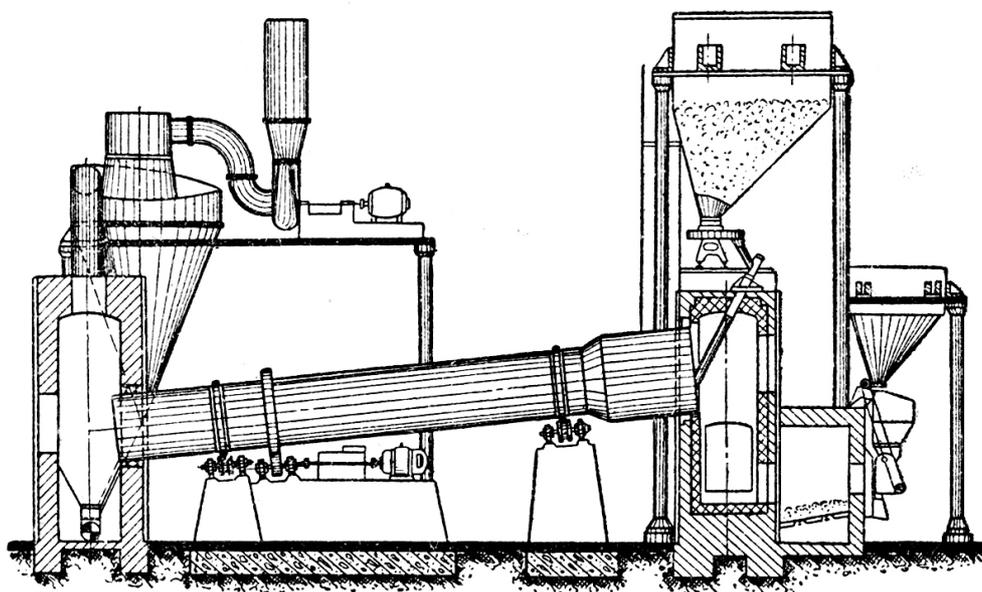


В.Ю. Лакомкин, С.Н. Смородин

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ БАРАБАННОЙ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Учебно-методическое пособие
для выполнения курсового проекта



Санкт-Петербург
2012

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ РАСТИТЕЛЬНЫХ
ПОЛИМЕРОВ»**

В.Ю. Лакомкин, С.Н. Смородин

**РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
БАРАБАННОЙ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ**

**Учебно-методическое пособие
для выполнения курсового проекта**

**Санкт-Петербург
2012**

УДК 66.01(07)
ББК 35.1я7
Л 195

Лакомкин В.Ю., Смородин С.Н. Расчет и проектирование барабанной сушильной установки: учебно-методическое пособие для выполнения курсового проекта / СПб ГТУ РП. СПб., 2012. -38с., ил.12.

В настоящем пособии приведена методика теплового и гидравлического расчета барабанной сушильной установки. графические материалы для выполнения чертежа, а также перечень необходимой литературы и вспомогательные таблицы справочных величин.

Предназначено для выполнения курсовых и дипломных проектов студентами факультета промышленной энергетики специальности 140104 «Промышленная теплоэнергетика», 140105 «Энергетика теплотехнологий», а также студентами бакалавриата и магистратуры по направлению 140100 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Рецензент: канд.техн.наук, доцент кафедры теплосиловых установок и тепловых двигателей СПб ГТУ РП Т.Ю. Короткова.

Подготовлено и рекомендовано кафедрой промышленной теплоэнергетики СПб ГТУ РП (протокол № 3 от 12 ноября 2012г.).

Утверждено к изданию методической комиссией факультета промышленной энергетики СПб ГТУ РП (протокол № 2 от 4 декабря 2012г.).

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров в качестве учебно-методического пособия.

