

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Белгородский государственный технологический университет  
им. В. Г. Шухова

**В. В. Губарева**

**РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ  
КОНВЕКТИВНЫХ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК**

**Учебное пособие**



**Белгород  
2014**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Белгородский государственный технологический университет  
им. В. Г. Шухова

**В. В. Губарева**

**РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ  
КОНВЕКТИВНЫХ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК**

*Утверждено ученым советом университета  
в качестве учебного пособия  
для студентов направления бакалавриата  
140100 – Теплоэнергетика и теплотехника  
профилей подготовки "Энергетика теплотехнологии"  
и "Энергообеспечение предприятий"*

Белгород  
2014

УДК 666.1.032 (075)  
ББК 35.41 я 73  
Г93

Рецензенты:

Доктор технических наук, генеральный директор ООО «Энергоэффективность и энергосбережение» *П. А. Трубаев*

Кандидат технических наук, профессор Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова *А. Д. Толстой*

**Губарева В. В.**

Г93 Расчет и проектирование конвективных сушильных установок:  
учеб. пособие: /В.В. Губарева. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. – 118 с.

В учебном пособии представлены теплотехнологические и конструктивные схемы конвективных сушилок, приведены методики теплотехнического расчета сушилок, а также расчета и подбора вспомогательного оборудования. Кроме того, приведены справочные материалы для проведения расчетов основного и вспомогательного оборудования в ходе курсового проектирования

Учебное пособие предназначено для выполнения курсового проекта по дисциплинам "Термовлажностные и низкотемпературные теплотехнологические процессы и установки" и "Тепломассообменное оборудование предприятий" для студентов направления бакалавриата 140100 – Теплоэнергетика и теплотехника профилей подготовки "Энергетика теплотехнологии" и "Энергообеспечение предприятий".

Данное издание публикуется в авторской редакции.

УДК 666.1.032 (075)  
ББК 35.41 я 73

© Белгородский государственный  
технологический университет  
(БГТУ) им. В.Г. Шухова, 2014

## ВВЕДЕНИЕ

Курсовой проект является заключительным этапом в изучении теоретического курса.

При выполнении курсового проекта студент не только расширяет и закрепляет теоретически и практически знания, полученные при изучении дисциплины, но и овладевает навыками самостоятельного решения конкретных инженерных задач.

В качестве объекта проектирования выбраны конвективные сушильные установки, что в полной мере соответствует методическим требованиям подготовки энергетиков теплотехнологии, так как раздел «Сушка и сушильные установки» является одним из основных разделов дисциплин «Термовлажностные и низкотемпературные теплотехнологические процессы и установки» и «Тепломассообменное оборудование предприятий».

Для обезвоживания в промышленности чаще всего применяют тепловую сушку, которая является процессом с интенсивным потреблением энергии. Поэтому ученые и эксплуатационники постоянно ищут пути уменьшения использования тепла. Оценка современной технологии и техники сушки в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства показывает, что с помощью использования известных способов энергосбережения можно получить экономию тепла до 30%.

На практике разрабатываются и применяются многочисленные способы интенсификации тепло- и массопереноса, причем выбор оптимального способа сушки должен быть основан на реализации системного подхода и завершаться оценкой его технико-экономической целесообразности.

Инженер-теплотехник должен хорошо владеть теорией сушки, а также иметь развернутое представление о проблемах рационального проектирования и эксплуатации сушильных установок.

Получив тему курсового проекта, студент должен изучить имеющиеся достижения в этой области, выбрать наиболее рациональную, энергоэффективную и экологически безопасную теплотехнологическую схему и выполнить теплотехнические расчеты основного и вспомогательного оборудования.

Расчетно-пояснительную записку курсового проекта оформляют на листах форматом А4. Запись ведут на одной стороне листа шрифтом Times New Roman, размер 14 pt с полуторным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу и вверху – 2 см.

Первая страница работы является титульным листом; на втором листе оформляется задание, на третьем – оглавление.

Затем приводится литературный обзор с обоснованием применяемого

способа, рабочего режима сушки и принципиальной схемы установки, а также сравнительной характеристики конвективных сушилок. Далее дается описание установки в целом и основных ее устройств и аппаратов. Затем приводят материальный, тепловой, аэродинамический и конструктивный расчеты, а также расчет и подбор вспомогательного оборудования (топки, калорифера, питателя, пылеулавливающих устройств, вентилятора и др.). Все данные, отсутствующие в задании, но необходимые для расчета, выбирают из соответствующих справочных таблиц, получают по номограммам или рассчитывают по формулам.

При оформлении расчетной части необходимо выписать расчетное уравнение, все обозначения величин, входящих в уравнение; подставить числовые данные и дать расчет; подставить размерность величин окончательного результата. Все вычисления в курсовом проекте следует выполнять в международной системе единиц измерения. В связи с этим уравнения в учебном пособии приведены к форме, рассчитанной на подстановку в них физических величин в единицах СИ и не содержат переводных коэффициентов.

Объем расчетно-пояснительной записки 25...30 страниц машинописного текста.

Графическая часть проекта состоит из двух листов формата А1 и выполняется с помощью компьютерной техники. На первом листе должна быть представлена теплотехнологическая компоновочная схема установки, на втором – разрез основного аппарата и разрез одного из аппаратов вспомогательного оборудования или узла основного аппарата (по заданию преподавателя).

## 1. ПРОЦЕССЫ СУШКИ В КОНВЕКТИВНЫХ СУШИЛКАХ

Тепловой метод обезвоживания или **тепловая сушка** – процесс удаления влаги из материала путем подвода теплоты (испарения влаги) и отвода образующихся паров.

Сушка материалов весьма распространенный технологический процесс. Нет ни одной отрасли промышленности, где бы этот процесс не имел места. Это — энергоемкий процесс. В целом в нашей стране на сушку расходуется около 12% всей добываемой энергии топлива. Поэтому правильно выбранный оптимальный режим сушки должен соответствовать минимальным затратам тепла и энергии, максимальной скорости удаления влаги при наилучших технологических свойствах обрабатываемых материалов.

Реализация процесса тепловой сушки связана с изменением теплового состояния вещества при регламентированном тепловом воздействии на исходный материал посредством тепло- и массопереноса. Анализ тепло- и массопереноса, управление протеканием их во времени предполагают глубокое знание теории сушки.

Удаление влаги при сушке сводится к перемещению тепла и вещества (влаги) внутри материала и их переносу с поверхности материала в окружающую среду. Таким образом, процесс сушки является сочетанием связанных друг с другом процессов тепло- и массообмена. Этот процесс может протекать, когда парциальное давление водяных паров на поверхности высушиваемого материала больше, чем в окружающей среде. Так как процесс сушки носит двойственный характер (с одной стороны — это теплообменный процесс, с другой - массообменный), то существуют две движущие силы этого процесса: 1) для массообменного процесса – разность парциальных давлений (концентраций) водяных паров на поверхности материала  $P_m$  и в окружающей среде  $P_c$ ; 2) для теплообменного процесса – разность температур сушильного агента (температура сухого термометра  $t$ ) и поверхности материала (температура мокрого термометра  $t_m$ ), называемая потенциалом сушки.

Аппараты, в которых осуществляют тепловую сушку, называются сушилками.

**По способу сообщения тепла различают** конвективные, контактные, терморadiационные, сублимационные и высокочастотные сушилки. Дисперсные материалы, к которым относятся зернистые, порошкообразные, гранулированные, дробленые твердые, а также диспергированные жидкие и пастообразные продукты, в химической технологии высушивают, главным образом, конвективным способом.

В *конвективных сушилках* тепло для процесса несет газообразный сушильный агент (нагретый воздух, топочные газы или смесь их с воз-

духом), непосредственно соприкасающийся с поверхностью материала. Пары влаги уносятся тем же сушильным агентом. Если соприкосновение высушиваемого материала с кислородом воздуха недопустимо или если пары удаляемой влаги взрыво- или огнеопасны, сушильным агентом служат инертные по отношению к высушиваемому материалу газы: азот, диоксид углерода, гелий и другие инертные газы или перегретый водяной пар. В сушилках многих типов со взвешенным слоем высушиваемого материала сушильный агент служит не только тепло- и влагоносителем, но и транспортирующей средой для дисперсной частицы материала.

**В контактных сушилках** тепло сушимому материалу передается от сушильного агента через разделяющую стенку.

**В терморadiационных сушилках** материал высушивается инфракрасными лучами, в **сублимационных** – при замораживании под вакуумом, в **диэлектрических** – токами высокой частоты.

Сушка проводится под атмосферным давлением и под вакуумом, при этом высушиваемый материал может находиться в состоянии покоя, перемешиваться, в "кипящем слое" и так далее.

В технологических схемах различных производств конвективным способом, главным образом, высушивают дисперсные материалы, к которым относятся зернистые, порошкообразные, гранулированные, дробленые твердые, а также диспергированные жидкие и пастообразные продукты.

### 1.1. Классификация и свойства влажного материала

Классификация высушиваемых материалов по определяющим характеристикам и знание их свойств дают возможность выбрать рациональный метод и режим сушки, а также спроектировать эффективную сушильную установку.

Выявление общих физических закономерностей в процессе переноса теплоты и влаги внутри влажных материалов и анализ их структурно-механических характеристик позволило академику А.В.Лыкову предложить следующую классификацию высушиваемых материалов [1]:

– **капиллярно-пористые материалы** – это материалы, в которых жидкость в основном связана капиллярными силами. При обезвоживании капиллярно-пористые тела практически не изменяют свои размеры, становятся хрупкими и в высушенном состоянии могут быть превращены в порошок. Они мало сжимаются и впитывают любую смачивающую жидкость. Для таких материалов капиллярные силы значительно превышают силы тяжести (силикагель, керамика, гипс, полимеры);

– **коллоидные материалы** – это материалы, которые при изменении содержания в них влаги существенно изменяют геометрические размеры, сохраняя эластичные свойства (желатин, мучное тесто и т.п.);

– **капиллярно-пористые коллоидные материалы** (жидкость имеет различные виды связи) имеют капиллярно-пористую структуру, однако стенки капилляров, как правило, эластичны, способны к набуханию при увлажнении и к усыханию при обезвоживании. Материалы этой группы обладают свойствами двух вышеназванных групп.

Большинство влажных материалов относится к третьей группе.

Изучение закономерностей переноса теплоты и влаги при сушке типичных материалов каждой из групп позволяет качественно прогнозировать процесс сушки принадлежащих к этой группе материалов.

При сушке влага из внутренних слоев влажного материала передвигается к поверхности и затем испаряется в окружающую среду. На преодоление сил сцепления молекул влаги друг с другом и со скелетом материала требуются затраты энергии. Поэтому свойства влажных материалов, а также скорость процесса переноса в них зависят от формы связи влаги с материалом. Академиком П.А. Ребиндером [2] была разработана физически обоснованная классификация, согласно которой различают следующие **формы связи влаги с материалом** (в порядке убывания величины энергии связи):

– **химическая** (строго определенное стехиометрическое соотношение влаги и вещества), включающая ионную (влага в виде гидроксильных ионов) и молекулярную (в виде кристаллогидратов) связи. При сушке химически связанная влага не удаляется;

– **физико-химическая** (различные, но не строго определенные соотношения), включающая адсорбционную и осмотическую связи. Адсорбционно-связанная влага образуется при адсорбции пара из окружающей газовой среды поверхностью материала. Осмотически связанная влага – это влага, проникающая в материал за счет осмотического давления, вызывающего избирательную диффузию влаги из окружающей среды через полупроницаемую оболочку;

– **физико-механическая** связь (неопределённые соотношения влаги и сухого вещества) включает влагу, находящуюся в микро- и макрокапиллярах, порах, а также влагу смачивания, проникающую в материал при непосредственном соприкосновении его с жидкостью.

Применительно к процессу сушки влагу материала классифицируют в более широком смысле на свободную и связанную. Под свободной понимают влагу, скорость испарения которой из материала равна скорости испарения воды со свободной поверхности (влага макрокапилляров и макропор). Следовательно, при наличии в материале свободной влаги  $P_m = P_{\text{нас}}$ , где  $P_{\text{нас}}$  – давление пара воды над её свободной поверхностью. Под связанной понимают влагу, скорость испарения которой из материала меньше скорости испарения воды со свободной поверхности, при этом  $P_m < P_{\text{нас}}$ .

Рассмотренные выше классификации отражают качественные ха-



рактические характеристики материала, но для расчетов необходимы количественные характеристики.

Количественными характеристиками влажного состояния материала являются относительная и абсолютная влажность, а также влагосодержание. Массу влажного материала  $G_{\text{вл}}$  можно представить в виде суммы массы сухого материала  $G_{\text{сух}}$  и связанной с ним массы влаги  $W$ :

$$G_{\text{вл}} = G_{\text{сух}} + W. \quad (1)$$

**Относительная влажность** материала – это отношение массы влаги ко всей массе влажного материала, выраженное в %

$$\omega_{\text{от}} = \frac{W}{G_{\text{вл}}} \cdot 100\%. \quad (2)$$

Иногда пользуются понятием **абсолютная влажность**. Это отношение массы влаги к массе сухого материала, выраженное в %:

$$\omega_{\text{аб}} = \frac{W}{G_{\text{сух}}} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Более удобно влажность высушиваемого материала выражать **влагосодержанием**, т.е. отношением массы влаги к массе сухого материала, выраженным в относительных единицах

$$U = \frac{W}{G_{\text{сух}}} \cdot \left[ \frac{\text{кг}}{\text{кг}} \right]. \quad (4)$$

Пересчет относительной влажности в абсолютную и наоборот производится как в процентах:

$$\omega_{\text{аб}} = \frac{\omega_{\text{от}} \cdot 100}{100 - \omega_{\text{от}}}, \% \quad (5)$$

$$\omega_{\text{от}} = \frac{\omega_{\text{аб}} \cdot 100}{100 + \omega_{\text{аб}}}, \% \quad (5a)$$

так и в долях:

$$\omega_{аб} = \frac{\omega_{от}}{1 - \omega_{от}}, \quad (6)$$

$$\omega_{от} = \frac{\omega_{аб}}{1 + \omega_{аб}}. \quad (6a)$$

Основанная на энергетическом принципе классификация влажных материалов П.А. Ребиндера носит обобщающий характер по формам связи влаги с материалом, а классификация А.В. Лыкова построена на структурном принципе и характеризует свойства твердой фазы высушиваемых материалов. В этих классификациях в известной мере учитывается возможность структурных изменений материалов в процессе их сушки: усадка, уменьшение пористости и других показателей в пределах выделенных классов, однако эти явления не увязываются с внешними условиями сушки. Между тем кинетика процесса сушки и изменение структуры высушиваемого материала в значительной степени зависят от внешних условий сушки (температуры, скорости и влажности сушильного агента) и состояния материала по отношению к окружающей среде.

По отношению к окружающей среде различают равновесное, гигроскопическое и влажное состояние материала. Для того чтобы проанализировать эти состояния материала, мы должны рассмотреть один из параметров влажного воздуха, а именно относительную влажность воздуха. **Относительной влажностью воздуха**  $\varphi$  называется отношение массы пара в 1 м<sup>3</sup> влажного воздуха  $\rho_{п}$  к максимально возможной массе пара в 1 м<sup>3</sup> влажного воздуха при тех же условиях  $\rho_{нас}$  (давлении  $P$  и температуре  $t$ ):

$$\varphi = \frac{\rho_{п}}{\rho_{нас}} = \frac{P_{п}}{P_{нас}}, \quad (7)$$

где  $P_{п}$  и  $P_{нас}$  – парциальное давление пара и давление насыщенного пара при тех же условиях.

Взаимодействие влажного материала с окружающим воздухом приводит в результате сорбции или десорбции к **равновесному состоянию системы**, когда парциальное давление паров влаги, содержащейся в материале, становится равным парциальному давлению паров влаги в окружающем воздухе. После этого влагосодержание материала будет оставаться неизменным до тех пор, пока не изменится температура или относительная влажность окружающего воздуха. Такое состояние соответствует **гигротермическому равновесию** материала и окружающей

среды. Влагосодержание, при котором устанавливается гигротермическое равновесие, называется **равновесным**  $U_p$ . Если влагосодержание материала  $U$  меньше равновесного, то он будет поглощать (сорбировать) водяные пары из окружающего воздуха, и наоборот, при  $U < U_p$  материал будет сушиться [3].

Равновесное влагосодержание материала достигает максимума при  $\phi = 100\%$  и называется в этом случае **максимальным гигроскопическим влагосодержанием**  $U_{м.г}$  или максимальной гигроскопической влажностью. Под **гигроскопическим состоянием материала** понимают такое, при котором он поглощает водяные пары из окружающей среды, а под **влажным состоянием материала** такое, при котором он отдает (десорбирует) водяные пары в окружающую среду. Материал может увлажняться за счет сорбции водяных паров воздуха, пока не приобретет  $U_{м.г}$ . Выше этого предела увлажнение материала может продолжаться только при непосредственном контакте с водой. Если влажный материал высушивается до  $U < U_{м.г}$ , то удаляется полностью вода, определяющая влажное состояние материала, а также часть сорбированной воды.

Почти каждый твердый материал, находящийся в контакте с влажным воздухом, способен поглощать из него или отдавать ему влагу. Направление переноса влаги определяется знаком разности парциальных давлений пара на поверхности материала  $P_m$  и в окружающей среде  $P$ . При  $(P_m - P) > 0$  происходит процесс десорбции влаги (сушка), при  $(P_m - P) < 0$  – процесс сорбции влаги (увлажнение материала). Разность парциальных давлений определяет величину движущей силы и интенсивность переноса влаги.

## 1.2. Кинетика процесса сушки

Под кинетикой процесса сушки обычно понимают изменение по объему высушиваемого материала средних значений влагосодержания  $U$  и температуры материала  $\theta$  с течением времени  $\tau$ . Графическая зависимость  $U = f(\tau)$  называется кривой сушки. Большой практический интерес представляет также изменение скорости сушки с течением времени. Под скоростью сушки понимают изменение влагосодержания материала в единицу времени. Следует отличать скорость сушки  $du/d\tau$  от скорости массопередачи или интенсивности испарения влаги  $dW/sd\tau$ , которая определяет массу влаги, испаряемой с единицы поверхности материала в единицу времени.

Скорость сушки можно определить графическим дифференцированием кривой сушки по тангенсу угла наклона к оси абсцисс касательной, проведенной к данной точке кривой сушки. Откладывая в координатах  $U - du/d\tau$  значения  $\operatorname{tg} \alpha = du/d\tau$ , можно построить кривую скорости

сушки. Как видно из рис. 1, на всех этих кривых можно выделить ряд характерных периодов.

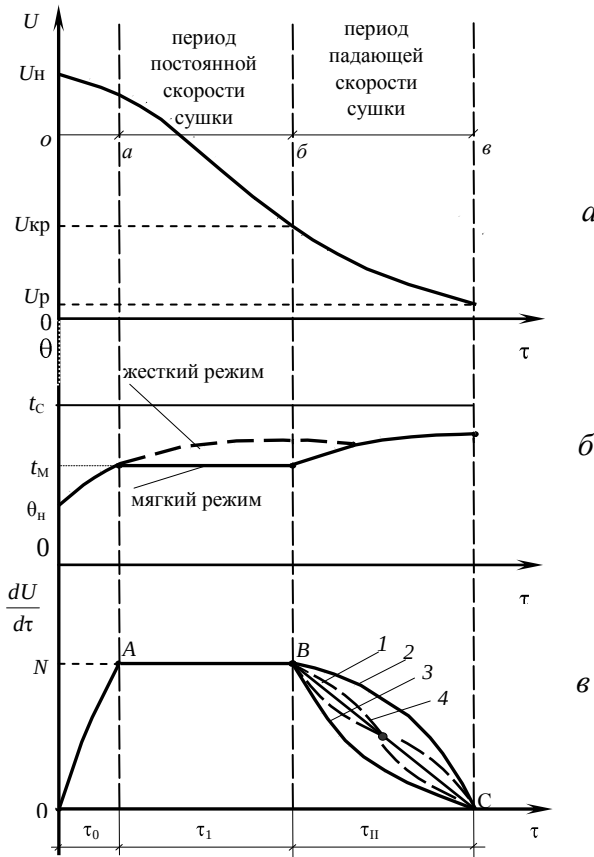


Рис. 1. Кривые сушки – а, изменения температуры материала – б и скорости сушки – в: 1 – волокнистые материалы; 2 – коллоидные материалы; 3 – капиллярно-пористые коллоидные; 4 – глина; 5 – сухари

Период прогрева (участок О-а) характеризуется: уменьшением влагосодержания от начального  $U_H$  до некоторого промежуточного значения, увеличением температуры материала от начальной  $\theta_H$  до температуры мокрого термометра  $t_M$  и увеличением скорости сушки от нуля до максимального ее значения  $N$ . Участок а - б, соответствующий снижению влагосодержания до критического значения  $U_{кр}$ , носит название **периода постоянной скорости сушки** (он еще называется первым периодом), что наглядно видно на нижней кривой. Интенсивность испаре-

ния с поверхности влажного материала в этом периоде при мягких режимах сушки совпадает с интенсивностью испарения жидкости со свободной поверхности при тех же параметрах сушильного агента. Невысокая температура сушильного агента, небольшие скорости его движения и достаточно большая относительная влажность, имеющие место при мягких режимах сушки, способствуют тому, что температура материала практически не изменяется в течение всего периода и близка к температуре мокрого термометра, а парциальное давление пара у поверхности испарения равно давлению насыщения при температуре мокрого термометра. В этом периоде вся подводимая теплота тратится не на нагрев материала, а на испарение поверхностной влаги. Поэтому температура не меняется, а у поверхности материала устанавливается гигротермическое равновесие, соответствующее состоянию мокрого термометра.

Изменение влагосодержания во времени происходит линейно, поэтому скорость сушки постоянна и зависит лишь от условий тепло- и массообмена сушильного агента и сушеного материала, т.е. от температурного режима, относительной влажности и скорости сушильного агента.

Для первого периода мягкого режима сушки можно написать уравнение баланса теплоты:

$$q = \alpha(t_c - t_m) = g \cdot r, \quad (8)$$

где  $q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $t_c$  и  $t_m$  – температуры сушильного агента и поверхности тела, °C;  $g$  – интенсивность испарения, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $r$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг.

Скорость сушки в периоде постоянной скорости ( $du/d\tau$ ) =  $N$  является максимальной вследствие того, что удаляется свободная влага, менее прочно связанная со скелетом тела. Она может быть определена из выражения:

$$N = \frac{gF}{\rho_0 V} = K, \quad (9)$$

где  $K$  – константа скорости сушки, (кг/кг)/с;  $\rho_0$  – плотность сухого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $F$  и  $V$  – площадь поверхности, м<sup>2</sup>, и объем, м<sup>3</sup>, сушеного материала.

По известной скорости сушки, т.е. по интенсивности испарения влаги с поверхности влажного материала, определяют продолжительность периода постоянной скорости сушки  $\tau_1$ , с [3]:

$$\tau_1 = \frac{1}{K} (U_n - U_{кр}) \approx \frac{1}{N} (U_n - U_{кр}) \approx \frac{\rho_0 V}{gF} (U_n - U_{кр}). \quad (10)$$

При жестких режимах сушки, когда интенсивность испарения достаточно велика, средняя температура материала в периоде постоянной скорости сушки непрерывно растет. Это происходит потому, что подвод влаги из внутренних слоев к поверхности материала меньше, чем возможности отвода в окружающую среду, вследствие чего происходит углубление зоны, из которой осуществляется испарение жидкости. Верхние слои материала обезвоживаются, и их температура непрерывно повышается. Увеличение температуры верхних слоев приводит к росту средней температуры сушеного материала.

Период постоянной скорости сушки продолжается до некоторого значения влагосодержания, называемого критическим,  $U_{кр}$ . Начиная с этого момента времени (участок б-в на рис. 1), влаги, подводимой к наружным слоям, будет недостаточно для полного смачивания поверхности – сначала на ней появляются сухие участки ("островки"), а затем вся поверхность материала оказывается сухой и зона испарения углубляется внутрь материала. С момента, когда количество влаги, подводимое к поверхности, станет меньше того, которое могло бы испариться, скорость сушки начинает уменьшаться от своего максимального значения  $N$  до нуля. Этот период называется **периодом падающей скорости** сушки или **вторым периодом**.

Скорость сушки равна нулю после достижения материалом равновесного влагосодержания  $U_p$ . Известно, что при испарении влаги из материала существуют одновременно два потока молекул влаги: один направлен от поверхности материала в окружающую среду (собственно испарение), другой – из окружающей среды к поверхности материала (конденсация). До тех пор пока процесс испарения превалирует над процессом конденсации, происходит убыль влаги из материала. Равновесное влагосодержание соответствует такому состоянию, когда оба потока равны, при этом количество влаги в материале остается постоянным. Температура материала во II периоде непрерывно повышается, стремясь к температуре омывающего его сушильного агента. В период падающей скорости процесса сушки обуславливается диффузией влаги к поверхности испарения, т.е. внутренней диффузией, скорость которой определяется структурой материала, его толщиной, начальным влагосодержанием и мало зависит от внешних условий.

На кривой скорости сушки различают две критические точки (периоды на рис. 1). Первая из них соответствует началу убывания скорости (т. В), когда температура на поверхности материала продолжает еще оставаться равной  $t_m$ , а влагосодержание достигает критического  $U_{кр}$ . Вторая критическая точка (т. D) характеризует такое состояние, когда  $U$



$$\tau_2 = \frac{1,28U_n}{N} \lg \frac{U_{п.к} - U_p}{U_k - U_p}. \quad (12)$$

Общая продолжительность процесса сушки  $\tau$  определяется суммированием времени сушки в периодах постоянной и падающей скорости:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{1}{N} \left[ U_n - U_{п.к} \right] + 1,28U_n \lg H \left[ U_k - U_p \right], \quad (13)$$

где  $H$  – относительный коэффициент сушки, зависящий от свойств материала и его начальной влажности.

При определении плотности теплового потока к материалу  $q$  в периоде падающей скорости необходимо учесть, что теплота расходуется не только на испарение влаги, но и на нагрев всего тела:

$$q = \left( c\rho_0 \frac{V}{F} \cdot \frac{dt}{d\tau} + \frac{\rho_0 V}{F} r \frac{du}{d\tau} \right), \text{Вт/м}^2, \quad (14)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость влажного тела, Дж/(кг·°C);  $dt/d\tau$  – изменение температуры тела за бесконечно малый промежуток времени, °C/c;  $du/d\tau$  – изменение влагосодержания тела за бесконечно малый промежуток времени.

Значения остальных величин приведены выше. Первый член правой части уравнения (14) соответствует количеству теплоты, пошедшей на нагрев тела, второй – на испарение влаги.



## 2. КОНСТРУКЦИИ КОНВЕКТИВНЫХ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

В связи с задачей выбора способа сушки важные материалы делят на 6 основных групп:

- 1) твердые дисперсные материалы, обладающие сыпучестью во влажном состоянии: пылевидные, зернистые, кусковые;
- 2) штучные, массивные, крупногабаритные материалы и изделия: керамика, элементы строительных конструкций, изделия из древесины;
- 3) жидкотекучие материалы – это истинные и коллоидные растворы, эмульсии, суспензии, т.е. материалы, которые можно перекачивать насосами;
- 4) пастообразные материалы – это влажные материалы, которые не перекачиваются насосами;
- 5) тонкие, гибкие материалы: ткани, бумага, картон;
- 6) изделия, подвергающиеся сушке после окрашивания, склеивания и т.п.

В промышленности наиболее часто встречаются первые три группы материалов и сушильное оборудование для этих материалов.

### 2.1. Сушиллки для твердых дисперсных материалов

Конвективная сушка твердых дисперсных сыпучих материалов проводится в сушилках с плотным, полувзвешенным и полностью взвешенным слоями материалов.

Слой сыпучего материала характеризуется сложной внутренней структурой. Объем слоя  $V_{сл}$  всегда больше объема твердых частиц в слое  $V_m$ . Расчеты показывают, что порозность  $\varepsilon$  плотного слоя шарообразных частиц лежит в пределах 0,259...0,476.

Порозность – это доля свободного объема в слое:

$$\varepsilon = \frac{V_{сл} - V_m}{V_{сл}}. \quad (15)$$

Однако в зависимости от распределения частиц по размерам, их формы, способа укладки и уплотнения слоя эта величина может быть больше или меньше указанных значений.

Плотным называется слой, если  $\varepsilon = 0,25...0,45$ . Для **взвешенного** слоя  $\varepsilon$  стремится к единице. В **полувзвешенном** состоянии  $\varepsilon = 0,4...1$ .

### Сушиллки с плотным слоем материала

В конвективных сушилках с **плотным слоем материала** сушильный агент подается вдоль слоя или через слой. К таким сушиллкам относятся ка-

мерные сушилки с неподвижными и подвижными полками, шахтные, ленточные, турбинные.

**Камерные сушилки с подвижными (опрокидывающимися) полками** могут работать непрерывно (рис. 3).

В этом случае материал подается на верхнюю полку, дно которой составляют узкие продольные пластины. Через определенный промежуток времени пластины поворачиваются в вертикальное положение, давая возможность материалу пересыпаться на вторую полку.

С нижней полки высушенный материал поступает в бункер готовой продукции. Циркуляция сушильного агента осуществляется так же, как в камерах с неподвижными полками.

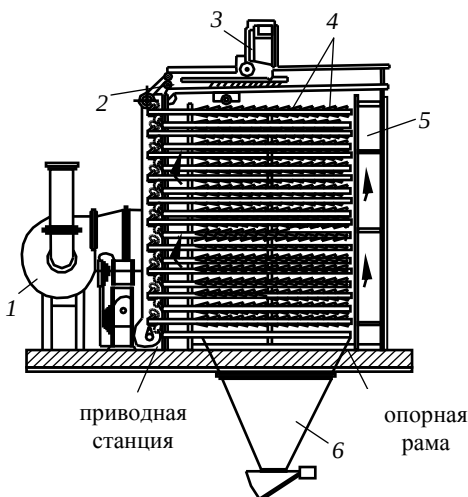


Рис. 3. Камерная сушилка с подвижными полками  
(с выносным вентилятором):

- 1 – вентилятор; 2 – загрузочная каретка; 3 – загрузочное устройство;  
4 – поворотные пластины; 5 – воздушные короба; 6 – разгрузочный бункер

Производительность сушилки по влаге достигает 1000 кг/ч, время сушки  $\tau_c$  – 20...50 мин.

Сушилки с опрокидывающимися полками отличаются невысокой интенсивностью, повышенной металлоемкостью, низкой эксплуатационной надежностью и сложностью ремонта, поэтому сейчас они почти вытеснены более эффективными сушилками с взвешенным слоем.

Сушильный агент в таких сушилках продувается сквозь слой. При пересыпании материала с ленты на ленту увеличивается поверхность

его соприкосновения с сушильным агентом, что способствует увеличению скорости и равномерности сушки.

### **Сушилки с полувзвешенным слоем материала**

Эти сушилки используют для сушки дисперсных, в том числе кусковых материалов. В них часть материала находится во взвешенном состоянии, что увеличивает поверхность тепломассообмена. К сушилкам с полувзвешенным состоянием материала относятся барабанные и аэрофонтанные.

Наибольшее распространение в крупнотоннажных производствах промышленности стройматериалов получили **барабанные сушилки** (рис. 4), поскольку они имеют большую производительность, надежны, просты в эксплуатации и достаточно экономичны. Они используются для сушки кусковых и зернистых материалов.

К барабанным сушилкам относят горизонтальные, цилиндрические сушилки с вращающимся или неподвижным корпусом. В первом случае с барабаном вращается внутренняя насадка, обеспечивающая перемешивание материала, во втором – специальное перемешивающее устройство.

По способу подвода тепла барабанные сушилки делятся на конвективные, контактные и комбинированные. На рис. 4 показана схема конвективной барабанной сушилки для сушки материала смесью воздуха с топочными газами.

Материал поступает в сушильный барабан 5 через питатель 2. Топочные газы, получаемые сжиганием топлива в топке 1, подают в камеру смешения и далее – в барабан. В сушилке материал и сушильный агент движутся прямоходом. Высушенный материал через затвор-мигалку направляется на ленточный транспортер 8; отработанные газы поступают в циклон 7, откуда дымососом 6 отводятся в атмосферу. Сушилка работает под небольшим разрежением.

Основной элемент барабанной сушилки – сушильная камера, представляющая собой наклонный (под углом 2...6°) вращающийся барабан, на корпус которого надеты два бандаж и зубчатый венец. Барабан приводится в движение электродвигателем через зубчатую передачу 9. Бандажами барабан опирается на свободно вращающиеся опорные ролики 10. Для предотвращения осевого смещения один из бандажей барабана упирается боковой поверхностью в упорные ролики. У одного конца барабана устанавливается загрузочная камера, у другого – разгрузочная.

Зазор между вращающимся барабаном и неподвижными камерами уплотняется специальными устройствами – уплотнениями, которые

предохраняют установку от больших подсосов воздуха извне и уменьшают расход энергии на вентилятор.

Если сушильный материал не вызывает коррозии и необходимости применения легированных сталей, барабаны изготавливают из царг, вальцованных из листовой углеродистой стали толщиной 8...20 мм. Для передачи давления от всех вращающихся частей аппарата на опорные ролики служат бандажы, представляющие собой стальные кольца прямоугольного, квадратного или коробчатого сечения. Для понижения местных напряжений материала корпуса под бандажими и венцовой шестерней приваривают усиливающие кольца, в 1,5...2 раза превышающие толщину барабана. Бандажы крепятся к корпусу, как правило, болтами, венцовая шестерня – жестким или гибким креплением. Жесткое крепление применяется при постоянной температуре корпуса, гибкое – в сушильных барабанах, работающих при высоких температурах.

Внутри корпуса сушилки, в зависимости от свойств высушиваемого материала, устанавливают различные насадки, способствующие равномерному распределению материала и его интенсивному перемешиванию в процессе сушки. Вид насадки соответствует свойствам высушиваемого материала.

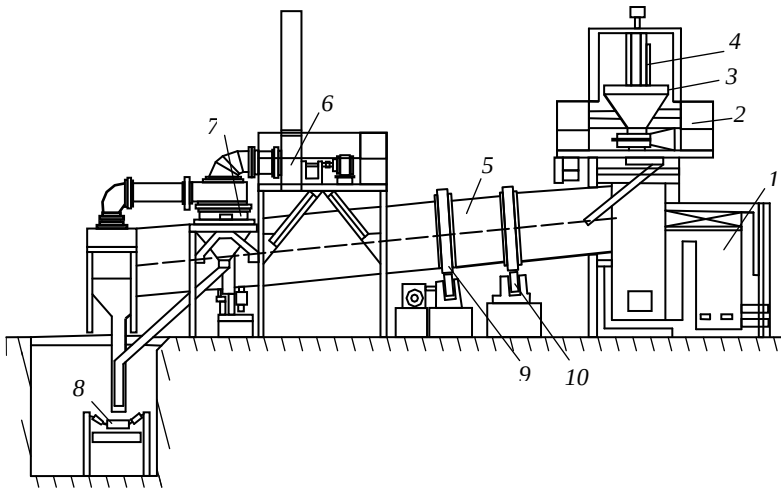


Рис. 4. Барабанная сушилка: 1 – топка; 2 – питатель; 3 – бункер; 4 – элеватор; 5 – сушильный барабан; 6 – дымосос; 7 – циклон; 8 – ленточный транспортер; 9 – зубчатая передача; 10 – опорные ролики

Если во время сушки свойства материала изменяются, то форму насадки принимают разной по длине барабана. Со стороны загрузочной камеры по длине, равной половине диаметра, располагают распределитель

тельную насадку в виде винтовых лопастей. При сушке достаточно сыпучих материалов за винтовой насадкой помещают периферийную подъемно-лопастную насадку. Форма насадки может быть различной (рис. 5).

