достигать 1000 кВт и иметь следующее распределение: 40% — камера сгорания, 50-55% — теплообменники и вентиляторы. Мощность вентиляционной системы так же влияет на теплообменник, создавая давление порядка 1000 Па, а примесь газов в покрасочной камере повышает температуру еще на 3-5 %. Поэтому регулирование и контроль температуры являются обязательными.

Электрический теплогенератор.

Представляет собой обычные ТЭНы (трубчатые электронагреватели), которые являются доступными и поэтому пользуются популярностью. Существенным недостатком такой системы обогрева является длительное время сушки и большое потребление электроэнергии (до 200 кВт).

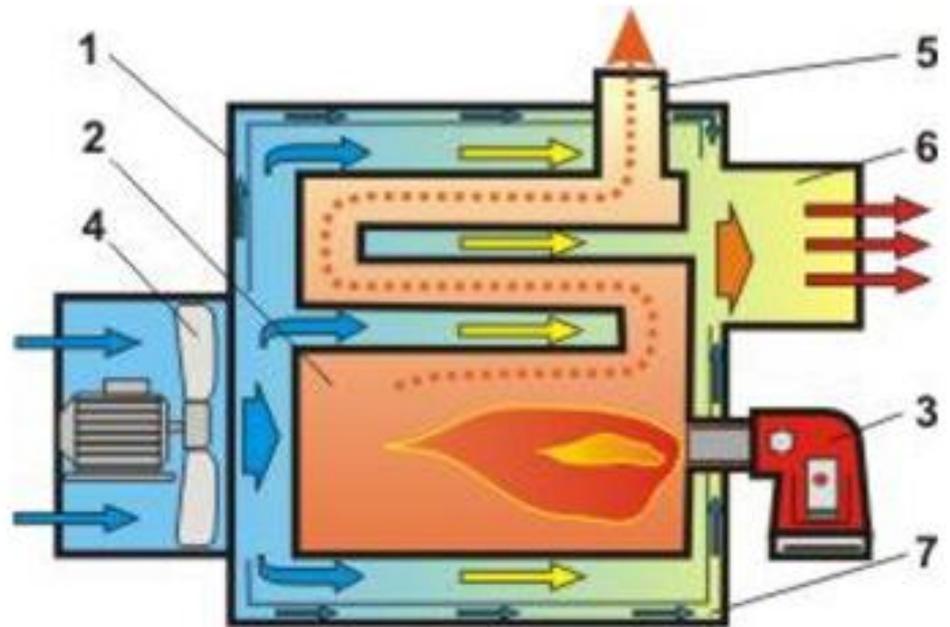




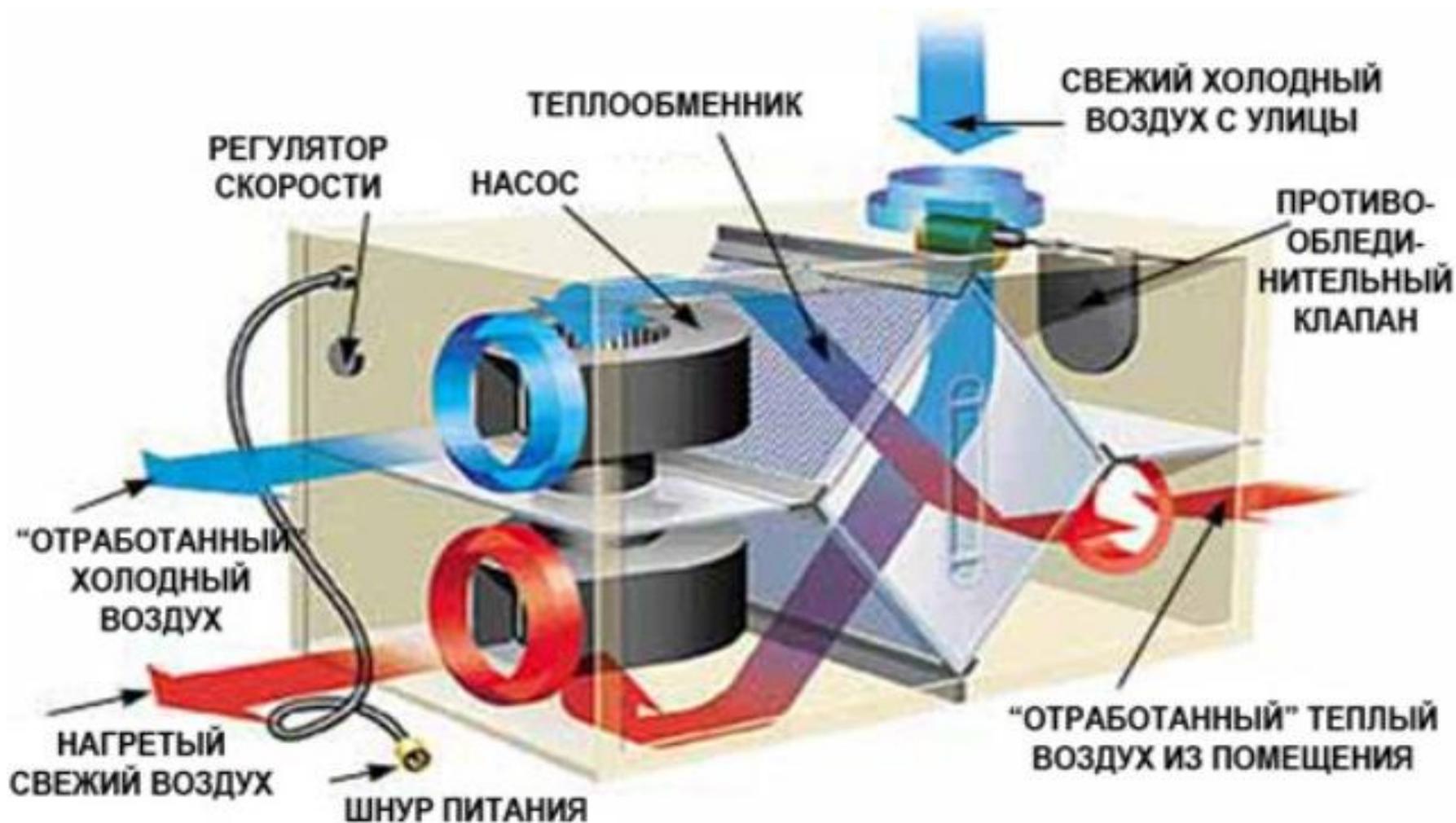
Газовый теплогенератор. Очень экономная система обогрева, но на этапах разработки и монтажа является дорогостоящей. Разработка газового проекта, подключение, согласование со всеми службами и регулярные обязательные проверки требуют существенного капиталовложения. Для оборудования покрасочной камеры в условиях стационарных боксов на СТО газовый теплогенератор будет выгодным капиталовложением, но на перспективу и будущую окупаемость.

Дизельные теплогенераторы являются самым приемлемым вариантом дешевого тепла для покрасочных камер и при этом не требуют значительных расходов средств и времени на установку. Топливо для них стоит заложить в расходные материалы.

1. Корпус.
2. Теплообменник.
3. Дизельная горелка.
4. Вентилятор.
5. Дымоотводящий патрубок.
6. Патрубок вывода нагретого воздуха.
7. Контур охлаждения корпуса.



Рекуперативными называются теплообменники, в которых горячая и холодная среда протекает одновременно и теплота передается через разделяющую их стенку (котлы, подогреватели, испарители).



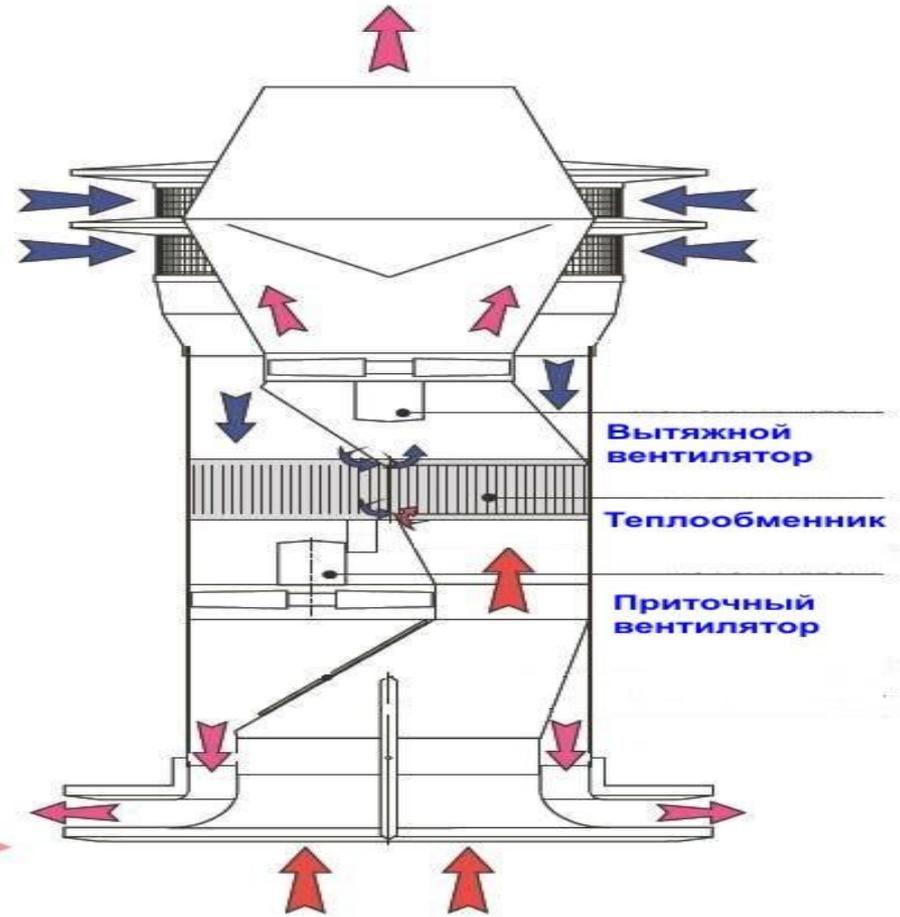
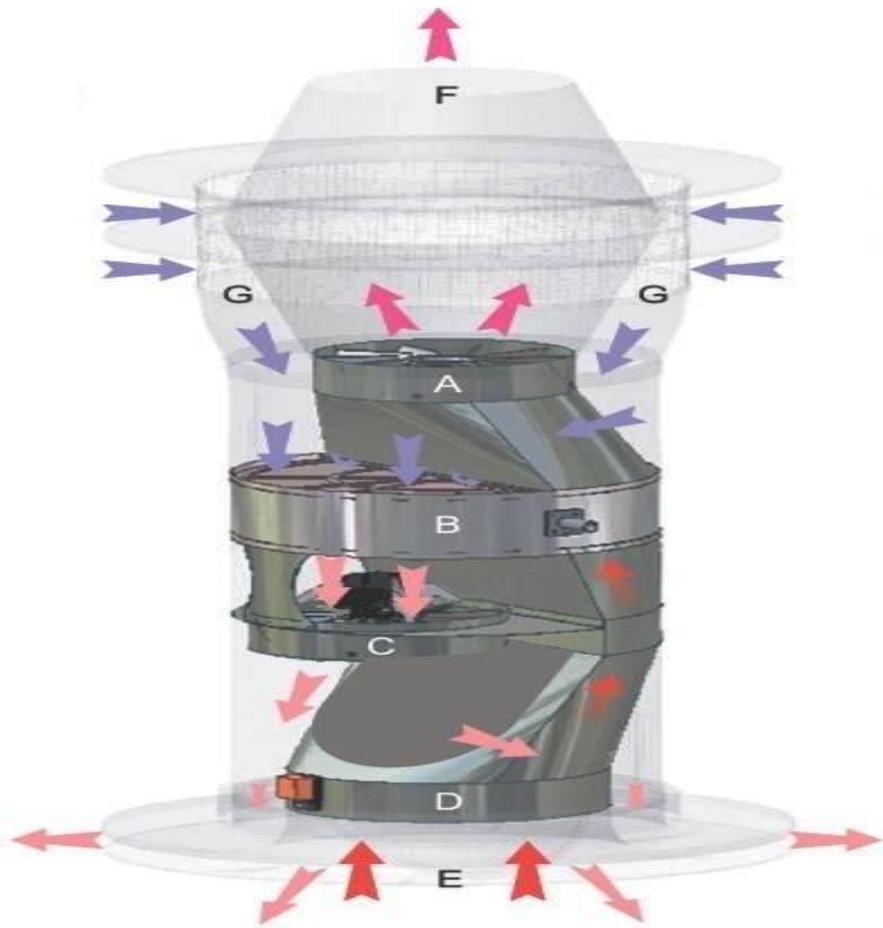
Отличительной особенностью конструкции является наличие двух каналов воздухопроводов, по которым отдельно движутся горячие и холодные массы, а сам теплообмен происходит между стенками теплообменника.