Редактор и корректор Т.А.Смирнова
Техн. редактор Л.Я.Титова

Темплан 2012 г., поз. 95

Подп.к печати 06.12.2012. Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага тип. №1.
Печать офсетная. Печ. л. 2,5 . Уч.-изд. л. 2,5 . Тираж 100 экз. Изд. №95.
Цена “С”. Заказ

Ризограф Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров. 198095, Санкт-Петербург, ул.Ивана Черных, 4

© Санкт-Петербургский
государственный технологический
университет растительных полимеров,
2012

© В.Ю. Лакомкин, С.Н. Смородин, 2012

КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП РАБОТЫ БАРАБАННОЙ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Барабанные конвективные сушильные установки широко применяются для сушки различных мелкокусковых и зернистых материалов в химической и силикатной промышленности, а также для сушки топлива на электростанциях и углеобогатительных предприятиях. В целлюлозно-бумажном производстве сушильные барабаны могут быть использованы для сушки лигнина, древесных отходов, местных топлив и других влажных материалов.

Барабанная сушилка (рис. 1) представляет собой установленный наклонно вращающийся барабан, на который надеты два бандаж и зубчатый венец привода. Бандажми барабан опирается на четыре ролика, установленные на рамах. Два опорных ролика ограничивают осевое смещение корпуса барабана. На торцах барабана имеются камеры: в одной предусмотрен ввод газов и загрузка влажного материала, в другой - вывод сухого продукта и отработавшего сушильного агента. За счет установки барабана под небольшим наклоном (до 6°) материал постепенно передвигается к разгрузочной камере.

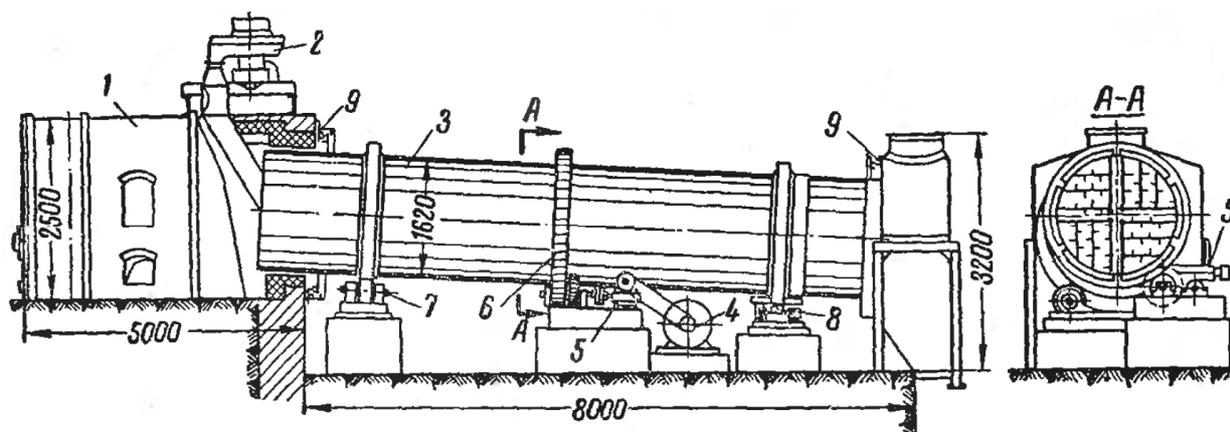


Рис. 1. Барабанная сушилка:

- 1 – топка; 2 – тарельчатый питатель; 3 – корпус барабана;
- 4 – электродвигатель; 5 – редуктор; 6 – зубчатая передача;
- 7 – опорные ролики; 8 – опорно-упорные ролики; 9 – лабиринтовые уплотнения

Материал поступает в барабан по течке, которая в некоторых случаях оборудована специальным подающим устройством (рис. 2). Иногда течки снабжены рубашкой, в которой движется охлаждающая вода или воздух. Это позволяет избежать прилипания материала к стенке, омываемой горячими газами.