В конце барабана устанавливают секторную насадку с пятью или шестью секторами (лопастная секторная или секторная перевалочная). Для налипающих материалов используется цепная насадка, которая позволяет в сушильном агрегате совмещать при обработке помол и сушку.

При сушке материала в барабане основное количество теплоты от сушильного агента передается материалу конвекцией. При увеличении степени загрузки барабана материалом возможность его пересыпания сокращается. Вместе с этим уменьшается поверхность контакта материала и сушильного агента, а также интенсивность сушки.

Поэтому одной из важнейших характеристик барабанной сушилки является коэффициент заполнения  $\beta_m$ . Чем выше  $\beta_m$  тем большая поверхность высушиваемого материала участвует в тепломассообмене с сушильным агентом и тем эффективнее используется рабочий объем барабана.

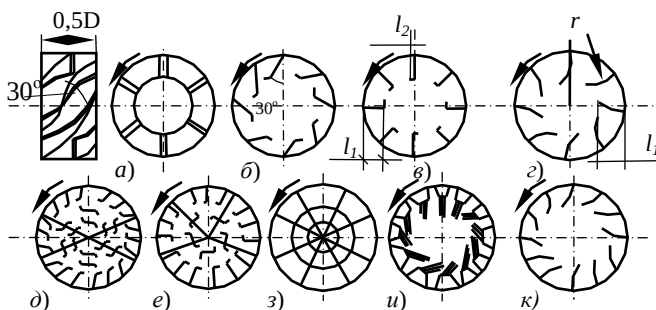


Рис. 5. Схемы некоторых внутренних насадок барабанных сушилок:  
 а – винтовая распределительная (приемно-винтовая); б, к – подъемно-лопастная;  
 в – подъемно-лопастная:  $l_1 = (0,15 \dots 0,2) D$ ;  $l_2 = 0,085 D$ ; г – подъемно-лопастная:  
 $l_1 = 0,125 D$ ;  $r = 0,07 D$ ; д, е, – лопастная секторная; з – секторная (перевалочная);  
 и – самоочищающиеся лопасти

Величина  $\beta_m$  зависит от конструкции насадки (по практическим данным  $\beta_m = 0,15 \dots 0,35$ ):

$$\beta_m = \frac{A_v}{\rho_{\text{нас}}} \cdot \frac{1 - (U_n + U_k) / 2}{U_n - U_k}, \quad (16)$$

где  $\rho_{\text{нас}}$  – насыпная плотность материала,  $\text{кг/м}^3$ ;  $U_n$ ,  $U_k$  – соответственно начальное и конечное влагосодержание материала,  $\text{кг/кг}$ .

При выборе размеров барабанной сушилки пользуются экспериментально установленными  $A_v$ , зависящими от  $\beta_m$ ,  $U_n$ ,  $U_k$ , вида сушимого материала, а также режимных параметров сушки. Отечественные предприятия выпускают барабанные сушилки диаметром от 1 до 5 м, длиной до 40 м ( $L/D = 4...8$ ).

Барабанные сушилки могут работать как с прямоточным, так и с противоточным движением материала и сушильного агента.

Длительность сушки материала в барабанах зависит от вида материала, длины, диаметра и угла наклона барабана, частоты его вращения и составляет от 10 до 40 мин. Размеры барабана выбирают исходя из допустимого объемного напряжения по влаге, которое колеблется от 30 до 120 кг/(м<sup>3</sup>·ч).

Скорость сушильного агента в барабане – 2,5...3 м/с. Для снижения пылеуноса скорость сушильного агента на выходе из барабана не должна превышать 1,8 м/с. Удельный расход теплоты  $q_k$  (показатель тепловой экономичности) при сушке воздухом составляет примерно 4600 кДж/кг, при сушке смесью топочных газов с воздухом – 3500...6300 кДж/кг.

**Аэрофонтанные сушилки** (рис. 6) относятся к установкам с полувзвешенным слоем, поскольку в центре таких сушилок материал движется пневмотранспортом вверх, а по стенкам камеры возвращается в слой. Эти сушилки применяются для дисперсных материалов даже неоднородного гранулометрического состава при скорости витания частиц, значительно меняющейся в процессе сушки.

Существуют два типа аэрофонтанных сушилок – с решеткой и без решетки. Угол конусности таких сушилок обычно 30...70°. Практически апробированное  $D_{\max}/D_{\min} = 3...10$ . Это обеспечивает устойчивую работу сушилки. Скорость газа в узком сечении сушилки в 1,5...2 раза выше скорости витания частиц. В сушилке без решетки эту скорость принимают равной устойчивой скорости пневмотранспорта крупных частиц – 1,5...2 м/с.

В широкой части сушилки обычно создается режим кипения с условной скоростью газа по всему сечению 0,2...0,5 м/с. В конической части аппарата частицы циркулируют в потоке сушильного агента до тех пор, пока скорость витания  $v_{\text{вит}}$  не станет больше скорости газового потока  $v_{г.п.}$ . Тогда они выносятся из аппарата в пылеулавливающую систему.

Материал подается питателем в пневмотрубу 2, где подхватывается потоком горячего сушильного агента, предварительно подсушивается и поступает на окончательную сушку в аэрофонтан 3. Высушенный продукт полностью уносится газами и затем выгружается из циклона 4.

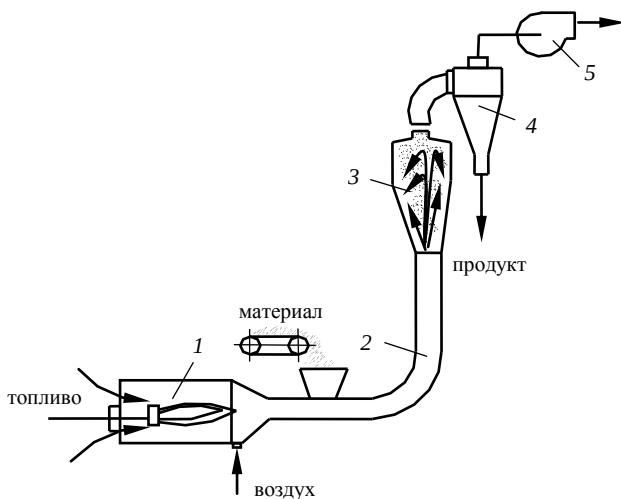


Рис. 6. Аэрофонтанная сушилка:  
1 – топка; 2 – пневмотруба; 3 – аэрофонтан; 4 – циклон; 5 – дымосос

Порозность слоя  $\epsilon$  в аэрофонтанных сушилках близка к 0,85. Время пребывания материала в аппарате – 15...25 с. Из-за кратковременного пребывания материала в таких сушилках их используют лишь для удаления свободной влаги.

Ввиду малых концентраций материала в единице рабочего объема сушилки и небольших относительных скоростей сушильного агента и материала интенсивность сушки невелика.

Высота таких сушилок достигает 40...60 м.

Вследствие этого их редко используют в сушильной технике.

### Сушилки со взвешенным слоем материала

К сушилкам с взвешенным слоем материала относятся сушилки "кипящего" слоя и пневматические сушилки (трубы-сушилки, а также спиральные, вихревые, циклонные). Наибольшее распространение в промышленности стройматериалов получили сушилки "кипящего" слоя (рис. 7).

Сушка в "кипящем" слое – перспективный метод для сушки кусковых и сыпучих материалов диаметром до 70 мм. Если сравнить сушилку "кипящего" слоя с конвективной барабанной по объемному коэффициенту теплопередачи  $\alpha_v$ , то для сушилок "кипящего" слоя этот коэффициент колеблется в пределах 6000...9000 Вт/м<sup>2</sup>·°С, а для барабанной не превышает 580 Вт/м<sup>2</sup>·°С. Следовательно, сушилки "кипящего" слоя

должны быть более компактными и производительными. Они позволяют, кроме сушки, одновременно классифицировать материал по фракциям. Однако сушилки "кипящего" слоя имеют свои недостатки: повышенный расход электроэнергии для создания высокой скорости сушильного агента с целью образования "кипящего" слоя и несколько повышенный удельный расход теплоты.

По конструктивному признаку эти сушилки делятся на две большие группы: одно- и двухкамерные. Однокамерные сушилки наиболее просты по устройству и в эксплуатации, обладают высокими экономическими показателями, легко поддаются автоматизации. Это наиболее распространенный тип промышленных сушилок.

На рис. 7 показана схема сушилки с одноступенчатым аппаратом "кипящего" слоя.

Сушильный агент получают за счет разбавления холодным воздухом продуктов горения топлива, сжигаемого в топке 2. Далее сушильный агент за счет давления, создаваемого вентилятором 1, поступает через решетку к слою материала со скоростью, равной скорости витания частиц. Материал питателем 3 непрерывно подается на решетку и высушивается в "кипящем" слое. Высушенный материал через шлюзовый затвор выгружается на конвейер.

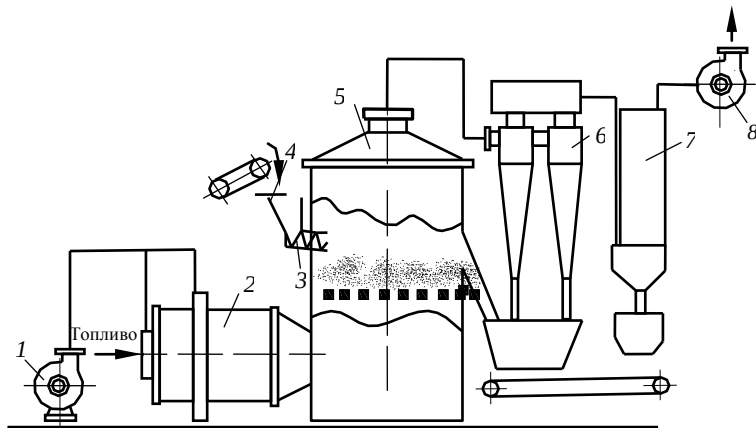


Рис. 7. Схема цилиндрической сушилки с кипящим слоем: 1 – вентилятор; 2 – топка; 3 – шнековый питатель; 4 – бункер; 5 – сушильная камера; 6 – циклон; 7 – рукавный фильтр; 8 – дымосос

Отработанный сушильный агент подается в циклон 6, далее – в рукавный фильтр 7 и после очистки выбрасывается дымососом 8 в атмосферу.



Промышленные сушилки "кипящего" слоя работают в интервале порозности  $\varepsilon = 0,15...0,75$ . Эта область охватывает диаметр частиц от 30...40 мкм до 6...7 мм.

Недостатком некоторых конструкций является неравномерная сушка полидисперсного материала, обусловленная различным временем пребывания отдельных частиц в зоне сушки.

Этот недостаток можно предотвратить, организовав направленное движение слоя материала и разделяя камеру на зоны, различающиеся гидродинамическими и термодинамическими условиями проведения процесса. Но простейший вариант устранения этого недостатка заключается в применении призматической, конусообразной или корытообразной формы камеры, которая обуславливает сепарирование частиц разного размера по высоте; более мелкие частицы находятся в верхней части слоя, поэтому меньше подвергаются перегреву (рис. 8).

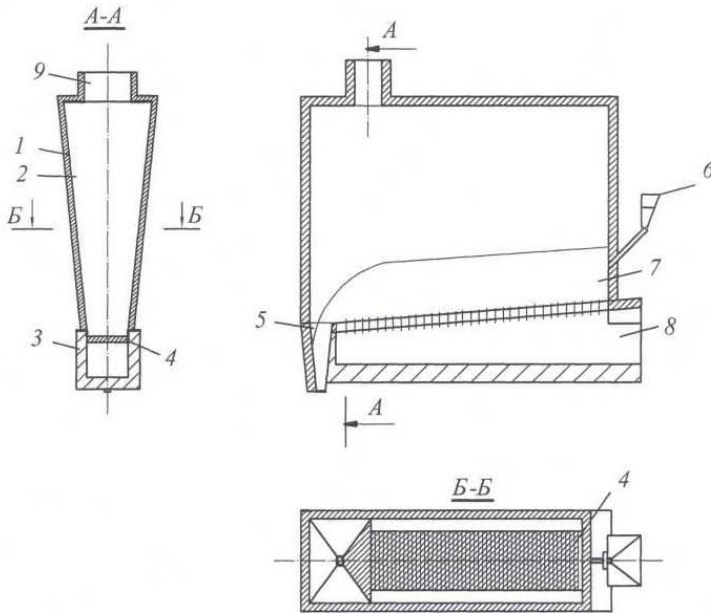


Рис. 8. Однокамерная прямоугольная сушилка с направленным движением материала: 1 – корпус; 2 – сепарационное пространство; 3 – футеровка; 4 – распределительная решетка; 5 – разгрузочный бункер; 6 – питатель; 7 – псевдоожиженный слой; 8 – вход газа; 9 – выход газа

Непрерывное перемещение частиц вдоль камеры обеспечивается наклоном и некоторым уменьшением ширины решетки в сторону выгрузки. Вследствие уменьшения вертикальной скорости газа к концу

камеры результирующая сил тяжести материала и давления газа заставляет частицы двигаться как бы по наклонной плоскости. В аппаратах с виброкипящим слоем для этой цели применяют виброрешетки.

Основным и наиболее важным элементом сушилок "кипящего" слоя являются газораспределительные решетки, которые выполняют две функции: они поддерживают псевдоожиженный слой и обеспечивают равномерное распределение газового потока по сечению камеры.

Наиболее равномерное распределение обеспечивают пористые плиты, но они забиваются и обладают очень большим гидравлическим сопротивлением, поэтому практического применения не имеют.

В настоящее время применяют два типа решеток – провальные и беспровальные.

Провальные решетки (рис. 9, а, б) представляют собой перфорированные плиты или колосники, на которых материал поддерживается за счет скоростного напора газа. Толщина плиты – 10...20 мм, что создает большую жесткость и значительную длину канала, при которой вероятность просыпания близка к нулю. Незначительные прогибы и неровности приводят к неравномерному кипению и залеганию материала.

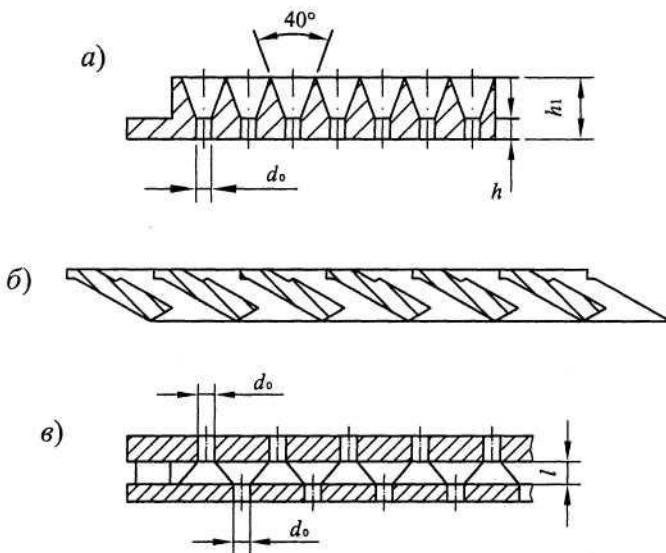


Рис. 9. Газораспределительные решетки:  
а – сотовая; б – колосниковая; в – беспровальная

Беспровальные решетки (рис. 9, в) выполняются четырех типов: плиты из жаропрочного бетона или чугуна, в отверстия которых вставляются сменные сопла-колпачки с шагом 100...300 мм, расположенные в

шахматном или коридорном порядке; два параллельно расположенных листа или набор колосников, оси отверстий которых смещены по отношению друг к другу; два параллельно расположенных листа (перфорированных), промежуток между которыми заполнен огнеупорным дробленым материалом; перфорированные, горизонтально уложенные трубы (для мелких частиц).

Живое сечение решеток составляет 2...10%. Нижний предел обычно принимают при работе с малыми скоростями кипения, т.е. при сушке тонкодисперсных материалов с малой плотностью частиц. Диаметр отверстий чаще всего составляет 2,0...5,6 мм. Для равномерного распределения газов необходимо, чтобы большим диаметрам аппарата соответствовало большее сопротивление решетки. Скорость сушильного агента в отверстиях решетки должна быть больше скорости витания частиц, размеры которых равны диаметру отверстий. С возрастанием перепада температур живое сечение решетки при прочих равных условиях также увеличивается.

Промышленные сушилки "кипящего" слоя работают с небольшим слоем материала – 300...400 мм. На основании опыта эксплуатации сушилок "кипящего" слоя установлено, что высота слоя  $H_{сл}$  должна быть в 4 раза больше высоты гидродинамической стабилизации слоя  $H_{ст}$ , а  $H_{ст} \approx 20 d_{отв}$ , следовательно,  $H_{сл} \approx 80 d_{отв}$ . Высоту сепарационного пространства рекомендуется принимать в 4...6 раз больше  $H_{сл}$ .

Загрузка материала производится с помощью шлюзовых затворов, вибропитателей с автоматическими весами, шнеков или специальных забрасывателей. Питатель располагается примерно на высоте 1000 мм над решеткой. Выгрузка производится непосредственно с решетки, при этом производительность разгрузочного устройства регулируется так, чтобы высота слоя оставалась постоянной.

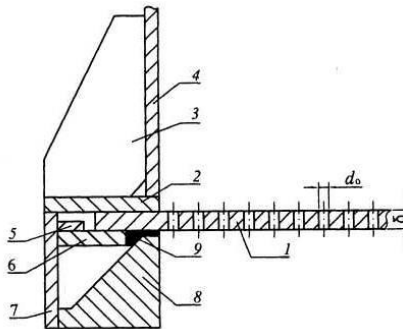


Рис. 10. Крепление газораспределительной решетки: 1 – решетка; 2 – фланец; 3 – косынка; 4 – верхний корпус сушилки; 5 – ограничитель; 6 – опора; 7 – нижний корпус сушилки; 8 – футеровка; 9 – уплотнительная набивка (асбестовый шнур)

При сушке однородных материалов иногда применяют переливные пороги, высота которых определяет высоту слоя; разгрузатель в этом случае не ставят. В нижней части порога делают отверстие для крупных частиц.

Для надежной работы распределительной решетки важное значение имеет правильный выбор материала. В условиях высоких температур при сушке газом решетки изготавливают из высоколегированной жаропрочной стали или легированного чугуна. Крепление распределительной решетки должно предусматривать свободное перемещение ее при расширении (рис.10)

Удельное объемное напряжение сушилок "кипящего" слоя по влаге  $A_v = 150...200 \text{ кг/м}^3\cdot\text{ч}$ , поверхностное –  $A_s = 800... 1000 \text{ кг/м}^2\cdot\text{ч}$ . Удельный расход теплоты для этих сушилок –  $5000...6500 \text{ кДж/кг}$ .

**Многокамерные сушилки** "кипящего" слоя могут быть с последовательным движением материала и подачей свежего теплоносителя в каждую камеру, а также ступенчато-противоточные. Многокамерные сушилки являются многозонными, но в то же время в отдельных камерах могут быть организованы дополнительные зоны. Многокамерные сушильные аппараты можно создать простым секционированием сушильного пространства вертикальными или горизонтальными перегородками.

Для материалов, склонных к налипанию, комкообразованию и каналообразованию, применяются одно- и многокамерные сушилки "кипящего" слоя, оборудованные различными механическими побудителями слоя (мешалки-ворошители, виброрешетки, шнеки, движущиеся перегородки и т.п.).

**Пневматические сушилки** представляют собой чаще всего трубы, в которых материал подвергается сушке во взвешенном состоянии. Схема простейшей трубы сушилки приведена на рис. 11.

Диаметр частиц сушимого материала не превышает 10 мм. Его перемещение в сушилке происходит за счет энергии движения сушильного агента (пневмотранспорт).

Проходя в сушильной трубе 5 со скоростью  $10...35 \text{ м/с}$ , сушильный агент подхватывает куски влажного материала и, благодаря большой поверхности испарения, высушивает его во время перемещения в трубе в течение  $1,5...2,5 \text{ с}$ . Расширитель (аэрофонтан) 4 в средней части трубы создает условия нестационарного гидродинамического режима, что интенсифицирует процесс сушки, а также задерживает крупные куски материала в зоне сушки.

Разделение высушенного материала и сушильного агента происходит в одиночном циклоне 6 и батарейном циклоне 7. Обеспыленный сушильный агент выбрасывается вентилятором или дымососом 8 в атмосферу. Карман 1 в нижней части трубы играет роль сепаратора и ло-

вушки для крупных кусков материала, предохраняя их от перегрева и разложения.

Вертикальный пневмотранспорт сушимого материала может происходить только при такой скорости движения сушильного агента, которая превышает скорость витания частиц материала.

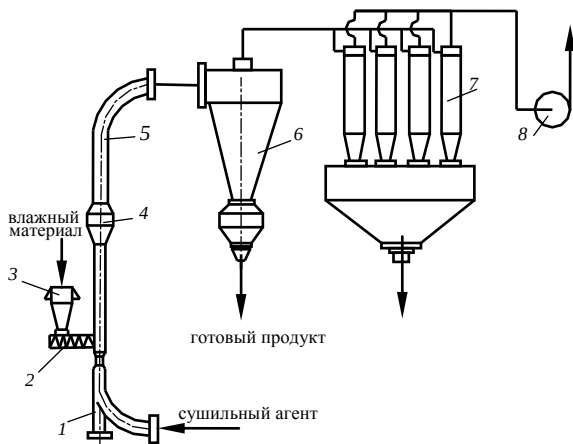


Рис. 11. Схема трубной пневматической сушилки:

1 – карман; 2 – питатель; 3 – бункер; 4 – аэрофонтан; 5 – труба-сушилка; 6 – циклон; 7 – батарейный циклон; 8 – вентилятор

Большим достоинством пневматических сушилок является использование прямотока и кратковременность сушки, вследствие чего даже для термочувствительных материалов допустимо применять высокотемпературный теплоноситель. В трубе постоянного сечения около 55% влаги удаляется на разгонном участке длиной 1...1,5 м (это 1/10 всей высоты трубы), где движущая сила наибольшая. Удельная объемная напряженность по влаге  $A_v$  у этих сушилок достигает 350...400 кг/м<sup>3</sup>·ч.

Основными недостатками труб-сушилок являются значительный расход электроэнергии для создания необходимой скорости сушильного агента и большой пылеунос, а также большой износ трубопроводов.

В промышленности применяют также **многоступенчатые** трубы-сушилки (рис. 12).

Их преимуществом является то, что, создавая на каждой ступени наиболее благоприятный режим сушки, можно высушить материал до низкой остаточной влажности при минимальных затратах тепла.

На первой ступени происходит, как правило, съем основного количества влаги. Для этого в сушилку подается сушильный агент с максимально

возможной температурой. Температура отработанного сушильного агента сравнительно низкая. Вторая ступень используется для окончательной сушки материала. Считается, что оптимальное число ступеней для многоступенчатых сушилок – две.

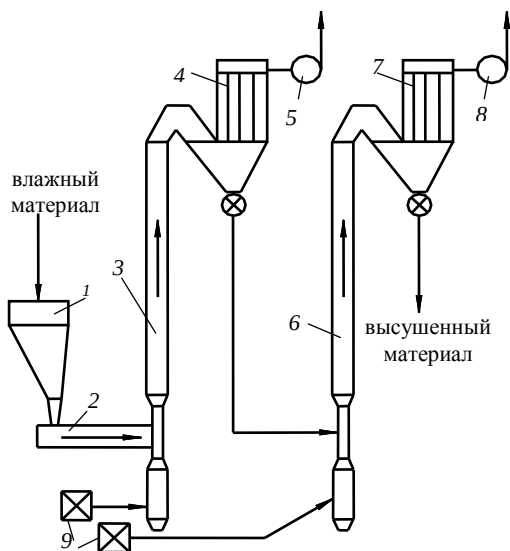


Рис. 12. Схема установки с двухступенчатой трубной пневматической сушилкой: 1 – бункер материала; 2 – питатель; 3 – труба-сушилка первой ступени; 4, 7 – фильтры рукавные; 5, 8 – дымососы; 6 – труба-сушилка второй ступени; 9 – калориферы

Если материал не высушивается в двух ступенях, то во избежание роста капитальных и эксплуатационных вложений целесообразно использовать сушилку другого типа.

Интенсификация тепло- и массообмена в потоках газозвесей может быть достигнута искусственным увеличением относительной скорости движения частиц в газе при воздействии силы, не оказывающей влияния на газовую среду.

Наиболее простым и радикальным способом увеличения относительной скорости движения частиц в газе является использование центробежной силы, возникающей при движении газозвеси по криволинейному пути. Применительно к пневмотранспорту закручивание может быть осуществлено по винтовой траектории (объемной спирали) или по траектории плоской спирали. Двигаясь по криволинейной траектории, частицы материала отбрасываются на внешнюю стенку канала, соударяясь между собой

и стенкой. При этом скорость их движения уменьшается, что приводит к концентрированию газовой взвеси и интенсификации межфазного тепло- и массообмена.

В то же время движение частиц в пристенной области позволяет создать в сушилке благоприятные условия для контактного подвода дополнительной теплоты к материалу. Дисперсная фаза, двигаясь в пристенной зоне аппарата, активно воздействует на пограничный слой, турбулизируя его, что способствует значительному повышению коэффициента теплоотдачи от стенки аппарата к газовой взвеси.

Поскольку концентрация дисперсного материала в пристенной зоне значительно выше, чем в прямых пневмотрубах, то и коэффициент конвективного теплообмена намного выше. Коэффициент теплоотдачи от стенки аппарата к газовой взвеси может достигать  $230...350 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°C)}$ . Указанные возможности реализованы в **спиральных пневматических сушилках**.

На рис. 13 представлена пневмосушилка с плоским спиральным каналом и циклонным сепаратором.

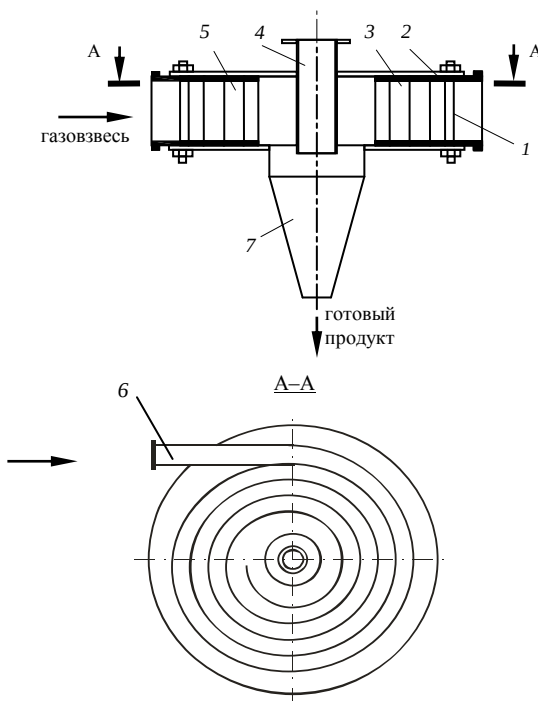


Рис. 13. Пневмосушилка с плоским спиральным каналом и циклонным сепаратором:

1 – корпус; 2 – крышка; 3 – спиральная лента; 4 – выпускная труба;  
5 – спиральный канал; 6 – входной штуцер; 7 – сепарирующая камера

Это сушилка с плоским спиральным каналом в горизонтальной плоскости, плавно переходящим в сепарирующую камеру, конструктивно оформленную в виде циклона. Аппарат состоит из корпуса 1, в котором днище-крышка 2 и спиральная лента 3 образуют спиральный канал 5, плавно переходящий в сепарирующую камеру 7.

Достоинства: компактна и относится к аппаратам безуносного типа. Эффективность разделения твердой и газовой фаз достигает 99%, что позволяет исключить из технологической схемы пылеочистные устройства, а это соответственно уменьшает энергетические затраты на сушку.

Недостатки: ограничен верхний предел производительности. С ростом производительности повышается расход сушильного агента, и соответственно проходное сечение канала, радиус сепаратора и максимальный радиус сушилки увеличиваются.

Расчет показывает, что практическое использование сушилок этого типа с приемлемым радиусом 1,5...2 м ограничено расходом сушильного агента – 12...15 тыс. м<sup>3</sup>/ч.

Гидравлическое сопротивление сушилки – 1500...3000 Па, причем 30...40% его приходится на сопротивление циклонного сепаратора. Длина спирали 10...20 м (зависит от материала), время пребывания в сушилке составляет 1...2 с.

## **2.2. Сушилки для штучных, массивных, крупногабаритных материалов и изделий**

К таким сушилкам относятся камерные сушилки с неподвижными полками и туннельные сушилки.

Схема простейшей **камерной сушилки с неподвижными полками** приведена на рис. 14.

Камера 1 длиной 10...13 м и высотой 3,5 м рассчитана на загрузку 10 полок с материалом. Эти полки загрузочной вагонеткой укладываются на выступы камеры 2. Ниже уровня пола камера имеет три канала 3, 4, 5, два боковых 3, 5 – для подачи сушильного агента, средний 4 – для отбора сушильного агента. Каналы перекрыты настилами с отверстиями 6.

Камеры соединяются в блоки по 20...30 шт. и имеют общее снабжение сушильным агентом через подводящий канал и общий принудительный отбор сушильного агента.

Сушильный агент через каналы 3, 5 подается в камеру и, так как он легче воздуха, занимающего рабочий объем камеры, поднимается вверх (на рис. 20 показано стрелками) до тех пор, пока его плотность в процессе охлаждения не выровняется с плотностью воздуха в камере. По пути движения нагретый сушильный агент отдает теплоту более холодному мате-



риалу и начинает двигаться вниз, постепенно снижаясь, попадает в нижний канал 4 и выбрасывается в атмосферу.

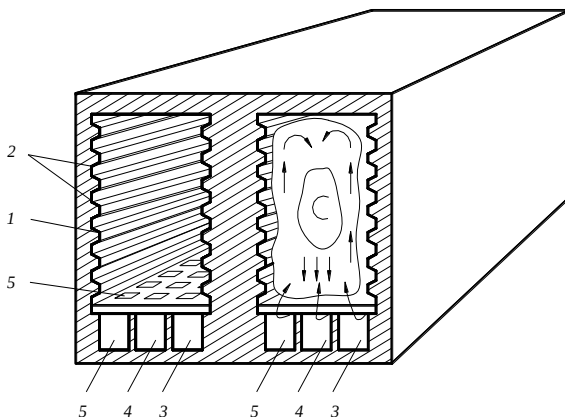


Рис. 14. Схема камерной сушилки с неподвижными полками:  
1 – камера; 2 – выступы; 3, 5 – каналы для подачи сушильного агента;  
4 – канал для отвода сушильного агента; 5 – настилы

Смешивание восходящих и нисходящих потоков сушильного агента вызывает многократную циркуляцию и достаточно равномерную сушку изделий. В середине сушилки, где сушильный агент опускается вниз, имеется зона слабой сушки С. Процесс в этой зоне можно интенсифицировать путем увеличения скорости сушильного агента с одновременным снижением его начальной температуры.

На большинстве заводов в качестве сушильного агента используют смесь топочных газов с воздухом или отходящие газы обжиговых печей. Температура газов в подводящем канале камерных сушилок колеблется от 90 до 150 °С.

Температура отработанных газов в начале цикла составляет 25...30 °С, а в конце цикла возрастает до 50...55 °С. Скорость газов в камере составляет 2,5...3,5 м/с, разрежение поддерживается в пределах 10 Па.

Время сушки в камерных сушилках составляет 2...3 сут. Удельный расход теплоты 4200...6300 кДж/кг<sub>вл.</sub>

Длительное время основным недостатком камерных сушилок считали периодичность их действия, обуславливающую повышенный расход топлива и неравномерность сушки, определявшую увеличение продолжительности сушки и снижение качества высушенных изделий. Однако современные конструкции камерных сушилок обеспечивают высокое качество вы-

сушенной продукции при малых расходах топлива по сравнению с туннельными сушилками.

В то же время большое преимущество камерных сушилок – возможность эксплуатации по дискретному режиму, что исключает необходимость круглосуточной и непрерывной работы заготовительных цехов. Работа по этому режиму имеет определенные социальные преимущества, повышает производительность труда и облегчает решение многих организационно-производственных вопросов.

В связи с этим как в нашей стране, так и за рубежом отмечается тенденция возврата к камерным сушилкам, но на новой технической основе, каковой является внутренняя принудительная циркуляция теплоносителя.

В отличие от камерных, **туннельные сушилки** являются сушилками непрерывного действия.

Их рабочей камерой является туннель, по которому непрерывно перемещается высушиваемый материал. Тепловые зоны стационарны по длине туннеля. Поток теплоносителя (газов или воздуха) в туннеле движется или навстречу материалу (противоточные сушилки), или в одном направлении с ним (прямоточные сушилки). Распространены сушилки с комбинированным движением теплоносителя, а также с продольным и поперечным его перемещением.

Конструкции туннельных сушилок весьма разнообразны по тепло-технологическим схемам, а также по виду транспортирующих устройств. По последнему признаку различают сушилки вагонеточные, с цепными, ленточными, ленточно-сетчатыми и роликовыми конвейерами.

Туннельные сушилки с наземным вагонеточным транспортом в промышленности строительных материалов широко применяют для сушки кирпича, черепицы и дренажных труб. Противоточные туннельные сушилки, работающие с однократным использованием теплоносителя, предельно просты по конструкции и потому получили наибольшее распространение в промышленности строительных материалов.

**Туннельная противоточная вагонеточная сушилка для сушки кирпича-сырца** (рис. 15) представляет собой длинный туннель 1, заполненный вагонетками 2, на которых уложены полки 3 с кирпичом. Длина туннеля обычно 25...35 м, ширина 1,2...1,3 м и высота до 1,7 м. С помощью толкателя 6 вагонетки подаются в туннель, при этом весь поезд вагонеток, заполняющих туннель, продвигается на длину одной вагонетки. В это же время из разгрузочного конца туннеля выталкивается вагонетка с уже высушенным кирпичом.

Из главного подводящего коллектора 12, расположенного вдоль фронта выгрузочных дверей туннелей, газы поступают в каждый туннель через соединительные каналы 10, которые заканчиваются отверстием 9 в полу туннеля. Регулируют количество подаваемых в каждый туннель газов заслонкой 11.

Газы, продвигаясь по туннелю, омывают кирпич и, высушивая его, увлажняются и охлаждаются. Удаляются они на загрузочном конце тунне-

ля через отверстие 8, соединительный канал 7 с заслонкой 5 и главный коллектор 4 отработанных газов.

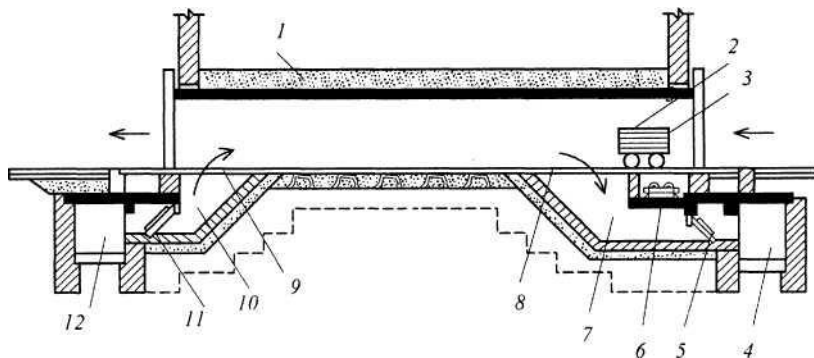


Рис. 15. Рабочая камера туннельной сушилки для сушки кирпича-сырца:  
1 – туннель; 2 – вагонетка; 3 – полки; 4 – главный коллектор; 5, 11 – заслонки;  
6 – толкатель; 7 – соединительный канал; 8 – отверстие для удаления отработанного  
сушильного агента; 9 – отверстие для подачи в камеру сушильного агента;  
10 – соединительные каналы; 12 – подводящий коллектор

Таким образом, при противоточной схеме загруженный в туннель холодный и механически слабый сырец омывается влажными остывшими газами. При этом он прогревается, не подвергаясь интенсивной сушке, которая могла бы вызвать возникновение в нем напряжений и трещин. По мере продвижения по туннелю сырец встречает все более нагретые и более сухие газы и интенсивность его сушки возрастает.