По конструкции стенок теплообменники различают и соответственно называют:

- Ребристые.
- Спиральные.
- Пластинчатые.

Для покрасочной камеры не имеет значения вид конструкции, а только площадь теплообменника и его габаритные размеры.

Регенеративными называются теплообменники, в которых одна и та же поверхность нагрева через определенные промежутки времени омывается то холодным, то горячим теплоносителем. В период контакта стенки с горячим теплоносителем стенка нагревается, нагревая среду за счет аккумулированной теплоты (воздухообогреватели газотурбинных установок).



Их конструкция отличается исполнением из термостойкой нержавеющей стали, которая обеспечивает лучшее распределение тепла и предотвращает возможность перегрева. Недостатком использования теплообменника регенеративного для покрасочных камер является обязательное наличие системы рециркуляции воздуха, что приводит к дополнительным тратам.

Подводя черту, можно заключить вывод о главных критериях выбора системы обогрева: достаточная мощность и экономичность. Бесспорно, воздушная система обогрева для коммерческой покрасочной камеры будет выгодней с использованием дизельного теплогенератора и стационарного теплообменного оборудования. Дополнительной выгоды можно достигнуть, используя инфракрасные обогреватели, и вкладываясь в газовый теплогенератор. Но точный выбор следует делать, опираясь на реальные условия устройства и эксплуатации покрасочной камеры.

Энергосбережение в сушильных установках

Под сушкой понимают совокупность термических и массообменных процессов у поверхности (внешняя задача) и внутри (внутренняя задача) влажного материала, способствующих его обезвоживанию.

Скорость протекания тепломассообменных процессов, степень их завершенности зависит от способа подвода теплоты к материалу и от режима сушки.

Промышленные сушильные установки классифицируют по следующим признакам:

- по способу подвода теплоты к материалу;
- по функционированию по времени;
- по конструкции.

Наибольшее распространение получили конвективные сушильные установки, которые разделяют на несколько групп:

1. По применяемому сушильному агенту (воздушные, на дымовых (топочных) газах, на неконденсирующихся в процессе сушки газах (перегретый пар, азот и т.д.);
2. По схеме движения сушильного агента (с однократным использованием сушильного агента, рециркуляцией, с промежуточным подогревом сушильного агента, рециркуляцией его в зонах и между зонами и т.п.).

Все энергосберегающие мероприятия можно разбить на три группы: теплотехнологические – теплотехнические, конструктивно-технологические;

- Теплотехнологические – теплотехнические (выбор тепловой схемы, режимных параметров сушки – температуры, скорости и влагосодержания сушильного агента, и т.д.); конструктивно-технологические (выбор направления взаимного движения сушильного агента и материала, и т.д.);
- Кинетические – методы интенсификации внешнего тепло- и массообмена (коэффициента тепло-отдачи к сушимому материалу, поверхности тепло- и массообмена и т.д.); методы интенсификации внутреннего тепло- и массообмена (повышение температуры материала в первом периоде сушки и т.д.);
- энергосберегающие технологии – использование нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, приводящее к замещению органического топлива (солнечные сушильные установки и др.); использование в качестве сушильного агента паров растворителя, водяного пара атмосферного давления и др.

Энергосбережение в выпарных установках.

На современных крупных предприятиях выпаривание ведут в многокорпусных (многоступенчатых) установках непрерывного действия. При этом происходит использование образующегося над раствором так называемого «вторичного пара» каждого корпуса в последующих корпусах с более низким давлением в качестве греющего или с передачей части вторичного пара (экстра-пара) другим тепловым потребителям. Раствор в таких установках перетекает из корпуса в корпус, выпариваясь при этом частично в каждом корпусе до определенной концентрации.

Экономия энергии в выпарных установках может достигаться следующими способами:

- использованием теплоты вторичного пара в многоступенчатых выпарных установках;
- применением сжатия паров при помощи струйного эжектора или механического компрессора,
- подогревом раствора, направляемого на выпарку вторичным паром или конденсатом.

Материальный баланс сушилки

Материальный баланс по всему количеству вещества выразится равенством $G_1 = G_2 + W$, где

G_1 — количество влажного материала, поступающего в сушилку, кг/с;

G_2 — количество высушенного материала на выходе из сушилки, кг/с;

W — влаги, испаряемой из материала в процессе сушки, кг/с.

Баланс по абсолютно сухому веществу, количество которого не изменяется в процессе сушки, имеет вид: $G_1(100 - U_H) = G_2(100 - U_K)$, где

U_H — влажность материала, поступающего в сушилку, в весовых процентах;

U_K — влажность высушенного материала в весовых процентах.

Технические характеристики и цены на сушильные барабаны.

Модель	Расчетная производительность, т/ч	Тип	Размер корпуса барабана (L×d), мм	Тепло-носитель	Габаритные размеры L×B×H, мм	Масса, кг	Цена*
Барабан сушильный БСЛ-1.0.3	0.3–1.0	поточный	3000×1000	топочные газы	4000×1200×2000	700	526 000
Барабан сушильный БСЛ-1.0.4	1.3–2.0	поточный	4500×1000	топочные газы	5500×1200×2000	1100	685 000
Барабан сушильный БСЛ-1.3.5	2.7–3.5	поточный	4500×1300	топочные газы	5500×1500×2300	1500	791 000
Барабан сушильный БСЛ-1.3.6	4.5–5.5	поточный	6000×1300	топочные газы	6000×1500×2300	2000	1 124 000
Барабан сушильный БС-1.6.10	10–12	поточный	10000×1600	топочные газы	10000×2000×3000	13500	7 356 000
Печь-сушилка ПСК-630/5100	1.5–2	конвекционный	5100×630	горячий воздух	7000×2000×2740	5000	4 651 000

Производство сушильных барабанов — одно из направлений деятельности ООО «НПП «СТЦ».

Цена с НДС в руб. на 13.04.2016

Расчёт камерной сушильной установки.

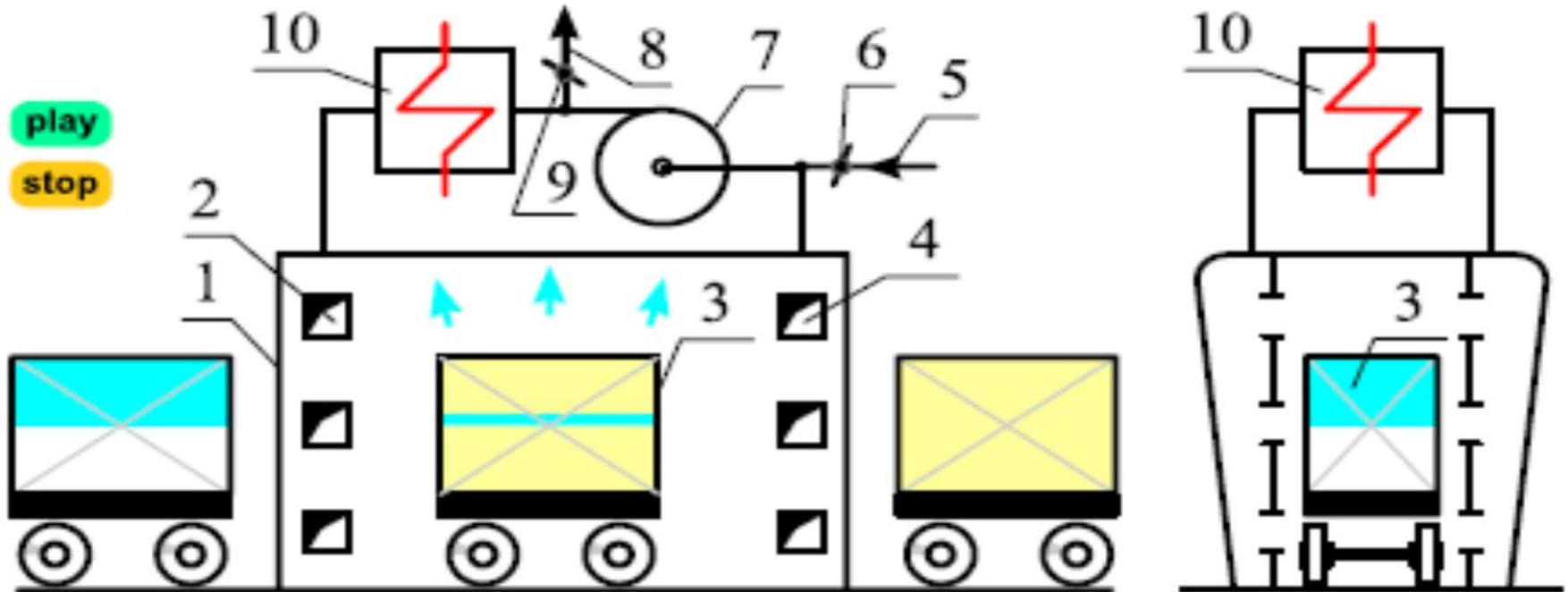


Рис. 1.1. Схема камерной сушильной установки:

1 - ограждение камеры; 2 - воздухораспределительные отверстия; 3 - высушиваемый материал; 4 - всасывающие отверстия; 5 - свежий воздух; 6 и 9 - регулирующие клапаны; 7 - нагнетающий вентилятор; 8 - отработавший воздух; 10 - калорифер

Выполняются два вида теплотехнического расчета сушильных установок - конструктивный и поверочный. При проектировании новых сушильных установок выполняется конструктивный расчёт, основной задачей которого является определение геометрических размеров по известным режимным характеристикам и заданной производительности установки. Поверочный расчёт сушильных установок выполняется с целью определения производительности и сравнения её с фактическими данными, одновременно рассчитывается КПД установки, удельный расход теплоты и другие характеристики.