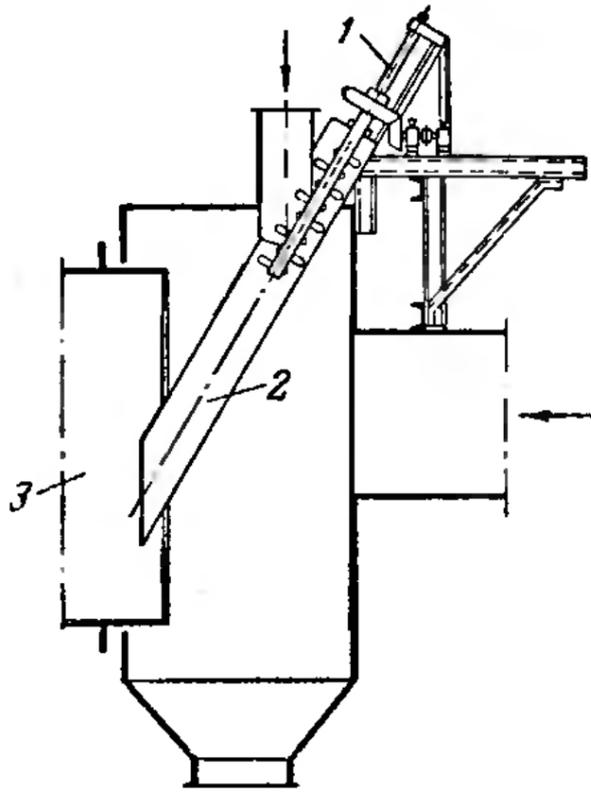


Рис. 2. Загрузочное устройство барабана:
 1 - шнек; 2 – течка; 3 - барабан

Внутри барабана, в зависимости от свойств высушиваемого материала, устанавливают различные насадки (рис. 3). При вращении барабана лопасти насадки подхватывают материал, поднимают его и сбрасывают, при этом поверхность его соприкосновения с газами увеличивается. Падая, материал омывается сушильным агентом и высушивается.

Из загрузочной камеры материал поступает на приемно-винтовую насадку, приваренную к корпусу барабана под углом (рис. 3а). Приемно-винтовой насадкой материал подается на основную насадку. Для крупнокусковых материалов, склонных к налипанию, на внутренние стенки барабана устанавливается подъемно-лопастная насадка (рис. 3б, в, г, и). Для материалов с хорошей сыпучестью устанавливается секторная насадка (рис. 3 д, е). Следует отметить, что расположение лопаток в секторах должно быть таким, чтобы человек мог свободно очистить насадки от налипшего материала. На рис. 3з показаны самоочищающиеся прямые поворотные лопатки, которые используют при сушке мажущихся материалов. Для материалов с очень мелкими частицами, дающих большое пыление, применяется перевалочная система с закрытыми ячейками (рис. 3ж). В зависимости от внутреннего устройства барабана заполнение его материалом может достигать до 20-28 %.