Вблизи выгрузочного конца туннеля сырец взаимодействует с горячими и сравнительно сухими газами. Однако их взаимодействие в этой зоне туннеля уже не представляет опасности для сырца, поскольку здесь он подогретый, в значительной мере высушенный, механически окрепший и не дает усадки.

Туннельные сушилки большой производительности komponуются в блоки по 10...15 туннелей.

При сушке кирпича в простых противоточных туннельных сушилках начальная температура газов обычно  $t = 90 \dots 120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура отработанных газов  $t = 30 \dots 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , а их относительная влажность  $\varphi = 80 \dots 85\%$ .

Основным недостатком, обуславливающим невысокое качество высушенных в таких сушилках изделий, является отсутствие возможности принудительного регулирования режима сушки по длине туннеля.

Для смягчения режима сушки на горячем конце туннелей иногда увлажняют теплоноситель подачей воды в подводящий коллектор.

Скорость газов в живом сечении туннеля должна быть не менее  $2,5 \dots 4 \text{ м/с}$ . Практически таких скоростей можно достичь либо при низкой начальной температуре газов ( $t = 60 \dots 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), что неэкономично в тепловом отношении, либо путем рециркуляции отработанных газов, что более ра-

ционально.

Удельный расход теплоты в противоточных туннельных сушилках составляет 4600...5500 кДж/кг влаги.

В простейших противоточных сушилках можно регулировать лишь начальную температуру газов. Температурная кривая по длине туннеля, а также кривая сушки, равно как и параметры отработанных газов, складываются стихийно и чаще всего получаются не такими, какие нужны по технологическим свойствам высушиваемого материала. Кроме того, подача в туннель сухих газов приводит часто к чрезмерно интенсивной сушке на коротком участке туннеля, в результате чего на кирпиче возникают трещины. На разгрузочном же конце туннеля наблюдается переохлаждение газов с выпадением конденсата на загруженный холодный сырец, что приводит в конечном счете к снижению качества готовых изделий.

Недостатки в некоторой степени преодолеваются в сушилках с рециркуляцией отработанных газов. Различают рециркуляцию общую и зонную. При общей рециркуляции часть отработанных газов – рециркулят смешивают с теплоносителем вне туннеля и образующуюся смесь подают в туннель. При зонной рециркуляции рециркулят подают в одну или несколько зон туннеля, и он смешивается с основным теплоносителем уже в самом туннеле.

Общая рециркуляция позволяет регулировать влагосодержание поступающих в туннель газов и несколько смягчить режим сушки, растянув участок наиболее интенсивной сушки материала. Кроме того, общая рециркуляция повышает количество газов, поступающих в туннель, что способствует более равномерной сушке по сечению туннеля.

Зонная рециркуляция дает возможность локально регулировать параметры процесса и согласовывать с кривой сушки на отдельных участках. Чаще всего ввод рециркулята осуществляют на расстоянии  $1/3$  длины туннеля от его загрузочного конца.

### 2.3. Сушилки для жидкотекучих материалов

Для сушки этих материалов необходимо создать определенные гидродинамические условия: либо распыление, либо распределение тонким слоем, либо перемешивание в тонком слое, либо образование пенного слоя.

**Используются сушилки: распылительные, вальцовые, роторно-вакуумные, шнековые, вихревые.** Кроме того, возможны комбинации распыления и нанесения тонких слоев жидкого материала на поверхность инертных тел или гранул высушиваемого материала в барабанных сушилках-грануляторах или сушилках псевдоожиженного слоя. Сушка в пенном слое осуществляется в пеносушилках, применяемых в пищевой и мясомолочной промышленности.

Необходимость испарения большого количества влаги влечет за собой существенное повышение потребления тепловой энергии и расхода тепло-

носителя, что связано с увеличением габаритов сушильных аппаратов, а также с удорожанием систем очистки отработанного сушильного агента. Кроме того, сушка жидких материалов сопровождается формированием морфологической структуры частиц продукта, а в случае распылительной сушки – повышенным пылеобразованием.

Эти особенности обуславливают направление разработки и усовершенствования технологии и оборудования сушки жидких материалов: максимальное энергосбережение, интенсификация, решение проблемы очистки воздуха от пыли, формирование на стадии сушки требуемой дисперсности и структуры частиц готового продукта. Во многих случаях возможно комплексное решение указанных вопросов.

В промышленности наибольшее распространение получили **распылительные сушилки**. Их используют, как правило, при производительности 10...20 т/ч по испаренной влаге, редко до 40 т/ч.

Распылительные сушилки, отличаются конструктивной простотой, малым термическим воздействием на материал в процессе сушки, возможностью регулирования конечных влагосодержаний сушеного материала, достаточной экономичностью и технологической простотой процесса из-за отсутствия таких промежуточных стадий как фильтрование, центрифугирование, кристаллизация, размол и т.п.

К недостаткам этих сушилок можно отнести небольшую удельную напряженность по влаге  $A_v$ , которая составляет 5...20 кг/(м<sup>3</sup>·ч) и, как следствие, значительные габариты установки, повышенный расход электроэнергии и большой пылеунос.

Распылительные сушилки применяют в тех случаях, когда необходим интенсивный процесс сушки жидких материалов с начальной влажностью не менее 40% с получением сухого продукта высокой дисперсности. Их целесообразно применять для термочувствительных материалов.

Рабочей камерой распылительной сушилки является башня, в которой шликер определенной вязкости диспергируется на мелкие капли. Последние взаимодействуют с дымовыми газами высокой температуры и в короткое время, исчисляемое секундами, высыхают до остаточной влажности 7...9%.

На керамических заводах нашей страны эксплуатируются распылительные сушилки трех основных конструкций: НИИстройкерамики, КБ Минского комбината строительных материалов (МКСМ) и Гипрострой-материалов.

На рис. 16 представлена распылительная сушилка НИИстройкерамики.

Цилиндрическую башню 1 собирают из полых металлических панелей, заполненных минеральной ватой.

Внутренняя поверхность башни выполнена из жаростойкой стали.

Конусное днище 3 является сборником высушенного порошка.

Мембранным насосом под давлением 1,2...1,3 МПа шликер нагнетают в кольцевой шликеропровод 9, откуда он поступает в восемь механических форсунок 10, расположенных пучком. Они образуют в башне факел распыленного шликера, направленный снизу вверх. В корпус башни вмонтированы газовые горелки 2. В модернизированных конструкциях этих сушилок горелки расположены в два яруса.

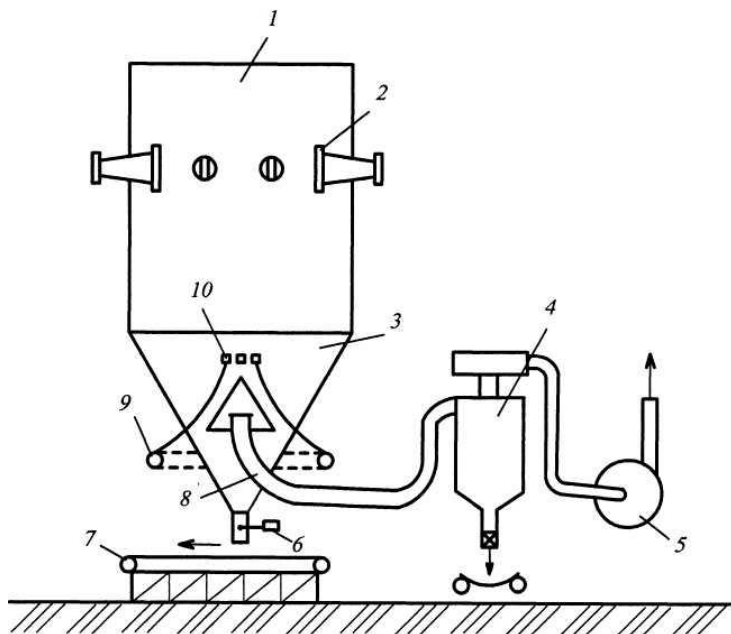


Рис. 16. Распылительная сушилка НИИстройкерамики: 1 – сушильная камера; 2 – газовые горелки; 3 – конусное днище; 4 – циклон; 5 – дымосос; 6 – клапан-мигалка; 7 – транспортер; 8 – отсасывающий патрубок; 9 – кольцевой шликеропровод;

Продукты горения природного газа, взаимодействуют с каплями шликера, высушивают их и превращают в округлые полые гранулы. Отработанные дымовые газы по отсасывающему патрубку 8, защищенному от засорения конусным колпаком, направляются в циклон 4, а из него дымососом 5 в атмосферу.

Готовый продукт из конусного днища при помощи клапан-мигалки 6 разгружается на транспортер 7.

Диаметр башни сушилки описанной конструкции 4,5 м, высота ци-

линдрической части 5 м, а конической – 3 м. Общий объем сушилки  $94 \text{ м}^3$ .

Производительность по готовому продукту при влажности шликера 45% составляет 3,5 т/ч, а по испаряемой влаге 2,5 т/ч; удельный влагосъем  $A_v = 26,5 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{ч}$ ; удельный расход теплоты  $3200 \text{ кДж/кг}$  испаренной влаги.

Институтом НИИСтройкерамика разработано шесть типоразмеров распылительных сушилок производительностью  $0,36 \dots 36 \text{ т/ч}$  порошка.

Классификация распылительных сушилок включает три признака:

- 1) способ распыления материала (форсуночный с механическим или пневматическим методом распыла и дисковый – с центробежно-дисковым распылом);
- 2) место ввода сушильного агента (нижний подвод, верхний подвод);
- 3) конструкция нижней части сушильной камеры (коническое днище, плоское днище).

Выбор той или иной конструкции обусловлен технологическими требованиями и свойствами материала.

Анализ схем распылительных сушилок (рис. 17) позволит сравнить и выбрать наиболее оптимальную схему сушки в распылительной сушилке.

*Прямоток* (а) позволяет использовать сушильный агент высокой начальной температуры (до  $800 \dots 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ), но перегрева материала не происходит, так как до 80 ... 90% теплоты передается раствору в зоне факела распыла, что приводит к резкому снижению температуры сушильного агента на выходе из сушильной камеры. Поэтому наиболее термолабильные материалы целесообразно сушить в прямоточных сушилках, так как температура контактирующих с наиболее горячим сушильным агентом частиц не превышает  $t_m$ . Температура сухих частиц определяется в основном температурой сушильного агента на выходе из сушильной камеры.

При *противотоке* скорость осаждения частиц меньше, чем при прямотоке, и, соответственно, больше время пребывания частиц в камере.

Особенностью аппарата *фонтанного типа* является последовательное сочетание противоточного и прямоточного движения распыляемой суспензии, двух кратное использование высоты. В зону высоких температур и максимальной движущей силы попадают сначала крупные капли, и по мере движения вниз сушильный агент контактирует с каплями меньшего размера. Самые мелкие капли, обладающие наибольшей развитой поверхностью, поднимаются на небольшую высоту и взаимодействуют с теплоносителем минимального потенциала.

Таким образом, в фонтанных сушилках наиболее полно используется сушильный потенциал, но велико время пребывания в камере, т.е. режим сушки жесткий.

Для осаждения мелких частиц ( $d_{cp} = 20 \dots 60 \text{ мкм}$ ) и уменьшения уноса скорость сушильного агента в камере, считая на ее полное сечение (фик-

тивная), обычно не превышает  $0,3 \dots 0,5$  м/с, но унос значительный.

По опытным данным, прямоточные цилиндрические сушильные камеры с коническим дном при верхнем расположении распыливающего центробежного диска имеют наилучшие эксплуатационные показатели и наиболее технологичны в производстве.

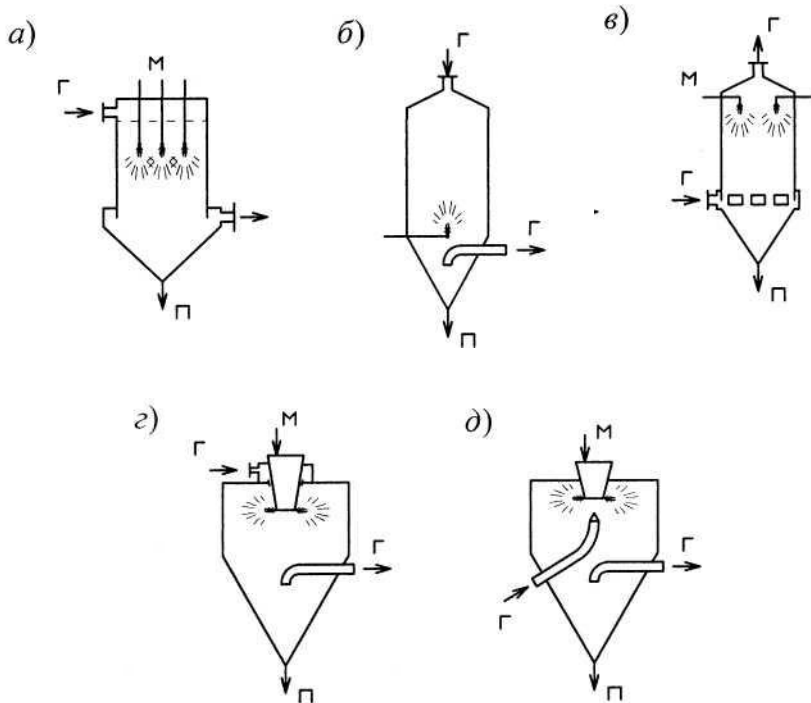


Рис. 17. Схемы распылительных сушилок: *форсуночное распыление*: а – прямоток, б – смешанный ток (сушилки фонтанного типа), в – противоток; *дисковое распыление*: г – подача сушильного агента сверху факела распыла, д – подача сушильного агента снизу, в центр факела, М – влажный материал, Г – сушильный агент, П – готовый продукт

На стадии аппаратного оформления при разработке новых высокоэффективных сушильных установок необходима подробная информация о движении капель и сушильного агента в камере и влиянии отдельных теплотехнических и конструктивных факторов на процесс сушки и габариты установки. В этом случае необходимо пользоваться сложными расчетно-аналитическими методами.

Капитальные затраты на сушку распылением, по сравнению с другими методами, уменьшаются с увеличением производительности.

Развитие промышленности требует создания распылительных сушилок



большой единичной мощности, что неэкономично, следовательно, размеры сушильных камер должны возрастать.

Поэтому необходимо интенсифицировать процессы тепло- и массообмена внутри сушильного аппарата, усовершенствовать технику распыления (тогда объем сушильной камеры не будет возрастать пропорционально количеству испаряемой влаги  $W$ ).

Получило распространение совмещение сушки с другими процессами: обжигом, дегидратацией, перемешиванием и др. Создание комбинированных аппаратов представляет большие преимущества с точки зрения уменьшения промежуточных операций; компактности установки; увеличения теплового КПД.

#### **2.4. Теплотехнологические схемы конвективных сушильных установок**

Наибольшее распространение в практике сушки получил нормальный сушильный вариант (схема с однократным использованием сушильного агента без дополнительного подогрева). Для повышения тепловой экономичности сушки или снижения предельной температуры нагрева сушильного агента, для проведения сушки во влажном сушильном агенте иногда целесообразно использовать более сложные теплотехнологические схемы сушильных установок. Широкое применение кроме нормального сушильного варианта нашли сушилки с использованием топочных газов и с частичной рециркуляцией сушильного агента.

Тепловой расчет сушильных установок может быть выполнен аналитически или графоаналитически при помощи  $I$ - $X$  диаграммы состояния влажного воздуха, **Графоаналитический метод расчета** менее трудоемок, прост и нагляден, поэтому широко используется в инженерной практике. Однако в нём ограничено применение ЭВМ для выбора оптимальных вариантов сушки.

**Характеристика  $I$ - $X$  диаграммы состояния влажного воздуха** (рис. 18).

Диаграмма была предложена в 1918 г. Л.К. Рамзиным и разработана совместно с М.Ю. Лурье для постоянного давления 99,4 кПа, которое можно считать среднегодовым для центральных районов России.  $I$ - $X$  диаграмма построена в косоугольной системе координат.

Угол между осями координат  $135^\circ$ , причем на оси ординат отложены в определенном масштабе энтальпии  $I$ , а на наклонной оси абсцисс – влагосодержания  $X$ , которые для удобства пользования диаграммой спроектированы на вспомогательную ось, перпендикулярную оси ординат.

На диаграмме нанесены: 1) линии постоянного влагосодержания ( $X = \text{const}$ ) – вертикальные прямые, параллельные оси ординат; 2) линии постоянной энтальпии ( $I = \text{const}$ ) – прямые, параллельные оси абс-

цисс, т.е. идущие под углом  $135^\circ$  к горизонту; 3) линии постоянных температур, или изотермы ( $t = \text{const}$ ); 4) линии постоянной относительной влажности ( $\phi = \text{const}$ ); 5) линии парциальных давлений водяного пара  $P_n$  во влажном воздухе, значения, которых отложены в масштабе на правой оси ординат диаграммы.

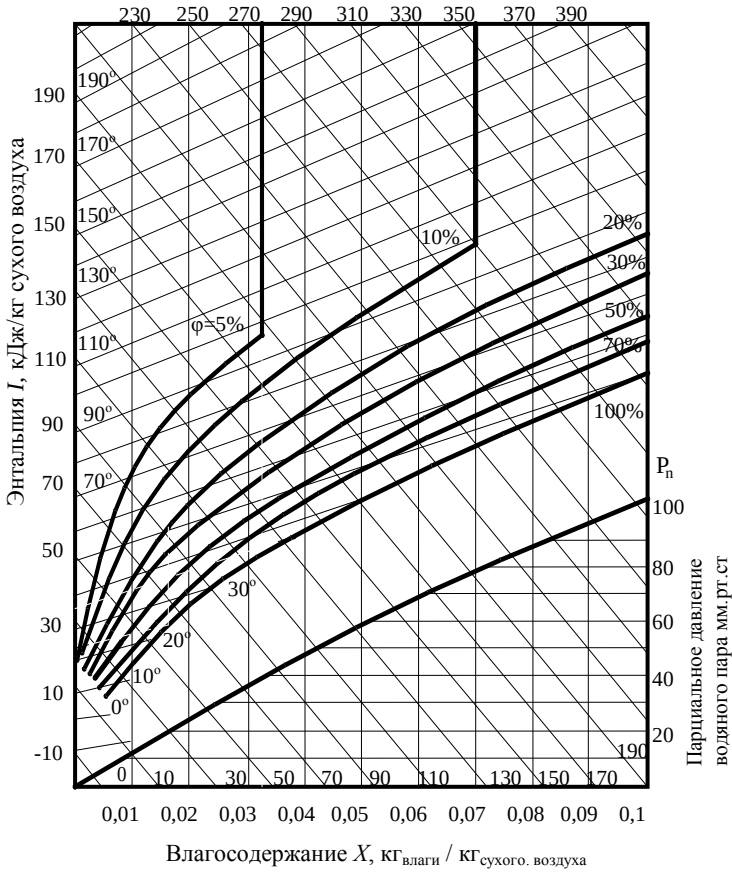


Рис 18. Диаграмма состояния влажного воздуха при давлении 99,4 кПа

Линии  $\phi = \text{const}$  образуют пучок расходящихся кривых, выходящих из одной точки с координатами  $t = -273^\circ \text{C}$  и  $X = 0$ . При температуре  $99,4^\circ \text{C}$  давление насыщенного пара  $P_n$  становится равным барометрическому,  $B = 99,4 \text{ кПа}$ , для которого построена  $I$ - $X$  диаграмма

Тогда  $\phi = P_n/B$  и влагосодержание вычисляется по формуле:

$$X = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{с.в.}}} \cdot \frac{\varphi P_{\text{п}}}{B - \varphi P_{\text{п}}} = 0,622 \frac{P_{\text{п}}}{B - P_{\text{п}}} = 0,622 \frac{\varphi}{1 - \varphi}.$$

Следовательно, при температуре  $t \geq 99,4$  °С относительная влажность воздуха  $\varphi$  не зависит от температуры и практически является величиной постоянной, так же как и влагосодержание  $X$ .

Поэтому при  $t = 99,4$  °С линии  $\varphi$  имеют резкий перелом и идут почти вертикально вверх. Линия  $\varphi = 100\%$  соответствует насыщению воздуха водяным паром при данной температуре и делит площадь диаграммы на две области. Область над кривой насыщения отвечает ненасыщенному влажному воздуху, используемому в качестве сушильного агента. Под кривой насыщения находится область пересыщенного паром воздуха и для расчета сушилок интереса не представляет.

Рассмотрим основы графоаналитического метода расчета некоторых характерных сушильных установок.

**Сушка с однократным использованием сушильного агента.** Рассмотрим основную схему процесса конвективной сушки на примере воздушной сушилки, в которой воздух нагревается только в основном калорифере и однократно проходит через сушилку.

Поскольку использование  $I$ - $X$  диаграммы для расчетов процесса сушки подразумевает лишь анализ изменения состояния сушильного агента при его движении в сушильной установке, принципиальная схема такой установки может быть представлена упрощенно.

На рис. 19 приведена принципиальная теплотехнологическая схема сушилки нормального сушильного варианта.

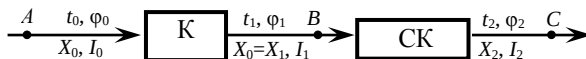


Рис. 19. Принципиальная теплотехнологическая схема воздушной сушилки с однократным использованием сушильного агента:

Для расчета и построения должны быть известны два любых параметра наружного воздуха, обычно  $t_0$  и  $\varphi_0$ , а также  $t_1$  и  $t_2$  или  $\varphi_2$ .

**Сушка смесью топочных газов с воздухом.** Наиболее интенсивным и экономичным является процесс сушки с использованием в качестве сушильного агента топочных газов. Такие сушилки, по сравнению с сушилками с паровыми калориферами, более экономичны по расходу топлива, менее металлоемки (нет необходимости в паровых котлах, паропроводах, калориферах и т. д.), но тепловая экономичность их ниже.

Кроме того, эта теплотехнологическая схема сушки позволяет ис-

пользовать в качестве сушильного агента отходящие от промышленных высокотемпературных установок газы.

Как правило, в сушильных установках используются не чисто топочные газы, а их смесь с воздухом. При коэффициенте избытка воздуха  $\alpha \geq 3 \dots 5$  отличие теплотехнических характеристик смеси от теплотехнических характеристик воздуха не превышает 5%. Поэтому балансовые расчеты сушильных установок на топочных газах, определение расхода теплоты  $Q$  и общего расхода воздуха  $L$  также могут быть выполнены с помощью  $I$ - $X$  диаграммы.

Воздух с параметрами  $t_0$ ,  $\varphi_0$  нагнетается вентилятором в камеру смешения КС. Туда же поступают из топки Т дымовые газы с параметрами  $I_{Т,Г}$ ,  $X_{Т,Г}$  (определяют при расчете горения топлива).

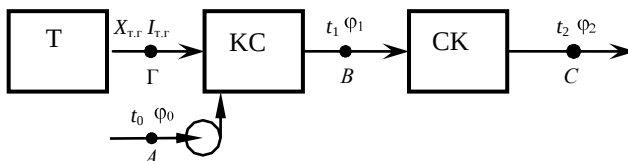


Рис. 20. Принципиальная теплотехнологическая схема сушилки с использованием смеси топочных газов с воздухом

Полученная в камере смешения смесь с температурой  $t_1$  вентилятором подается в сушильную камеру СК, из которой выходит с температурой  $t_2$ .

**Сушка с частичной рециркуляцией сушильного агента.** Одним из путей повышения степени использования воздуха является рециркуляция – подмешивание части уходящего из сушилки воздуха к свежему воздуху перед подачей его в подогреватель или сушильную камеру. При этом в сушилку возвращается также и часть теплоты.

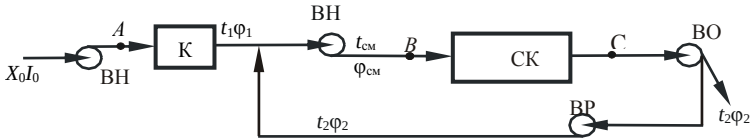
Сушилки с рециркуляцией имеют ряд преимуществ перед основной схемой: при одинаковых температурных режимах в них выше  $X$  и  $\varphi$  сушильного агента на входе и выходе из сушилки, а также выше тепловая экономичность (чем выше коэффициент рециркуляции  $K_p$ , тем ниже удельные расходы теплоты). Повышенные  $X$  и  $\varphi$  на входе дают возможность сушить материал в мягком режиме, идет более равномерная сушка. Однако наряду с достоинствами применение рециркуляции имеет и недостатки, связанные с теплотехническими и производственными трудностями сушки высоковлажным сушильным агентом.

Коэффициентом рециркуляции  $K_p$  называется отношение количества сухого рециркулирующего  $L_p$  и сухого смешиваемого (свежего)  $L_0$  сушильных агентов:

$$K_p = \frac{L_p}{L_0} = \frac{\ell_p}{\ell_0}.$$

Принципиально возможны возврат и смешение некоторой части отработавшего (рециркулируемого) воздуха: *а)* перед сушилкой и *б)* перед калорифером.

*а)*



*б)*

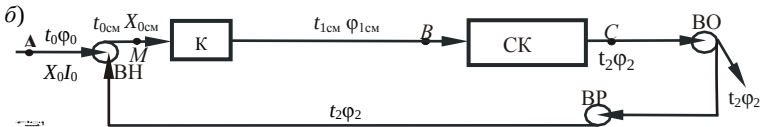


Рис. 21. Принципиальные теплотехнологические схемы сушилки с частичной рециркуляцией отработанного сушильного агента

При заданных температуре сушильного агента  $t_1$  и коэффициенте рециркуляции  $K_p$  перед сушилкой в схеме на рис. 12, *а* следует нагревать незначительные количества свежего воздуха с параметрами точки *А* до очень высоких температур, а в схеме на рис. 12, *б* температура нагревания в калорифере равна температуре сушильного агента на входе в сушилку  $t_1$ , однако количество нагреваемого в нем воздуха существенно выше, чем в первой схеме.

Вторая схема получила в промышленности большее распространение как относительно простая в техническом отношении. Нагнетающий вентилятор ВН засасывает одновременно окружающий воздух с параметрами  $t_0$ ,  $\varphi_0$  и отработанный воздух с параметрами  $t_2$ ,  $\varphi_2$ . Получаемая смесь с параметрами  $t_{0\text{ см}}$ ,  $\varphi_{0\text{ см}}$ ,  $X_{0\text{ см}}$ ,  $I_{0\text{ см}}$  направляется вентилятором ВН в калорифер К, где подогревается до  $t_{1\text{ см}}$ , а затем поступает в сушильную камеру (СК).

Часть отработанных газов, с параметрами  $t_2$ ,  $\varphi_2$  выбрасывается в атмосферу отсасывающим вентилятором ВО, а другая часть, называемая рециркулятом, посредством рециркуляционного вентилятора ВР возвращается для вторичного использования с передачей в нагнетающий вентилятор ВН.

При выборе теплотехнологической схемы сушки руководствуются как технологическими, так и экономическими соображениями.

### 3. ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

#### 3.1. Горелочные устройства и топки

Для сжигания природного газа рекомендуется применять коротко-факельные горелки с частичным или полным предварительным смешением топлива и воздуха (см. рис. 22).

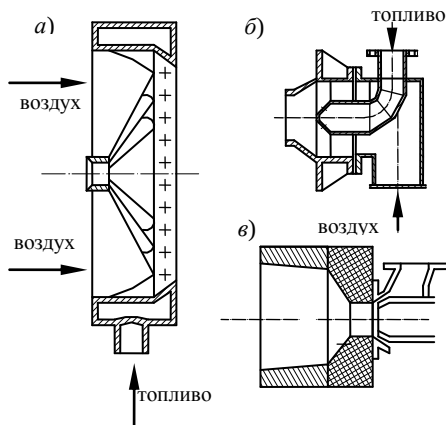


Рис. 22. Короткофакельные горелки для природного газа:  
*а, б* – с частичным смешением топлива с воздухом;  
*в* – инжекционная

В горелках с частичным смешением природный газ распределяют в закрученном потоке воздуха в виде мелких струй, вытекающих под давлением из отверстий газового коллектора (рис. 22, *а, б*).

В инжекционных горелках (рис. 22, *в*) струя газообразного топлива, вытекающая из сопла с большой скоростью, инжектирует (подсасывает) атмосферный воздух. Применение инжекционных горелок позволяет в некоторых случаях отказаться от установки дутьевого вентилятора для подачи воздуха на горение.

В сушильных установках возможно применение беспламенных горелок (рис. 23) с полным предварительным смешением холодного воздуха и природного газа, которое осуществляется в инжекционном смесителе.

Из диффузора смесителя газозооушная смесь поступает в распределительную камеру, а оттуда через систему соединительных трубок в керамические туннели, в которых поддерживается высокая температура и происходит беспламенное горение.

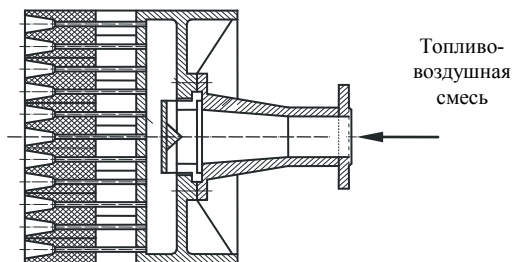


Рис. 23. Беспламенная горелка панельного типа

Жидкое топливо (мазут) сжигают с помощью форсунок высокого и низкого давления (рис. 24), распыляющих мазут на мелкие капли.

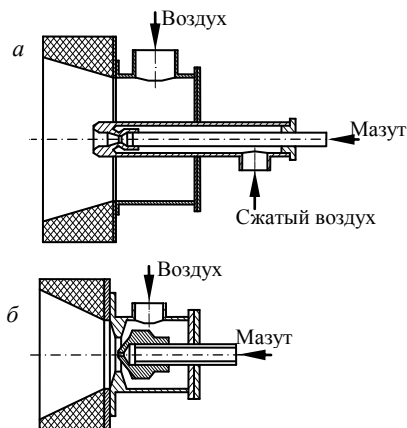


Рис. 24. Мазутные форсунки:  
*а* – горелка с форсункой высокого давления;  
*б* – горелки с форсункой низкого давления.

В форсунках высокого давления топливо распыляют струями сжатого воздуха (рис. 24, *а*), в форсунках низкого давления – потоком воздуха, подаваемого вентилятором (рис. 24, *б*).

В форсунках большой мощности может быть применено механическое распыливание: закрученный поток мазута подают под повышенным давлением через выходное отверстие малого диаметра. Во всех случаях для улучшения распыла мазута его подогревают перед подачей в форсунку до 90...100 °С.

Рациональная конструкция топки для сжигания мазута показана на рис. 25.

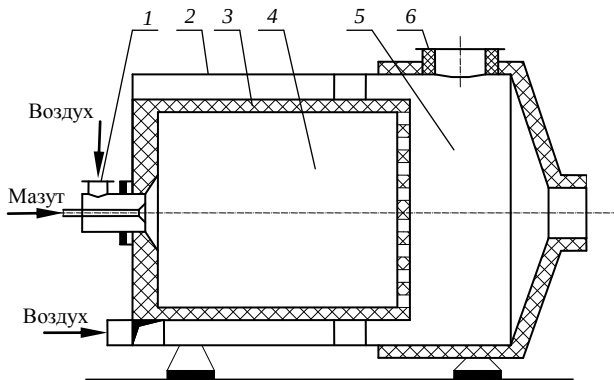


Рис. 25. Цилиндрическая топка с воздушным охлаждением:  
 1 – горелка; 2 – корпус топки; 3 – футеровка; 4 – кольцевой зазор;  
 5 – дожигательная перегородка; 6 – камера смешения;  
 7 – взрывной клапан

Топка имеет цилиндрическую форму; ее боковые стены футерованы огнеупорным бетоном и охлаждаются холодным воздухом, направленным в камеру смешения через кольцевой зазор между футеровкой и наружным корпусом топки. Дожигательная перегородка (решетка) отделяет зону горения мазутного факела от сравнительно холодной камеры смешения.

### 3.2. Аппараты пылеочистки

Санитарными нормами проектирования промышленных предприятий допускается наличие в воздухе рабочих помещений не более  $6 \text{ мг/м}^3$  минералов, не содержащих свободного  $\text{CO}_2$ . Запыленность газов и воздуха, выбрасываемых в атмосферу, не должна превышать  $80 \text{ мг/м}^3$ .

Поэтому отработанные газы и воздух перед удалением в атмосферу обеспыливают в специальных обеспыливающих устройствах.

Для очистки газа, выходящего из сушильного аппарата, рекомендуется в качестве первой ступени применять **пылеуловители циклонного типа**. В технике пылеулавливания наиболее распространены одиночные, групповые и батарейные циклоны НИИОГАЗ (рис. 26, 27, 28).

Одиночные циклоны НИИОГАЗ (рис. 26), обычно имеющие диаметр в диапазоне 400...800 мм, применяют при небольшом расходе (до  $2 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Не рекомендуется устанавливать циклоны с диаметром более 800...1000 мм.

Циклоны являются аппаратами грубой и средней очистки.



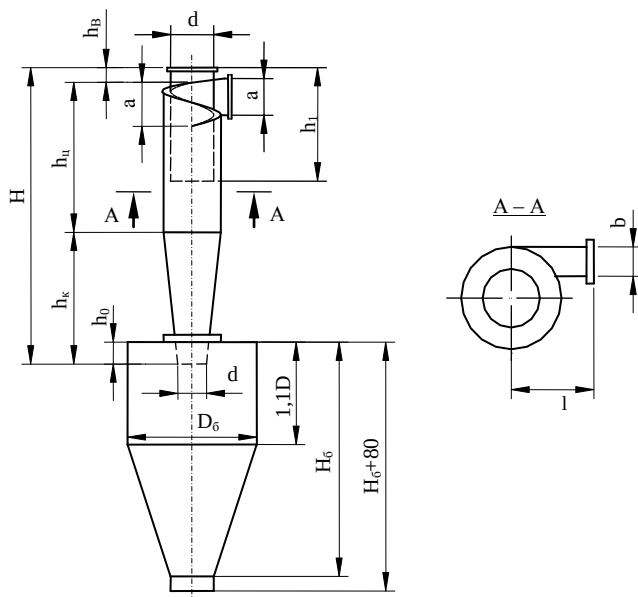


Рис. 26. Циклонный пылеуловитель НИИОГАЗ

Минимальная величина улавливаемых ими частиц 8 мкм. Степень очистки 50...60%.

Предельная температура газов должна быть на 20...50 °С выше их точки росы, а наружные поверхности аппаратов, бункеров и газопроводов должны быть теплоизолированы. Допускаемая запыленность, поступающих в циклон газов: слабослипающаяся – 200 г/м<sup>3</sup>, среднеслипающаяся – 100 г/м<sup>3</sup>, сильнослипающаяся – 50 г/м<sup>3</sup> пыли, а для батарейных циклонов – 75...100 г/м<sup>3</sup>. Циклоны предпочтительно устанавливать на всасывающей стороне вентилятора.

Типоразмер циклона подбирают по его пропускной способности, приведенной в каталогах и справочниках. Основные размеры одиночных циклонов НИИОГАЗ приведены в прил. 20. При выборе типоразмера циклона следует иметь в виду, что с увеличением его диаметра степень очистки газа снижается.