Тепловой баланс камерных сушилок периодического действия составляется для одного цикла работы установки и выражается расходом теплоты за один цикл (кДж/цикл). В общем виде уравнение теплового баланса сушильных установок имеет вид:

$$Q_c + \Sigma Q_{\text{пот}} = L_B \cdot c_B \cdot (t_{B1} - t_{B2}), \quad (1.1)$$

где L_B, c_B - массовый расход и средняя теплоемкость воздуха; t_{B1}, t_{B2} - температура воздуха на входе и выходе из сушильной камеры.

Расход теплоты на сушку влажного материала складывается из расхода теплоты на прогрев влажного материала $Q_{\text{пр}}$, расхода теплоты в периоде постоянной скорости сушки Q_I и расхода теплоты в периоде падающей скорости сушки Q_{II} :

$$Q_c = Q_{\text{пр}} + Q_I + Q_{II}. \quad (1.2)$$

1. Камерная сушильная установка

Расход теплоты в период прогрева равен: $Q_{\text{пр}} = G_{\text{сух}} \cdot (c_m + c_w \cdot u_0) \cdot (\vartheta_m - \vartheta_0)$. (1.3)

Расход теплоты в период постоянной скорости сушки определяется по формуле

$$Q_I = G_{\text{сух}} \cdot (u_0 - u_k) \cdot r_1 = G_{\text{сух}} \cdot (u_0 - u_k) \cdot (i_{\text{п1}} - c_w \cdot \vartheta_m) = G_{\text{сух}} \cdot (u_0 - u_k) \cdot (i_0 + c_{\text{п}} \cdot \vartheta_m - c_w \cdot \vartheta_m). \quad (1.4)$$

Расход теплоты в период падающей скорости сушки:

$$Q_{II} = G_{\text{сух}} \cdot [(c_m + c_w \cdot u_2) \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_m) + (u_k - u_2) \cdot r_2] = G_{\text{сух}} \cdot [(c_m + c_w \cdot u_2) \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_m) + (u_k - u_2) \cdot (i_{\text{п2}} - c_w \cdot \vartheta_2)], \quad (1.5)$$

где $G_{\text{сух}}$ - расход материала по абсолютно сухой массе; $c_m, c_w, c_{\text{п}}$ - теплоёмкости абсолютно сухого материала, влаги и пара; u_0, u_k, u_2 - начальное, критическое и конечное влагосодержание материала; $\vartheta_0, \vartheta_m, \vartheta_2$ - начальная температура материала, температура в периоде постоянной и падающей скорости; r_1, r_2 - теплота парообразования в периоде постоянной и падающей скорости сушки.

Потери складываются из расхода теплоты на транспортные устройства, в окружающую среду и на нагревание ограждения:

$$\Sigma Q_{\text{пот}} = Q_{\text{тр}} + Q_{\text{окр}} + Q_{\text{огр}}. \quad (1.6)$$

Расход теплоты на транспортные устройства: $Q_{\text{тр}} = G_{\text{тр}} \cdot c_{\text{тр}} \cdot (t_{\text{тр2}} - t_{\text{тр1}})$. (1.7)

Расход теплоты в окружающую среду: $Q_{\text{окр}} = k \cdot F_{\text{огр}} \cdot \Delta t$. (1.8)

Расход теплоты на нагревание ограждений: $Q_{\text{огр}} = G_{\text{огр}} \cdot c_{\text{огр}} \cdot (t_{\text{огр2}} - t_{\text{огр1}})$, (1.9)

где $G_{\text{тр}}, G_{\text{огр}}$ - масса транспортных устройств и ограждения; $c_{\text{тр}}, c_{\text{огр}}$ - удельные теплоёмкости транспортных устройств и ограждающих элементов; $t_{\text{тр1}}, t_{\text{огр1}}, t_{\text{тр2}}, t_{\text{огр2}}$ - начальные и конечные температуры транспортных устройств и ограждения; F - поверхность ограждающих конструкций; k - коэффициент теплопередачи; Δt - температурный напор.

В уравнении (1.1) могут быть также и другие расходные статьи в зависимости от конструкции и схемы сушильной установки.

Уравнение теплового баланса сушильной установки может быть выражено в процентах (или относительных единицах), если правую и левую части уравнения (1.1) разделить на $L_n \cdot c_n \cdot (t_{n1} - t_{n2})$:

$$q_{пр} + q_i + q_{II} + q_{тр} + q_{окр} + q_{огр} = 100\%. \quad (1.10)$$

Уравнение теплового баланса может быть также выражено в удельных затратах теплоты на испарение 1 кг влаги, содержащейся в материале, если правую и левую части уравнения (1.1) разделить на $G_{сух} \cdot (u_0 - u_2)$:

$$q_{вл}^{уд} = q_{пр}^{уд} + q_i^{уд} + q_{II}^{уд} + q_{тр}^{уд} + q_{окр}^{уд} + q_{огр}^{уд}, \quad \text{кДж/кг влаги.} \quad (1.11)$$

Если же отнести расходы теплоты к производительности установки $G_{сух}$, то тогда получим удельные расходы, отнесённые к единице выпускаемой продукции:

$$q'_{прод} = q'_{пр} + q'_i + q'_{II} + q'_{тр} + q'_{окр} + q'_{огр}, \quad \text{кДж/кг продукции.} \quad (1.12)$$

2. Конвективная установка непрерывного действия для сушки ленточных и листовых материалов

В целлюлозно - бумажной промышленности конвективные сушильные установки непрерывного действия применяются для сушки древесноволокнистых плит, целлюлозы, картона, бумаги и других материалов.

На рис. 2.1 приведена схема конвективной сушильной установки ленточного типа, в которой материал подаётся в верхнюю часть сушилки, затем последовательно огибает несколько направляющих валиков и выходит с противоположной стороны. Нагретый в калорифере воздух подаётся в воздухораспределительные устройства, обтекает материал продольным потоком и выходит через всасывающие воздуховоды снова в циркуляционную систему. Направление движения материала и воздуха может быть противоположным или прямоточным.

Тепловой расчёт сушильных установок производится с целью определения их габаритов для получения необходимой конечной влажности материала при заданных параметрах воздуха и материала. Часовая производительность установки определяется по формуле

$$G_{сух} = 60 \cdot b_n \cdot w_n \cdot P_{сух}, \quad \text{кг/ч,} \quad (2.1)$$

где b_n - ширина полотна, м; w_n - скорость движения полотна, м/мин; $P_{сух}$ - масса 1 м² сухого полотна, кг/м².

Расход воздуха для ассимиляции испарившейся влаги определяется как

$$L_n = 1000 \cdot G_{сух} \cdot (u_0 - u_2) / (d_2 - d_0), \quad \text{кг/ч,} \quad (2.2)$$

где u_0, u_2 - начальное и конечное влагосодержание материала, кг/кг; d_0, d_2 - влагосодержание воздуха по I-d диаграмме, г/кг.

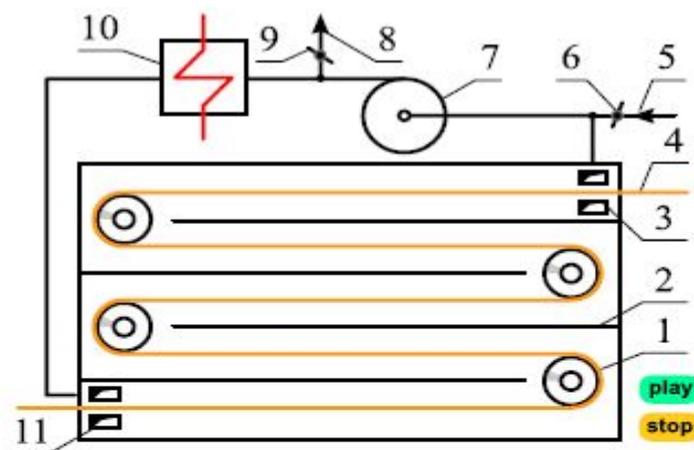


Рис. 2.1. Схема конвективной сушильной установки непрерывного действия.

1 - направляющие валики; 2 - направляющие перегородки для воздуха; 3 - всасывающие воздуховоды; 4 - высушиваемый материал; 5 - свежий воздух; 6 и 9 - регулирующие клапаны; 7 - нагнетающий вентилятор; 8 - отработавший воздух; 10 - калорифер; 11 - воздухоотвод.

Тепловой расчёт теплообменных, в том числе сушильных установок для ленточных и листовых материалов, производится в основном по двум формулам: уравнению теплового баланса и уравнению теплообмена, считая, что $Q_6 = Q_T$.

Количество теплоты, необходимое для сушки влажного материала и рассчитанное по уравнению теплового баланса, равно:

$$Q_6 = G_{\text{сух}} \cdot (u_0 - u_2) \cdot q_{\text{вл}}^{\text{ул}} \approx G_{\text{сух}} \cdot (u_0 - u_2) \cdot \bar{r}, \text{ кДж/ч.} \quad (2.3)$$

Величина $q_{\text{вл}}^{\text{ул}}$ определяется по формуле (1.11). Количество теплоты, необходимое для сушки влажного материала и определённое из уравнения теплообмена, равно:

$$Q_T = 2 \cdot 3,6 \cdot \alpha_k \cdot b_{\text{п}} \cdot l_{\text{п}} \cdot (\bar{t}_в - \bar{\vartheta}_м), \text{ кДж/ч,} \quad (2.4)$$

где α_k - конвективный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); $\bar{t}_в$ - средняя температура воздуха, С°; $\bar{\vartheta}_м = 0,5 \cdot (\vartheta_0 + \vartheta_2)$ - средняя температура полотна, С°; $b_{\text{п}}$, $l_{\text{п}}$ - ширина и длина полотна, м; коэффициент 2 учитывает двустороннюю поверхность испарения, коэффициент 3,6 служит для перевода Вт в кДж/ч.