Циклоны относятся к аппаратам инерционного типа и выполняются в виде вертикальных цилиндров с коническим днищем. Запыленные газы входят в циклон по тангенциально расположенному входному патрубку и спиралеобразно перемещаются вниз. Под действием центробежных сил твердые частицы пыли отбрасываются к внутренней поверхности цилиндрической части корпуса, а под действием сил тяжести скатываются в цилиндрическую часть корпуса циклона. В центре циклона остаются наиболее

очищенные газы, которые, меняя направление, уходят через выхлопную трубу в атмосферу. Под циклоном устанавливается пылесборный бункер, из которого осажденная пыль выгружается по мере ее накопления.

На эффективность очистки газа в циклонах НИИОГАЗ влияет угол наклона крышки и входного патрубка аппарата.

Оптимальную величину коэффициента очистки и гидравлического сопротивления имеет циклон ЦН-15 с углом наклона крышки и входного патрубка  $15^\circ$ . Циклон ЦН-15у, имеющий уменьшенную высоту, характеризуется меньшей эффективностью пылеулавливания.

Циклон ЦН-24 с углом наклона крышки  $24^\circ$  применяют при повышенных расходах газа и большой концентрации пыли, состоящей в основном из крупных частиц.

Циклон ЦН-11 с углом наклона крышки  $11^\circ$ , позволяет эффективно улавливать мелкие частицы размером  $5 \dots 10$  мм, но имеет повышенное гидравлическое сопротивление.

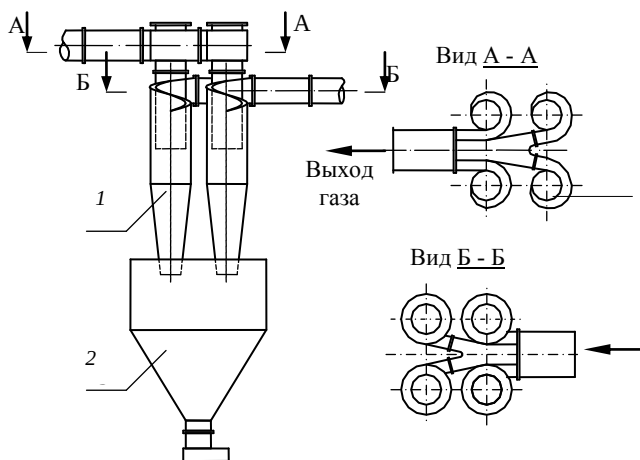


Рис. 27. Групповая установка циклонов: 1 – циклон; 2 – бункер

При расходе газа выше  $1,5 \dots 2$  м<sup>3</sup>/с циклоны НИИОГАЗ компонуют в группы до восьми аппаратов в каждой. Газ к отдельным циклонам подводят с помощью коллектора, снабженного патрубками для подсоединения к циклонам (рис. 27). Все циклоны в группах должны быть однотипными и иметь одинаковое гидравлическое сопротивление.

Для отвода газа из группы циклонов служат улитки, подключаемые к отводящему коллектору. Для отбора и отвода пыли применяют общий для всех циклонов группы бункер, имеющий угол наклона стенок  $55 \dots 60^\circ$  (больше угла естественного откоса пыли).

При общем расходе газа не ниже  $5 \text{ м}^3/\text{с}$  рекомендуются к применению батарейные циклоны НИИОГАЗ (рис. 28). Они более металлоемкие, чем групповые, но занимают меньшую площадь.

Батарейные циклоны состоят из большого количества циклонных элементов малого диаметра, установленных в общем корпусе с бункером. Опыт эксплуатации батарейных циклонов с элементами диаметром 100, 150, и 250 мм показал, что наиболее целесообразно применять элементы диаметром 250 мм. Количество элементов по глубине батарейного циклона обычно не превышает 10...12.

В качестве закручивателей газового потока в циклонных элементах применяют винтовые двухзаходные или восьмилопаточные розеточные направляющие аппараты. Угол наклона винта и лопаток розетки к горизонтали  $25^\circ$ .

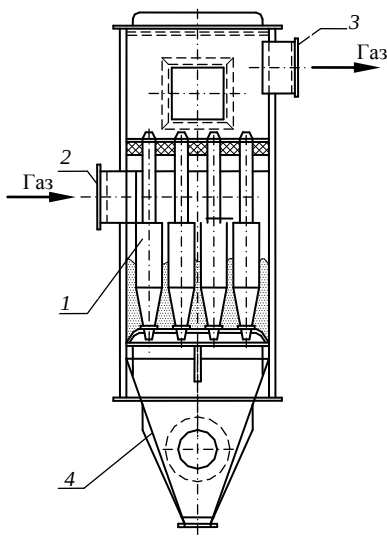


Рис. 28. Батарейный циклон:

1 – циклонный элемент; 2 – входной патрубок; 3 – выходной патрубок; 4 – бункер

Винтовые направляющие аппараты в меньшей степени забиваются пылью. Розеточные направляющие аппараты обеспечивают более высокую смесь очистки газа, но имеют повышенный коэффициент гидравлического сопротивления. Этот коэффициент можно снизить на 25%, обеспечив безударный вход газа путем применения фигурных направляющих лопаток, имеющих входной угол  $90^\circ$  при выходном угле  $25^\circ$ .

Элементы батарейных циклонов обычно устанавливают в прямоугольном корпусе. Известны также компоновки циклонных элементов в

цилиндрическом корпусе, которые имеют то преимущество, что обеспечивают равномерность раздачи запыленного газа по отдельным элементам.

Чугунные корпуса элементов батарейного циклона установлены на нижней опорной решетке, выполненной из стального листа. Между фланцами корпусов элементов и опорной плитой уложена асбестовая прокладка, поверх фланцев и опорной решетки нанесен слой уплотняющего раствора, а остальное пространство между корпусами элементов засыпано сухим шлаком. К верхней опорной решетке приварены фланцы (трубные диски) выхлопных труб. Таким образом, обеспечивается газоплотность батарейных циклонов НИИОГАЗ.

Остаточная запыленность газа на выходе из пылеуловителя должна быть меньше величины, установленной санитарными нормами. В противном случае необходимо подобрать более эффективный пылеуловитель или установить дополнительную ступень очистки газа, например, рукавный фильтр (рис. 29) или электрофильтр (рис. 30).

**Рукавные фильтры** могут быть разделены по способу подачи запыленных газов, по расположению рукавов и их размеру, виду крепления рукавов, по методу регенерации и конструкции механизма для ее проведения.

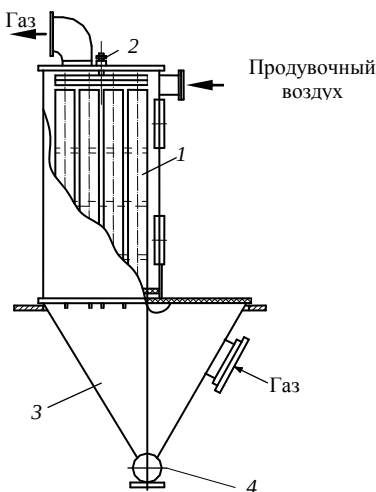


Рис. 29. Рукавный фильтр:

- 1 – рукава; 2 – встряхивающее устройство; 3 – бункер сбора пыли;  
4 – разгрузочное устройство

Рукава изготавливают из тканей или нетканых материалов в виде бесшовного цилиндра или сшивают из полотна. Длина рукавов составляет от 1,5 до 10 м, диаметр 220 мм, реже – 125 мм и 300 мм. Обычно отноше-

ние длины к диаметру колеблется от 15 до 20. Аппарат делят на секции по 10...12 рукавов в каждой с целью уменьшения нагрузки на ткань во время обратной продувки. Располагают рукава прямыми рядами или в шахматном порядке.

Корпус фильтра обычно изготавливают из металла в виде прямоугольной камеры с бункерами для сбора пыли. Аппарат внутри разделен горизонтальной решеткой, в которой сделаны отверстия с патрубками для крепления рукавов.

Для регенерации фильтровальных рукавов из шерстяных и синтетических тканей применяют в большинстве случаев сочетание механического встряхивания рукавов с их обратной продувкой.

Рукавные фильтры с обратной продувкой типа СМЦ-100 предназначены для очистки газов с температурой до 300 °С, типа ФР – до 250 °С; рукавные фильтры со встряхивающим устройством типа СМЦ-101 – для очистки газов с температурой до 140 °С; рукавные фильтры с импульсной продувкой типа ФРИ – для очистки газов от мелкодисперсной пыли с температурой до 130 °С.

Для более тонкой очистки газов применяют **электрофильтры**.

Очистка газов от пыли в электрофильтрах происходит в неравномерном электрическом поле между коронирующим и осадительным электродами.

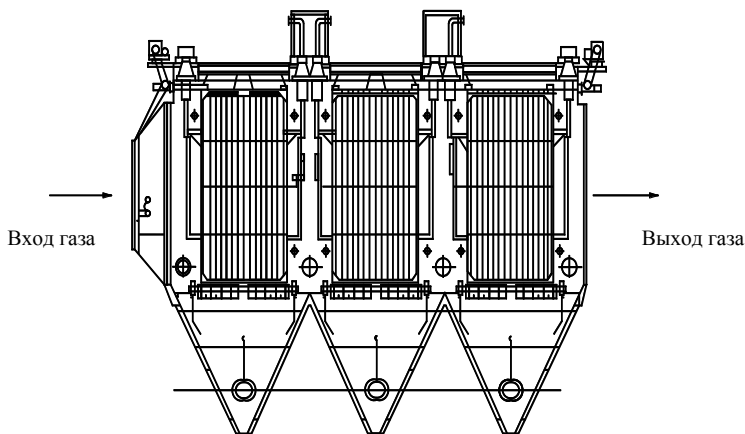


Рис. 30. Электрофильтр ЭГА1

Отрицательно заряженные частицы пыли притягиваются к осадительному электроду и нейтрализуются на нем. Эти электроды периодически встряхиваются, пыль ссыпается в нижнюю часть электрофильтра и разгрузчиком удаляется из него. Очищенные газы выбрасываются в атмосферу. На рис. 30 представлен пластинчатый, горизонтальный, дымовой трех-

польный электрофильтр с коронирующими электродами игольчатого типа и осадительными – с-образной формы.

Электрофильтр, так же как и рукавный фильтр, подбирают по рассчитанной площади поперечного сечения.

Для сухих электрофильтров с плоскими осадительными электродами скорость газа в активном сечении аппарата обычно не более  $0,8 \dots 1,0$  м/с, а в электрофильтрах с профилированными электродами (например, серии УГ, предназначенных для очистки газов с температурой до  $250^\circ\text{C}$ ) – не более  $1,5 \dots 1,7$  м/с.

Аэродинамическое сопротивление электрофильтров невелико и для расчетов принимается  $100 \dots 200$  Па.

### 3.3. Питатели и затворы

Для непрерывной подачи материала в сушильный аппарат на входе устанавливают питатель. Наиболее распространенными являются тарельчатый, лопастной и шнековый питатели (рис. 31, в, з, д).

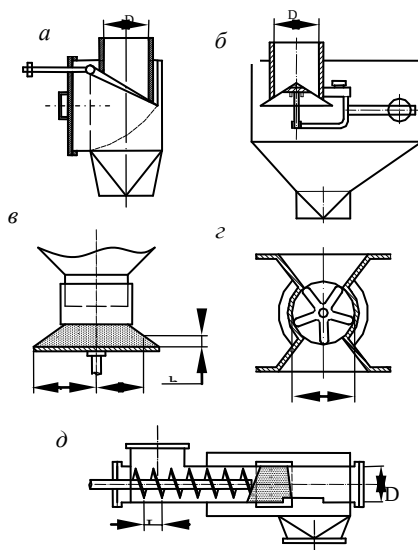


Рис. 31. Затворы и питатели:

а – клапан-мигалка плоский; б – клапан-мигалка конусная; в – тарельчатый питатель; з – лопастной питатель; д – шнековый питатель

Тарельчатые питатели предназначены для непрерывной подачи и дозирования мелкодробленых сыпучих материалов и устанавливаются под бункерами или силосами. Основным элементом питателя является вращаю-

щийся диск (тарелка). Материал высыпается из трубы бункера на диск в форме конуса. При вращении диска питателя часть находящегося на нем материала сбрасывается в разгрузочный лоток ножом.

Производительность тарельчатого питателя может регулироваться с помощью ножа или с подъемом и опусканием подвижной обоймы, надетой на трубу бункера.

Лопастные и шнековые питатели применяются для равномерной подачи мелкодисперсных сыпучих материалов и удаления сухой пыли из бункеров рукавных и электрофильтров.

Во избежание перетечек газа аппараты каждой ступени пылеочистки снабжают самостоятельным бункером для сбора и отвода пыли.

Пыль из бункеров пылеуловителей выгружается непрерывно через запирающие клапаны-мигалки (рис. 31, *а, б*), устанавливаемые на вертикальных участках пылеотводных труб. Зазор уплотняется пылью, накапливающейся на клапане.

Если разряжение над клапаном превышает 1000 Па, то для обеспечения надежного уплотнения устанавливают две мигалки последовательно.

Наиболее надежно работают конусные мигалки (рис. 31, *б*). Они имеют повышенную чувствительность, благодаря установке качающейся системы на призматических опорах, и обеспечивают равномерный кольцевой зазор для прохода пыли.

## 4. РАСЧЕТ КОНВЕКТИВНЫХ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Расчет сушильных аппаратов состоит из следующих этапов: 1) изучив литературные источники по заданной теме выбирают наиболее рациональную теплотехнологическую схему сушки; 2) по требуемой производительности составляют материальный баланс сушилки и определяют количество влаги, испаряемой в единицу времени; 3) составляют тепловой баланс и находят требуемое количество теплоты в единицу времени, расход топлива или пара и расход сушильного агента; 4) определяют требуемую поверхность тепло- и массообмена; 5) находят рабочий объем и габариты сушилки; 6) проводят расчет и подбор вспомогательного оборудования; 7) находят общее гидравлическое сопротивление сушильной установки и подбирают тягодутьевое оборудование.

### 4.1. Литературный обзор

Изучив учебную и периодическую литературу по заданной теме, студент в этом разделе должен раскрыть сущность заданного процесса, дать краткое описание и сравнительную характеристику установок для осуществления данного процесса, выбрать наиболее рациональную теплотехнологическую схему сушки, описать выбранную установку и привести ее эскиз.

### 4.2. Материальный расчет сушилки

Целью расчета является определение количества влаги  $W$ , испаряемой в сушилке за единицу времени, и расход материала – влажного  $G_1$  или высушенного  $G_2$ .

Общее количество испаряемой влаги рассчитывают по следующим формулам, вытекающим из уравнений материального баланса сушилки:

$$W = G_1 \frac{\omega_1 - \omega_2}{1 - \omega_2} \quad (17)$$

или

$$W = G_2 \frac{\omega_1 - \omega_2}{1 - \omega_1}, \quad (18)$$

где  $G_1$ ,  $G_2$  – производительность сушилки по влажному и высушенному материалу;  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  – соответственно начальная и конечная влажность материала, в долях.

Расход материала  $G_1$ ,  $G_2$  находят с помощью уравнения материального баланса:

$$G_1 = G_2 + W. \quad (19)$$



### 4.3. Внутренний баланс сушильной камеры

Величина  $\Delta$ , называемая внутренним балансом сушильной камеры, выражает разность между приходом и расходом теплоты непосредственно в сушильной камере без учета теплоты сушильного агента:

$$\Delta = q_{в1} - (q_m + q_{о.в} + q_{тр} + q_{п}). \quad (20)$$

Расчет величины  $\Delta$  выполняют для летних и зимних условий.

Удельный приход теплоты с испаряемой влагой равен:

$$q_{в1} = C_{в1} \theta_1, \quad (21)$$

где  $C_{в1}$  – удельная теплоемкость влаги, удаляемой из материала при начальной температуре материала  $\theta_1$ ; для воды  $c_v = 4,19$  кДж/(кг·К).

Удельный расход теплоты на нагревание высушенного материала равен:

$$q_m = \frac{G_2(1 - \omega_2)C_{с.м}(\theta_2 - \theta_1)}{W}, \quad (22)$$

Удельную теплоемкость абсолютно сухого материала  $C_{с.м}$  находят по прил. 1.

Температуру материала  $\theta$  принимают равной температуре мокрого термометра при средних параметрах окружающего воздуха. В зимних условиях допускается считать  $\theta_1 = 0$  °С (при хранении материала в помещении), иначе необходимо учитывать дополнительный расход тепла на подогрев и плавление замерзшей свободной влаги в материале.

Температуру  $\theta_2$  высушенного материала при мягком режиме хранения рекомендуется принимать на 10...15 °С выше температуры мокрого термометра, определяемой по параметрам сушильного агента на входе в сушилку. При жестком режиме сушки температура материала приближается к температуре кипения влаги.

Удельный расход тепла на нагрев остаточной влаги в материале рассчитывают по формуле:

$$q_{о.в} = \frac{G_2 \omega_2 C_v (\theta_2 - \theta_1)}{W}, \quad (23)$$

где  $C_v$  – средняя удельная теплоемкость влаги.

Удельные потери теплоты на нагрев транспортирующих устройств (вагонеток, конвейера и др.) рассчитывают с учетом массы  $G_{тр}$  транспортирующего устройства, проходящего через сушилку за единицу времени:

$$q_{тр} = \frac{G_{тр} C_{тр} (t_{тк} - t_{тн})}{W}, \quad (24)$$

где  $G_{\text{тр}}$  – масса транспортирующего устройства, проходящая в единицу времени через сушилку;  $C_{\text{тр}}$  – удельная теплоемкость материала транспортирующего устройства,  $t_{\text{н}}$  – начальная температура транспортирующего устройства, примерно равная температуре воздуха в помещении,  $t_{\text{к}}$  – конечная температура транспортирующего устройства (принимается равной температуре  $t_1$  сушильного агента при противоточной или  $t_2$  – при прямоточной схеме сушки).

Удельные потери теплоты в окружающую среду оценивают предварительно в долях от теплоты, расходуемой на испарение 1 кг влаги:

$$q_{\text{п}} = a_{\text{п}}(r_0 + C_{\text{п}}t_2), \quad (25)$$

где  $r_0$  – удельная теплота парообразования при нормальных условиях (для воды  $r_0 = 2493$  кДж/кг),  $C_{\text{п}}$  – удельная теплоемкость пара ( $C_{\text{п}} = 1,97$  кДж/(кг·К)). Коэффициент  $a_{\text{п}} = 0,005 \dots 0,05$ . Меньшее значение рекомендуется для сушки в "кипящем" слое, большее – для барабанной и туннельной сушилок. После определения размеров сушильного аппарата следует выполнить уточненный расчет потери теплоты в окружающую среду.

#### 4.4. Построение на $I$ – $X$ диаграмме процесса сушки воздухом

На диаграмме (рис. 32) состояние атмосферного воздуха изображается точкой  $A$ , состояние горячего воздуха на входе в сушилку – точкой  $B$ . Прямая  $AB$  характеризует процесс нагрева воздуха в калорифере.

Точку  $A$  наносят на диаграмму по значениям температуры  $t_0$  и относительной влажности  $\varphi_0$  в заданном районе (прил. 8). Для зимних условий (при отрицательной температуре) рекомендуется использовать параметры  $x_0$  и  $I_0$ . Влагосодержание воздуха рассчитывают по уравнению:

$$X_0 = 0,622 \frac{\varphi_0 P_{\text{н}}}{P - P_{\text{н}}}, \quad (26)$$

где  $P_{\text{н}}$  – давление насыщенного водяного пара, соответствующее заданной температуре  $t_0$  (см. прил. 4). Энтальпию  $I_0$  определяют по формуле (35).

Точку  $B$  с параметрами  $X_1$ ,  $t_1$ ,  $I_1$  находят из условия равенства  $X_1$  и  $X_0$  на пересечении вертикальной линии  $AB$  с заданной изотермой  $t_1$ .

Из точки  $B$  проводят линию  $I_1 = \text{const}$  до пересечения с  $t_2$  или  $\varphi_2$ . Получают точку  $D$  с параметрами  $X_{2\text{т}}$ ,  $t_2$ , отражающую состояние отработанного воздуха на выходе из теоретической сушилки. и откладывают по вертикали (в масштабе диаграммы) величину  $\Delta(X'_2 - X_1)$  до точки  $E$ . Линия  $BE$  совпадает по направлению с линией действительного процесса сушки. Ее пересечение с изотермой  $t_2$  определяет положение точки  $C$ .



неизвестно, рекомендуется рассчитать параметры вспомогательной точки  $I$  на диаграмме  $I-X$ , характеризующие состояние топочных газов после их предварительного смешения с воздухом. При этом коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  в смеси принимают от 2 до 5, в зависимости от заданной начальной температуры сушильного агента (меньшие значения  $\alpha$  при  $t_1 \approx 1200$  °C, большие – при  $t_1 \approx 300$  °C).

Состав и расчетные характеристики топлива (природного газа, мазута и угля) даны в прил. 2 и 3. Расходы воздуха и продуктов сгорания в таблицах и расчетных формулах при сжигании жидкого и твердого топлива отнесены соответственно к 1 кг рабочей массы мазута и угля или 1 м<sup>3</sup> сухого природного газа, взятого при нормальных условиях (влажностное содержание природного газа при обычном его давлении в расчётах можно не учитывать).

Объем  $V^0$  теоретически необходимого воздуха также соответствует нормальным условиям (н.у.).

Масса  $G_B$  сухого воздуха, необходимого для сжигания топлива и смешения с топочными газами, зависит от принятой величины коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ :

$$G_B = \alpha \rho_{c.B} V^0, \quad (28)$$

где  $\rho_{c.B}$  – плотность сухого воздуха при нормальных условиях (0 °C, 760 мм. рт.ст.), равная 1,293 кг/м<sup>3</sup>.

Примечание: в составе природного газа, кроме указанных углеводородов  $C_m H_n$ , имеются негорючие компоненты:

$$N_2 + CO_2 = 1 - \sum C_m H_n,$$

где  $\sum C_m H_n = CH_4 + C_2H_6 + C_3H_8 + C_4H_{10} + C_5H_{12}$ .

Масса сухих топочных газов при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha$  составляет:

при сжигании 1 кг мазута или угля:

$$G_{c.r} = 1 - (W^p + A^p + 9H^p) + G_B; \quad (29)$$

при сжигании 1 м<sup>3</sup> природного газа:

$$G_{c.r} = \rho_r^c - \rho_n \sum \frac{n}{2} C_m H_n + G_B, \quad (30)$$

где  $\rho_n$  – плотность водяного пара при нормальных условиях,  $\rho_n = 0,804$  кг/м<sup>3</sup>.

Масса водяных паров в топочных газах при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha$  составляет:

при сжигании мазута или угля:

$$G_n = W^p + 9H^p + X_0 G_B; \quad (31)$$

при сжигании природного газа:

$$G_{\text{п}} = \rho_{\text{п}} \sum \frac{n}{2} C_{\text{м}} H_{\text{п}} + X_0 G_{\text{в}}, \quad (32)$$

где  $X_0$  – влагосодержание окружающего воздуха.

Влагосодержание топочных газов при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha$  определяют по формуле:

$$X_{\text{т.г}} = \frac{G_{\text{п}}}{G_{\text{с.г}}}. \quad (33)$$

Энтальпию топочных газов, отнесенную к 1 кг абсолютно сухого газа, при избытке воздуха  $\alpha$  вычисляют по следующей формуле:

$$I_{\text{т.г}} = \frac{(Q_{\text{п}}^{\text{п}} \eta_{\text{т}} + c_{\text{тл}} t_{\text{тл}} + I_0 G_{\text{в}})}{G_{\text{с.г}}}. \quad (34)$$

где  $\eta_{\text{т}}$  – КПД топки, учитывающий потери тепла от неполноты сгорания топлива и от наружного охлаждения топки,  $\eta_{\text{т}} \approx 0,95$ ;  $c_{\text{тл}}$  – удельная теплоемкость мазута, кДж/(кг·К), величину которой можно определить по формуле  $c_{\text{тл}} = 1,74 + 0,0025 t_{\text{тл}}$ ;  $t_{\text{тл}}$  – температура подогрева мазута перед подачей в форсунку,  $t_{\text{тл}} \approx 80 \dots 100$  °С;  $I_0$  – энтальпия окружающего воздуха, кДж/кг, величину которой определяют по диаграмме I–X для летних и зимних условий или вычисляют по формуле:

$$I_0 = c_{\text{в}} t_0 + (r_0 + c_{\text{п}} t_0) X_0, \quad (35)$$

где  $t_0$ ,  $X_0$  – температура и влагосодержание окружающего воздуха;  $r_0$ ,  $c_{\text{в}}$  и  $c_{\text{п}}$  – удельная теплота парообразования и теплоемкость воздуха и пара, имеющие те же значения, что и в формуле (116),  $c_{\text{в}} = 1$  кДж/(кг·К).

#### 4.6. Построение на I–X диаграмме процесса сушки смесью топочных газов с воздухом

На диаграмме (рис. 33) состояние окружающего воздуха изображается точкой  $A$ , состояние топочных газов при расчетном коэффициенте избытка воздуха  $\alpha$  (после предварительного смешения с воздухом) изображается вспомогательной точкой  $F$  с параметрами  $X_{\text{т.г}}$ ,  $I_{\text{т.г}}$ . Линия  $AF$  характеризует процесс смешения топочных газов с воздухом.

При высокой температуре топочных газов точка  $F$  может оказаться вне поля применяемой диаграммы. В этом случае следует рассчитать параметры топочных газов при большом значении  $\alpha$ . Точку  $B$ , определяющую параметры сушильного агента ( $X_1$ ,  $t_1$ ,  $I_1$ ) на входе в сушилку, находят на пересечении линии  $AF$  с изотермой  $t_1$ . Дальнейшее построение процесса сушки (линии  $BC$ ) проводят так же, как для воздушных сушилок нормального сушильного варианта.

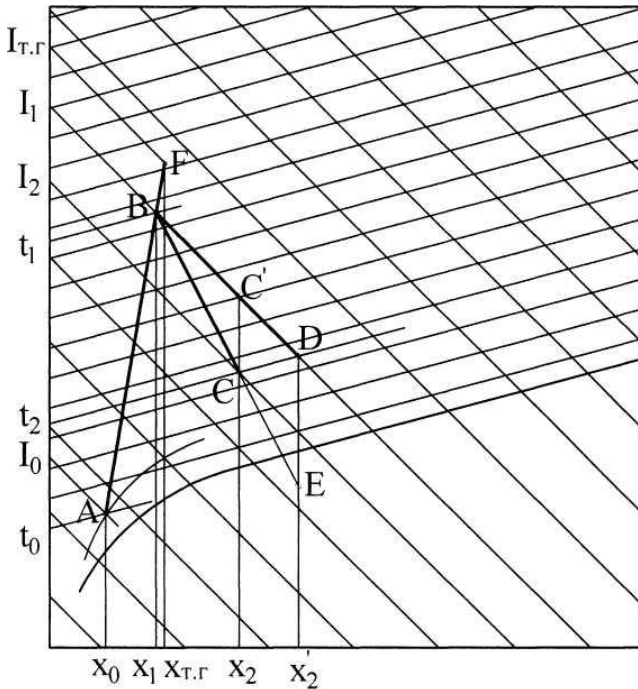


Рис. 33. Построение на  $I$ - $X$  диаграмме процесса сушки смесью топочных газов с воздухом

По соотношению длин отрезков  $AB$  и  $AF$  на линии смешения  $AF$  (или их проекций на ось  $X$ ) вычисляют кратность смешения воздуха с топочными газами:

$$n = \frac{G_{\text{в.см}}}{G_{\text{с.г}}} = \frac{X_{\text{т.г}} - X_1}{X_1 - X_0}, \quad (36)$$

где  $G_{\text{в.см}}$  – масса сухого воздуха, подаваемого на окончательное смешение с топочными газами.

Коэффициент избытка воздуха  $\alpha_{\text{см}}$  в газовоздушной смеси, поступающей в сушильную камеру, можно определить по формуле:

$$\alpha_{\text{см}} = \alpha(1 + n \frac{G_{\text{с.г}}}{G_{\text{в}}}). \quad (37)$$

#### 4.7. Построение на $I$ – $X$ диаграмме процесса сушки с рециркуляцией воздуха

В схеме сушильной установки с рециркуляцией часть воздуха, выходящего из сушилки, подается вентилятором на смешение с атмосферным воздухом, поступающим в калорифер. При построении на  $I$ – $X$  диаграмме (рис. 34) линии теоретического процесса сушки с рециркуляцией наносят точки  $A$  и  $C$ , соответствующие параметрам свежего ( $t_0$ ,  $\phi_0$ ) и отработанного ( $t_2$ ,  $\phi_0$ ) воздуха. На линии смешения  $AC$  находят точку  $M$ , характеризующую параметры смеси, поступающей в калорифер.

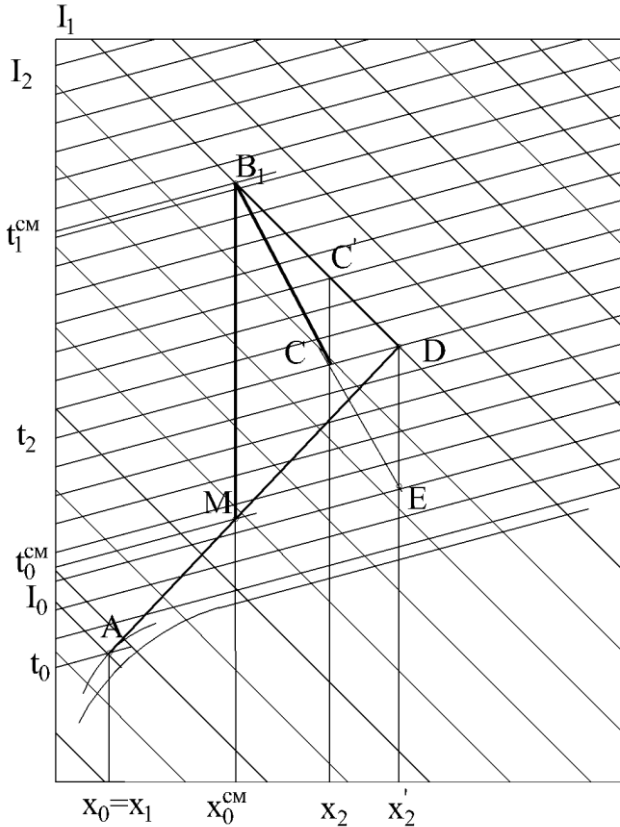


Рис. 34. Построение на  $I$ – $X$  диаграмме процесса сушки с частичной рециркуляцией отработанного воздуха

Место этой точки определяет отношение отрезков  $\frac{CM}{AM} = K_p$ , которое численно равно коэффициенту рециркуляции. Обычно  $K_p$  вычисляется из заданной по расчету доли рециркулята  $G_p$ , выраженной в процентах по отношению ко всей получаемой смеси:

$$G_p = \frac{K_p}{K_p + 1} \cdot 100\%, \quad (38)$$

Откуда

$$K_p = \frac{G_p}{100 - G_p}. \quad (39)$$

$$K_p = \frac{L_p}{L} = \frac{X_{\text{occ}} - X_0}{X_2 - X_{\text{occ}}}. \quad (40)$$

Отсюда определяют влагосодержание сушильного агента после смешивания на входе в калорифер:

$$X_{\text{occ}} = \frac{X_0 + n_p X_2}{1 + n_p}. \quad (41)$$

Из точки  $M$  проводят линию  $X_{0\text{см}} = \text{const}$  до пересечения с линией  $I_2 = I_1 = \text{const}$ , проведенной из точки  $C$ . Точка пересечения  $B$  характеризует состав воздуха на входе в сушильную камеру, а изотерма  $t_{1\text{см}}$  – температуру смеси на входе в сушильную камеру.

Если же заданы  $K_p$  неизвестен, а заданы составы свежего и отработанного воздуха (т.  $A$  и  $C$ ) и допустимая температура нагрева смеси  $t_{1\text{см}}$ , то положение точки  $B$  определяется по пересечению линии  $I_2 = I_1 = \text{const}$ , проведенной из точки  $C$ , с заданной  $t_{1\text{см}} = \text{const}$ . Опуская вертикаль из точки  $B_1$  на линию  $AC$ , находят положение точки  $M$  ( $t_{0\text{см}}$ ,  $\varphi_{0\text{см}}$ ,  $X_{0\text{см}}$ ).

Процесс сушки в целом изображается ломаной линией  $AMBC$ . На  $I$ - $X$  диаграмме линия  $AM$  характеризует смешение свежего и отработанного воздуха, линия  $MB$  – нагрев смеси в калорифере, а линия  $BC$  – процесс теоретической сушки в сушильной камере.

Построение действительного процесса сушки проводят так же, как для воздушных сушилок нормального сушильного варианта.

#### 4.8. Расчет расходов сушильного агента, греющего пара и топлива

Массовый расход абсолютно сухого газа (в составе сушильного агента) рассчитывают, используя результаты построения процесса сушки на диаграмме  $I$ - $X$ :



$$L = \frac{W}{(X_2 - X_1)}. \quad (42)$$

Массовый расход влажного газа  $L_{вл.г}$  определяют в зависимости от его влагосодержания  $X$ :

$$L_{вл.г} = L(1 + X). \quad (43)$$

Расход греющего пара в калорифере при сушке воздухом рассчитывают по уравнению теплового баланса:

$$D = \frac{L(I_1 - I_0)}{r}, \quad (44)$$

где  $r$  – удельная теплота парообразования, соответствующая заданному давлению греющего пара (прил. 4).

Расход топлива (при сушке топочными газами) может быть найден из соотношения массового расхода сушильного агента  $L$  и массы сухих газов  $G_{с.г}$ , приходящийся на 1 кг или 1 м<sup>3</sup> топлива, с учетом кратности  $n$  смешения их с воздухом перед сушилкой:

$$B_m = \frac{L}{G_{с.г}(1 + n)}. \quad (45)$$

#### 4.9. Расчет рабочего объема сушилки

Размеры сушилки в значительной степени зависят от интенсивности теплообменных процессов. Лишь при сушке в кипящем слое решающее значение приобретают условия псевдооживления.

Общее количество теплоты, затрачиваемой в процессе сушки за 1 с, определяют по формуле:

$$Q_0 = L(I_1 - I_0). \quad (46)$$

Вычитая из него тепловые потери на нагрев транспортных устройств и в окружающую среду, можно найти количество теплоты, передаваемой высушиваемому материалу в рабочем объеме сушилки за 1 с:

$$Q = Q_0 - W(q_{тр} + q_n). \quad (47)$$

При сушке формованных изделий и в других случаях, когда известна связь теплообменной поверхности с массой материала, рассчитывают коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  (см. разд. 4.9) и поверхность теплообмена:

$$S_{\tau} = \frac{Q}{\alpha \Delta t_{cp}}, \quad (48)$$

где  $\Delta t_{cp}$  – средний температурный напор. Рабочий объем сушилки выбира-

ют из условия размещения в сушилке изделий (материала) с расчетной величиной поверхности теплообмена (см. разд. 4.10).

В остальных случаях рассчитывают непосредственно рабочий объем сушилки, применяя объемный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_v$  (см. разд. 4.10) или объемный коэффициент тепломассообмена  $K_v$ .

Для расчета рабочего объема  $V_p$  сушилки используют уравнение теплоотдачи от сушильного агента к материалу:

$$V_p = \frac{Q}{\alpha_v \Delta t_{cp}}. \quad (49)$$

Интенсивность теплообмена в сушилке характеризуется величиной удельной производительности рабочего объема по влаге:

$$A_v = \frac{W}{V_p}. \quad (50)$$

Если отсутствуют надежные методы расчета коэффициента теплоотдачи, например, **в барабанной сушилке**, величину  $A_v$  определяют по уравнению тепломассообмена:

$$A_v = K_v \Delta t_{cp}, \quad (51)$$

где  $K_v$  – объемный коэффициент тепломассообмена.

Затем из формулы (49) находят рабочий объем  $V_p$  сушилки. Объемный коэффициент тепломассообмена  $K_v$  вычисляют по эксплуатационным показателям сушилок в промышленных условиях (прил. 9). Он в значительной степени зависит от гигроскопичных свойств и конечной влажности высушиваемого материала.

Средний температурный напор вычисляют по формуле;

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\lg \left( \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m} \right)}. \quad (52)$$

Для расчета величины  $\Delta t_{cp}$  находят температурные напоры на входе сушильного агента и на выходе из нее:

$$\Delta t_6 = t_1 - \theta_m; \quad \Delta t_m = t_2 - \theta_m,$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – температуры сушильного агента соответственно на входе в сушилку и на выходе из нее.

В большинстве случаев допускается принимать температуру материала  $\theta_m$  равной температуре мокрого термометра  $t_m$ , которую находят с помощью диаграммы  $I-X$  по параметрам сушильного агента на входе и выходе из сушилки.

При удалении связанной влаги в период падающей скорости сушки

материал нагревается выше температуры мокрого термометра.

Рабочий объем сушилки можно также определить, задавшись оптимальным для данной конструкции сушилки значением  $A_v$ .

#### 4.10. Расчет коэффициента теплоотдачи

Для расчета конвективной теплоотдачи применяют эмпирические уравнения, которые устанавливают зависимость критерия Нуссельта  $Nu = \alpha l / \lambda$  от критерия Рейнольдса  $Re = v l / \nu$ . Здесь  $v$  – средняя скорость газа,  $l$  – определяющий линейный размер. Коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , кинематический коэффициент вязкости  $\nu$ , удельную теплоемкость  $C_p$  и величину критерия Прандтля ( $Pr$ ) выбирают по таблице физических свойств воздуха при средней температуре сушильного агента (прил. 6), что допустимо также и при сушке смесью топочных газов с воздухом. Среднюю температуру сушильного агента находят по формуле:

$$t_{cp} = \theta_m + \Delta t_{cp},$$

где  $\theta_m$  – температура материала.

Для расчета коэффициента конвективной теплоотдачи при продольном обтекании поверхности турбулентным потоком газа применяют уравнение:

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4}. \quad (53)$$

Здесь определяющим линейным размером является эквивалентный диаметр канала:

$$d_s = \frac{4S}{\Pi}, \quad (54)$$

где  $S$  – живое (поперечное) сечение канала,  $\Pi$  – смоченный периметр канала.

Коэффициент теплоотдачи к частицам (кускам) материала можно рассчитать по уравнению, справедливому для значений  $Re > 1000$ :

$$Nu = 2 + 1,05 Re^{0,5} Pr^{0,33} Gu^{0,175}. \quad (55)$$

Здесь определяющим линейным размером является диаметр частиц, кусков материала или изделий. Если кусок материала или изделие имеет неправильную форму, то за определяющий размер можно приближенно принимать среднегеометрическую величину:

$$l = \sqrt{l_{\max} l_{\min}},$$

где  $l_{\max}$  и  $l_{\min}$  – наибольший и наименьший размеры куска материала

или изделия.

Критерий Гухмана  $Gu$ , введенный в уравнение, учитывает влияние массообмена на теплообмен:

$$Gu = \frac{(t_{cp} - t_m)}{(273 + t_{cp})}, \quad (56)$$

где  $t_{cp}$  – средняя температура газа, °C;  $t_m$  – температура мокрого термометра, °C.

Для сушки в кипящем слое рекомендуются следующие формулы:

$$Nu = 0,016 \left( \frac{Re_0}{\varepsilon} \right)^{1,3} Pr^{0,33}, \text{ при } \frac{Re_0}{\varepsilon} < 200; \quad (57)$$

$$Nu = 0,4 \left( \frac{Re_0}{\varepsilon} \right)^{0,67} Pr^{0,33}, \text{ при } \frac{Re_0}{\varepsilon} \geq 200, \quad (58)$$

где  $\varepsilon$  – порозность псевдоожиженного ("кипящего") слоя.

Критерий  $Re_0$  вычисляют по фиктивной скорости газа  $v_0$ . Определяющим линейным размером является средний диаметр  $d$  частиц материала.

#### 4.11. Расчет основных параметров туннельной сушилки

Площадь поперечного сечения  $S$  туннеля выбирают из условия создания в ней средней скорости  $v_0$  сушильного агента не менее 1...1,5 м/с:

$$S = \frac{L}{\rho v_0}, \quad (59)$$

где  $L$  и  $\rho$  – массовый расход и плотность абсолютно сухого сушильного агента. В этом случае скорость  $v$  сушильного агента, по которой рассчитывают теплоотдачу в туннеле, заполненном изделиями, будет в несколько раз превышать принятое значение  $v_0$ , что соответствует оптимальным условиям конвективного теплообмена.

Ширина и высота туннеля должны соответствовать размерам вагонетки и габаритам осадки изделий. Рекомендуется принимать следующие размеры вагонетки: высота 600 мм, длина 1200 мм, ширина 850 мм. Масса стальной вагонетки 200 кг. Допускается применять вагонетки с увеличенными до двух метров размерами по длине и ширине.

Ширину туннеля принимают на 150 мм больше ширины вагонеток, высоту туннеля – на 100 мм больше суммарной высоты вагонетки и садки.

Размещение садки изделий изображают на эскизе и с его помощью рассчитывают емкость  $G_0$  одной вагонетки по массе (числу), высушенных изделий и поверхность теплообмена  $S_{то}$  изделий на вагонетке. Затем, рассчитав по формуле (56) необходимую поверхность теплообмена изделий в сушилке  $S_t$ , определяют число вагонеток, которое необходимо разместить в

сушилке для обеспечения заданной ее производительности:

$$n_{\text{заг}} = \frac{S_{\text{т}}}{S_{\text{то}}}. \quad (60)$$

Принимая длину одного туннеля от 20 до 36 м и учитывая зазоры между вагонетками (каждый зазор 300...400 мм), находят число вагонеток  $n_0$  в одном туннеле и необходимое число туннелей:

$$n_{\text{тун}} = \frac{n_{\text{ваг}}}{n_0}. \quad (61)$$

Время сушки изделия можно найти по формуле:

$$\tau = \frac{n_{\text{ваг}} G_0}{G_2}, \quad (62)$$

где  $G_2$  – производительность сушилки по массе (числу) высушенных изделий.

В некоторых случаях время сушки принимают на основании эксплуатационного опыта (прил. 10). Тогда необходимое число вагонеток  $n_{\text{ваг}}$ , одновременно размещаемых в сушилке, рассчитывают по формуле (60).

#### 4.12. Расчет параметров барабанной сушилки

Рабочий объем  $V_p$  сушилки определяют по уравнению (49), напряжение объема сушильного барабана по влаге  $A_v$  – по формуле (50).

Из материального баланса сушилки следует зависимость, по которой можно найти коэффициент заполнения  $\psi$  барабана, т. е. долю рабочего объема барабана, заполненную материалом:

$$\psi = \frac{A}{\rho_{\text{нас}}} \cdot \frac{1 - \frac{U_1 + U_2}{2}}{U_1 - U_2}, \quad (63)$$

где  $\rho_{\text{нас}}$  – насыпная плотность материала (прил. 9).

Обычно величина  $\psi$  не превышает 0,2...3.

Во избежание чрезмерного пылеуноса скорость газов  $v_r$  в барабане не должна превышать 2,5...3 м/с. Исходя из этого условия, находят минимально допустимый диаметр сушильного барабана:

$$D_6 = \sqrt{\frac{4L}{\pi(1 - \psi)\rho_2 v_r}}, \quad (64)$$

где  $\rho_2$  и  $L$  – плотность и расход абсолютно сухого сушильного агента.

Задаются отношения длины барабана  $L_6$  к его диаметру  $D_6$  в пределах  $4 < L_6/D_6 < 8$  и определяют диаметр барабана из формулы:

$$V_p = \frac{\pi D_6^2 L_6 (1 - \psi)}{4}. \quad (65)$$

Принимают стандартные размеры сушильного барабана по ГОСТ 11875-79 (прил. 11), соответствующие наибольшей из величин  $D_6$ , вычисленных по формулам (64, 65).

Находят средний массовый расход материала:

$$G_{cp} = \frac{(G_1 + G_2)}{2} \quad (66)$$

и время пребывания материала в барабане:

$$\tau = \frac{V_6 \rho_{нас} \psi}{G_{cp}}. \quad (67)$$

Выбирают угол наклона сушильного барабана  $\gamma_6$  согласно стандарту от 0,0175 до 0,07 рад (1...4°) и рассчитывают частоту вращения барабана  $n_6$  или угловую скорость  $\omega_6$ , необходимую для перемещения заданного количества материала по длине  $L_6$  барабана за время сушки  $\tau$ :

$$n_6 = \frac{a_1 a_2 L_6}{\gamma_6 D_6 \tau}, \quad (68)$$

где  $a_1$  – коэффициент, зависящий от типа насадки (для подъемно-лопастной 0,7, для секторной 1,0);  $a_2$  – коэффициент, зависящий от плотности высушиваемого материала и направления движения газов и материала (прил. 13);  $\gamma_6$  – угол наклона барабана, рад.

Потребную мощность  $N_6$  на вращение барабана приближенно определяют по формуле:

$$N_6 = 78 \sigma \rho_{нас} n_6^3 D_6^3 L_6, \quad (69)$$

где  $\sigma$  – коэффициент мощности (прил. 12).

Для подъемно-лопастной насадки коэффициент мощности можно вычислить по формуле:

$$\sigma = 0,22\psi + 0,016. \quad (70)$$

Массу металла барабанной сушилки  $G_6$  допускается определять ориентировочно в зависимости от ее рабочего объема  $V_p$ :

$$G_6 = 7200 + 630V_p. \quad (71)$$

#### 4.13. Расчет параметров сушилки "кипящего" слоя

По среднему диаметру  $d_t$  частиц, характеристикам физических свойств влажного газа (воздуха) при средней температуре  $t_{cp}$  (вязкость  $\mu$ , плотность  $\rho$ ) и плотности  $\rho_t$  материала вычисляют критерий Архимеда:

$$Ar = \frac{d_t^3 \rho \cdot g}{\mu^2} \quad (72)$$

Как правило, в расчетах можно принимать, что средняя температура сушильного агрегата равна его температуре на выходе из слоя.

Принимая величину порозности  $\varepsilon$  псевдооживленного слоя в интервале 0,55...0,75 (предпочтительное значение  $\varepsilon = 0,7 \dots 0,75$ ), определяют критерий Рейнольдса по уравнению:

$$Re_0 = \frac{Ar \cdot \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,6 \sqrt{Ar \cdot \varepsilon^{4,75}}}, \quad (73)$$

и учитывая, что

$$Re_0 = \frac{\rho v_0 d_t}{\mu}, \quad (74)$$

находят фиктивную (отнесенную к полному сечению) скорость  $v_0$  оживающего газа.

При сушке материала, близкого по составу к монодисперсному, определяют также критическую скорость псевдооживления  $v_{nc}$  при  $\varepsilon = 0,4$  и число псевдооживления

$$K_v = \frac{v_0}{v_{nc}}. \quad (75)$$

По расходу сухого газа через сушилку и скорости  $v_0$  находят расчетную площадь  $S_{nc}$  псевдооживленного слоя

$$S_{nc} = \frac{L + X_2}{\rho_2 v_0}, \quad (76)$$

где  $X_2$  и  $\rho_2$  – влагосодержание и плотность сушильного агента на выходе из слоя.

Рассчитав  $S_{nc}$ , находят диаметр  $D_{nc}$  сушилки (для аппарата круглой формы):

$$D_{nc} = \sqrt{\frac{4}{\pi} S_{nc}}. \quad (77)$$

Диаметр  $D_{nc}$  сушилки округляют до стандартного по ГОСТ 9931-79 (прил. 15), после чего уточняют величину фиктивной скорости  $v_0$  газа в псевдооживленном слое, величину порозности  $\varepsilon$  слоя и расчетную площадь  $S_{nc}$  слоя.

Площадь  $S_p$  распределительной решетки примерно равна расчетной площади  $S_{nc}$  псевдооживленного слоя.

Живое сечение распределительной решетки находят по формуле:

$$S_0 = \varphi_p S_p, \quad (78)$$

где  $\varphi_p$  – доля живого сечения решетки. При сушке мелкого материала  $\varphi_p$  обычно находится в диапазоне от 0,02 до 0,1. С увеличением среднего размера частиц до 5 мм, доля живого сечения  $\varphi_p$  возрастает до 0,3.

При большом свободном сечении решетки и малом сопротивлении распределения потока по сечению решетки будет неравномерным. Для удовлетворительного распределения газового потока следует соблюдать определенное соотношение между сопротивлениями слоя и решетки. Минимально допустимое гидравлическое сопротивление решетки может быть вычислено по формуле:

$$\Delta P_{\min} = \Delta P_{\text{сл}} \frac{K_v^2}{K_v^2 - 1} \cdot \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon}, \quad (79)$$

где  $\Delta P_{\text{сл}}$  – сопротивление кипящего слоя,  $K_v$  – число псевдооживления;  $\varepsilon_0$  – порозность неподвижного слоя.

Перепад давления в псевдооживленном слое находят из условия равенства силы гидравлического сопротивления слоя весу всех его частиц:

$$\Delta P_{\text{сл}} = (\rho_s - \rho_g) g H_{\text{сл}}, \quad (80)$$

где  $H_{\text{сл}}$  – высота кипящего слоя.

Доля живого сечения распределительной решетки должна быть подобрана так, чтобы сопротивление  $\Delta P_p$  было примерно равным минимально-му допустимому  $\Delta P_{\min}$ .

Сопротивление распределительной решетки аппарата с кипящим слоем рассчитывают по формуле:

$$\Delta P_p = \zeta_p \rho_g \frac{v_p^2}{2}, \quad (81)$$

где  $\zeta_p$  – коэффициент гидравлического сопротивления решетки:

$$\zeta_p = \frac{(1 - \varphi_p^2)}{c^2}. \quad (82)$$

Коэффициент  $c$ , входящий в последнюю формулу, зависит от соотношения диаметра отверстия  $d_0$  и толщины решетки  $\delta$ . При изменении  $d_0/\delta$  от 0,25 до 0,5, т.е. в диапазоне, характерном для распределительных решеток, коэффициент  $c$  возрастает приблизительно от 0,5 до 0,7.

Таким образом, чтобы найти долю живого сечения  $\varphi_p$ , следует сначала рассчитать  $S_p$  и  $S_0$  и затем, приняв  $\Delta P_p$  равным  $\Delta P_{\min}$ , определить скорость газа  $v_p$  в отверстиях распределительной решетки из формулы (81). Площадь живого сечения решетки  $S_0$ , соответствующую этой скорости, рассчитывают по уравнению:



$$S_0 = \frac{L(\rho_1 + X_1)}{\rho_1 v_p}, \quad (83)$$

где  $\rho_1$  – плотность влажного газа (воздуха) при начальной температуре сушки  $t_1$  и влагосодержании  $X_1$ .

Из соотношения (88) можно определить величину  $\varphi_p$ .

При сушке кристаллических материалов высоту  $H_{\text{пс}}$  кипящего слоя выбирают обычно не менее 250...300 мм, чтобы предотвратить каналообразование, и не более 400...500 мм, так как от высоты слоя непосредственно зависит перепад давления в нем и, следовательно, расход электроэнергии на сушку материала.

Диаметр отверстий  $d_0 \approx 0,0125 H_{\text{пс}}$ .

Рассчитанную величину  $d_0$  округляют до одного из значений ряда нормальных линейных размеров, установленных ГОСТ 6636-69: 2,0 мм; 2,2 мм; 2,5 мм; 2,8 мм; 3,2 мм; 3,6 мм; 4,0 мм; 4,5 мм; 5,0 мм; 5,6 мм.

Число отверстий в решетке определяют по уравнению:

$$n_0 = \frac{4S_0}{\pi d_0^2}. \quad (84)$$

Высота сепарационного пространства сушилки обычно в 4...6 раз больше высоты псевдоожиженного слоя. Диаметр газоотводящего патрубка  $d_{\text{от}}$  сушильного аппарата выбирают по величине скорости газа в нем ( $v_{\text{от}} = 10...15$  м/с).

При площади кипящего слоя  $S_{\text{пс}}$ , высоты  $H_{\text{пс}}$  и порозности  $\varepsilon$  определяют заполнение сушилки материалом  $G_{\text{м}}$  и среднее время  $\tau$  сушки материала:

$$G_{\text{м}} = \rho_{\text{т}}(\rho_1 - \varepsilon) S_{\text{пс}} H_{\text{пс}}; \quad (85)$$

$$\tau = \frac{G_{\text{м}}}{0,5(G_1 + G_2)}. \quad (86)$$

#### 4.14. Расчет параметров пневматической трубы-сушилки

Поперечное сечение трубы-сушилки рассчитывается по скорости движения и секунднему расходу сушильного агента

$$S = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{V_t}{v_t}, \text{ м}^2. \quad (87)$$

Отсюда внутренний диаметр трубы-сушилки

$$D = 113 \sqrt{\frac{V_t}{v_t}}, \text{ м}, \quad (88)$$

где  $V_t$  – действительный расход сушильного агента при  $t$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $v_t$  – действительная скорость движения газов в трубе-сушилке,  $\text{м}/\text{с}$ .

Действительная скорость сушильного агента должна незначительно (на 10...20%) превышать скорость витания наиболее крупных частиц материала, чтобы не создавать чрезмерно большие аэродинамические сопротивления, перерасход электроэнергии, а также ненужное увеличение трубы-сушилki.

Для частиц шаровой формы скорость витания (критическая скорость) определяется по формуле:

$$v_{\text{вит}} = \frac{3,62}{\sqrt{\xi}} \sqrt{\frac{d\rho_{\text{м}}}{\rho_{\text{с.а}}}}, \text{ м}/\text{с}. \quad (89)$$

При  $\text{Re} > 1000$ ,  $\xi = 0,28 \dots 0,32$ .

Тогда

$$v_{\text{вит}} = (6,4 \dots 6,85) \sqrt{\frac{d\rho_{\text{м}}}{\rho_{\text{с.а}}}}, \text{ м}/\text{с}, \quad (90)$$

где  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $d$  – диаметр частиц,  $\text{м}$ ;  $\rho_{\text{м}}$ ,  $\rho_{\text{с.а}}$  – плотность материала и сушильного агента соответственно,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Для частиц неправильной произвольной формы  $\xi = 0,48$ . Тогда действительная скорость движения газов  $v_t$ , увеличенная на 10% по отношению к скорости витания  $v_{\text{вит}}$ , будет равна

$$v_t = 5,7 \sqrt{\frac{d\rho_{\text{м}}}{\rho_{\text{с.а}}}}, \text{ м}/\text{с} \quad (91)$$

Как видно из формул (89, 90), скорость витания  $v_{\text{вит}}$  зависит от плотности сушильного агента  $\rho_{\text{с.а.}}$ , которая меняется с изменением состава газа, температуры и давления.

Фактическая продолжительность сушки в трубе зависит от длины трубы  $L_T$  и скорости витания  $v_{\text{вит}}$ . При равномерном движении:

$$\tau = \frac{L_T}{v_{\text{с.а}} - v_{\text{вит}}}, \text{ ч}. \quad (92)$$

На продолжительность сушки влияет концентрация материала в газовом потоке:

$$C = \frac{G_M}{G_T}, \text{ кг/кг} \quad (93)$$

В отличие от простого пневмотранспорта (концентрация частиц 5...15 кг/кг) для пневмосушилки требуется небольшая концентрация материала (0,3...3 кг/кг). Она зависит также от степени подсушки материала, влажности и температуры сушильного агента.

#### 4.15. Расчет распылительной сушилки

Упрощенный расчет распылительной сушилки с дисковым распылением, включающий определение расхода теплоты  $Q$  и сушильного агента  $L$ , производится аналитически или графоаналитически.

При определении напряженности сушилки по влаге (удельная объемная производительность по испаряемой влаге) используют эмпирическое соотношение полученное в НИИХиммаш:

при дисковом распылении

$$A_v = 0,114 \left[ \left( \frac{t_1 + t_2}{2} - t_{M2} \right) - 50 \right], \quad (94)$$

при форсуночном распылении:

$$A_v = 0,0625 \left[ \left( \frac{t_1 + t_2}{2} - t_{M2} \right) - 50 \right]. \quad (95)$$

Для определения температуры мокрого термометра  $t_m$  используют  $I-X$  диаграмму или эмпирическую зависимость.

Рассчитав или выбрав по рекомендациям  $A_v$  можно определить рабочий объем камеры:

$$V_K = \frac{W}{A_v}.$$

По объему камеры из ГОСТ 18906-80 (прил. 16) определяем типоразмер сушильной камеры и ее диаметр:

$$H_K = \frac{4 \cdot V_K}{\pi \cdot D_K^2}. \quad (96)$$

Диаметр камеры  $D_K$  выбирают в зависимости от вида распылителя, так, чтобы факел распыляемых частиц не касался стенок камеры, что предотвращает налипание.

Для устранения налипания порошка на стенки и потолок сушильной камеры *при фонтанном распылении* (подачи суспензии снизу вверх) необходимо, чтобы расстояние между уровнем установки форсунки и по-

толком камеры, а также диаметр камеры были больше, чем высота ( $H_{99}$ ) и диаметра ( $2R_{99}$ ) факела распыленной суспензии.

Радиус факела распыла определяют по формуле

$$R_{99} = 3 \frac{P^{0,243}}{\mu^{1,1}} \cdot \rho^{0,78} \cdot d_{3,2}^{1,23} \cdot \mu^{0,3}, \quad (97)$$

Высота факела распыла

$$H_{99} = 13,05 \frac{P^{0,57}}{\rho^{1,17}} \cdot d_{3,2}^{1,23} \cdot \mu^{0,3}, \quad (98)$$

где  $d_{3,2}$  – средний объемно-поверхностный диаметр частиц;  $\rho$  – плотность распыляемой суспензии;  $\mu$  – коэффициент расхода форсунки;  $P$  – давление распыления.

При заданных параметрах суспензии, коэффициента расхода, и диаметра сопла необходимый гранулометрический состав будет обеспечен при давлении распыления, ат

$$P = 52,5 \frac{\mu^{1,33} \cdot d_c^{1,37}}{W_0^{1,63} \cdot d_{3,2}^{2,86}}, \quad (99)$$

где  $d_c$  – диаметр сопла форсунки,  $d_c = 2,1; 2,7; 3,7; 4,7$  мм.

Производительность форсунки

$$G_1^\phi = 39,7 \cdot \mu \cdot d_c^2 \cdot P^{0,5} \cdot \rho^{0,5} \quad (100)$$

Необходимое количество форсунок определяется, исходя из производительности сушилки по влажному материалу  $G_1$

$$n = \frac{G_1}{G_1^\phi} \quad (101)$$

Для выбранной форсунки находим высоту ( $H_{99}$ ) и диаметр ( $2R_{99}$ ) факела распыла суспензии.

Суммарный объем факела при использовании нескольких форсунок:

$$\sum_1^n (V_{99})_i = 0,785 \left[ \pi R_{99}^2 + \Delta D \right] (H_{99})_i, \quad (102)$$

где  $\Delta D$  – максимальное расстояние между крайними форсунками,  $\Delta D = 2m$  [2].

Удельный влагосъем  $q$ ,  $\frac{\kappa_2}{m^3 \cdot q}$  в объеме факела распыла суспензии определяется по формуле

$$q = \left( \frac{\omega_n - \omega_k}{100 - \omega_k} \right) \sum V_{99} \quad (103)$$

Если общее удельное количество испаряемой в сушилке влаги со-

ответствует необходимым нормам, то принимаем к установке расчетное количество форсунок с выбранным ранее диаметром сопла  $d_c$ .

Согласно полученным размерам факела распыляемой суспензии по ГОСТ 18906-80 принимаем к установке распылительную сушилку с соответствующими параметрами (прил. 16 )

При форсуночном распылении рекомендуется принимать следующие отношения высоты и диаметра камеры

$$\frac{H_k}{D_k} = 1,5 \dots 2,5 \quad (104)$$

Меньшие отношения берутся, при больших производительностях и размерах с низкой начальной влажностью.

При дисковом распылении

$$\frac{H_k}{D_k} = 0,75 \dots 1, \quad \text{т.е.} \quad D_k = \sqrt[3]{(1,25 \dots 1,7)V_k} \quad (105)$$

## 5. РАСЧЕТ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

### 5.1. Расчет футеровки и тепловой изоляции

После того, как определены основные размеры сушильного аппарата, по рекомендациям подбирают толщину футеровки или тепловой изоляции.

Затем рассчитывают потери теплоты через поверхность сушилки.

Тепловой поток  $Q_{\text{п}}$  через поверхность  $S_{\text{ст}}$  стенок сушилки вычисляют по уравнению теплопередачи:

$$Q_{\text{п}} = K \Delta t_{\text{ср}} S_{\text{ст}}. \quad (106)$$

Коэффициент теплопередачи  $K$  рассчитывают по формуле для многослойной плоской стенки:

$$K = \frac{1}{\left( \frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)}, \quad (107)$$

где  $\delta$  и  $\lambda$  – соответственно толщина и коэффициент теплопроводности различных слоев футеровки и различных слоёв теплоизоляции.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1$  от сушильного агрегата к внутренней поверхности стенки находят с помощью критериальных уравнений:

$$\text{Nu} = 0,66 \text{Re}^{0,5} \text{Pr}^{0,33}; \quad \text{при} \quad \text{Re} < 5 \cdot 10^5 \quad (108)$$

или

$$\text{Nu} = 0,037 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,43}; \quad \text{при} \quad \text{Re} > 5 \cdot 10^5, \quad (109)$$

Определяющим линейным размером в критериях  $\text{Nu}$  и  $\text{Re}$  в данном случае служит длина стенки  $l$  в направлении витания потока газа.

Суммарный коэффициент теплоотдачи конвекцией и излучением от наружной поверхности стенки к окружающему воздуху при установке сушилки в помещении можно определить по эмпирическому уравнению:

$$\alpha_2 = 9,74 + 0,07(t_{\text{ст}} - t_{\text{в}}), \quad (110)$$

где  $t_{\text{ст}}$  – температура наружной поверхности стенки;  $t_{\text{в}}$  – температура окружающего воздуха ( $t_{\text{в}} \approx 20^\circ \text{C}$ ).

Температура наружной поверхности стенки сушильного аппарата должна быть не выше  $40 \dots 50^\circ \text{C}$ . По этому условию выбирают толщину футеровки и теплоизоляции. Ориентировочные значения толщины футеровки, располагаемой внутри металлического корпуса, даны в прил. 14. Снаружи корпус сушильного аппарата или газохода может быть снабжен

дополнительным слоем теплоизоляции толщиной 60...100 мм. Удельную потерю теплоты в окружающую среду определяют по формуле:

$$q_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{п}}}{W}, \quad (111)$$

где  $W$  – масса влаги, удаляемая из высушиваемого материала за 1 с.

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  теплоизоляционных материалов имеет следующие значения, Вт/(м·°C): для огнеупорного кирпича (шамот) 1,05; для теплоизоляционного кирпича (диатомит) 0,15; для шлаковой ваты 0,075.

Если  $q_{\text{п}}$  не превышает  $q_{\text{п}}$ , принятую в теплотехническом расчете, значит толщина футеровки и тепловой изоляции выбрана верно.

## 5.2. Расчет калорифера при сушке воздухом

Поверхность теплообмена  $S_{\text{т}}$  калорифера определяется по уравнению теплопередачи:

$$S_{\text{т}} = \frac{Q_0}{k\Delta t_{\text{ср}}}. \quad (112)$$

Общее количество теплоты  $Q_0$ , которое получает воздух в калорифере за 1 с, рассчитывают по формуле (46).

Средний температурный напор вычисляют по формуле

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\text{г}} - \Delta t_{\text{м}}}{\lg\left(\frac{\Delta t_{\text{г}}}{\Delta t_{\text{м}}}\right)}. \quad (113)$$

При этом температурные напоры  $\Delta t_{\text{г}}$  и  $\Delta t_{\text{м}}$  на концах теплообменника рассчитывают как разность температуры греющего пара  $t_1$  (равной температуре насыщения пара при заданном давлении) и температуры воздуха на входе в калорифер  $t_{2\text{н}}$  или на выходе из него  $t_{2\text{к}}$ :

$$\Delta t_{\text{г}} = t_1 - t_{2\text{н}}; \quad \Delta t_{\text{м}} = t_1 - t_{2\text{к}}.$$

Коэффициент теплопередачи  $K$  для пластинчатых калориферов при обогреве паром вычисляют по эмпирической формуле:

$$K = 14,1(\rho v)^{0,366}. \quad (114)$$

Рекомендуемая скорость воздуха  $\rho v = 7...10$  кг/(м<sup>2</sup>·с). Для орбренных калориферов (рис. 35) значение коэффициента теплопередачи в зависимости от массовой скорости воздуха  $\rho v$  приведены в прил. 18.

Секции калорифера устанавливают параллельно по ходу воздуха так,

чтобы получить в них рекомендуемую скорость воздуха, и последовательно по ходу воздуха для набора необходимой поверхности теплообмена.

Находят необходимое число  $n_k$  секций калорифера, установленных последовательно:

$$n_k = \frac{S_r}{S_c}. \quad (115)$$

Размеры и поверхность теплообмена  $S_c$  одной секции пластинчатых калориферов принимают по ГОСТ 7201-70, секции оребренных калориферов – по прил. 17. Фактическое число секций выбирают с 15...20%-м запасом по сравнению с расчетным.

Для определения числа  $n_b$  секций калорифера, установленных параллельно, рассчитывают среднюю массовую скорость воздуха в калорифере:

$$\rho v = \frac{L}{S}, \quad (116)$$

где  $L$  – расход абсолютно сухого воздуха;  $S$  – площадь живого сечения секций, включенных параллельно по ходу воздуха.

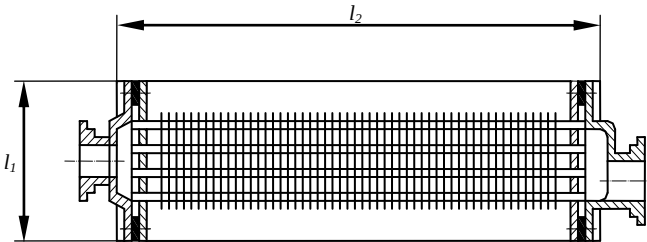


Рис. 35. Секция оребренного калорифера

Если фактическая скорость воздуха  $\rho v$  значительно отличается от ранее принятой  $\rho v_{пр}$ , то число секций калорифера, установленных параллельно,

$$n_b = \frac{\rho v}{\rho v_{пр}}. \quad (117)$$

Потерю давления при проходе воздуха через секцию калорифера можно определить по следующим формулам:

в пластинчатом калорифере большой модели

$$\Delta p = 2,75(\rho v)^{1,7}; \quad (118)$$

в оребренном калорифере большой модели



$$\Delta p = 4,4(\rho v)^{1,85}. \quad (119)$$

Сопротивление секций средней модели в 1,2 раза меньше, чем большой.

Сопротивление оребренных калориферов приведено в прил.19.

### 5.3. Расчет топки

Объем топки  $V_T$  рассчитывают по рекомендуемой величине теплового напряжения объема  $q_v$ :  
при сжигании мазута

$$V_T = \frac{Q_H^p B_T}{q_v}; \quad (120)$$

при сжигании природного газа

$$V_T = \frac{Q_H^c B_T}{q_v}; \quad (121)$$

Рекомендуемые значения теплового напряжения объема  $q_v$  составляют для камерных топок  $100 \dots 300 \text{ кВт/м}^3$ , для циклонных топок –  $2000 \dots 5000 \text{ кВт/м}^3$ . При сжигании мазута принимают меньшие из указанных значений  $q_v$ .

Соотношение длины  $L_T$  в диаметре  $D_T$  следует выдерживать в следующих пределах: для камерных топок –  $1,5 \dots 3$ ; для циклонных –  $1 \dots 1,5$ .

При сжигании мазута длина камерной топki должна быть не менее 6 м для обеспечения полного сгорания топлива.

### 5.4. Расчет питателей и затворов

Диаметр лопастного или шнекового питателя (рис. 31, з, д) вычисляют по формуле:

$$D = \sqrt{\frac{4G}{\pi n \psi \rho_n L}}, \quad (122)$$

где  $G$  – расход влажного материала через питатель;  $\psi$  – доля объема питателя, заполненного материалом ( $\psi = 0,5 \dots 0,8$ );  $n$  – частота вращения питателя;  $\rho_n$  – насыпная плотность материала;  $L$  – расчетная длина питателя (для лопастного питателя  $L \approx (1 \dots 1,2)D$ ; для шнекового питателя длину принимают равной шагу винта шнека, т.е. длина шнека, соответствующая одному обороту винта на  $360^\circ$ ).

Вычисленное значение  $D$  округляют или приводят в соответствие с сортаментом труб (для шнекового питателя).

Производительность тарельчатого питателя (рис. 31, в) зависит от частоты вращения  $n_r$  тарелки и объема материала, сбрасываемого с нее за один оборот. Производительность питателя рассчитывают по формуле:

$$G = \pi n_r \rho_{\text{нас}} \left[ \frac{h}{3} (R^2 + r^2 + R \cdot r) - r^2 h \right], \quad (123)$$

где  $h$  – высота кольцевого слоя материала, сбрасываемого с тарелки ножом;  $R$  – наружный радиус тарелки;  $r$  – радиус установки внутренней кромки ножа.

Высоту  $h$  определяют по углу  $\gamma_m$  естественного откоса материала ( $\gamma_m \approx 30 \dots 50^\circ$ ):

$$h = (R - r) \operatorname{tg} \gamma_m. \quad (124)$$

Частоту вращения тарелки ограничивают, так как центробежная сила не должна превышать силу трения материала о тарелку. Из этого условия следует, что:

$$n_r < \frac{0,275}{\sqrt{R}}. \quad (125)$$

Внутренний диаметр входного патрубка клапана-мигалки (рис. 31, а, б) определяют по формуле:

$$D = \sqrt{\frac{4G}{\pi G_{\text{уд}}}}, \quad (126)$$

где  $G$  – расход материала через мигалку;  $G_{\text{уд}}$  – удельная производительность мигалки (рекомендуется принимать  $15 \dots 80 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ ).

Расчетный диаметр патрубка мигалки следует округлить до одного из следующих значений:

$D = 25, 70, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 \text{ мм}$ .

Рекомендуется, применять конусную мигалку (рис. 31, б), обеспечивающую меньшие присосы воздуха, чем плоская мигалка.

### 5.5. Выбор и расчет пылеуловителей

Объемный расход газов  $V_r$  в системе пылеулавливания (без учета присосов воздуха) определяют по массовому расходу и параметрам сушильного газа на выходе из сушилки:

$$V_r = \frac{L(1 + X_2)}{\rho_{\text{в.г}}}. \quad (127)$$

Плотность влажного газа  $\rho_{\text{в.г}}$  равна сумме плотностей абсолютно сухого газа  $\rho_{\text{с.г}}$  и пара  $\rho_{\text{п}}$ , взятых при парциальных давлениях и влагосодер-

жании  $X_2$  :

$$\rho_{в.г} = \rho_{с.г} (1 + X). \quad (128)$$

Парциальное давление абсолютно сухого газа  $p_{с.г}$  вычисляют как разность между общим давлением смеси  $P$  и парциальным давлением пара  $p_n$ :

$$P_{с.г} = P - p_n. \quad (129)$$

Парциальное давление пара  $p_n$  можно найти по диаграмме  $I-X$  в зависимости от величины влагосодержания  $X$ . При этом общее давление  $p$  влажного газа следует принимать равным 99,4 кПа (745 мм рт. ст.), т.е. давлению, для которого построена диаграмма.