Коэффициент теплоотдачи определяется из критериального уравнения, полученного при сушке влажного картона в продольном потоке воздуха:

$$\text{Nu}_T = 0,07 \cdot \text{Re}^{0,75}. \quad (2.5)$$

Теплообменный критерий Нуссельта равен:

$$\text{Nu}_T = \frac{\alpha_k \cdot l}{\lambda}, \quad (2.6)$$

где l - определяющий размер полотна, м; λ - теплопроводность воздуха, Вт/(м·К).

Критерий Рейнольдса равен:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot l}{\nu}, \quad (2.7)$$

где w - скорость потока воздуха, м/с; ν - кинематическая вязкость воздуха, м²/с.

Из уравнений (2.3) и (2.4) следует, что длина материала, находящегося в сушильной установке, равна:

$$l_{\text{п}} = \frac{G_{\text{сух}} \cdot (u_0 - u_2) \cdot q_{\text{вл}}^{\text{ул}}}{2 \cdot 3,6 \cdot \alpha_k \cdot b_{\text{п}} \cdot (\bar{t}_в - \bar{\vartheta}_м)} \approx \frac{G_{\text{сух}} \cdot (u_0 - u_2) \cdot \bar{r}}{2 \cdot 3,6 \cdot \alpha_k \cdot b_{\text{п}} \cdot (\bar{t}_в - \bar{\vartheta}_м)}, \quad (2.8)$$

где \bar{r} - скрытая теплота парообразования при средней температуре в сушильной камере, кДж/кг.

Длину сушильной камеры рассчитывают в зависимости от количества ярусов, по которым перемещается материал.

3. Конвективная установка с сопловым обдувом

В конвективной установке с сопловым обдувом струи нагретого воздуха направляются перпендикулярно к поверхности сушимого материала. Сопловые сушильные установки обладают высокой интенсивностью испарения влаги, однако при этом у них большие затраты электроэнергии на циркуляцию воздуха и создание избыточного давления в сопловых камерах. На рис. 3.1 приведена схема сопловой установки для сушки обоев. Она состоит из верхней и нижней сопловых камер, в которые подаётся нагретый воздух с помощью вентилятора. Нагретый воздух в виде плоских струй вытекает через щелевидные сопла перпендикулярно поверхности материала. После соприкосновения с материалом воздух возвращается во всасывающие воздуховоды, при этом часть отработанного воздуха возвращается в циркуляционную систему, а часть выбрасывается в атмосферу.

Принцип действия конвективных сопловых установок основан на применении изотермических струй, вытекающих из сопел круглой или плоской формы. На рис. 3.2 показано поле скоростей при изменении плоской струи, набегающей на полотно бумаги. Струя, вытекающая из сопла, ударяется о поверхность бумаги и растекается в противоположные стороны, обтекая материал в продольном направлении.

Участок струи, на котором сохраняется скорость истечения из сопел, носит название начального участка. Скорость струи на начальном участке w_0 рассчитывается по известному напору воздуха в сопловой камере:

$$w_0 = \mu \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p_0}{\rho_v}} = \frac{L_v}{3600 \cdot \rho_v \cdot f_{\text{соп}}}, \text{ м/с, (3.1)}$$

где p_0 - напор воздуха в сопловой камере, Па; ρ_v - плотность воздуха, кг/м³; μ - коэффициент сопротивления при истечении воздуха из соплового аппарата, $\mu = 0,98 - 0,99$; L_v - массовый расход воздуха через сопла, кг/ч; $f_{\text{соп}}$ - живое сечение всех сопел, м².

Для круглых сопел живое сечение: $f_{\text{соп}} = \pi \cdot d^2 \cdot n_c / 4$. (3.2)

Для плоских сопел живое сечение: $f_{\text{соп}} = B_c \cdot b_c \cdot n_c$, (3.3)

где n_c - число сопел; B_c - ширина сопловой камеры, м; b_c - ширина сопла, м; d - диаметр сопла, м.

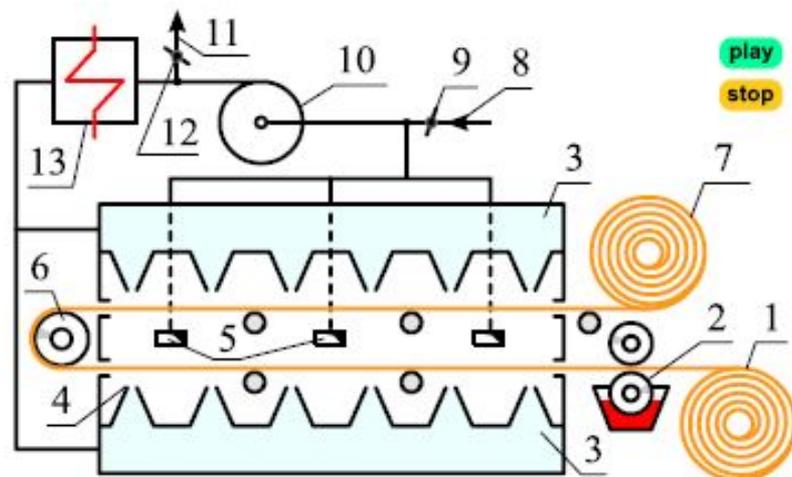


Рис. 3.1. Сопловая установка для сушки обоев: 1 - рулон бумаги; 2 - узел нанесения краски; 3 - сопловые камеры; 4 - сопло; 5 - отверстия для удаления отработанного воздуха; 6 - поворотный вал; 7 - накат для обоев; 8 - свежий воздух; 9 и 12 - регулирующие клапаны; 10 - вентилятор; 11 - отработавший воздух; 13 - калорифер

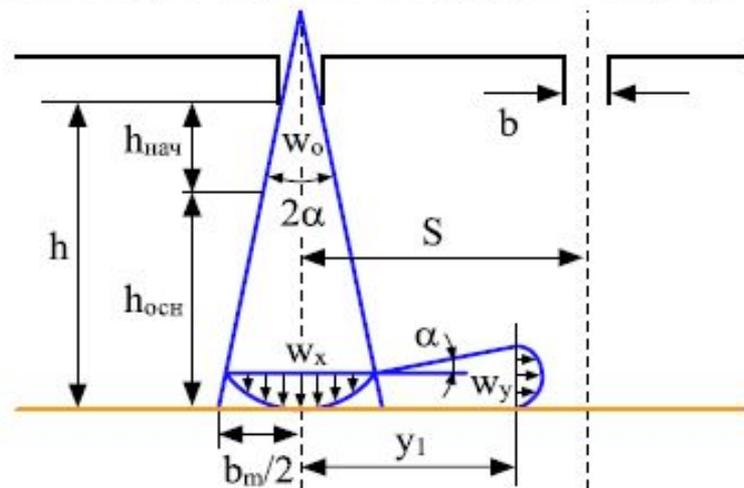


Рис. 3.2. Схема струи воздуха, набегающей на полотно

По мере удаления струи от среза сопел скорость воздуха постепенно снижается за счёт трения в неподвижном окружающем воздухе и возникновения дополнительных потоков. Затухание скорости по оси основного участка изотермической струи выражается следующими формулами:

- для плоской струи
$$w_m = \frac{1,2 \cdot w_0}{\sqrt{\frac{2 \cdot a \cdot h}{b} + 0,41}}, \text{ м/с}, \quad (3.4)$$

где a - коэффициент турбулентности струи, $a = 0,1 - 0,11$; b - ширина сопла, м; h - расстояние от среза сопел до полотна бумаги, м;

- для круглой струи

$$w_m = \frac{0,96 \cdot w_0}{\frac{2 \cdot a \cdot h}{d} + 0,29}, \text{ м/с}, \quad (3.5)$$

где d - диаметр сопла, м.

У поверхности материала скорость движения воздуха (для основного участка) равна среднеквадратичной скорости:

$$w_x = 0,7 \cdot w_m, \text{ м/с}. \quad (3.6)$$

На основании проведённых исследований по сушке бумаги с применением различных типов сопловых камер получено уравнение для определения коэффициента конвективной теплоотдачи

$$\alpha_c = 0,0814 \cdot \frac{\lambda}{S} \cdot \left(\frac{w_x \cdot S}{\nu} \right)^{0,75}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad (3.7)$$

где λ - теплопроводность воздуха, Вт/(м · К); S - шаг между соплами, м; ν - кинематическая вязкость воздуха у поверхности бумажного полотна, м²/с; w_x - средняя квадратичная скорость воздуха у поверхности бумажного полотна, м/с.

Количество влаги, испарившейся в результате применения сопловой установки, можно рассчитать по формуле

$$M_{\text{вл}} = 3,6 \cdot \alpha_c \cdot F \cdot (t_{\text{в}} - \vartheta_{\text{б}}) / r, \text{ кг/ч}, \quad (3.8)$$

где F - площадь обдуваемой поверхности бумажного полотна, м²; $t_{\text{в}}$ - температура воздуха, °С; $\vartheta_{\text{б}}$ - средняя температура бумажного полотна, °С; r - теплота фазового превращения, кДж/кг.

4. Ленточная установка для сушки кусковых и волокнистых материалов

Сушильные установки ленточного типа применяются для сушки мелкокусковых и волокнистых материалов в движущемся слое. В качестве транспортера применяется плетеная металлическая сетка или перфорированная штампованная лента (см. рис. 4.1).

Материал движется в виде слоя, расположенного на транспортере 1. Над слоем установлены ворошители 2. Воздух, нагреваемый в калорифере 6, центробежным вентилятором 7 нагнетается в распределительный канал 8 и фильтруется далее через слой материала 4 сверху вниз. Отработавший воздух частично удаляется в атмосферу, а частично возвращается через окна 3 на рециркуляцию. Свежий воздух подсасывается через окно 5. Высота слоя h_0 высушиваемого материала составляет 0,1 - 0,5 м. Скорость фильтрации воздуха (газа) w_f зависит от структуры слоя и находится в пределах от 0,5 до 2 м/с.

Тепловой расчёт установки ленточного типа производится с целью определения конструктивных характеристик по известным режимным параметрам. Так, расход сушильного агента L_c (кг/ч) определяется по следующей формуле:

$$L_c = \frac{Q_c}{c_B \cdot (t_{B1} - t_{B2})}, \quad (4.1)$$

где c_B - средняя теплоёмкость сушильного агента, кДж/(кг·К); Q_c - количество теплоты, необходимое для сушки влажного материала, кДж/ч; t_{B1} , t_{B2} - температура сушильного агента на входе в сушильную камеру и на выходе из неё, °С.

Площадь слоя в плоскости, перпендикулярной потоку газа: $F_M = L_c / (3600 \cdot w_f \cdot \rho_B)$, (4.2), где ρ_B - плотность воздуха, кг/м³.