Плотность сухого газа при давлении  $p_{с.г}$  и температуре  $t$  определяют по формуле:

$$\rho_{с.г} = \rho_0 \frac{p_{с.г} T_0}{p_0 T}, \quad (130)$$

где  $\rho_0$  – плотность газа при нормальных условиях (для абсолютно сухого воздуха  $\rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3$ );  $p_0$  – давление, соответствующее нормальным условиям ( $p_0 = 101,3 \text{ кПа}$ );  $T_0$  – температура, соответствующая нормальным условиям ( $T_0 = 273,15 \text{ К}$ );  $T$  – температура влажного газа, измеренная по абсолютной (термодинамической) шкале:

$$T = 273,15 + t.$$

Рекомендуемый расход газов  $q_n$  через одиночный циклон НИИОГАЗ (рис. 26) или один элемент батарейного циклона НИИОГАЗ (рис. 28) диаметром  $D_n$  определяют из условия:

$$\frac{\Delta P_n}{\rho_r} = (550 \dots 750) \left[ \frac{\text{Па}}{\text{кг/м}^3} \right], \quad (131)$$

где  $\Delta P_n$  – гидравлическое сопротивление циклона;  $\rho_r$  – плотность газа.

В этом случае:

$$q_n = (26 \dots 30) \frac{D_n^2}{\sqrt{\zeta_n}}, \quad (132)$$

где  $\zeta_n$  – коэффициент гидравлического сопротивления циклона (прил. 21), определяемый по условной скорости газа в цилиндрической части циклона.

Число циклонов или элементов в батарейном циклоне должно соответствовать рекомендациям каталогов:

$$n \approx \frac{V_r}{q_{\text{ц}}} \quad (133)$$

Для выбора рукавного фильтра определяют расчетную площадь фильтрования:

$$S = \frac{V_r}{v_{\text{ф}}} \quad (134)$$

где  $V_r$  – объемный расход газов через систему пылеулавливания;  $v_{\text{ф}}$  – фиктивная скорость газа в фильтровальной ткани, т.е. расход газа, приходящийся на  $1 \text{ м}^2$  ткани (прил. 23).

Фактическая поверхность рукавного фильтра должна на 15...20% превышать расчетную для очистки продувочного воздуха и воздуха, подсосанного через неплотности.

Рассчитав по формуле (134) площадь поверхности фильтрования, подбирают соответствующий типоразмер рукавного фильтра (прил. 22).

Электрофильтр, также как и рукавный фильтр, подбирают по рассчитанной площади активного сечения, определяемой по формуле (144). Габаритные размеры электрофильтров приведены в прил. 24.

### 5.6. Расчет гидравлического сопротивления сушильной установки

Потерю давления на трение  $\Delta P_{\text{тр}}$  и на преодоление местных сопротивлений  $\Delta P_{\text{м}}$  на отдельных участках газового (воздушного) тракта рассчитывают по уравнениям:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{d_s} \cdot \frac{\rho v^2}{2}, \quad (135)$$

$$\Delta P_{\text{м}} = \frac{\sum \zeta_{\text{м}} \rho v^2}{2}, \quad (136)$$

где  $\lambda$  – коэффициент трения;  $l$  и  $d_s$  – соответственно длина и эквивалентный диаметр расчетного участка тракта;  $\rho$  и  $v$  – соответственно плотность и средняя скорость газа на этом участке;  $\sum \zeta_{\text{м}}$  – сумма коэффициентов местных сопротивлений на расчетном участке тракта.

Так как доля сопротивления трению в общей потере давления невелика, величину коэффициента трения  $\lambda$  обычно принимают постоянной и независимой от величины критерия Рейнольдса. Для отдельных не футерованных газозухопроводов  $\lambda \approx 0,02$ , для кирпичных или бетонных каналов  $\lambda \approx 0,03$  при  $d_s \geq 0,9 \text{ м}$  и  $\lambda \approx 0,04$  при  $d_s < 0,9 \text{ м}$ . Эквивалентный диаметр  $d_s$  вычисляют по формуле:

$$d_s = \frac{4S}{\Pi}, \quad (137)$$

где  $S$  – площадь живого сечения;  $\Pi$  – смоченный периметр канала.

Для газовоздухопроводов круглого сечения эквивалентный диаметр  $d_s$  равен диаметру канала.

Коэффициенты местных сопротивлений (выхода, входа, сужений, расширений, разветвлений, поворотов и др.) приведены в прил. 25.

Гидравлическое сопротивление при проходе газа через сушильный барабан определяют по опытным данным. При отсутствии данных его можно принять равным 100...200 Па.

Сопротивление кипящего слоя и распределительной решетки рассчитывают по уравнениям (90) и (91).

Потерю давления в одной секции калорифера определяют в зависимости от массовой скорости  $w$  в наиболее узком живом сечении теплообменной части аппарата (прил. 19). При последовательном соединении нескольких секций по воздушному тракту их сопротивления суммируют.

Общее гидравлическое сопротивление горелок и топки обычно имеет величину в пределах 500...1000 Па. Потерю давления в горелке можно рассчитать по формуле (146), приняв что  $v$  – скорость воздуха в выходном сечении горелки, а коэффициент сопротивления  $\zeta_{гор} = 1,2...2,5$ .

Гидравлическое сопротивление циклонных пылеуловителей определяют из условий (фиктивной) скорости  $v_{ц}$  в цилиндрической части циклона. Значение коэффициентов сопротивления циклонных аппаратов приведены в прил. 21.

Условную скорость газа  $v_{ц}$  рассчитаем по формуле:

$$v_{ц} = \frac{4V_r}{\pi D_{ц}^2 n_{ц}}, \quad (138)$$

где  $V_r$  – общий расход газов в системе пылеулавливания;  $D_{ц}$  – внутренний диаметр цилиндрической части циклона или элемента в батарейном циклоне;  $n_{ц}$  – число параллельного включенных циклонов.

При групповом расположении циклонов сопротивление пылеуловителя вместе с коллекторами приблизительно на 10% превышает величину гидравлического сопротивления одиночного циклона.

Сопротивление рукавных фильтров зависит в основном от количества пыли, осевшей на ткани. При регулярной её очистке (встряхиванием и обратной продувкой) потеря давления составляет от 1000 до 1500 Па при средней скорости фильтрования 0,01...0,02 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с).

Гидравлическое сопротивление электрофильтров при максимальной скорости газа  $v_r = 1,5$  м/с обычно не превышает 150...200 Па.

Общее сопротивление тракта, находящегося под давлением, определяют, суммируя потери давления на всех его участках и аппаратах:

$$\Delta P_{\text{дав}} = \Delta P_{\text{в}} + \Delta P_{\text{т}} + \Delta P_{\text{р}} + \Delta P_{\text{сл}} - \Delta P_{\text{об}} - \Delta P_{\text{стр}}, \quad (139)$$

где  $\Delta P_{\text{в}}$  – сопротивление воздушного тракта до топki или калорифера;  $\Delta P_{\text{т}}$  – сопротивление горелки и топki или калорифера;  $\Delta P_{\text{р}}$  – сопротивление распределительной решетки и сушилки с кипящим слоем;  $\Delta P_{\text{сл}}$  – сопротивление псевдоожиженного слоя материала;  $\Delta P_{\text{об}}$  – минимальное разрежение, которое обычно поддерживается в рабочем объеме сушилки ( $\Delta P_{\text{об}} \approx 10$  Па);  $\Delta P_{\text{стр}}$  – динамическое давление струй газа (воздуха), выходящего из отверстий распределительной решетки:

$$\Delta P_{\text{стр}} = \frac{\rho_1 v_{\text{р}}^2}{2} = \frac{\Delta P_{\text{р}}}{\zeta_{\text{р}}}. \quad (140)$$

Общее сопротивление тракта, находящегося под разрежением, рассчитывают, суммируя потери давления в сушильном аппарате, в пылеуловителях и в соединительных газовоздухопроводах:

$$\Delta P_{\text{раз}} = \Delta P_{\text{об}} + \Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{ц}} + \Delta P_{\text{пл}} + \Delta P_{\text{г}}, \quad (141)$$

где  $\Delta P_{\text{с}}$  – сопротивление сушильного аппарата;  $\Delta P_{\text{ц}}$  – сопротивление циклонных аппаратов;  $\Delta P_{\text{пл}}$  – сопротивление других пылеуловителей (электрофильтров или рукавных фильтров);  $\Delta P_{\text{г}}$  – сопротивление соединительных газовоздухопроводов.

Для туннельных сушилок в общее сопротивление входит сопротивление садки  $\Delta P_{\text{сад}}$

$$\Delta P_{\text{сад}} = \zeta_{\text{сад}} \frac{v_0^2}{2} \rho_0 (1 + \beta t), [\text{Па}] \quad (142)$$

где  $\zeta_{\text{сад}}$  – коэффициент сопротивления садки;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения сушильного агента;  $v$  – скорость сушильного агента;  $t$  – температура сушильного агента.

Коэффициент сопротивления садки определяется по формуле:

$$\zeta_{\text{сад}} = (0,4 \dots 0,5)L, \quad (143)$$

где  $L$  – длина туннеля.

## 5.7. Выбор вентиляторов (дымососов)

Вентиляторы характеризуются подачей  $V_{\text{м}}$ , м<sup>3</sup>/ч и перепадом полных давлений между выходными и входными патрубками, называемыми давлением вентилятора  $p_{\text{н}}$ . Вентиляторы выбирают с некоторым запасом по подаче и давлению.

Расчетную подачу  $V'_n$  вентилятора, установленного на воздушной стороне тракта, находят по следующим формулам:  
при сушке топочными газами

$$V'_n = \beta'_1 \alpha V_0 B_T \frac{273 + t_0}{273}, \quad (144)$$

при сушке воздухом

$$V'_n = \frac{\beta'_1 L}{\rho}, \quad (145)$$

где  $\beta'_1$  – коэффициент запаса, равный 1,05;  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха;  $V_0$  – объем воздуха, теоретически необходимого для горения, м<sup>3</sup>/кг или м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $B_T$  – расход топлива;  $t_0$  – температура окружающего воздуха засасываемого вентилятором, °С;  $L$  – расход абсолютно сухого воздуха;  $\rho$  – плотность воздуха.

Расчетная подача вентилятора (дымососа), установленного на газовой стороне тракта, равна:

$$V''_n = \beta''_1 V_r, \quad (146)$$

где  $V_r$  – объемный расход газов в системе пылеулавливания;  $\beta''_1$  – коэффициент запаса, учитывающий также присосы воздуха в системе пылеулавливания  $\beta''_1 \approx 1,1 \dots 1,2$ .

Расчетное давление вентилятора определяют по уравнению:

$$p_n = \beta_2 \Delta p, \quad (147)$$

где  $\beta_2$  – коэффициент запаса, равный 1,1;  $\Delta p$  – суммарное гидравлическое сопротивление участка тракта, находящегося под давлением ( $\Delta p_{\text{давл}}$ ) или под разрежением ( $\Delta p_{\text{разр}}$ ).

Заводская характеристика вентилятора дается обычно для воздуха при температуре, отличной от расчетной, поэтому при выборе вентилятора используют величину приведенного расчетного давления  $p_n^*$ , отличающуюся от величины  $p_n$  поправочным множителем  $k_p$ , учитывающим различие плотностей газа в расчетных и заводских условиях:

$$p_n^* = k_p p_n, \quad (148)$$

$$k_p = \frac{\rho_0}{\rho_r} \cdot \frac{273}{273 + t_{\text{зав}}}, \quad (149)$$

где  $\rho_0$  – плотность воздуха при нормальных условиях;  $\rho_r$  – плотность газа (воздуха) у вентилятора (приблизительно равная плотности сушильного газа  $\rho_2$  на выходе из сушилки);  $t_{\text{зав}}$  – температура воздуха по заводской харак-

теристике машины, °С.

По заводским характеристикам подбирают вентиляторы, у которых подача  $V_n$  и давление  $p_n$  совпадает с расчетными значениями  $V_r$  и  $p_n^*$  или несколько превышает эти значения, и определяют число оборотов вентилятора и коэффициент полезного действия  $\eta_n$  при расчетной подаче  $V_n$ . Расчетное значение КПД, как правило, должно составлять не менее 90% от максимальной величины КПД, определяемой по характеристике вентилятора.

В прил. 28, 29 представлен общий вид вентиляторов среднего и высокого давления, а также приведены их характеристики. С помощью этих характеристик можно определить давление  $p_n$  и коэффициент полезного действия  $\eta_n$  вентилятора по заданной величине подачи  $V_n$  и угловой скорости рабочего колеса  $\omega_n$ . В прил. 26, 27 даны технические характеристики дутьевых вентиляторов и дымососов.

Мощность, расходуемую вентилятором (мощность на валу), рассчитывают по формуле:

$$N_n = \frac{p_n V_n}{\eta_n}. \quad (150)$$

Мощность электродвигателя находят по выражению:

$$N_{дв} = \frac{N_n}{\eta_{пер} \eta_{дв}}, \quad (151)$$

где  $\eta_{пер}$  – КПД передачи,  $\eta_{пер} \approx 0,98$ ;  $\eta_{дв}$  – КПД электродвигателя,  $\eta_{дв} \approx 0,98$ .

Установочную мощность электродвигателя определяют по формуле:

$$N_{уст} = \beta_{уст} N_{дв}, \quad (152)$$

где  $\beta_{уст}$  – коэффициент запаса (принимают равным 1,1).

На основе результатов теплотехнического расчета сушильной установки и вспомогательного оборудования студенты разрабатывают чертежи теплотехнологической схемы установки, общего вида и отдельных узлов основного агрегата.

В разделе "Заключение" пояснительной записки обобщаются результаты расчетов и дается оценка тепловой эффективности сушильной установки.



### 5.8. Задания на курсовое проектирование

Номер варианта выбирает из числа, образуемого двумя последними цифрами шифра зачетной книжки. Если это число больше 49, то из него вычитают 50 и по полученному числу находят номер варианта. Например, шифр 485068 –  $50 = 18$ .

Если последние две цифры шифра образуют число меньше 50, то по нему следует сразу выбирать номер нужного варианта.

Работа, не соответствующая заданному варианту, преподавателем не рассматривается.

#### ТЕМА 1

Выбрать рациональную теплотехнологическую схему, рассчитать и спроектировать барабанную сушилку для сушки известняка производительностью  $G_2$ , считая по высушенному материалу. Начальная влажность известняка  $\omega_1$ , конечная  $\omega_2$  (считать на общую массу).

В качестве сушильного агента используется смесь воздуха и продуктов горения топлива. Начальная температура сушильного агента  $t_1$ , конечная  $t_2$ . Топливо выбирается в зависимости от места расположения сушилки.

Исходные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

| Номер варианта | $G_2$ , т/ч | $\omega_1$ , % | $\omega_2$ , % | $t_1$ , °C | $t_2$ , °C | Район расположения сушилки |
|----------------|-------------|----------------|----------------|------------|------------|----------------------------|
| 00             | 18,0        | 13,0           | 2,5            | 1000       | 90         | Владивосток                |
| 01             | 20,0        | 14,5           | 3,4            | 980        | 95         | Днепропетровск             |
| 02             | 25,0        | 14,0           | 3,3            | 950        | 98         | Киров                      |
| 03             | 15,0        | 13,5           | 3,2            | 920        | 100        | Киев                       |
| 04             | 17,5        | 13,0           | 3,1            | 900        | 103        | Новгород                   |
| 05             | 19,0        | 12,5           | 3,0            | 870        | 105        | Одесса                     |
| 06             | 21,0        | 12,0           | 2,9            | 850        | 110        | Псков                      |
| 07             | 23,0        | 11,5           | 2,8            | 830        | 115        | Смоленск                   |
| 08             | 25,0        | 11,0           | 2,7            | 800        | 118        | Челябинск                  |
| 09             | 27,0        | 10,5           | 2,6            | 780        | 120        | Ашхабад                    |

#### ТЕМА 2

Выбрать рациональную теплотехнологическую схему, рассчитать и спроектировать сушилку "кипящего слоя" для сушки песка производи-

тельностью  $G_2$ , считая по высушенному материалу. Начальная влажность материала  $\omega_1$ , конечная  $\omega_2$ . Сушка осуществляется смесью воздуха и продуктов горения топлива с начальной температурой  $t_1$ , конечную температуру  $t_2$  принимают в соответствии с рекомендациями. Топливо выбирается в зависимости от района расположения сушилки.

Исходные данные приведены в табл. 2.

Таблица 2

| Номер варианта | $G_2$ ,<br>т/ч | $\omega_1$ ,<br>% | $\omega_2$ ,<br>% | $t_1$ ,<br>$^{\circ}\text{C}$ | Район расположения сушилки |
|----------------|----------------|-------------------|-------------------|-------------------------------|----------------------------|
| 10             | 20,0           | 8,0               | 2,3               | 650                           | Архангельск                |
| 11             | 22,5           | 10,5              | 2,5               | 700                           | Батуми                     |
| 12             | 25,0           | 9,8               | 2,7               | 800                           | Горький                    |
| 13             | 30,0           | 9,0               | 2,5               | 1100                          | Красноярск                 |
| 14             | 40,0           | 11,0              | 2,8               | 1000                          | Волгоград                  |
| 15             | 27,5           | 10,0              | 2,6               | 720                           | Керчь                      |
| 16             | 18,0           | 13,0              | 2,4               | 950                           | Брянск                     |
| 17             | 35,0           | 12,5              | 2,6               | 900                           | Омск                       |
| 18             | 32,0           | 11,5              | 2,7               | 850                           | Казань                     |
| 19             | 38,0           | 12,0              | 2,8               | 750                           | Волгоград                  |

### ТЕМА 3

Выбрать рациональную теплотехнологическую схему, рассчитать и спроектировать туннельную сушилку для сушки глиняного кирпича-сырца производительностью  $G_1$ , считая по влажному материалу. Влажность поступающего в сушилку кирпича-сырца  $\omega_1$ , выходящего из сушилки -  $\omega_2$  (считать на общую массу). Сушка производится нагретым до температуры  $t_1$  воздухом. Температура воздуха на выхода из сушилки  $t_2$ . Давление пара в калорифере  $P$  (абсолютное). Кирпич-сырец, имеет размеры 250х120х65 мм, плотность его 1300 кг/м<sup>3</sup>.

Исходные данные приведены в табл. 3

Таблица 3

| Номер варианта | $G_1$ ,<br>т/год | $\omega_1$ ,<br>% | $\omega_2$ ,<br>% | $t_1$ ,<br>$^{\circ}\text{C}$ | $t_2$ ,<br>$^{\circ}\text{C}$ | $P$ , ат | Район расположения сушилки |
|----------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------|----------------------------|
| 1              | 2                | 3                 | 4                 | 5                             | 6                             | 7        | 8                          |
| 20             | 10000            | 22,5              | 7,7               | 75                            | 35                            | 1,0      | Тамбов                     |
| 21             | 12000            | 22,0              | 7,4               | 80                            | 40                            | 1,0      | Харьков                    |

| Окончание табл. 3 |       |      |     |     |    |     |                   |
|-------------------|-------|------|-----|-----|----|-----|-------------------|
| 1                 | 2     | 3    | 4   | 5   | 6  | 7   | 8                 |
| 22                | 14000 | 21,5 | 7,1 | 85  | 36 | 1,0 | Уфа               |
| 23                | 16000 | 21,0 | 6,8 | 90  | 35 | 1,2 | Новгород          |
| 24                | 20000 | 20,0 | 6,2 | 100 | 38 | 1,5 | Кутаиси           |
| 25                | 18000 | 20,5 | 6,5 | 95  | 42 | 1,2 | Новорос-<br>сийск |
| 26                | 22000 | 19,5 | 5,9 | 105 | 45 | 1,8 | Киров             |
| 27                | 24000 | 19,0 | 5,6 | 110 | 40 | 2,0 | Керчь             |
| 28                | 26000 | 18,5 | 5,3 | 115 | 40 | 2,5 | Иркутск           |
| 29                | 28000 | 18,0 | 5,0 | 120 | 40 | 2,8 | Акмолинск         |

#### ТЕМА 4

Выбрать рациональную теплотехнологическую схему, рассчитать и спроектировать барабанную сушилку для сушки глины производительностью  $G_1$ , считая по влажному материалу. Сушка производится воздухом с начальной температурой  $t_1$ , конечной -  $t_2$ . Начальная влажность материала  $\omega_1$ , конечная  $\omega_2$  (считая на общую массу). Давление пара в калорифере Р (абсолютное).

Исходные данные представлены в табл. 4.

Таблица 4

| Номер<br>вари-<br>анта | $G_1$ ,<br>т/ч | $\omega_1$ , % | $\omega_2$ , % | $t_1$ ,<br>$^{\circ}\text{C}$ | $t_2$ ,<br>$^{\circ}\text{C}$ | Р, ат | Район рас-<br>положения<br>сушилки |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------|------------------------------------|
| 30                     | 16,0           | 12,0           | 2,7            | 110                           | 60                            | 2,0   | Брянск                             |
| 31                     | 17,0           | 11,5           | 2,9            | 115                           | 63                            | 2,5   | Вологда                            |
| 32                     | 19,0           | 11,0           | 2,1            | 120                           | 66                            | 2,8   | Белгород                           |
| 33                     | 9,5            | 10,5           | 2,9            | 125                           | 69                            | 3,2   | Казань                             |
| 34                     | 10,0           | 10,0           | 2,3            | 130                           | 72                            | 3,8   | Красно-<br>дар                     |
| 35                     | 10,5           | 9,5            | 2,5            | 135                           | 75                            | 4,2   | Курск                              |
| 36                     | 11,0           | 9,0            | 2,8            | 120                           | 78                            | 2,8   | Николаев                           |
| 37                     | 11,5           | 8,5            | 2,0            | 135                           | 82                            | 4,2   | Пермь                              |
| 38                     | 12,0           | 8,0            | 2,2            | 130                           | 80                            | 3,8   | Одесса                             |
| 39                     | 12,5           | 7,5            | 2,4            | 125                           | 70                            | 3,2   | Томск                              |

## ТЕМА 5

Выбрать рациональную теплотехнологическую схему, рассчитать и спроектировать распылительную сушилку для получения керамического пресс-порошка из глиняного шликера производительностью  $G_2$ , считая по высушенному материалу. Начальная влажность материала  $\omega_1$ , конечная  $\omega_2$ . Сушка осуществляется смесью воздуха и продуктов горения топлива с начальной температурой  $t_1$ , конечную температуру  $t_2$  принимают в соответствии с рекомендациями. Топливо выбирается в зависимости от района расположения сушилки.

Исходные данные приведены в табл. 5 .

Таблица 5

| Номер варианта | $G_2$ ,<br>т/ч | $\omega_1$ ,<br>% | $\omega_2$ ,<br>% | $t_1$ ,<br>°C | Район расположения<br>сушилки |
|----------------|----------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------------------|
| 40             | 10,0           | 42,0              | 9,3               | 650           | Пермь                         |
| 41             | 12,5           | 40,5              | 9,2               | 700           | Курск                         |
| 42             | 15,0           | 41,0              | 8,8               | 680           | Псков                         |
| 43             | 18,0           | 40,0              | 8,5               | 720           | Новгород                      |
| 44             | 20,0           | 38,0              | 8,9               | 700           | Новосибирск                   |
| 45             | 24,0           | 45,0              | 8,7               | 780           | Челябинск                     |
| 46             | 26,0           | 41,0              | 8,3               | 760           | Брянск                        |
| 47             | 28,0           | 37,5              | 8,1               | 750           | Омск                          |
| 48             | 30,0           | 43,0              | 9,1               | 800           | Мурманск                      |
| 49             | 32,0           | 39,0              | 9,0               | 830           | Екатеринбург                  |

## ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение 1

**Средняя удельная теплоемкость сухих материалов  
при температуре от 0° до 100 °С**

| Материал  | Теплоемкость<br>$C_0, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ | Материал        | Теплоемкость<br>$C_0, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ |
|-----------|--------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------|
| Асбест    | 0,816                                                        | Мел             | 0,879                                                        |
| Базальт   | 0,837                                                        | Песок кварцевый | 0,796                                                        |
| Глина     | 0,921                                                        | Уголь бурый     | 1,424                                                        |
| Глинозем  | 0,766                                                        | Уголь каменный  | 1,166                                                        |
| Доломит   | 0,930                                                        | Шлак доменный   | 0,754                                                        |
| Известняк | 0,921                                                        |                 |                                                              |

## Приложение 2

**Расчетные характеристики природного газа**

| Газопровод         | Состав газа, % по объему |                        |                        |                           |                           | Плотность сухого газа<br>(при н.у.) $\rho_t, \text{кг}/\text{м}^3$ | Теплота сгорания сухого газа, низшая<br>$Q_{н.с.}, \text{кДж}/\text{м}^3$ | Объем теоретически необходимого воздуха<br>$V^0, \text{м}^3/\text{м}^3$ |
|--------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
|                    | $\text{CH}_4$            | $\text{C}_2\text{H}_6$ | $\text{C}_3\text{H}_8$ | $\text{C}_4\text{H}_{10}$ | $\text{C}_5\text{H}_{12}$ |                                                                    |                                                                           |                                                                         |
| Саратов-Москва     | 84,5                     | 3,8                    | 1,9                    | 0,9                       | 0,3                       | 0,837                                                              | 35850                                                                     | 9,52                                                                    |
| Серпухов-Ленинград | 89,7                     | 5,2                    | 1,7                    | 0,5                       | 0,1                       | 0,799                                                              | 37500                                                                     | 10,00                                                                   |
| Дашава-Киев        | 98,9                     | 0,3                    | 0,1                    | 0,1                       | 0,0                       | 0,712                                                              | 35900                                                                     | 9,52                                                                    |
| Караганда-Ереван   | 93,9                     | 3,1                    | 1,1                    | 0,3                       | 0,1                       | 0,766                                                              | 37150                                                                     | 9,85                                                                    |
| Бухара-Урал        | 94,9                     | 3,2                    | 0,4                    | 0,1                       | 0,1                       | 0,758                                                              | 36800                                                                     | 9,73                                                                    |
| Средняя Азия-Центр | 93,8                     | 3,6                    | 0,7                    | 0,2                       | 0,4                       | 0,776                                                              | 37600                                                                     | 9,91                                                                    |

## Приложение 3

## Расчетные характеристики мазута и твердых топлив

| Вид топлива                    | Состав рабочей массы топлива, % по массе |                 |                           | Теплота сгорания низшая $Q_n^p$ , кДж/кг | Объем теоретически необходимого воздуха $V^0$ , м <sup>3</sup> /кг |
|--------------------------------|------------------------------------------|-----------------|---------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
|                                | Влажность $W^p$                          | Зольность $A^p$ | Содержание водорода $H^p$ |                                          |                                                                    |
| Мазут сернистый                | 3,0                                      | 0,1             | 11,2                      | 39800                                    | 10,45                                                              |
| Уголь каменный длиннопламенный | 14,0                                     | 25,8            | 3,4                       | 17800                                    | 4,78                                                               |
| Уголь бурый                    | 32,0                                     | 25,2            | 2,2                       | 10450                                    | 2,94                                                               |

## Приложение 4

## Свойства насыщенного водяного пара в зависимости от давления

| $P$ , ат | $t$ , °C | $V_{уд}$ , М <sup>2</sup> /кг | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | $I_{ж}$ , кДж/кг | $I_{п}$ , кДж/кг | $r$ , кДж/кг |
|----------|----------|-------------------------------|----------------------------|------------------|------------------|--------------|
| 1        | 2        | 3                             | 4                          | 5                | 6                | 7            |
| 0,01     | 6,6      | 131,60                        | 0,00760                    | 27,7             | 2506             | 2478         |
| 0,02     | 17,1     | 68,27                         | 0,01465                    | 71,6             | 2526             | 2456         |
| 0,03     | 23,7     | 46,53                         | 0,02149                    | 99,3             | 2539             | 2440         |
| 0,04     | 28,9     | 35,46                         | 0,02820                    | 119,8            | 2548             | 2429         |
| 0,05     | 32,5     | 28,73                         | 0,03481                    | 136,2            | 2556             | 2420         |
| 0,06     | 35,8     | 24,19                         | 0,04133                    | 150,0            | 2562             | 2413         |
| 0,08     | 41,1     | 18,45                         | 0,05420                    | 172,2            | 2573             | 2400         |
| 0,10     | 45,4     | 14,96                         | 0,06686                    | 190,2            | 2581             | 2390         |
| 0,15     | 53,6     | 10,22                         | 0,09789                    | 224,6            | 2596             | 2372         |
| 0,20     | 59,7     | 7,977                         | 0,1283                     | 250,1            | 2607             | 2358         |
| 0,30     | 68,7     | 5,331                         | 0,1876                     | 287,9            | 2690             | 2336         |
| 0,40     | 75,4     | 4,072                         | 0,2456                     | 315,9            | 2632             | 2320         |
| 0,50     | 80,9     | 3,304                         | 0,3027                     | 339,0            | 2642             | 2307         |
| 0,60     | 85,5     | 2,785                         | 0,3590                     | 358,2            | 2650             | 2296         |
| 0,70     | 89,3     | 2,411                         | 0,4147                     | 375,0            | 2657             | 2286         |
| 0,80     | 93,0     | 2,128                         | 0,4699                     | 389,7            | 2663             | 2278         |
| 0,90     | 96,2     | 1,906                         | 0,5246                     | 403,1            | 2668             | 2270         |
| 1,0      | 99,1     | 1,727                         | 0,5790                     | 415,2            | 2677             | 2264         |
| 1,2      | 104,2    | 1,457                         | 0,6865                     | 437,0            | 2686             | 2249         |
| 1,4      | 108,7    | 1,261                         | 0,7931                     | 456,3            | 2693             | 2237         |
| 1,6      | 112,7    | 1,113                         | 0,8980                     | 473,1            | 2703             | 2227         |

| Окончание прил. 4 |       |        |       |       |      |      |
|-------------------|-------|--------|-------|-------|------|------|
| 1                 | 2     | 3      | 4     | 5     | 6    | 7    |
| 2,0               | 119,6 | 0,903  | 1,107 | 502,4 | 2710 | 2208 |
| 3,0               | 132,9 | 0,6180 | 1,618 | 558,9 | 2730 | 2171 |
| 4,0               | 142,9 | 0,4718 | 2,120 | 601,1 | 2744 | 2141 |
| 5,0               | 151,1 | 0,3825 | 2,614 | 637,7 | 2754 | 2117 |
| 6,0               | 158,1 | 0,3222 | 3,104 | 667,9 | 2768 | 2095 |
| 7,0               | 164,2 | 0,2785 | 3,591 | 694,3 | 2769 | 2075 |
| 8,0               | 169,6 | 0,245  | 4,075 | 718,4 | 2776 | 2057 |
| 9,0               | 174,5 | 0,2195 | 4,536 | 740,0 | 2780 | 2040 |
| 10                | 179,0 | 0,1985 | 5,037 | 759,6 | 2784 | 2024 |
| 11                | 183,2 | 0,1813 | 5,516 | 778,8 | 2787 | 2009 |
| 12                | 187,1 | 0,1668 | 5,996 | 795,3 | 2790 | 1995 |
| 13                | 190,7 | 0,1545 | 6,474 | 811,2 | 2793 | 1984 |
| 14                | 194,1 | 0,1438 | 6,952 | 826,7 | 2795 | 1968 |
| 15                | 197,4 | 0,1346 | 7,431 | 840,9 | 2796 | 1956 |
| 16                | 200,4 | 0,1264 | 7,909 | 854,8 | 2798 | 1943 |
| 17                | 203,4 | 0,1192 | 8,389 | 867,7 | 2799 | 1931 |
| 18                | 206,2 | 0,1128 | 8,868 | 880,3 | 2800 | 1920 |
| 19                | 208,8 | 0,1070 | 9,349 | 892,5 | 2801 | 1909 |
| 20                | 211,4 | 0,1017 | 9,83  | 904,2 | 2802 | 1898 |

Приложение 5

**Давление насыщенного водяного пара  $P_n$   
при отрицательной температуре  $t_0$**

| Температура,<br>$t_0$ , °C | Давление,<br>$P_n$ , Па | Температура,<br>$t_0$ , °C | Давление,<br>$P_n$ , Па |
|----------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|
| 0                          | 610                     | -10                        | 259                     |
| -1                         | 562                     | -11                        | 237                     |
| -2                         | 517                     | -12                        | 217                     |
| -3                         | 476                     | -13                        | 198                     |
| -4                         | 437                     | -14                        | 181                     |
| -5                         | 401                     | -15                        | 165                     |
| -6                         | 368                     | -16                        | 150                     |
| -7                         | 337                     | -17                        | 137                     |
| -8                         | 309                     | -18                        | 125                     |
| -9                         | 283                     | -19                        | 113                     |

**Физические параметры**

| $t, ^\circ\text{C}$            | $\rho,$<br>$\text{кг/м}^3$ | $c,$<br>$\text{кДж/кг}\cdot^\circ\text{C}$ | $\nu\cdot 10^6,$<br>$\text{м}^2/\text{с}$ | $\lambda,$<br>$\text{Вт/м}^2\cdot^\circ\text{C}$ | $a,$<br>$\text{м}^2/\text{ч}$ | $\text{Pr}$ |
|--------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------|-------------|
| <b>Воды на линии насыщения</b> |                            |                                            |                                           |                                                  |                               |             |
| 0                              | 1001,7                     | 4,221                                      | 1,788                                     | 0,551                                            | 4,71                          | 1,36        |
| 20                             | 999,98                     | 4,185                                      | 1,006                                     | 0,596                                            | 5,15                          | 7,02        |
| 40                             | 994,06                     | 4,182                                      | 0,658                                     | 0,626                                            | 5,44                          | 4,34        |
| 60                             | 984,94                     | 4,187                                      | 0,478                                     | 0,65                                             | 5,59                          | 3,02        |
| 80                             | 973,57                     | 4,2                                        | 0,364                                     | 0,666                                            | 5,89                          | 2,22        |
| 100                            | 960,12                     | 4,218                                      | 0,294                                     | 0,679                                            | 6,05                          | 1,74        |
| 120                            | 944,75                     | 4,253                                      | 0,247                                     | 0,683                                            | 6,15                          | 1,446       |
| 140                            | 927,78                     | 4,286                                      | 0,214                                     | 0,682                                            | 6,21                          | 1,241       |
| 160                            | 909,21                     | 4,345                                      | 0,19                                      | 0,679                                            | 6,22                          | 1,099       |
| 180                            | 888,56                     | 4,42                                       | 0,173                                     | 0,673                                            | 6,21                          | 1,004       |
| 200                            | 866,3                      | 4508                                       | 0,16                                      | 0,662                                            | 6,14                          | 0,937       |
| 220                            | 841,97                     | 4,614                                      | 0,15                                      | 0,651                                            | 6,05                          | 0,891       |
| 240                            | 815,23                     | 4,76                                       | 0,143                                     | 0,633                                            | 5,9                           | 0,871       |
| 260                            | 785,45                     | 4,953                                      | 0,138                                     | 0,609                                            | 5,68                          | 0,874       |
| 280                            | 752,15                     | 5,212                                      | 0,135                                     | 0,579                                            | 5,33                          | 0,910       |
| 300                            | 713,89                     | 5,732                                      | 0,135                                     | 0,538                                            | 4,77                          | 1,019       |
| <b>Воздуха</b>                 |                            |                                            |                                           |                                                  |                               |             |
| 0                              | 1,254                      | 1,0056                                     | 13,72                                     | 0,0241                                           | 0,069                         | 0,712       |
| 50                             | 1,06                       | 1,0056                                     | 18,48                                     | 0,028                                            | 0,095                         | 0,701       |
| 100                            | 0,917                      | 1,0098                                     | 23,77                                     | 0,0319                                           | 0,124                         | 0,69        |
| 200                            | 0,724                      | 1,0266                                     | 25,85                                     | 0,039                                            | 0,19                          | 0,678       |
| 300                            | 0,597                      | 1,0433                                     | 49,43                                     | 0,0461                                           | 0,268                         | 0,668       |