Расход теплоты на испарение влаги определяется из уравнения теплового баланса:

$$Q_c = G_{\text{сух}} \cdot (u_0 - u_2) \cdot \bar{V} = l_{\text{сл}} \cdot b_{\text{сл}} \cdot h_{\text{сл}} \cdot \rho_{\text{нм}} \cdot (u_0 - u_2) \cdot \bar{V} / \tau_{\text{суш}}, \quad (4.3)$$

где $h_{\text{сл}}$ и $b_{\text{сл}}$ - толщина и ширина слоя материала, м; $\rho_{\text{нм}}$ - насыпная плотность материала, кг/м³; $\tau_{\text{суш}}$ - длительность сушки, ч.

Уравнение теплообмена имеет вид: $Q_c = 3,6 \cdot \alpha_v \cdot h_{\text{сл}} \cdot F_M \cdot \Delta t$, (4.4)

где α_v - объемный коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м³·К); Δt - средний температурный напор в слое материала, °С.

Из совместного решения уравнений (4.3) и (4.4) определим длину слоя установки ленточного типа:

$$l_{\text{сл}} = \frac{3,6 \cdot \alpha_v \cdot F_M \cdot \Delta t \cdot \tau_c}{b_{\text{сл}} \cdot h_{\text{сл}} \cdot \rho_{\text{нм}} \cdot (u_0 - u_2) \cdot \bar{V}}, \quad (4.5)$$

Средний температурный напор в слое определяется по следующей формуле:

$$\Delta t = \frac{(t_{B1} - \vartheta_0) - (t_{B2} - \vartheta_2)}{\ln \frac{(t_{B1} - \vartheta_0)}{(t_{B2} - \vartheta_2)}}, \quad (4.6)$$

где ϑ_0 , ϑ_2 - температура материала в начале и в конце сушки.

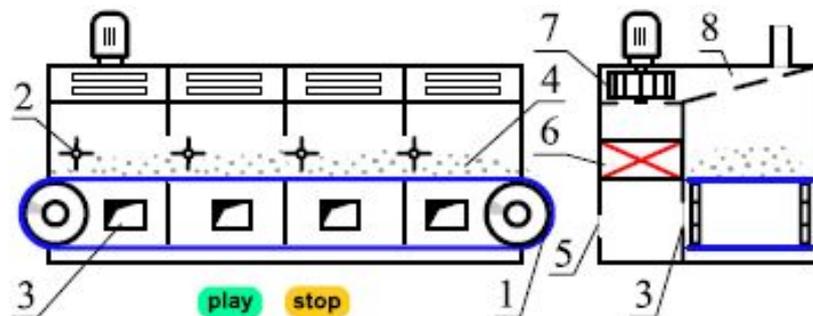


Рис. 4.1. Ленточная сушильная установка для сушки кусковых и волокнистых материалов в движущемся слое: 1 - транспортер; 2 - ворошитель; 3 - всасывающие окна; 4 - слой материала; 5 - свежий воздух; 6 - калорифер; 7 - вентилятор; 8 - раздающий короб

5. Аэрофонтанная сушильная установка

Аэрофонтанные установки применяются для сушки сыпучих материалов: песка, зерна, целлюлозы, корьевых отходов и др. Особенность их работы заключается в том, что восходящая струя воздуха (или газа) в центре конуса увлекает частицы материала, которые, достигнув определенной высоты, возвращаются вниз вдоль стенок конусной части, напоминая траекторию полета капли в фонтане.

На рис. 5.1 показана схема одноступенчатой аэрофонтанной установки, состоящей из топки для получения высокотемпературных дымовых газов (4), камеры смешения (6), аэрофонтанной сушилки (2) и циклона (7). Имеются также схемы, в которых в качестве сушильного агента применяется нагретый воздух или отработавшие в котельном агрегате дымовые газы.

Преимущество таких сушилок по сравнению с пневматическими трубами-сушилками заключается в том, что сушимый материал, многократно циркулируя в установке, может находиться там до тех пор, пока не приобретет необходимую влажность (т. е. конечную влажность материала можно регулировать), после чего питателем сухого материала подается потребителю.

Интерес представляют аэрофонтанные многоконусные сушилки, отличающиеся от одноконусных большим временем сушки материала. Схема такой ступенчатой аэрофонтанной сушилки, используемой для сушки древесных опилок, показана на рис. 5.2.

Часто аэрофонтанные сушилки комбинируют с другими типами сушилок, например, с сушилками кипящего слоя.

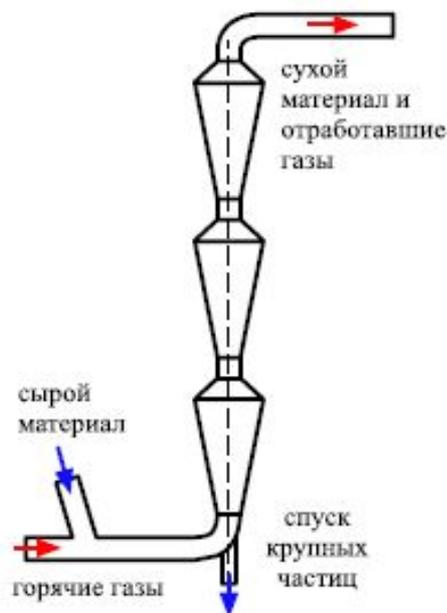


Рис. 5.2. Ступенчатая сушилка

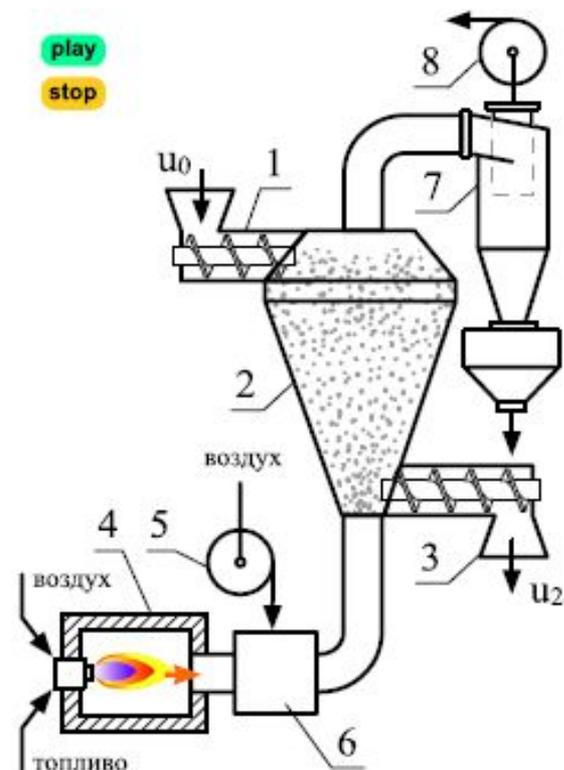


Рис. 5.1. Аэрофонтанная установка: 1 - подача влажного материала; 2 - корпус сушилки (рюмка); 3 - разгрузка сухого материала; 4 - топка; 5 - дутьевой вентилятор; 6 - камера смешения; 7 - циклон; 8 - дымосос; u_0 , u_2 - начальное и конечное влагосодержание материала

6. Сушильная установка с кипящим слоем

На рис. 6.1 приведена схема установки для сушки влажных материалов, оборудованная камерой с кипящим слоем. Основным узлом в камерах кипящего слоя является система воздухораспределения (решетка), состоящая из колпачков различной конфигурации, основным назначением которых является равномерное распределение потока подаваемого под решетку воздуха или газа со скоростью, обеспечивающей псевдооживление слоя.

Причина образования кипящего слоя заключается в следующем. Если через неподвижный слой твердых частиц, лежащих на решетке, пропускать снизу вверх поток газа или воздуха, при этом увеличивая его скорость, то постепенно весь слой перейдет во взвешенное состояние. Он **возрастет в объеме**, в нем будет происходить интенсивное перемешивание частиц, как бы "кипение", которое способствует улучшению теплообмена. При дальнейшем увеличении скорости слой разрушается, твердые частицы уносятся потоком газа.

Скорость газа, при которой начинается кипение слоя, называется критической $w_{кр}$. Скорость газа, при которой происходит разрушение слоя, называется скоростью уноса $w_{ун}$ или скоростью витания.

При определении габаритов установки с кипящим слоем, рассчитывают высоту слоя:

$$H_{сл} = \frac{c_{\Gamma} \cdot L_{сг} \cdot \varphi_s \cdot d_{эк}}{6 \cdot \alpha \cdot (1 - \varepsilon) \cdot F_p} \cdot \ln \frac{(t_{вх} - \bar{\vartheta}_M)}{(t_{вых} - \bar{\vartheta}_M)}, \quad (6.1)$$

где $\varphi_s = F_{сф}/F_M$ - коэффициент формы частицы. Для шара $\varphi_s \leq 1$ (коэффициент формы частицы определяется опытным путем); $d_{эк}$ - эквивалентный диаметр частицы:

$$d_{эк} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_M}{\pi}}. \quad (6.2)$$

Коэффициент конвективного теплообмена определяется из критериальной зависимости:

$$Nu = 1,6 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{Re}{\varepsilon}\right)^{1,3} \cdot Pr^{0,33} \quad \text{при } Re < 200, \quad (6.3) \quad \text{где } Nu = \alpha \cdot d_{эк} / \lambda_{\Gamma},$$

$$\text{или } Nu = 0,4 \cdot \left(\frac{Re}{\varepsilon}\right)^{0,67} \cdot Pr^{0,33} \quad \text{при } Re > 200, \quad (6.4) \quad Pr = \nu_{\Gamma} / a = \nu_{\Gamma} \cdot c_{\Gamma} \cdot \rho_{\Gamma} / \lambda_{\Gamma}$$

Важнейшей характеристикой слоя твердых частиц является порозность - это отношение пустот между частицами в слое к объему слоя:

$$\varepsilon_0 = (V_0 - V_M) / V_0 = 1 - \rho_{нс} / \rho_M, \quad (6.5)$$

где $\rho_{нс} = G_M / V_0$ - насыпная плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; V_M - объем, занимаемый материалом, V_0 - объем сосуда, м^3 .

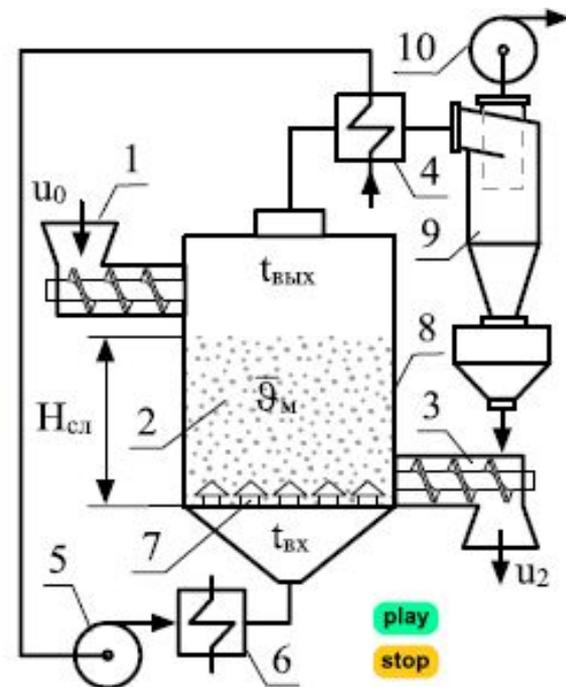
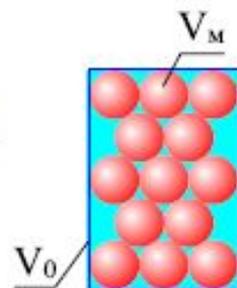


Рис. 6.1. Установка с кипящим слоем: 1 - подача влажного материала; 2 - кипящий слой; 3 - разгрузка сухого материала; 4 - теплоуловитель; 5 - воздуходувка; 6 - калорифер; 7 - воздухораспределительные колпачки; 8 - сушильная камера; 9 - циклон; 10 - дымосос; u_0 и u_2 - начальное и конечное влагосодержание материала;



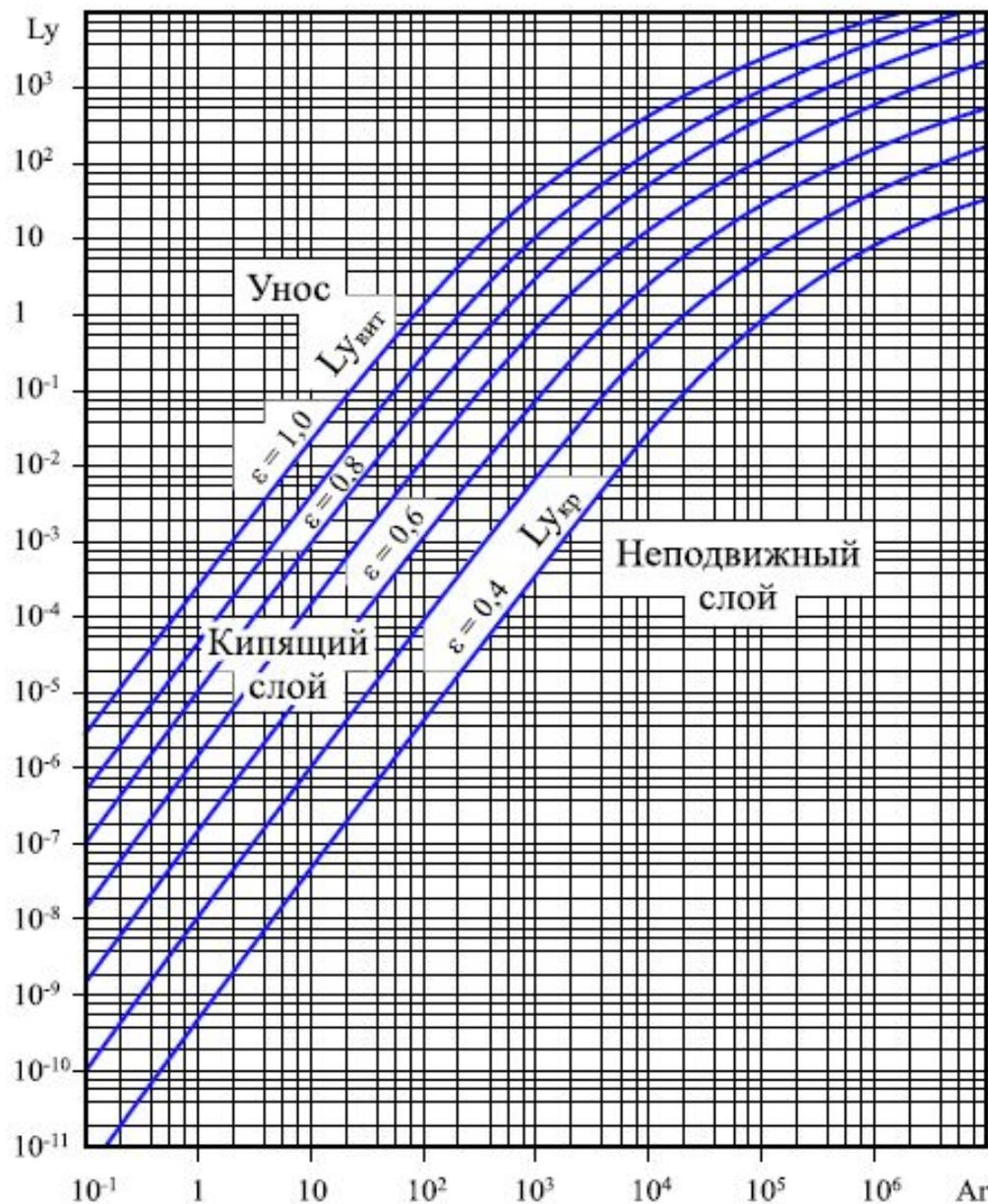


Рис. 6.2. Зависимость между критериями Лященко и Архимеда

6. Сушильная установка с кипящим слоем

Для неподвижного слоя шаровых частиц одинакового диаметра порозность составляет приблизительно 0,4 независимо от диаметра частиц. Для взвешенного слоя порозность с увеличением расхода газа будет повышаться, так как объем взвешенного слоя возрастет. Среднюю порозность кипящего слоя можно определить по уравнению О. М. Тодеса и З. Б. Розенбаума:

$$\epsilon_0 = \left(\frac{18 \cdot Re + 0,36 \cdot Re^2}{Ar} \right)^{0,21} \quad (6.6)$$

При скорости уноса $w_{ун}$ $\epsilon = 1$. Таким образом, взвешенный слой шаровых частиц одного диаметра может существовать в пределах от 0,4 ($w_{\phi} = w_{кр}$) до 1 ($w_{\phi} = w_{ун}$). С некоторым приближением это можно принять и для частиц, имеющих форму многогранника.

В гидравлике взвешенного слоя очень удобной для расчетов и наглядной является графическая зависимость между критериями Лященко и Архимеда при значениях ϵ , соответствующих области существования кипящего слоя шаровых частиц (см. рис. 6.2).

Критерий Лященко определяется по формуле

$$Ly = \frac{w_{\phi}^3 \cdot \rho_r}{\nu_r \cdot (\rho_m - \rho_r) \cdot g} \quad (6.7)$$

где ν_r - вязкость газов, m^2/c ; w_{ϕ} - фиктивная скорость газа, равная отношению объемного расхода газа к сечению решетки $w_{\phi} = V_{cr}/F_p$, m/c .

Критерий Архимеда определяется по формуле

$$Ar = \frac{d_{эк}^3 \cdot (\rho_m - \rho_r) \cdot g}{\nu_r^2 \cdot \rho_r} \quad (6.8)$$

7. Пневматическая сушильная установка (труба-сушилка)

Для сушки мелкозернистых материалов во взвешенном состоянии применяются пневматические установки, принцип действия которых основан на перемещении влажного материала совместно с потоком нагретого воздуха или продуктов сгорания. На рис. 7.1 показана схема пневматической сушильной установки, которая состоит из трубы-сушилки, циклона, дымососа, питателя влажного материала.

Влажный материал (или топливо) питателем подается в трубу-сушилку, подхватывается потоком газа и перемещается по трубе-сушилке, в циклоне происходит разделение твердой фазы и газа. Продукты сгорания выбрасываются в атмосферу, а подсушенный материал направляется для дальнейшего использования.

На таком же принципе основана подсушка топлива в шахтно-мельничных установках, в которых после размельчения в мельницах частички влажного топлива подхватываются нагретым потоком первичного воздуха и направляются в топку.

В основе расчета аэродинамики пневматических сушильных установок лежит определение скорости витания частиц материала $w_{\text{вит}}$. Рассмотрим, что же это такое.

На одиночную твердую частицу, находящуюся в направленном вверх потоке газа или жидкости, действуют (рис. 7.2): сила тяжести G , подъемная (Архимедова) сила A и сила динамического давления потока P .

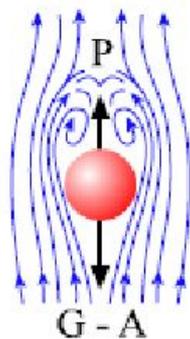


Рис. 7.2.

Силы, действующие на твердую частицу в направленном вверх потоке среды

Для шаровой частицы диаметром d_m

$$G = \frac{\pi \cdot d_m^3}{6} \cdot \rho_m \cdot g; \quad (7.1)$$

$$A = \frac{\pi \cdot d_m^3}{6} \cdot \rho_{\text{ср}} \cdot g; \quad (7.2)$$

$$P = \xi_{\text{вит}} \cdot \frac{\pi \cdot d_m^2}{4} \cdot \frac{w_{\text{вит}}^2 \cdot \rho_{\text{ср}}}{2}, \quad (7.3)$$

где $\rho_m, \rho_{\text{ср}}$ - плотности материала и среды, кг/м³; $w_{\text{вит}}$ - скорость потока (скорость витания), м/с; $\xi_{\text{вит}}$ - безразмерный коэффициент лобового сопротивления частицы, зависящий от режима течения среды.

Если $G - A > P$, частица будет опускаться вниз, если $G - A < P$, частица будет уноситься потоком вверх. При $G - A = P$, когда все силы, действующие на частицу, уравновешены, частица будет находиться в потоке во взвешенном состоянии, будет в нем "витать". Скорость среды, при которой достигается такое взвешенное состояние частицы, называется скоростью витания.