**Теплофизические свойства дымовых газов,  
полученных при сжигании природного газа  
среднего химического состава**

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\rho, \text{кг/м}^3$ | $C_p, \text{кДж/кг}^\circ\text{C}$ | $\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/м}^2\text{}^\circ\text{C}$ | $a, \text{м}^2/\text{с}$ | $\mu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$ | $\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$ | Pr    |
|---------------------|-----------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------|
| 0                   | 1,295                 | 1,04                               | 2,28                                                     | 16,85                    | 15,8                                  | 12,20                                 | 0,72  |
| 100                 | 0,950                 | 1,07                               | 3,12                                                     | 31,2                     | 20,4                                  | 21,54                                 | 0,69  |
| 200                 | 0,748                 | 1,10                               | 4,00                                                     | 49,0                     | 24,6                                  | 32,8                                  | 0,67  |
| 300                 | 0,617                 | 1,13                               | 4,83                                                     | 70,5                     | 28,3                                  | 45,81                                 | 0,65  |
| 400                 | 0,525                 | 1,15                               | 5,68                                                     | 94,5                     | 31,6                                  | 60,38                                 | 0,64  |
| 500                 | 0,457                 | 1,19                               | 6,54                                                     | 122,5                    | 34,8                                  | 76,30                                 | 0,63  |
| 600                 | 0,405                 | 1,21                               | 7,44                                                     | 150,0                    | 38,0                                  | 93,61                                 | 0,62  |
| 700                 | 0,363                 | 1,24                               | 8,25                                                     | 184,0                    | 40,6                                  | 112,10                                | 0,61  |
| 800                 | 0,330                 | 1,26                               | 9,15                                                     | 220,0                    | 43,5                                  | 131,80                                | 0,60  |
| 900                 | 0,301                 | 1,29                               | 9,98                                                     | 259,0                    | 46,0                                  | 152,50                                | 0,59  |
| 1000                | 0,275                 | 1,31                               | 10,90                                                    | 304,0                    | 47,7                                  | 173,40                                | 0,58  |
| 1100                | 0,257                 | 1,32                               | 11,75                                                    | 346,0                    | 51,0                                  | 197,10                                | 0,57  |
| 1200                | 0,240                 | 1,34                               | 12,62                                                    | 400,0                    | 53,0                                  | 221,00                                | 0,56  |
| 1300                | 0,230                 | 1,36                               | 13,51                                                    | 432,0                    | 55,0                                  | 239,0                                 | 0,554 |
| 1400                | 0,220                 | 1,38                               | 14,40                                                    | 474,0                    | 56,6                                  | 257,0                                 | 0,543 |
| 1500                | 0,210                 | 1,41                               | 15,30                                                    | 516,0                    | 58,6                                  | 279,0                                 | 0,54  |
| 1600                | 0,200                 | 1,44                               | 16,20                                                    | 560,0                    | 60,0                                  | 300,0                                 | 0,534 |
| 1700                | 0,195                 | 1,46                               | 15,05                                                    | 600,0                    | 64,6                                  | 331,0                                 | 0,553 |
| 1800                | 0,190                 | 1,48                               | 18,1                                                     | 645,0                    | 68,5                                  | 361,0                                 | 0,560 |
| 1900                | 0,185                 | 1,50                               | 18,95                                                    | 685,0                    | 72,0                                  | 390,0                                 | 0,570 |
| 2000                | 0,180                 | 1,52                               | 19,85                                                    | 725,0                    | 75,4                                  | 419,0                                 | 0,576 |

**Среднемесячные значения температуры  $t_0$  и относительной  
влажности  $\phi_0$  воздуха для различных городов России  
и стран ближнего зарубежья**

| Город       | Январь                |          | Июль                  |          |
|-------------|-----------------------|----------|-----------------------|----------|
|             | $t_0, ^\circ\text{C}$ | $\phi_0$ | $t_0, ^\circ\text{C}$ | $\phi_0$ |
| 1           | 2                     | 3        | 4                     | 5        |
| Акмолинск   | -17,0                 | 85       | 20,3                  | 59       |
| Алма-Ата    | -8,6                  | 87       | 22,1                  | 56       |
| Архангельск | -13,3                 | 88       | 15,3                  | 79       |
| Астрахань   | -7,1                  | 91       | 25,2                  | 58       |
| Ашхабад     | -0,4                  | 86       | 29,6                  | 41       |
| Баку        | -3,4                  | 82       | 25,3                  | 65       |

| <i>Продолжение прил. 8</i> |       |    |      |    |
|----------------------------|-------|----|------|----|
| 1                          | 2     | 3  | 4    | 5  |
| Батуми                     | -6,3  | 78 | 23,1 | 84 |
| Брянск                     | -8,8  | 88 | 18,2 | 74 |
| Владивосток                | -13,7 | 74 | 20,6 | 77 |
| Волгоград                  | -9,9  | 85 | 24,7 | 50 |
| Вологда                    | -12,0 | 85 | 17,5 | 70 |
| Воронеж                    | -9,8  | 90 | 20,6 | 62 |
| Ворошиловград              | -7,0  | 84 | 22,2 | 59 |
| Нижний Новгород            | -12,2 | 89 | 19,4 | 68 |
| Грозный                    | -4,9  | 93 | 23,9 | 70 |
| Днепропетровск             | -6,0  | 88 | 22,3 | 60 |
| Ереван                     | -5,8  | 89 | 25,0 | 50 |
| Иваново                    | -12,0 | 90 | 18,8 | 71 |
| Иркутск                    | -20,9 | 85 | 17,2 | 72 |
| Казань                     | -13,6 | 86 | 19,9 | 63 |
| Керчь                      | -1,3  | 88 | 23,4 | 68 |
| Киев                       | -6,0  | 89 | 19,3 | 69 |
| Киров                      | -15,1 | 86 | 18,1 | 71 |
| Кировоград                 | -5,8  | 88 | 20,9 | 60 |
| Красноводск                | -2,4  | 78 | 28,6 | 46 |
| Краснодар                  | -2,1  | 90 | 23,7 | 67 |
| Красноярск                 | -19,2 | 81 | 19,3 | 72 |
| Курск                      | -9,3  | 88 | 19,4 | 67 |
| Кутаиси                    | -4,4  | 75 | 23,8 | 73 |
| Санкт-Петербург            | -7,7  | 87 | 17,5 | 69 |
| Минск                      | -6,8  | 88 | 17,5 | 78 |
| Москва                     | -10,8 | 88 | 18,0 | 70 |
| Николаев                   | -4,0  | 88 | 23,1 | 63 |
| Новгород                   | -8,4  | 88 | 17,6 | 78 |
| Новороссийск               | -2,0  | 75 | 23,6 | 68 |
| Новосибирск                | -19,3 | 83 | 18,7 | 59 |
| Одесса                     | -3,1  | 88 | 22,6 | 61 |
| Омск                       | -19,6 | 85 | 19,1 | 70 |
| Орел                       | -9,5  | 92 | 19,6 | 77 |
| Пермь                      | -16,0 | 84 | 18,0 | 72 |
| Псков                      | -7,1  | 86 | 17,5 | 72 |
| Ростов-на-Дону             | -6,1  | 89 | 23,7 | 59 |
| Самарканд                  | -0,2  | 92 | 24,8 | 47 |
| Саратов                    | -11,3 | 84 | 23,1 | 53 |
| Екатеринбург               | -16,2 | 84 | 17,2 | 70 |
| Смоленск                   | -8,4  | 88 | 17,6 | 78 |
| Тамбов                     | -11,1 | 88 | 20,0 | 68 |
| Ташкент                    | -1,3  | 81 | 26,8 | 46 |
| Тбилиси                    | -0,1  | 80 | 24,6 | 51 |

| Окончание прил. 8 |       |    |      |    |
|-------------------|-------|----|------|----|
| 1                 | 2     | 3  | 4    | 5  |
| Томск             | -19,4 | 82 | 17,8 | 76 |
| Уральск           | -14,0 | 85 | 23,5 | 47 |
| Уфа               | -15,0 | 86 | 19,4 | 67 |
| Харьков           | -7,7  | 88 | 20,6 | 65 |
| Целиноград        | -17,0 | 85 | 20,3 | 59 |
| Челябинск         | -16,2 | 84 | 18,6 | 72 |

## Приложение 9

## Параметры сушки материала в сушильных барабанах

| Материал             | Размер кусков, $d$ , мм | Насыпная плотность материала $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | Влажность материала      |                         | Коэффициент тепло-массообмена $K_v$ , кг/(м <sup>3</sup> ·с·К) | Рекомендуемый вид насадки |
|----------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------|
|                      |                         |                                                         | начальная $\omega_1$ , % | конечная $\omega_2$ , % |                                                                |                           |
| Глина                | 30                      | 1800                                                    | 25                       | 5                       | 0,3                                                            | лопастная и ячейковая     |
| »                    | 30                      | 1800                                                    | 25                       | 2,5                     | 0,25                                                           |                           |
| »                    | 30                      | 1800                                                    | 10                       | 0,7                     | 0,15                                                           |                           |
| Известняк            | 20                      | 2000                                                    | 10                       | 1,0                     | 0,2                                                            | ячейковая                 |
| Каолин               | -                       | 1500                                                    | 25                       | 1,0                     | 0,15                                                           | лопастная                 |
| Мел                  | 20                      | 1200                                                    | 24                       | 2,0                     | 0,2                                                            | лопастная                 |
| Песок                | 0,5                     | 1500                                                    | 10                       | 0,1                     | 0,35                                                           | ячейковая                 |
| Уголь:               |                         |                                                         |                          |                         |                                                                |                           |
| бурый                | 3,0                     | 800                                                     | 40                       | 15                      | 0,4                                                            | лопастная                 |
| каменный             | 6,0                     | 800                                                     | 25                       | 15                      | 0,25                                                           | лопастная                 |
| каменный             | 3                       | 800                                                     | 9                        | 0,6                     | 0,15                                                           | лопастная                 |
| Шлак гранулированный | 2,0                     | 600                                                     | 20                       | 0,3                     | 0,3                                                            | ячейковая                 |

**Продолжительность сушки изделий в туннельных сушилках**

| Изделия                                                                                    | Начальная влажность<br>$U_1$ , % | Время сушки,<br>$\tau$ , ч     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Шамотные, пластического формования:<br>нормальный кирпич<br>простой фаянс<br>сложный фаянс | 17...18<br>18...19<br>18...19    | 18...20<br>24...36<br>42...110 |
| Динасовые:<br>нормальный кирпич<br>простой фаянс<br>сложный фаянс                          | 6<br>8<br>8                      | 6<br>8<br>16...36              |
| Магнетитовые:<br>нормальный кирпич<br>безобжиговый кирпич                                  | 3<br>3                           | 12...20<br>35                  |
| Канализационные трубы                                                                      | 17                               | 18...19                        |
| Керамические плитки для полов                                                              | 8                                | 12...14                        |
| Санитарно-техническая керамика                                                             | 16                               | 24...36                        |
| Керамические блоки                                                                         | 18...19                          | 18...36                        |

**Основные размеры барабанных сушилок (ГОСТ 11875-79)**

| Диаметр,<br>мм | Длина, мм |      |       | Масса,<br>т (не более) |
|----------------|-----------|------|-------|------------------------|
|                | $L$       | $l$  | $l_1$ |                        |
| 1              | 2         | 3    | 4     | 5                      |
| 1000           | 4000      | 850  | 2300  | 5,8                    |
| 1000           | 6000      | 1250 | 3500  | 6,4                    |
| 1200           | 6000      | 1250 | 3500  | 8,5                    |
| 1200           | 8000      | 1650 | 4700  | 9,3                    |
| 1200           | 10000     | 2050 | 5900  | 10,0                   |
| 1600           | 8000      | 1650 | 4700  | 16,9                   |
| 1600           | 10000     | 2050 | 5900  | 18,9                   |
| 1600           | 12000     | 2500 | 7000  | 19,6                   |
| 2000           | 8000      | 1650 | 4700  | 25,1                   |
| 2000           | 10000     | 2050 | 5900  | 27,1                   |
| 2000           | 12000     | 2500 | 7000  | 29,1                   |
| 2200           | 10000     | 2050 | 5900  | 32,1                   |
| 2200           | 12000     | 2500 | 7000  | 33,8                   |
| 2200           | 14000     | 2900 | 8200  | 37,1                   |

| Окончание прил. 11 |       |      |       |       |
|--------------------|-------|------|-------|-------|
| 1                  | 2     | 3    | 4     | 5     |
| 2200               | 16000 | 3350 | 9300  | 39,3  |
| 2500               | 12000 | 2500 | 7000  | 80,0  |
| 2500               | 14000 | 2900 | 8200  | 85,0  |
| 2500               | 18000 | 3750 | 10500 | 100,0 |
| 2500               | 20000 | 4150 | 11700 | 115,0 |
| 2800               | 14000 | 2900 | 8200  | 102,0 |
| 2800               | 16000 | 3350 | 9300  | 110,0 |
| 2800               | 20000 | 4150 | 11700 | 130,0 |
| 2800               | 22000 | 5150 | 11700 | 140,0 |
| 3000               | 16000 | 2700 | 10600 | 135,0 |
| 3000               | 18000 | 4000 | 10000 | 145,0 |
| 3000               | 20000 | 4000 | 12000 | 155,0 |
| 3200               | 16000 | 2700 | 10000 | 165,0 |
| 3200               | 18000 | 4000 | 10000 | 185,0 |
| 3200               | 22000 | 4500 | 13000 | 205,0 |
| 3200               | 16000 | 2700 | 10600 | 205,0 |
| 3500               | 18000 | 4000 | 10000 | 215,0 |
| 3500               | 22000 | 4500 | 13000 | 240,0 |
| 3500               | 27000 | 5000 | 17000 | 270,0 |
| 4000               | 16000 | 2700 | 10600 | 205,0 |
| 4000               | 18000 | 4000 | 10000 | 220,0 |
| 4000               | 22000 | 4500 | 13000 | 235,0 |
| 4000               | 28000 | 5000 | 18000 | 270,0 |
| 4500               | 16000 | 2700 | 10600 | 230,0 |
| 4500               | 18000 | 4000 | 10000 | 240,0 |
| 4500               | 22000 | 4500 | 13000 | 255,0 |
| 4500               | 28000 | 5000 | 18000 | 290,0 |
| 4500               | 35000 | 6500 | 22000 | 415,0 |
| 5000               | 22000 | 4500 | 13000 | 280,0 |
| 5000               | 28000 | 5000 | 18000 | 310,0 |
| 5000               | 35000 | 6500 | 22000 | 430,0 |

## Приложение 12

Значение коэффициента мощности  $\sigma$ 

| Вид насадки              | При значении коэффициента заполнения $\psi$ |       |       |       |
|--------------------------|---------------------------------------------|-------|-------|-------|
|                          | 0,1                                         | 0,15  | 0,20  | 0,25  |
| Подъемно-лопастная       | 0,038                                       | 0,053 | 0,063 | 0,071 |
| Распределительная        | 0,013                                       | 0,026 | 0,038 | 0,044 |
| Секторная                | 0,0125                                      | 0,018 | 0,020 | 0,022 |
| Ячейковая (перевалочная) | 0,006                                       | 0,008 | 0,010 | 0,011 |

## Приложение 13

**Ориентировочное значение коэффициента  $a_2$** 

| Материал                                              | Направление движения газов | $a_2$ |
|-------------------------------------------------------|----------------------------|-------|
| Тяжелый ( $\rho_{\text{нас}} > 2500 \text{ кг/м}^3$ ) | Прямоток                   | 0,5   |
|                                                       | Противоток                 | 0,7   |
| Легкий ( $\rho_{\text{нас}} < 1000 \text{ кг/м}^3$ )  | Прямоток                   | 0,2   |
|                                                       | Противоток                 | 2,0   |

## Приложение 14

**Рекомендуемая толщина футеровки**

| Температура газов, °С | Толщина футеровки, мм | Толщина слоя футеровки, мм |          |                  |
|-----------------------|-----------------------|----------------------------|----------|------------------|
|                       |                       | Шамот                      | Диатомит | Минеральная вата |
| 400...600             | 250                   | 125                        | 125      | -                |
| 600...800             | 310                   | 125                        | 125      | 60               |
| 800...900             | 380                   | 195                        | 125      | 60               |
| 900...1200            | 500                   | 315                        | 125      | 60               |

## Приложение 15

**Рекомендуемые диаметр и высота цилиндрической части сушильных аппаратов кипящего слоя**

| Диаметр $D$ , мм | Высота $H$ , мм | Диаметр $D$ , мм | Высота $H$ , мм |
|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| 1000             | 1400            | 2000             | 1600            |
| 1000             | 1800            | 2200             | 1600            |
| 1200             | 1800            | 2400             | 1600            |
| 1400             | 1800            | 2600             | 1600            |
| 1600             | 1600            | 2800             | 1600            |
| 1800             | 1600            | 3000             | 1600            |

**Основные размеры распылительных сушилок (ГОСТ 18906-80)**

| Внутренний диаметр $D$ , м | Высота цилиндрической части $H$ , м | Рабочий объем $V_p$ , м <sup>3</sup> | Масса, т (не более) | Тип сушилки |
|----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------|-------------|
| 2,5                        | 4,0                                 | 20,0                                 | 4,0                 | СРФ         |
| 2,5                        | 5,0                                 | 29,0                                 | 4,5                 | СРФ         |
| 2,5                        | 2,0                                 | 9,0                                  | 6,0                 | СРЦ         |
| 2,5                        | 3,0                                 | 15,0                                 | 7,5                 | СРЦ         |
| 3,2                        | 2,0                                 | 16,0                                 | 9,0                 | СРЦ         |
| 3,2                        | 3,0                                 | 24,0                                 | 10,0                | СРЦ         |
| 3,2                        | 4,0                                 | 30,0                                 | 11,0                | СРЦ         |
| 3,2                        | 5,0                                 | 40,0                                 | 5,0                 | СРФ         |
| 3,2                        | 6,0                                 | 50,0                                 | 5,5                 | СРФ         |
| 4,0                        | 3,0                                 | 40,0                                 | 12,5                | СРЦ         |
| 4,0                        | 4,0                                 | 50,0                                 | 13,7                | СРЦ         |
| 4,0                        | 5,0                                 | 60,0                                 | 14,9                | СРЦ         |
| 4,0                        | 6,0                                 | 75,0                                 | 8,0                 | СРФ         |
| 4,0                        | 8,0                                 | 100,0                                | 9,0                 | СРФ         |
| 5,0                        | 4,0                                 | 80,0                                 | 21,5                | СРЦ         |
| 5,0                        | 5,0                                 | 100,0                                | 23,5                | СРЦ         |
| 5,0                        | 6,0                                 | 120,0                                | 24,5                | СРЦ         |
| 5,0                        | 7,0                                 | 140,0                                | 12,0                | СРФ         |
| 5,0                        | 10,0                                | 200,0                                | 13,5                | СРФ         |
| 6,5                        | 4,0                                 | 125,0                                | 23,0                | СРЦ         |
| 6,5                        | 5,0                                 | 170,0                                | 27,5                | СРЦ         |
| 6,5                        | 6,0                                 | 200,0                                | 29,0                | СРЦ         |
| 6,5                        | 10,0                                | 330,0                                | 19,5                | СРФ         |
| 6,5                        | 12,0                                | 400,0                                | 21,0                | СРФ         |
| 8,0                        | 6,0                                 | 300,0                                | 38,0                | СРЦ         |
| 8,0                        | 7,0                                 | 350,0                                | 40,0                | СРЦ         |
| 8,0                        | 8,0                                 | 400,0                                | 40,0                | СРЦ         |
| 8,0                        | 12,0                                | 600,0                                | 31,0                | СРФ         |
| 8,0                        | 16,0                                | 800,0                                | 35,0                | СРФ         |
| 10,0                       | 7,0                                 | 550,0                                | 62,0                | СРЦ         |
| 10,0                       | 10,0                                | 785,0                                | 65,0                | СРЦ         |
| 12,5                       | 9,0                                 | 1100,0                               | 70,0                | СРЦ         |
| 12,5                       | 12,0                                | 1500,0                               | 80,0                | СРЦ         |

**Техническая характеристика оребренных калориферов  
средней (КФСО) и большой модели (КФБО)**

| № калорифера | Поверхность теплообмена<br>$S_c, \text{м}^2$ |       | Живое сечение для воздуха $S_v, \text{м}^2$ |       | Размеры сечения, мм |      |              |              |
|--------------|----------------------------------------------|-------|---------------------------------------------|-------|---------------------|------|--------------|--------------|
|              |                                              |       |                                             |       | Длина<br>$l_1$      |      | Ширина $l_2$ | Высота $l_3$ |
|              | КФСО                                         | КФБО  | КФСО                                        | КФБО  | КФСО                | КФБО |              |              |
| 2            | 9,77                                         | 13,02 | 0,091                                       | 0,091 | 200                 | 230  | 390          | 600          |
| 4            | 17,06                                        | 20,68 | 0,153                                       | 0,143 | 200                 | 230  | 510          | 750          |
| 5            | 21,71                                        | 26,68 | 0,167                                       | 0,182 | 200                 | 230  | 640          | 750          |
| 6            | 26,29                                        | 32,65 | 0,227                                       | 0,222 | 200                 | 230  | 640          | 900          |
| 7            | 30,05                                        | 40,06 | 0,271                                       | 0,271 | 200                 | 230  | 760          | 900          |
| 8            | 35,28                                        | 47,00 | 0,318                                       | 0,318 | 200                 | 230  | 760          | 1050         |
| 9            | 41,89                                        | 53,86 | 0,375                                       | 0,375 | 200                 | 230  | 880          | 1050         |
| 10           | 48,22                                        | 64,30 | 0,431                                       | 0,431 | 200                 | 230  | 880          | 1200         |
| 11           | 55,84                                        | 71,00 | 0,497                                       | 0,475 | 200                 | 230  | 1010         | 1200         |

**Примечания.**

1. Предусмотрено вертикальное движение пара внутри труб и горизонтальное движение воздуха в межтрубном пространстве.

2. В средней модели КФСО имеется три ряда труб, в большой модели КФБО – четыре ряда труб по длине сечения.

**Коэффициент теплопередачи  $K$   
в оребренном калорифере, Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{К}$ )**

| Модель калорифера | Массовая скорость воздуха $\rho v$ , кг/( $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ) |      |    |      |      |      |      |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------|------|----|------|------|------|------|
|                   | 2                                                                       | 3    | 4  | 5    | 6    | 7    | 8    |
| КФСО (средняя)    | 25                                                                      | 30   | 34 | 37,6 | 40,6 | 43,5 | 46   |
| КФБО (большая)    | 22,6                                                                    | 27,1 | 31 | 34,3 | 37,2 | 40   | 44,8 |



## Сопротивление оребренных калориферов движения воздуха

|                                                                              |             |     |     |     |     |      |      |      |
|------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| Массовая скорость воздуха $\rho v$ , $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ | 2           | 3   | 4   | 5   | 6   | 7    | 8    | 9    |
| Потери давления, $\Delta p$ , Па                                             | Модель КФСО | 1,4 | 3,1 | 5,3 | 8,4 | 11,4 | 16,5 | 21,5 |
|                                                                              | Модель КФБО | 1,7 | 3,6 | 6,5 | 9,9 | 14,0 | 19,0 | 24,4 |

## Основные размеры циклонов НИИОГАЗ

| Параметры                                       | Обозначение    | Типы циклонов |                  |            |           |
|-------------------------------------------------|----------------|---------------|------------------|------------|-----------|
|                                                 |                | ЦН-15         | ЦН-15у           | ЦН-24      | ЦН-11     |
| Угол наклона крышки и входного патрубка циклона | —              | 15°           | 15°              | 24°        | 11°       |
| Внутренний диаметр циклона, мм                  | $D$            | 400...800     | 200...800        | 400...1000 | 400...800 |
| Высота конуса циклона                           | $h_k$          | $2D$          | $1,5D$           | $1,75D$    | $2D$      |
| Высота цилиндрической части циклона             | $h_{\text{ц}}$ | $2,26D$       | $1,51D$          | $2,11D$    | $2,08D$   |
| Общая высота циклона                            | $H$            | $4,56D$       | $3,31D$          | $4,26D$    | $4,38D$   |
| Наружный диаметр выхлопной трубы                | $d$            | —             | $0,6D$           | —          | —         |
| Высота выхлопной трубы с фланцем                | $h_r$          | $1,74D$       | $1,5D$           | $2,11D$    | $1,56D$   |
| Высота внешней части выхлопной трубы            | $h_{\text{в}}$ | $0,3D$        | $0,3D$           | $0,4D$     | $0,3D$    |
| Высота входного патрубка                        | $a$            | $0,66D$       | $0,66D$          | $1,11D$    | $0,48D$   |
| Ширина входного патрубка                        | $b$            | —             | $0,26D$          | —          | —         |
| Длина входного патрубка                         | $l$            | —             | $0,6D$           | —          | —         |
| Высота установки фланца                         | $h_{\text{ф}}$ | —             | $(0,24...0,32)D$ | —          | —         |
| Внутренний диаметр пылевыпускного отверстия     | $d_1$          | —             | $(0,3...0,4)D$   | —          | —         |
| Диаметр бункера                                 | $D_6$          | —             | $1,5D$           | —          | —         |
| Высота бункера                                  | $H_6$          | —             | $2,4D$           | —          | —         |

**Коэффициенты гидравлического сопротивления циклонов**

| Тип циклонного пылеуловителя                              |                                                    | Коэффициент сопротивления |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------|
| Циклоны НИИОГАЗ типа:                                     | ЦН-11                                              | 180                       |
|                                                           | ЦН-15                                              | 105                       |
|                                                           | ЦН-24                                              | 60                        |
| Батарейные циклоны НИИОГАЗ с направляющим аппаратом типа: | "Винт", $\gamma = 25^\circ$                        | 85                        |
|                                                           | "Розетка", $\gamma = 25^\circ$                     | 90                        |
|                                                           | "Розетка" с безударным входом, $\gamma = 25^\circ$ | 65                        |

**Техническая характеристика рукавных фильтров**

| Наименование параметров                              |    |     | СМЦ 100А    |      |       | СМЦ 101А |      |       |
|------------------------------------------------------|----|-----|-------------|------|-------|----------|------|-------|
| I                                                    | II | III | I           | II   | III   | I        | II   | III   |
| Материал                                             |    |     | Стеклоткань |      |       | Лавсан   |      |       |
| Площадь фильтрования, м <sup>2</sup>                 |    |     | 55          | 115  | 205   | 55       | 115  | 205   |
| Длина рукавов рабочая, мм                            |    |     | 2450        | 5100 | 9100  | 2450     | 5100 | 9100  |
| Диаметр рукавов, мм                                  |    |     | 200         |      |       | 200      |      |       |
| Температура обеспыливаемого газа, °С                 |    |     | 300         |      |       | 140      |      |       |
| Сопротивление фильтра перед регенерацией рукавов, Па |    |     | 1900        |      |       | 1900     |      |       |
| Габаритные размеры, мм                               |    |     |             |      |       |          |      |       |
| длина                                                |    |     | 1710        | 1710 | 1710  | 1710     | 1710 | 1710  |
| ширина                                               |    |     | 3170        | 3170 | 3170  | 3170     | 3170 | 3170  |
| высота                                               |    |     | 5700        | 8940 | 13760 | 5700     | 8940 | 13760 |
| Масса без электрооборудования, кг                    |    |     | 2400        | 3200 | 4400  | 2400     | 3200 | 4400  |

**Рекомендуемые значения газовой нагрузки  
в рукавных фильтрах**

| Ткань                                                                              | Шерстяная<br>или хлопчато-<br>бумажная | Синтетическая | Стеклоянная |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------|-------------|
| Фиктивная скорость фильтрования, $v_{cp}, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ | 0,01-0,02                              | 0,008-0,017   | 0,005-0,015 |

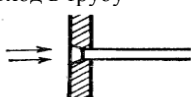
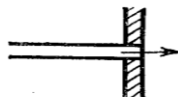
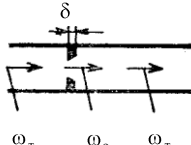
**Техническая характеристика электрофильтров**

| Марка и типоразмер электрофильтра | Площадь активного сечения, м <sup>2</sup> | Общая площадь осаждения, м <sup>2</sup> | Габариты, м |           |           |
|-----------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------|-----------|-----------|
|                                   |                                           |                                         | Длина, м    | Ширина, м | Высота, м |
| 1                                 | 2                                         | 3                                       | 4           | 5         | 6         |
| ЭГА1-10-4-4-2                     | 11                                        | 430                                     | 9,26        | 4,48      | 10,41     |
| ЭГА1-10-4-6-2                     |                                           | 645                                     | 11,82       |           | 11,44     |
| ЭГА1-10-4-6-3                     |                                           | 967                                     | 17,28       |           | 11,44     |
| ЭГА1-10-6-4-2                     | 16,5                                      | 635                                     | 9,26        | 4,89      | 12,41     |
| ЭГА1-10-6-4-3                     |                                           | 952                                     | 13,44       |           | 13,41     |
| ЭГА1-10-6-6-2                     |                                           | 952                                     | 11,82       |           |           |
| ЭГА1-10-6-6-3                     |                                           | 1430                                    | 17,28       |           |           |
| ЭГА1-14-7,5-4-2                   | 28,7                                      | 1656                                    | 13,44       | 6,15      | 13,91     |
| ЭГА1-14-7,5-4-3                   |                                           | 2210                                    | 17,62       |           | 14,91     |
| ЭГА1-14-7,5-6-2                   |                                           | 16,56                                   | 11,82       |           |           |
| ЭГА1-14-7,5-6-3                   |                                           | 24,85                                   | 17,28       |           |           |
| ЭГА1-20-7,5-4-2                   | 41                                        | 2366                                    | 13,44       | 7,95      | 15,41     |
| ЭГА1-20-7,5-4-3                   |                                           | 3157                                    | 17,62       |           | 16,91     |
| ЭГА1-20-7,5-6-2                   |                                           | 2366                                    | 11,82       |           |           |
| ЭГА1-20-7,5-6-3                   |                                           | 3550                                    | 17,28       |           |           |
| ЭГА1-20-9-6-2                     | 49                                        | 2827                                    | 11,82       | 10,38     | 14,91     |
| ЭГА1-20-9-6-3                     |                                           | 4243                                    | 17,28       |           |           |
| ЭГА1-20-9-6-4                     |                                           | 5660                                    | 22,74       |           |           |
| ЭГА1-30-7,5-4-2                   | 61,4                                      | 3543                                    | 13,44       | 10,38     | 14,91     |
| ЭГА1-30-7,5-4-3                   |                                           | 4728                                    | 17,62       |           |           |
| ЭГА1-30-7,5-6-2                   |                                           | 3780                                    | 11,82       |           |           |
| ЭГА1-30-7,5-6-3                   |                                           | 5317                                    | 17,28       |           |           |

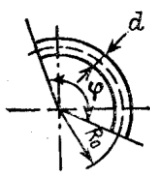
| Окончание прил. 24 |      |        |       |       |       |
|--------------------|------|--------|-------|-------|-------|
| 1                  | 2    | 3      | 4     | 5     | 6     |
| ЭГА1-30-9-6-2      | 73,4 | 42,35  | 11,82 |       | 16,41 |
| ЭГА1-30-9-6-3      |      | 6356   | 17,28 |       |       |
| ЭГА1-30-9-6-4      |      | 84,78  | 22,74 |       |       |
| ЭГА1-30-12-6-3     | 97,4 | 84,35  | 17,28 |       | 19,41 |
| ЭГА1-30-12-6-4     |      | 11,250 | 22,74 |       |       |
| ЭГА1-40-7,5-4-2    | 81,9 | 4726   | 13,44 | 13,99 | 15,41 |
| ЭГА1-40-7,5-4-3    |      | 6306   | 17,62 |       |       |
| ЭГА1-40-7,5-6-2    |      | 4726   | 11,82 |       |       |
| ЭГА1-40-7,5-6-3    |      | 7093   | 17,28 |       |       |

## Приложение 25

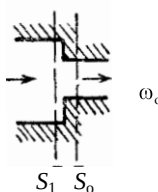
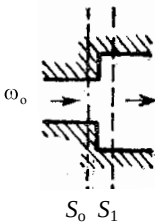
## Коэффициенты местных сопротивлений

| Вид сопротивления                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Значения коэффициентов местного сопротивления $\xi$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |     |     |     |     |     |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <p>Вход в трубу</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <p>С острыми краями: <math>\xi = 0,5</math><br/>С закругленными краями: <math>\xi = 0,2</math></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |     |     |     |     |     |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| <p>Выход из трубы</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <p><math>\xi = 1</math></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |     |     |     |     |     |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| <p>Диафрагма (отверстие) с острыми краями в прямой трубе</p>  <p><math>\omega_r</math>   <math>\omega_o</math>   <math>\omega_r</math></p> <p><math>d_o</math> – диаметр отверстия диафрагмы, м;<br/><math>\delta</math> – толщина диафрагмы, м; <math>\omega_o</math> – средняя скорость потока в отверстии, м/с;<br/><math>m = \left(\frac{d_o}{D}\right)^2</math>; <math>D</math> – диаметр трубы, м</p> | <p>При <math>\frac{\delta}{d_o} = 0 \div 0.015</math> потеря давления <math>\Delta p = \xi \frac{\rho \cdot \omega^2}{2}</math></p> <p>Значение <math>\xi</math> определяется по таблице:</p> <table><tr><td>m</td><td>0,02</td><td>0,04</td><td>0,06</td><td>0,08</td><td>0,1</td><td>0,12</td><td>0,14</td><td>0,16</td><td>0,18</td><td>0,20</td><td>0,22</td></tr><tr><td><math>\xi</math></td><td>7000</td><td>1670</td><td>730</td><td>400</td><td>245</td><td>165</td><td>117</td><td>86,0</td><td>65,5</td><td>51,5</td><td>40,0</td></tr><tr><td>m</td><td>0,24</td><td>0,26</td><td>0,28</td><td>0,30</td><td>0,34</td><td>0,40</td><td>0,50</td><td>0,60</td><td>0,70</td><td>0,80</td><td>0,90</td></tr><tr><td><math>\xi</math></td><td>32,0</td><td>26,8</td><td>22,3</td><td>18,2</td><td>13,1</td><td>8,25</td><td>4,00</td><td>2,00</td><td>0,97</td><td>0,42</td><td>0,13</td></tr></table> | m    | 0,02 | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,1  | 0,12 | 0,14 | 0,16 | 0,18 | 0,20 | 0,22 | $\xi$ | 7000 | 1670 | 730 | 400 | 245 | 165 | 117 | 86,0 | 65,5 | 51,5 | 40,0 | m | 0,24 | 0,26 | 0,28 | 0,30 | 0,34 | 0,40 | 0,50 | 0,60 | 0,70 | 0,80 | 0,90 | $\xi$ | 32,0 | 26,8 | 22,3 | 18,2 | 13,1 | 8,25 | 4,00 | 2,00 | 0,97 | 0,42 | 0,13 |
| m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,02                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,1  | 0,12 | 0,14 | 0,16 | 0,18 | 0,20 | 0,22 |      |      |       |      |      |     |     |     |     |     |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| $\xi$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 7000                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 1670 | 730  | 400  | 245  | 165  | 117  | 86,0 | 65,5 | 51,5 | 40,0 |      |      |       |      |      |     |     |     |     |     |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| m                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,24                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,26 | 0,28 | 0,30 | 0,34 | 0,40 | 0,50 | 0,60 | 0,70 | 0,80 | 0,90 |      |      |       |      |      |     |     |     |     |     |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| $\xi$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 32,0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 26,8 | 22,3 | 18,2 | 13,1 | 8,25 | 4,00 | 2,00 | 0,97 | 0,42 | 0,13 |      |      |       |      |      |     |     |     |     |     |      |      |      |      |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