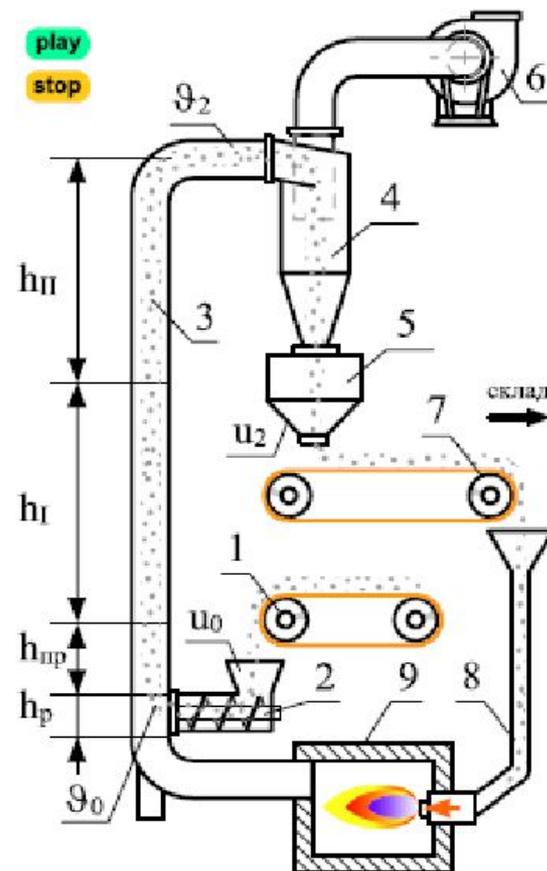


Рис. 7.1. Труба-сушилка:

1 - подача влажного материала; 2 - питатель; 3 - труба-сушилка; 4 - циклон; 5 - бункер для сухого материала (топлива); 6 - дымосос; 7 - транспортер для сухого материала (топлива); 8 - линия топливоподачи; 9 - топка; $h_{\text{пр}}, h_t, h_{\text{п}}$ - участки прогрева, первого и второго периодов сушки; θ_0, u_0 и θ_2, u_2 - начальные и конечные температура и влажность материала

В начале трубы частицы материала со скоростью, равной нулю, подхватываются потоком газа и увеличивают свою скорость до скорости установившегося движения. Этот участок называется разгонным участком (h_p). В конце разгонного участка частицы материала приобретают скорость, определяемую из условия равенства силы тяжести и сопротивления среды:

$$\frac{\pi \cdot d_M^3}{6} \cdot (\rho_M - \rho_{cp}) \cdot g = \xi_{вит} \cdot \frac{\pi \cdot d_M^2}{4} \cdot \frac{w_{вит}^2 \cdot \rho_{cp}}{2}. \quad (7.4)$$

Из уравнения (7.4) определяется скорость витания $w_{вит}$ частиц материала:

$$w_{вит} = \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot (\rho_M - \rho_{cp}) \cdot d_M}{3 \cdot \rho_{cp} \cdot \xi_{вит}}}. \quad (7.5)$$

Задача теплового расчёта пневматических установок заключается в определении диаметра и высоты трубы-сушилки. Приведем упрощенную методику теплового расчета пневматической сушильной установки.

Расход теплоты на сушку материала складывается из расхода теплоты на прогрев влажного материала, расхода теплоты в I периоде сушки и расхода теплоты во II периоде сушки:

$$Q_c = Q_{пр} + Q_I + Q_{II}. \quad (7.6)$$

Расход теплоты в период прогрева равен: $Q_{пр} = G_{сух} \cdot (c_M + c_w \cdot u_0) \cdot (\vartheta_M - \vartheta_0)$. (7.7)

Расход теплоты в I периоде сушки определяется по формуле: $Q_I = G_{сух} \cdot (u_0 - u_k) \cdot r_1$. (7.8)

Расход теплоты во II периоде сушки: $Q_{II} = G_{сух} \cdot [(c_M + c_w \cdot u_2) \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_M) + (u_k - u_2) \cdot r_2]$, (7.9)

где $G_{сух}$ - расход материала по абсолютно сухой массе; c_M, c_w, c_{II} - теплоёмкости абсолютно сухого материала, влаги и пара; u_0, u_k, u_2 - влагосодержание материала начальное, критическое и конечное; $\vartheta_0, \vartheta_M, \vartheta_2$ - температуры материала начальная, в I и II периодах сушки; r_1, r_2 - теплота парообразования в I и II периодах сушки.

Потери теплоты в окружающую среду принимаем равными: $Q_{окр} = k \cdot F_{тр} \cdot \Delta t \approx 0,1 \cdot Q_c$. (7.10)

Массовый расход сушильного агента: $L_r = \frac{Q_c + Q_{окр}}{c_r \cdot (t_{r1} - t_{r2})}$, (7.11) где c_r - средняя теплоемкость сушильного агента, t_{r1} и t_{r2} - температура сушильного агента на входе и выходе из трубы.

По расходу сушильного агента рассчитываются сечение трубы-сушилки и ее диаметр:

$$F_{тр} = \frac{L_r}{3600 \cdot \rho_{cp} \cdot w_r}, \quad (7.12) \quad D_{тр} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{тр}}{\pi}}, \quad (7.13) \quad \text{где } w_r = w_{вит} + (1 \div 2 \text{ м/с}) - \text{ скорость сушильного агента.}$$

Количество теплоты, передаваемое материалу в пневматической трубе-сушилке, рассчитывается по уравнению теплообмена:

$$Q_r = \alpha \cdot F_M \cdot \Delta t = \alpha_v \cdot F_{тр} \cdot \Delta t = \alpha_h \cdot h_{тр} \cdot \Delta t. \quad (7.14)$$

В уравнении теплообмена площадь поверхности частиц материала F_M заменяется на площадь сечения трубы $F_{тр}$. При этом вводится понятие объемного коэффициента теплоотдачи α_v - количества теплоты, которое передается влажному материалу в 1 м³ объема трубы при разности температур 1°C в единицу времени. Величина объемного коэффициента теплообмена находится в пределах от 100 до 1200 Вт/(м³ · К).

В некоторых методиках используется линейный коэффициент теплообмена α_h Вт/(м · К).

7. Пневматическая сушильная установка (труба-сушилка)

Объёмный коэффициент теплообмена рассчитывается: $\alpha_v = \alpha \cdot f_{уд}$, (7.15)

где $f_{уд} = F_M / V_{тр} = 6 \cdot \beta_v / (d_m \cdot \rho_m)$ - удельная поверхность теплообмена, m^2/m^3 ; $V_{тр}$ - объем трубы, занятый материалом, m^3 ; $\beta_v = G_{сух} / (3600 \cdot w_r \cdot F_{тр})$ - объемная концентрация частиц материала, $кг/м^3$ трубы.

Поверхность теплообмена (поверхность шаровых частиц материала) рассчитывается:

$$F_M = \pi \cdot d_m^2 \cdot n = 6 \cdot G_{сух} / (d_m \cdot \rho_m), \quad (7.16)$$

где $n = G_{сух} / (V_m \cdot \rho_m) = 6 \cdot G_{сух} / (\pi \cdot d_m^3 \cdot \rho_m)$ - число частиц, находящихся в трубе.

Высота трубы-сушилки складывается из участков соответствующих периодам сушки:

$$H_{тр} = \frac{Q_c + Q_{окр}}{3,6 \cdot \alpha_v \cdot F_{тр} \cdot \Delta t} \quad (7.17)$$

Коэффициент конвективного теплообмена для частиц, витающих в трубе, рассчитывается:

$$\alpha = 2 \cdot \lambda_r / d_m \text{ при } Re_{вит} < 20 \text{ или } \alpha = 0,186 \cdot Re_{вит}^{0,8} \cdot \lambda_r / d_m \text{ при } 20 < Re_{вит} < 480$$

$$\text{или } \alpha = 1,14 \cdot Re_{вит}^{0,8} \cdot \lambda_r / d_m \text{ при } 480 < Re_{вит} < 2000. \quad (7.18)$$

Температурный напор определяется для участков, соответствующих периодам сушки:

$$\Delta t = \frac{(t_1 - \vartheta_0) - (t_2 - \vartheta_2)}{\ln \frac{(t_1 - \vartheta_0)}{(t_2 - \vartheta_2)}} \quad (7.19)$$

Определение температурного напора при сушке осложняется тем, что процесс происходит при переменной температуре газовой среды. Для инженерных расчетов определение температурного напора с достаточной степенью точности может быть произведено графоаналитическим способом при помощи I-d диаграммы. **Подробнее смотри здесь.**

Пневматические сушильные установки являются высокоэффективными аппаратами для сушки влажных мелкозернистых материалов. Они компактны и просты в обращении. Диаметр трубы обычно не превышает 1,5 м, а ее высота 10 - 25 м. Скорость газов в трубе составляет 20 - 30 м/с. Однако степень высушивания материала в пневмосушилках невелика вследствие малого времени пребывания материала в сушильной трубе. В целях достижения более глубокой подсушки материала применяют двух- и трехступенчатые сушильные установки, например, для сушки целлюлозы-пушонки (см. рис. 7.3), или используют установки со спиральными трубами, например, для сушки отрубей.

В комплект пневмосушилок входит вспомогательное оборудование для транспортировки запыленного потока: дымосос или вентилятор и для улавливания частиц материала - циклоны. **Подробнее о вспомогательном оборудовании смотри здесь.** Дополнительно прилагаются **графические материалы для выполнения эскиза (чертежа) пневматической сушильной установки.**

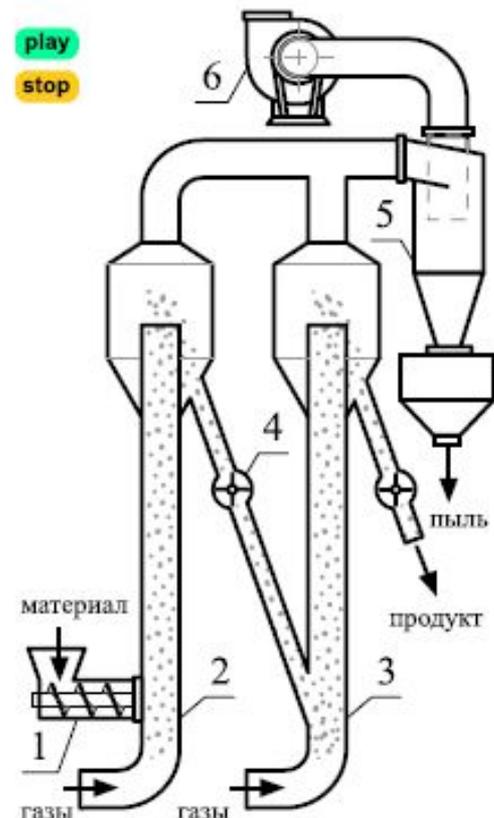


Рис. 7.3. Ступенчатая труба-сушилка: 1 - подача влажного материала; 2, 3 - сушильные трубы первой и второй ступеней; 4 - отвод материала; 5 - циклон; 6 - дымосос

8. Барабанная сушильная установка

Барабанные установки применяются при сушке песка, глины, влажного топлива и других сыпучих материалов.

Основным узлом в установке является сушильный барабан, имеющий цилиндрическую форму диаметром от 1,2 до 3,5 м и длину от 8 до 27 м. Он устанавливается на роликовых опорах под углом наклона к горизонту 1 - 3°. Привод барабана осуществляется от электродвигателя посредством редуктора и приводной шестерни. Частота вращения барабана регулируется в пределах от 2 до 10 об/мин. Снаружи барабан изолирован материалом с низкой теплопроводностью (рис. 8.1).

Внутри барабан имеет насадки различной конструкции, назначением которых является равномерное распределение материала по сечению. Применительно к сушке топлива и древесных отходов наиболее универсальной является насадка с подъёмными лопастями, которые в нижней части барабана набирают материал, а на определённой высоте ссыпают в виде струй, омываемых газами (рис. 8.2).

Как правило, в барабанах движение газов и материала - прямоточное. Начальная температура газов выбирается в зависимости от свойств высушиваемого материала и его влажности.

Конструкция предтопки определяется видом сжигаемого топлива. Если это твёрдое топливо, то предтопка может быть слоевая или камерная. Для получения необходимой температуры между топкой и барабаном предусматривается подача холодного воздуха в поток горячих продуктов сгорания (присадочный воздух).

Расчет барабанной сушильной установки сводится к определению удельных расходов теплоты и сушильного агента, а также габаритных размеров (длины и диаметра барабана) с последующим уточнением и выбором ближайших размеров **по каталогу**.

Существует упрощенная методика А. П. Ворошилова [2] основанная на статистических данных о напряжении объема барабана по испаренной влаге A_v . По этой методике объем барабана определяется по формуле

$$V_6 = W/A_v, \quad (8.1)$$

где $W = G_{\text{сух}} \cdot (u_0 - u_2)$ - расход испаряемой влаги, кг/ч; A_v - напряжение объема барабана по испаренной влаге, кг/(м² · ч).

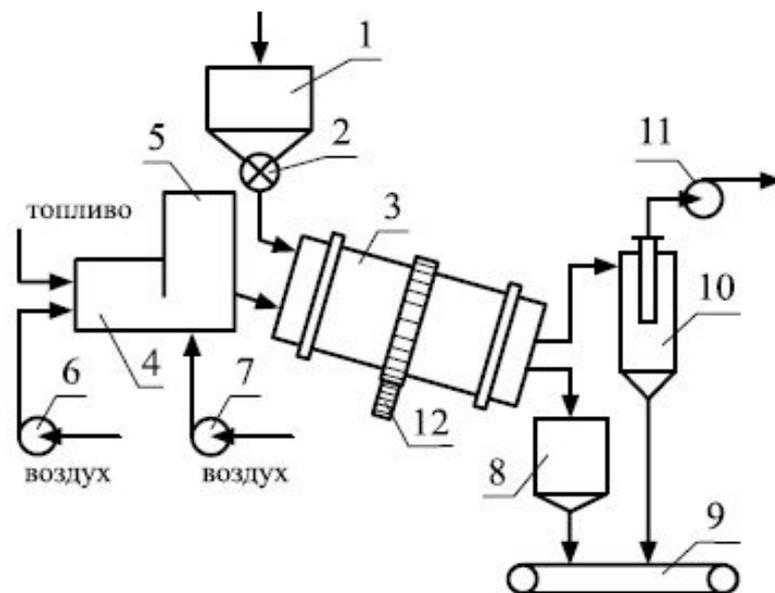
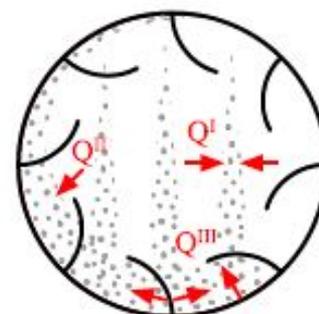


Рис. 8.1. Барабанная сушильная установка:
1 - бункер влажного материала; 2 - питатель; 3 - сушильный барабан; 4 - топка; 5 - камера смешения; 6 - воздух для горения; 7 - присадочный воздух; 8 - бункер сухого материала; 9 - транспортер; 10 - циклон; 11 - дымосос; 12 - шестерня



play
stop

Рис. 8.2. Подъемно-лопастная насадка для крупнокусковых или склонных к налипанию материалов

Величина A_v зависит от типа сушилки, степени заполнения ее объема и числа оборотов, от свойств, влажности и размеров частиц материала, от температуры, влажности и скорости сушильного агента внутри барабана. Значения A_v берутся из справочника.

Более точный метод расчета с помощью объемного коэффициента теплообмена α_v предложен Н. М. Михайловым [3]. По этой методике объем барабана определяется по формуле

$$V_6 = 1,2 \cdot Q_6 / (3,6 \cdot \alpha_v \cdot \Delta t) = 0,33 \cdot Q_6 / (\alpha_v \cdot \Delta t), \quad (8.2)$$

где 1,2 - коэффициент, учитывающий заполнение барабана материалом; $Q_6 = W \cdot q_c$ - теплота, затраченная на сушку, кДж/ч; q_c - см. формулу (8.6); α_v - объемный коэффициент теплообмена, Вт/(м³·К); Δt - температурный напор, °С.

В барабане имеет место сложный теплообмен. Согласно рис. 8.2 теплота передается материалу конвекцией и лучеиспусканием от трёхатомных газов через поверхность падающих с лопаток частиц Q^I и через наружную поверхность материала, находящегося на лопатках и в завале Q^{II} , а также за счет теплопроводности при контакте материала с более нагретыми частями барабана Q^{III} . При этом, конвективным способом передается 85-90 % всей теплоты.

Объемный коэффициент теплообмена равен сумме трех коэффициентов $\alpha_v = \alpha_v^I + \alpha_v^{II} + \alpha_v^{III}$, каждый из которых определяется по сложным формулам. А. В. Лыковым [4] была предложена упрощенная эмпирическая зависимость.

$$\alpha_v = 16 \cdot (w_T \cdot \rho_T)^{0,9} \cdot n^{0,7} \cdot \beta^{0,54}, \quad \text{Вт/(м}^3 \cdot \text{К)}, \quad (8.3)$$

где ρ_T - плотность газов, кг/м³; n - частота вращения барабана, об/мин; β - оптимальное заполнение материалом барабана, %; w_T - скорость газов в сечении барабана, м/с. Скорость газов принимается на 1 - 2 м/с меньше скорости витания для предупреждения уноса мелких фракций материала из барабана.

Температурный напор определяется как среднее логарифмическое разностей температур между сушильным агентом и материалом на входе и выходе из барабана.

$$\Delta t = \frac{(t_1 - \vartheta_0) - (t_2 - \vartheta_2)}{\ln \frac{(t_1 - \vartheta_0)}{(t_2 - \vartheta_2)}}, \quad ^\circ\text{C}. \quad (8.4)$$

Согласно уточненной методике [5], объем барабана складывается из объема, необходимого для прогрева влажного материала $V_{гр}$ до температуры смоченного термометра, и объема, требуемого для испарения влаги $V_{сущ}$. Последний определяется с помощью коэффициента массообмена β_v и средней концентрации водяных паров $\Delta C_{ср}$. [Смотри подробно здесь.](#)

$$V_{сущ} = W / (3600 \cdot \beta_v \cdot \Delta C_{ср}), \quad \text{м}^3. \quad (8.5)$$

Удельный расход теплоты на сушку материала, отнесённый к 1 кг испаряемой влаги, имеет вид:

$$q_c = q_{исп} + q_{наг} + q_{окр}. \quad (8.6)$$

Удельный расход теплоты на испарение влаги $q_{исп}$ является полезно затраченной теплотой и определяется по формуле

$$q_{исп} = i_0 + c_n \cdot t_2 - c_w \cdot \vartheta_0. \quad (8.7)$$

Расход теплоты на нагревание влажного материала q_m от начальной ϑ_0 до конечной ϑ_2 температуры рассчитывается по формуле

$$q_{наг} = (c_m + c_w \cdot u_2) \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_0) / (u_0 - u_2). \quad (8.8)$$

Потери теплоты в окружающую среду $q_{\text{окр}}$ определяются по уравнению:

$$q_{\text{окр}} = 3,6 \cdot k \cdot F_{\text{б}} \cdot \Delta t_{\text{ср}} / W \approx (0,1 \div 0,12) \cdot (q_{\text{исп}} + q_{\text{наг}}), \quad (8.9)$$

где $F_{\text{б}}$ - площадь поверхности барабана, м^2 ; k - коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $\Delta t_{\text{ср}}$ - средняя разность температур между сушильным агентом и окружающей средой, $^{\circ}\text{C}$. При конструктивном расчете, когда еще не известна площадь поверхности барабана, принимаем потери в окружающую среду как 10 - 12 % теплоты, затраченной на нагрев и испарение влаги.

Массовый расход сушильного агента в барабанной сушильной установке рассчитывается по формуле

$$L_{\text{г}} = G_{\text{сух}} \cdot (u_0 - u_2) \cdot 1000 / (d_2 - d_1), \quad \text{кг/ч}, \quad (8.10)$$

где d_2, d_1 - влагосодержание сушильного агента на выходе и входе в барабан, г/кг .

Из уравнения расхода определяют диаметр сушильного барабана:

$$D_{\text{б}} = \sqrt{\frac{4 \cdot L_{\text{г}}}{3600 \cdot w_{\text{г}} \cdot \rho_{\text{г}} \cdot (1 - \beta)}}, \quad \text{м}, \quad (8.11)$$

Длина барабана рассчитывается по формуле:

$$L_{\text{б}} = V_{\text{б}} / (0,785 \cdot D_{\text{б}}^2), \quad \text{м}. \quad (8.12)$$

Средняя продолжительность пребывания материала в барабане определяется как

$$\tau_{\text{с}} = \frac{3600 \cdot V_{\text{б}} \cdot \rho_{\text{м}} \cdot \beta}{G_{\text{сух}} \cdot (1 + u_2) + 0,5 \cdot W}, \quad \text{с}, \quad (8.13)$$

где $\rho_{\text{м}}$ - насыпная плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Угол наклона барабана определяется по известному времени пребывания материала в сушилке:

$$\angle \alpha = [30 \cdot L_{\text{б}} / (D_{\text{б}} \cdot n \cdot \tau_{\text{с}}) + 0,007 \cdot w_{\text{г}}] \cdot 180 / \pi, \quad \text{град}, \quad (8.14)$$

где n - частота вращения барабана (от 2 до 10 об/мин).

Если полученное значение мало (меньше 0,5 град), уменьшают число оборотов барабана n и повторяют расчет.

Потребная мощность электродвигателя для вращения барабана ориентировочно может быть определена по формуле:

$$N_{\text{эл}} = 0,0013 \cdot D_{\text{б}}^3 \cdot L_{\text{б}} \cdot \rho_{\text{м}} \cdot n \cdot \sigma, \quad \text{кВт}, \quad (8.15)$$

где σ - коэффициент мощности, зависящий от типа насадки и степени заполнения барабана материалом, $\sigma = 0,0125 - 0,071$.

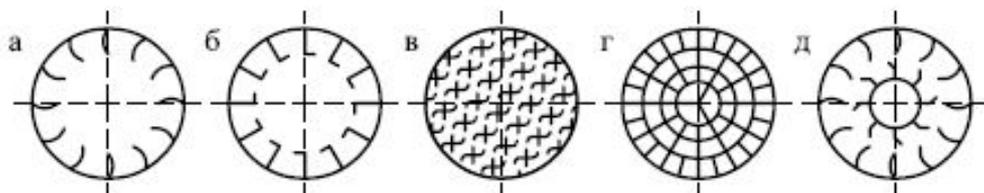


Рис. 8.3. Типы внутренних насадок и степень заполнения барабана β : а - подъемно-лопастная, $\beta = 12\%$; б - то же, $\beta = 14\%$; в - распределительная, $\beta = 20,6\%$; г - с закрытыми ячейками, $\beta = 27,5\%$; д - комбинированная