## Продолжение прил. 25

| Продолжение прил. 25                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                        |          |        |        |           |         |         |            |      |      |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------|--------|-----------|---------|---------|------------|------|------|-----------|
| Вид сопротивления                                                                                                                                                                                               | Значения коэффициентов местного сопротивления $\xi$                                                                                                                                    |          |        |        |           |         |         |            |      |      |           |
| Отвод круглого или квадратного сечения<br><br><br><br>$d$ – внутренний диаметр трубопровода, м; $R_0$ – радиус изгиба трубы, м | Коэффициент сопротивления $\xi = AB$ определяется по таблицам:                                                                                                                         |          |        |        |           |         |         |            |      |      |           |
|                                                                                                                                                                                                                 | Угол $\varphi$ , градусы                                                                                                                                                               | 20       | 30     | 45     | 60        | 90      | 110     | 130        | 150  | 180  |           |
|                                                                                                                                                                                                                 | A                                                                                                                                                                                      | 0,31     | 0,45   | 0,6    | 0,78      | 1,0     | 1,13    | 1,20       | 1,28 | 1,40 |           |
|                                                                                                                                                                                                                 | $R_0/B$                                                                                                                                                                                | 1,0      | 2,0    | 4,0    | 6,0       | 15      | 30      | 50         |      |      |           |
|                                                                                                                                                                                                                 | B                                                                                                                                                                                      | 0,21     | 0,15   | 0,11   | 0,09      | 0,06    | 0,04    | 0,03       |      |      |           |
| Колено (угольник) 90° стандартный чугунный                                                                                                                                                                      | Условный проход, мм                                                                                                                                                                    | 12,5     |        | 25     |           | 37      |         | 50         |      |      |           |
|                                                                                                                                                                                                                 | $\xi$                                                                                                                                                                                  | 2,2      |        | 2      |           | 1,6     |         | 1,1        |      |      |           |
| Вентиль нормальный                                                                                                                                                                                              | Значение $\xi$ при полном открытии вентиля                                                                                                                                             |          |        |        |           |         |         |            |      |      |           |
|                                                                                                                                                                                                                 | $D$ , мм                                                                                                                                                                               | 13       | 20     | 40     | 80        | 100     | 150     | 200        | 250  | 350  |           |
|                                                                                                                                                                                                                 | $\xi$                                                                                                                                                                                  | 10,8     | 8,0    | 4,9    | 4,0       | 4,1     | 4,4     | 4,7        | 5,1  | 5,5  |           |
| Вентиль прямой                                                                                                                                                                                                  | При $Re > 3 \cdot 10^5$ значение $\xi$ определяется по таблице:                                                                                                                        |          |        |        |           |         |         |            |      |      |           |
|                                                                                                                                                                                                                 | $D$ , мм                                                                                                                                                                               | 25       | 38     | 50     | 65        | 76      | 100     | 150        | 200  | 250  |           |
|                                                                                                                                                                                                                 | $\xi$                                                                                                                                                                                  | 1,04     | 0,85   | 0,79   | 0,65      | 0,60    | 0,50    | 0,42       | 0,36 | 0,32 |           |
|                                                                                                                                                                                                                 | При $Re < 3 \cdot 10^5$ коэффициент сопротивления $\xi = \xi_1 \cdot K$ . Значение $\xi_1$ определяется так же, как и при $Re \geq 3 \cdot 10^5$ , а значение $K$ приведено в таблице: |          |        |        |           |         |         |            |      |      |           |
|                                                                                                                                                                                                                 | Re                                                                                                                                                                                     | 5000     | 10 000 | 20 000 | 50 000    | 100 000 | 200 000 | 300 000    |      |      |           |
|                                                                                                                                                                                                                 | K                                                                                                                                                                                      | 1,40     | 1,07   | 0,94   | 0,88      | 0,91    | 0,93    | 1          |      |      |           |
| Кран пробочный                                                                                                                                                                                                  | Условный проход, мм                                                                                                                                                                    | 13       |        | 19     |           | 25      |         | 32         |      | 38   | 50 и выше |
|                                                                                                                                                                                                                 | $\xi$                                                                                                                                                                                  | 4        |        | 2      |           | 2       |         | 2          |      | 2    | 2         |
| Задвижка                                                                                                                                                                                                        | Условный проход, мм                                                                                                                                                                    | 15 – 100 |        |        | 175 – 200 |         |         | 300 и выше |      |      |           |
|                                                                                                                                                                                                                 | $\xi$                                                                                                                                                                                  | 0,5      |        |        | 0,25      |         |         | 0,15       |      |      |           |

Окончание прил. 25

| Вид сопротивления                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Значения коэффициентов местного сопротивления $\xi$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                 |           |      |      |      |  |  |     |     |     |     |     |     |    |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |        |      |      |      |      |      |      |         |  |  |  |  |  |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------|------|------|------|--|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|--------|------|------|------|------|------|------|---------|--|--|--|--|--|--|
| <div> <div>Внезапное сужение</div> <div>  <div> <math>S_0</math> – площадь меньшего поперечного сечения, м; <math>S_1</math> – площадь большего поперечного сечения, м; <math>\omega_o</math> – скорость потока в меньшем сечении, м/с </div> <div> <math display="block">Re = \frac{\omega_o d_2}{\nu}</math> <math display="block">\Delta p_{суж} = \xi \left( \frac{\omega_o^2}{2} \right)</math> </div> </div> </div>      | <table> <tr> <th rowspan="2"><math>Re = \frac{\omega_o d_2}{\nu}</math></th> <th colspan="6"><math>S_o/S_1</math></th> </tr> <tr> <th>0,1</th> <th>0,2</th> <th>0,3</th> <th>0,4</th> <th>0,5</th> <th>0,6</th> </tr> <tr> <td>10</td> <td>5,0</td> <td>5,0</td> <td>5,0</td> <td>5,0</td> <td>5,0</td> <td>5,0</td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>1,30</td> <td>1,20</td> <td>1,10</td> <td>1,00</td> <td>0,90</td> <td>0,80</td> </tr> <tr> <td>1000</td> <td>0,64</td> <td>0,50</td> <td>0,44</td> <td>0,35</td> <td>0,30</td> <td>0,24</td> </tr> <tr> <td>10000</td> <td>0,5</td> <td>0,40</td> <td>0,35</td> <td>0,30</td> <td>0,25</td> <td>0,20</td> </tr> <tr> <td>&gt;10000</td> <td>0,45</td> <td>0,40</td> <td>0,35</td> <td>0,30</td> <td>0,25</td> <td>0,20</td> </tr> </table>                                                                                   | $Re = \frac{\omega_o d_2}{\nu}$ | $S_o/S_1$ |      |      |      |  |  | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 10 | 5,0 | 5,0 | 5,0 | 5,0 | 5,0 | 5,0 | 100 | 1,30 | 1,20 | 1,10 | 1,00 | 0,90 | 0,80 | 1000 | 0,64 | 0,50 | 0,44 | 0,35 | 0,30 | 0,24 | 10000 | 0,5  | 0,40 | 0,35 | 0,30 | 0,25 | 0,20 | >10000 | 0,45 | 0,40 | 0,35 | 0,30 | 0,25 | 0,20 |         |  |  |  |  |  |  |
| $Re = \frac{\omega_o d_2}{\nu}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | $S_o/S_1$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                 |           |      |      |      |  |  |     |     |     |     |     |     |    |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |        |      |      |      |      |      |      |         |  |  |  |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0,1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0,2                             | 0,3       | 0,4  | 0,5  | 0,6  |  |  |     |     |     |     |     |     |    |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |        |      |      |      |      |      |      |         |  |  |  |  |  |  |
| 10                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 5,0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 5,0                             | 5,0       | 5,0  | 5,0  | 5,0  |  |  |     |     |     |     |     |     |    |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |        |      |      |      |      |      |      |         |  |  |  |  |  |  |
| 100                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 1,30                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 1,20                            | 1,10      | 1,00 | 0,90 | 0,80 |  |  |     |     |     |     |     |     |    |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |        |      |      |      |      |      |      |         |  |  |  |  |  |  |
| 1000                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0,64                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,50                            | 0,44      | 0,35 | 0,30 | 0,24 |  |  |     |     |     |     |     |     |    |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |        |      |      |      |      |      |      |         |  |  |  |  |  |  |
| 10000                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0,5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0,40                            | 0,35      | 0,30 | 0,25 | 0,20 |  |  |     |     |     |     |     |     |    |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |        |      |      |      |      |      |      |         |  |  |  |  |  |  |
| >10000                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,45                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,40                            | 0,35      | 0,30 | 0,25 | 0,20 |  |  |     |     |     |     |     |     |    |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |        |      |      |      |      |      |      |         |  |  |  |  |  |  |
| <div> <div>Внезапное расширение</div> <div>  <div> <math>S_o</math> – площадь меньшего поперечного сечения, м; <math>S_1</math> – площадь большего поперечного сечения, м; <math>\omega_o</math> – скорость потока в меньшем сечении, м/с </div> <div> <math display="block">Re = \frac{\omega_o d_2}{\nu}</math> <math display="block">\Delta p_{расш} = \xi \left( \frac{\omega_o^2}{2} \right)</math> </div> </div> </div> | <table> <tr> <th rowspan="2"><math>Re = \frac{\omega_o d_2}{\nu}</math></th> <th colspan="6"><math>S_o/S_1</math></th> </tr> <tr> <th>0,1</th> <th>0,2</th> <th>0,3</th> <th>0,4</th> <th>0,5</th> <th>0,6</th> </tr> <tr> <td>10</td> <td>3,1</td> <td>3,1</td> <td>3,1</td> <td>3,1</td> <td>3,1</td> <td>3,1</td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>1,70</td> <td>1,40</td> <td>1,20</td> <td>1,10</td> <td>0,90</td> <td>0,80</td> </tr> <tr> <td>1000</td> <td>2,0</td> <td>1,60</td> <td>1,30</td> <td>1,05</td> <td>0,90</td> <td>0,60</td> </tr> <tr> <td>3000</td> <td>1,00</td> <td>0,70</td> <td>0,60</td> <td>0,40</td> <td>0,30</td> <td>0,20</td> </tr> <tr> <td>3500</td> <td>0,81</td> <td>0,64</td> <td>0,50</td> <td>0,66</td> <td>0,25</td> <td>0,16</td> </tr> <tr> <td>и более</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table> | $Re = \frac{\omega_o d_2}{\nu}$ | $S_o/S_1$ |      |      |      |  |  | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 10 | 3,1 | 3,1 | 3,1 | 3,1 | 3,1 | 3,1 | 100 | 1,70 | 1,40 | 1,20 | 1,10 | 0,90 | 0,80 | 1000 | 2,0  | 1,60 | 1,30 | 1,05 | 0,90 | 0,60 | 3000  | 1,00 | 0,70 | 0,60 | 0,40 | 0,30 | 0,20 | 3500   | 0,81 | 0,64 | 0,50 | 0,66 | 0,25 | 0,16 | и более |  |  |  |  |  |  |
| $Re = \frac{\omega_o d_2}{\nu}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | $S_o/S_1$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                 |           |      |      |      |  |  |     |     |     |     |     |     |    |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |        |      |      |      |      |      |      |         |  |  |  |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0,1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 0,2                             | 0,3       | 0,4  | 0,5  | 0,6  |  |  |     |     |     |     |     |     |    |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |        |      |      |      |      |      |      |         |  |  |  |  |  |  |
| 10                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 3,1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 3,1                             | 3,1       | 3,1  | 3,1  | 3,1  |  |  |     |     |     |     |     |     |    |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |        |      |      |      |      |      |      |         |  |  |  |  |  |  |
| 100                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 1,70                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 1,40                            | 1,20      | 1,10 | 0,90 | 0,80 |  |  |     |     |     |     |     |     |    |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |        |      |      |      |      |      |      |         |  |  |  |  |  |  |
| 1000                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 2,0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 1,60                            | 1,30      | 1,05 | 0,90 | 0,60 |  |  |     |     |     |     |     |     |    |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |        |      |      |      |      |      |      |         |  |  |  |  |  |  |
| 3000                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1,00                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,70                            | 0,60      | 0,40 | 0,30 | 0,20 |  |  |     |     |     |     |     |     |    |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |        |      |      |      |      |      |      |         |  |  |  |  |  |  |
| 3500                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0,81                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0,64                            | 0,50      | 0,66 | 0,25 | 0,16 |  |  |     |     |     |     |     |     |    |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |        |      |      |      |      |      |      |         |  |  |  |  |  |  |
| и более                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                 |           |      |      |      |  |  |     |     |     |     |     |     |    |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |        |      |      |      |      |      |      |         |  |  |  |  |  |  |

**Техническая характеристика дутьевых вентиляторов**

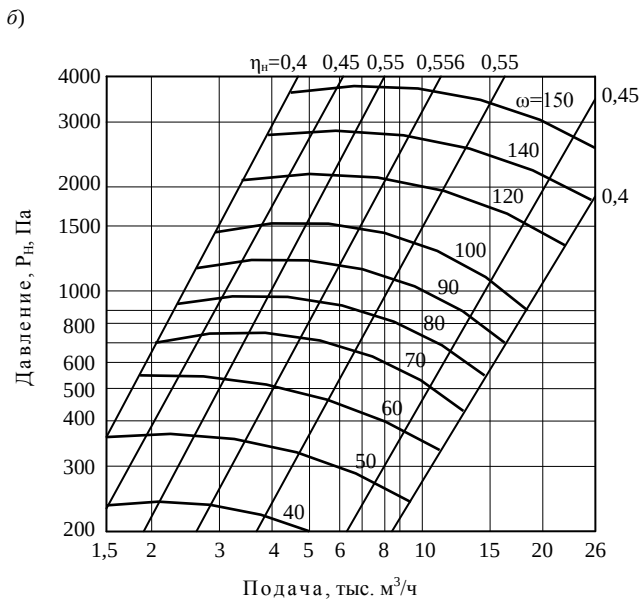
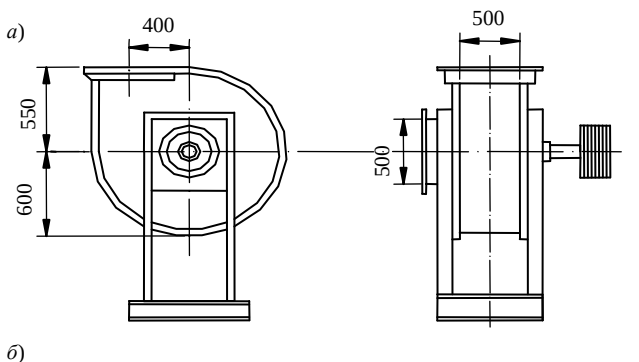
| Тип машины | Диаметр колеса, мм | Частота вращения, об/мин | Параметры на режиме максимального К.П.Д. ( $\eta_n = 82 - 85\%$ ) при температуре 30 °С |                     |                            |
|------------|--------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------|
|            |                    |                          | Подача<br>тыс. м <sup>3</sup>                                                           | Полное давление, Па | Потребляемая мощность, кВт |
| ВДН-8      | 800                | 750                      | 4,8                                                                                     | 600                 | 1,0                        |
|            |                    | 1000                     | 6,3                                                                                     | 1060                | 2,4                        |
|            |                    | 1500                     | 9,0                                                                                     | 2500                | 7,7                        |
| ВДН-9      | 900                | 750                      | 7,0                                                                                     | 760                 | 1,8                        |
|            |                    | 1000                     | 9,5                                                                                     | 1320                | 4,3                        |
|            |                    | 1500                     | 14,0                                                                                    | 3000                | 13,5                       |
| ВДН-10     | 1000               | 750                      | 9,5                                                                                     | 940                 | 3,2                        |
|            |                    | 1000                     | 13,0                                                                                    | 1640                | 7,2                        |
|            |                    | 1500                     | 18,0                                                                                    | 3800                | 22,3                       |
| ВДН-11,2   | 1120               | 750                      | 14,0                                                                                    | 1180                | 5,5                        |
|            |                    | 1000                     | 18,0                                                                                    | 2070                | 12,8                       |
|            |                    | 1500                     | 25,0                                                                                    | 4800                | 41                         |
| ВДН-12,5   | 1250               | 750                      | 18,5                                                                                    | 1480                | 9,5                        |
|            |                    | 1000                     | 25,0                                                                                    | 2580                | 22                         |
|            |                    | 1500                     | 35,0                                                                                    | 6000                | 72                         |
| ВДН-15     | 1500               | 1000                     | 54                                                                                      | 3200                | 60                         |
| ВДН-17     | 1700               | 1000                     | 60                                                                                      | 4800                | 90                         |
| ВДН-18-П   | 1800               | 750                      | 130                                                                                     | 2300                | 95                         |
|            |                    | 1000                     | 170                                                                                     | 3900                | 200                        |
| ВДН-18-Пу  | 1800               | 750                      | 85                                                                                      | 2100                | 65                         |
|            |                    | 1000                     | 115                                                                                     | 3650                | 140                        |
| ВДН-20-П   | 2000               | 750                      | 175                                                                                     | 2800                | 160                        |
|            |                    | 1000                     | 225                                                                                     | 4700                | 360                        |
| ВДН-20-Пу  | 2000               | 750                      | 125                                                                                     | 2600                | 110                        |
|            |                    | 1000                     | 165                                                                                     | 4500                | 255                        |
| ВДН-22-П   | 2200               | 590                      | 190                                                                                     | 2100                | 115                        |
|            |                    | 760                      | 210                                                                                     | 3300                | 230                        |
| ВДН-24-П   | 2400               | 590                      | 210                                                                                     | 2250                | 180                        |
|            |                    | 760                      | 275                                                                                     | 3550                | 355                        |
| ВДН-26-П   | 2600               | 590                      | 280                                                                                     | 2950                | 260                        |
|            |                    | 760                      | 350                                                                                     | 4650                | 530                        |
| ВДН-28-Пу  | 2800               | 590                      | 240                                                                                     | 3600                | 350                        |
|            |                    | 760                      | 300                                                                                     | 5500                | 700                        |

**Техническая характеристика дымососов**

| Тип машины     | Диаметр рабочего колеса, мм | Частота вращения, об/мин | Параметры на режиме максимального К.П.Д. |              |                            |                           |
|----------------|-----------------------------|--------------------------|------------------------------------------|--------------|----------------------------|---------------------------|
|                |                             |                          | Подача, м <sup>3</sup>                   | Давление, Па | Потребляемая мощность, кВт | Температура расчетная, °C |
| ДН-9           | 900                         | 750                      | 6,8                                      | 500          | 1,2                        | 200                       |
|                |                             | 1000                     | 9,5                                      | 850          | 2,7                        |                           |
|                |                             | 1500                     | 14,0                                     | 1900         | 9,1                        |                           |
| ДН-10          | 1000                        | 750                      | 9,3                                      | 620          | 2,0                        | 200                       |
|                |                             | 1000                     | 13,0                                     | 1050         | 4,8                        |                           |
|                |                             | 1500                     | 18,0                                     | 2400         | 15,0                       |                           |
| ДН-11,2        | 1120                        | 750                      | 13,5                                     | 770          | 3,5                        | 200                       |
|                |                             | 1000                     | 17,6                                     | 1320         | 8,2                        |                           |
|                |                             | 1500                     | 25,0                                     | 2900         | 25,0                       |                           |
| ДН-12,5        | 1250                        | 750                      | 18,5                                     | 960          | 6,0                        | 200                       |
|                |                             | 1000                     | 24,2                                     | 1540         | 14,0                       |                           |
|                |                             | 1500                     | 35,0                                     | 3800         | 45,0                       |                           |
| ДН-15          | 1500                        | 1000                     | 50,0                                     | 2300         | 40,0                       | 200                       |
| ДН-17          | 1700                        | 1000                     | 76,0                                     | 3000         | 73,0                       | 200                       |
| ДН-17          | 1700                        | 750                      | 57,0                                     | 1700         | 31,0                       | 200                       |
| ДН-19          | 1900                        | 1000                     | 105,0                                    | 4800         | 172,0                      | 100                       |
|                |                             | 750                      | 79,0                                     | 2700         | 72,0                       |                           |
|                |                             | 600                      | 63,0                                     | 1730         | 38,0                       |                           |
| ДН-21          | 2100                        | 1000                     | 144,0                                    | 5800         | 276,0                      | 100                       |
|                |                             | 750                      | 110,0                                    | 3300         | 124,0                      |                           |
|                |                             | 600                      | 90,0                                     | 2120         | 65,0                       |                           |
| ДН-22          | 2200                        | 750                      | 144,0                                    | 3400         | 172,0                      | 100                       |
| ДН-24          | 2400                        | 750                      | 185,0                                    | 4000         | 262,0                      | 100                       |
| ДН-26          | 2600                        | 750                      | 237,0                                    | 4700         | 395,0                      | 100                       |
|                |                             | 600                      | 190,0                                    | 3000         | 210,0                      |                           |
| ДН-22x2-0,62   | 2200                        | 750                      | 285,0                                    | 3400         | 349,0                      | 100                       |
| ДН-22x2-0,62ГМ |                             | 600                      | 230,0                                    | 2190         | 183,0                      |                           |
| ДН-24x2-0,62   | 2400                        | 750                      | 370,0                                    | 4000         | 525,0                      | 100                       |
| ДН-26x2-0,62   | 2600                        | 750                      | 475,0                                    | 4700         | 790,0                      | 100                       |

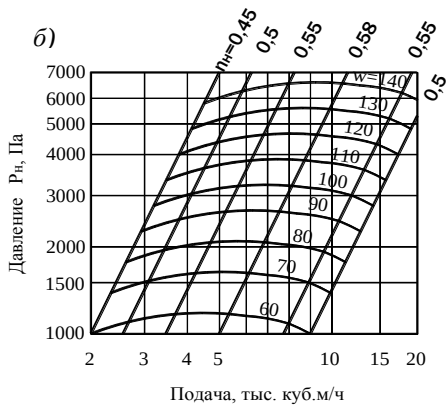
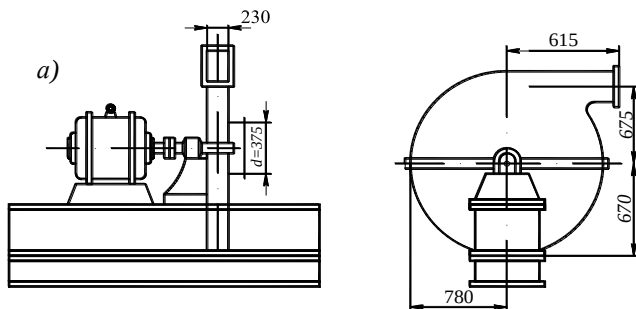


### Центробежный вентилятор среднего давления ЦП7-40



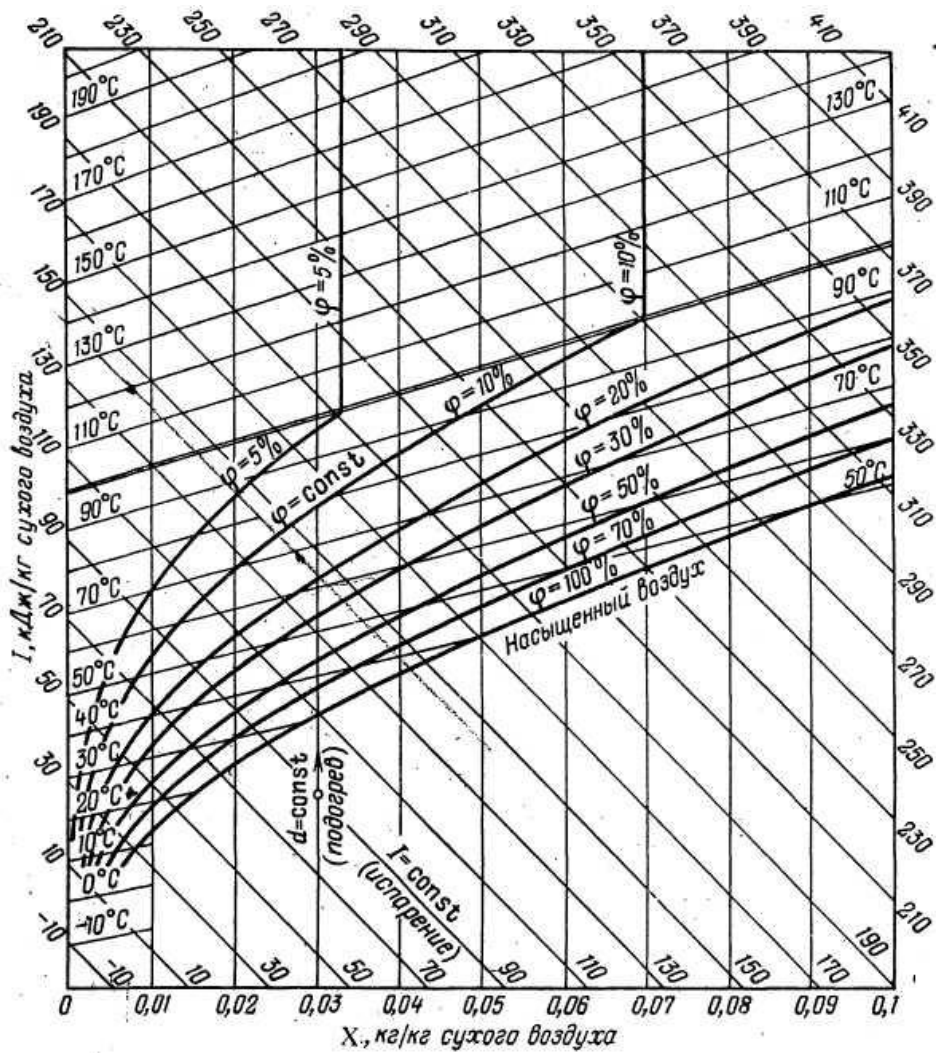
а – схема вентилятора; б – характеристики вентилятора:  $\eta_n$  – КПД вентилятора,  $\omega$  – угловая скорость вращения колеса, рад/с

# Центробежный вентилятор высокого давления ЦВ-18



*a* – схема вентилятора; *б* – характеристики вентилятора:  $\eta_n$  – КПД вентилятора,  $\omega$  – угловая скорость вращения колеса, рад/с.

# Диаграмма состояния влажного воздуха



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Касаткин, А.Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – 2-е изд., стер. и дораб. – М.: Альянс, 2005. – 753 с.
2. *Дытнерский, Ю.И.* Процессы и аппараты химической технологии. В 2 ч. Ч. 2. Массообменные процессы и аппараты / Ю.И. Дытнерский. – М.: Химия, 2002. – 368 с.
3. *Сажин, Б.С.* Основы техники сушки / Б.С. Сажин. – М.: Химия, 1984. – 320 с.
4. *Лыков, М.В.* Сушка в химической промышленности / М.В. Лыков. – М.: Химия, 1970. – 429 с.
5. *Лыков, М.В.* Распылительные сушилки / М.В. Лыков, Б.И. Леончик. – М.: Машиностроение, 1966. – 330 с.
6. *Муштаев, В.И.* Сушка дисперсных материалов / В.И. Муштаев, В. М. Ульянов. – М.: Химия, 1988. – 352 с.
7. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника / под общ. ред. А.В. Клименко и В.М. Зорина. – М.: Издательский дом МЭИ, 2004 – 630 с.
8. *Кокшарев, А.В.* Тепловые установки / А.В. Кокшарев, А.Н. Кучеренко. – К.: Высшая школа, 1990. – 335 с.
9. *Муштаев, В.И.* Конструирование и расчет аппаратов со взвешенным слоем / В.И. Муштаев, А.С. Тимонин, В.Я. Лебедев. – М.: Химия, 1991. – 344 с.
10. *Роговой, М.И.* Теплотехнологическое оборудование керамических заводов / М.И. Роговой. – М.: Стройиздат, 1983. – 367 с.
11. *Кашкаев, И.С.* Производство глиняного кирпича / И.С. Кашкаев, Е.Ш. Шейман. – М.: Высшая школа, 1978. – 248 с.
12. *Черкасский, В.М.* Насосы, вентиляторы, компрессоры / В. М. Черкасский. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 416 с.
13. *Доманский, И.В.* Машины и аппараты химических производств: учебное пособие / И.В. Доманский, В.П. Исаков, Г.М. Островский; под общ. ред. В.Н. Соколова. – С-П.: Политехника, 1992. – 327 с.
14. *Зиганшин, М.Г.* Проектирование аппаратов пылегазоочистки / М.Г. Зиганшин, А.А. Колесник, В.Н. Посохин. – М.: Экспресс-3М, 1998. – 505 с.
15. *Губарева, В.В.* Термовлажностные и низкотемпературные теплотехнологические процессы и установки. Ч. 1. Сушка: учеб. пособие / В.В. Губарева, В. П. Кожевников, М. С. Шиманская. – Белгород: Изд-во БГТУ; БИЭИ, 2009. – 140 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение.....                                                                                    | 3  |
| 1. Процессы сушки в конвективных сушилках.....                                                   | 5  |
| 1.1. Классификация и свойства влажного материала.....                                            | 6  |
| 1.2. Кинетика процесса сушки.....                                                                | 10 |
| 2. Конструкции конвективных сушильных установок.....                                             | 16 |
| 2.1. Сушилки для твердых дисперсных материалов .....                                             | 16 |
| 2.2. Сушилки для штучных, массивных, крупногабаритных<br>материалов и изделий .....              | 31 |
| 2.3. Сушилки для жидкотекучих материалов .....                                                   | 35 |
| 2.4. Теплотехнологические схемы конвективных сушильных<br>установок.....                         | 40 |
| 3. Вспомогательное оборудование сушильных установок.....                                         | 45 |
| 3.1. Горелочные устройства и топки.....                                                          | 45 |
| 3.2. Аппараты пылеочистки.....                                                                   | 47 |
| 3.3. Питатели и затворы.....                                                                     | 53 |
| 4. Расчет конвективных сушильных установок.....                                                  | 55 |
| 4.1. Литературный обзор.....                                                                     | 55 |
| 4.2. Материальный расчет сушилки.....                                                            | 55 |
| 4.3. Внутренний баланс сушильной камеры.....                                                     | 56 |
| 4.4. Построение на $I$ - $X$ диаграмме процесса сушки воздухом ...                               | 57 |
| 4.5. Определение параметров сушильного агента при сушке<br>смесью топочных газов с воздухом..... | 58 |
| 4.6. Построение на $I$ - $X$ диаграмме процесса сушки смесью<br>топочных газов с воздухом.....   | 60 |
| 4.7. Построение на $I$ - $X$ диаграмме процесса сушки с рецирку-<br>ляцией воздуха.....          | 62 |
| 4.8. Расчет расходов сушильного агента, греющего пара и<br>топлива.....                          | 63 |
| 4.9. Расчет рабочего объема сушилки.....                                                         | 64 |
| 4.10. Расчет коэффициента теплоотдачи.....                                                       | 66 |
| 4.11. Расчет основных параметров туннельной сушилки.....                                         | 67 |
| 4.12. Расчет параметров барабанной сушилки.....                                                  | 68 |
| 4.13. Расчет параметров сушилки "кипящего" слоя.....                                             | 69 |
| 4.14. Расчет параметров пневматической трубы-сушилки                                             | 72 |
| 4.14. Расчет распылительной сушилки.....                                                         | 74 |
| 5. Расчет вспомогательного оборудования.....                                                     | 77 |
| 5.1. Расчет футеровки и тепловой изоляции.....                                                   | 77 |
| 5.2. Расчет калорифера при сушке воздухом.....                                                   | 78 |
| 5.3. Расчет топки.....                                                                           | 80 |
| 5.4. Расчет питателей и затворов.....                                                            | 80 |
| 5.5. Выбор и расчет пылеуловителей.....                                                          | 81 |

|                                                                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.6. Расчет гидравлического сопротивления сушильной установки.....                                                                                | 83  |
| 5.7. Выбор вентиляторов (дымососов).....                                                                                                          | 85  |
| 5.8. Задания на курсовое проектирование.....                                                                                                      | 88  |
| <b>Приложения:</b> .....                                                                                                                          | 92  |
| Средняя удельная теплоемкость сухих материалов при температуре от 0° до 100 °С.....                                                               | 92  |
| Расчетные характеристики природного газа.....                                                                                                     | 92  |
| Расчетные характеристики мазута и твердых топлив.....                                                                                             | 93  |
| Свойства насыщенного водяного пара в зависимости от давления.....                                                                                 | 93  |
| Давление насыщенного водяного пара $P_n$ при отрицательной температуре $t_0$ .....                                                                | 94  |
| Физические параметры.....                                                                                                                         | 95  |
| Теплофизические свойства дымовых газов, полученных при сжигании природного газа среднего химического состава.....                                 | 96  |
| Среднемесячные значения температуры $t_0$ и относительной влажности $\phi_0$ воздуха для различных городов России и стран ближнего зарубежья..... | 97  |
| Параметры сушки материалов в сушильных барабанах.....                                                                                             | 98  |
| Продолжительность сушки изделий в туннельных сушилках.....                                                                                        | 99  |
| Основные размеры барабанных сушилок (ГОСТ 11875-79).....                                                                                          | 99  |
| Значение коэффициента мощности $\sigma$ .....                                                                                                     | 100 |
| Ориентировочное значение коэффициента $a_2$ .....                                                                                                 | 101 |
| Рекомендуемая толщина футеровки.....                                                                                                              | 101 |
| Рекомендуемые диаметр и высота цилиндрической части сушильных аппаратов кипящего слоя.....                                                        | 101 |
| Основные размеры распылительных сушилок (ГОСТ 18906-80).....                                                                                      | 102 |
| Техническая характеристика оребренных калориферов средней (КФСО) и большой модели (КФБО).....                                                     | 103 |
| Коэффициент теплопередачи $K$ в оребренном калорифере, Вт/(м <sup>2</sup> ·К).....                                                                | 103 |
| Сопротивление оребренных калориферов движению воздуха.....                                                                                        | 104 |
| Основные размеры циклонов НИИОГАЗ.....                                                                                                            | 104 |
| Коэффициенты гидравлического сопротивления циклонов.....                                                                                          | 105 |
| Технические характеристики рукавных фильтров.....                                                                                                 | 105 |
| Рекомендуемые значения газовой нагрузки в рукавных фильтрах.....                                                                                  | 106 |
| Техническая характеристика электрофильтров.....                                                                                                   | 106 |
| Коэффициенты местных сопротивлений.....                                                                                                           | 107 |
| Техническая характеристика дутьевых вентиляторов.....                                                                                             | 110 |
| Техническая характеристика дымососов.....                                                                                                         | 111 |
| Центробежный вентилятор среднего давления ЦП7-40.....                                                                                             | 112 |

|                                                      |     |
|------------------------------------------------------|-----|
| Центробежный вентилятор высокого давления ЦВ-18..... | 113 |
| Диаграмма состояния влажного воздуха.....            | 114 |
| Библиографический список .....                       | 115 |

Учебное издание

**ГУБАРЕВА** Валентина Васильевна

**Расчет и проектирование  
конвективных сушильных установок**

Учебное пособие

Подписано в печать 09.09.14. Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 6,9. Усл. изд. л. 7,4. .

|       |      |       |      |
|-------|------|-------|------|
| Тираж | экз. | Заказ | Цена |
|-------|------|-------|------|

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете  
им. В.Г. Шухова  
308012, г.Белгород, ул. Костюкова, 46