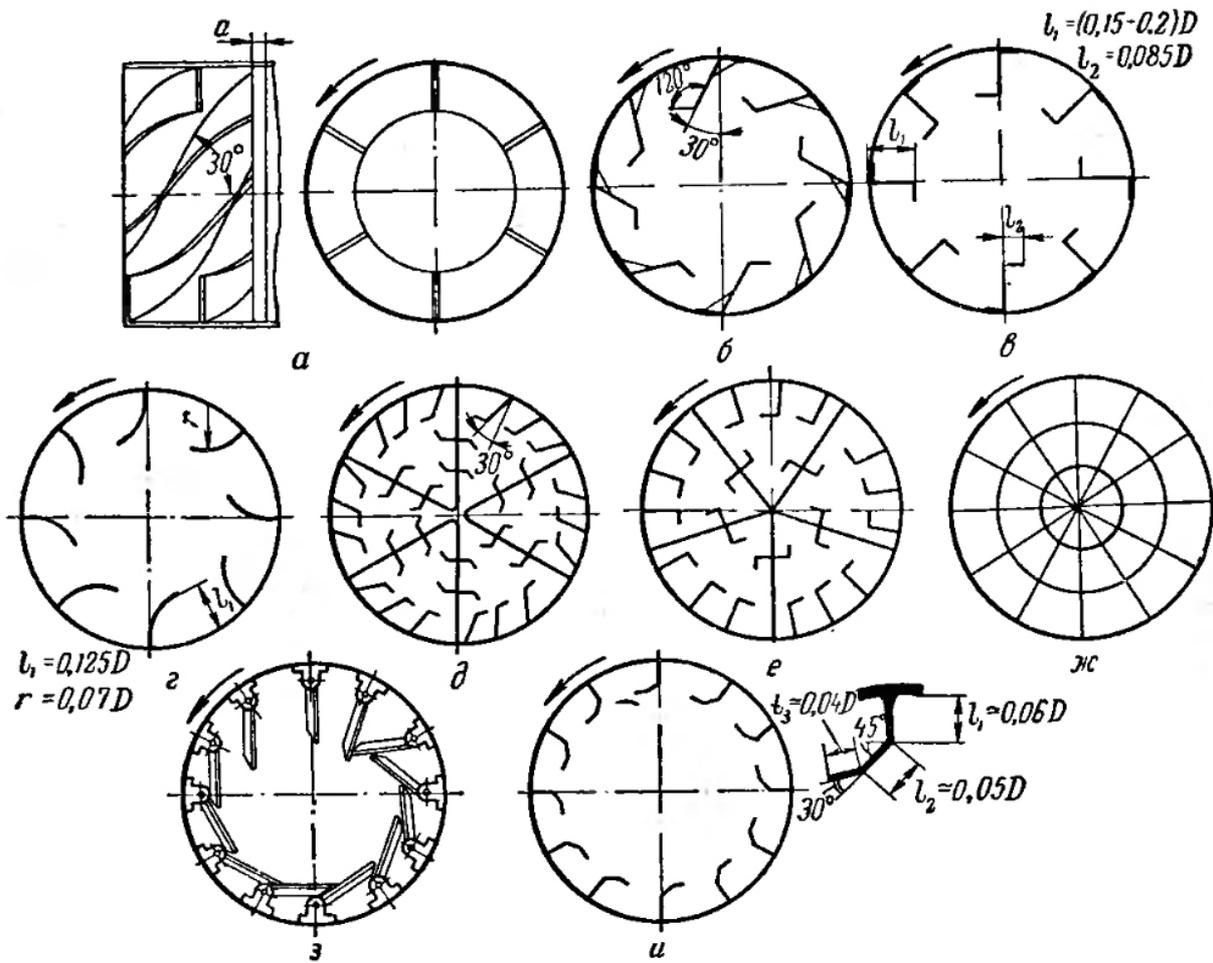


Рис. 3. Схемы различных типов внутренних устройств барабана

Для барабанов, работающих на дымовых газах, вместо приемной камеры предусмотрена установка специального листа, который крепится к топке. На обоих торцах барабана ставятся уплотняющие устройства, препятствующие выходу дымовых газов, но не мешающие вращению барабана (рис.4а,б).

На рис.5 показан общий вид установки сушильного барабана со всем вспомогательным оборудованием. Со стороны выхода отработавшей смеси воздуха и газов располагают пылеотделительное и вытяжное устройства. Дымосос обычно располагается за циклоном, так как при этом его ротор менее подвергается износу частицами высушенного продукта. При малых сопротивлениях системы вместо дымососа устанавливают вытяжную трубу. У конца барабана расположено устройство для удаления высушенного материала – шнек или затвор-мигалка.

Барабанные сушилки в России изготавливаются стандартных размеров согласно ГОСТ 27120-86, 27134-86, 11875-88.

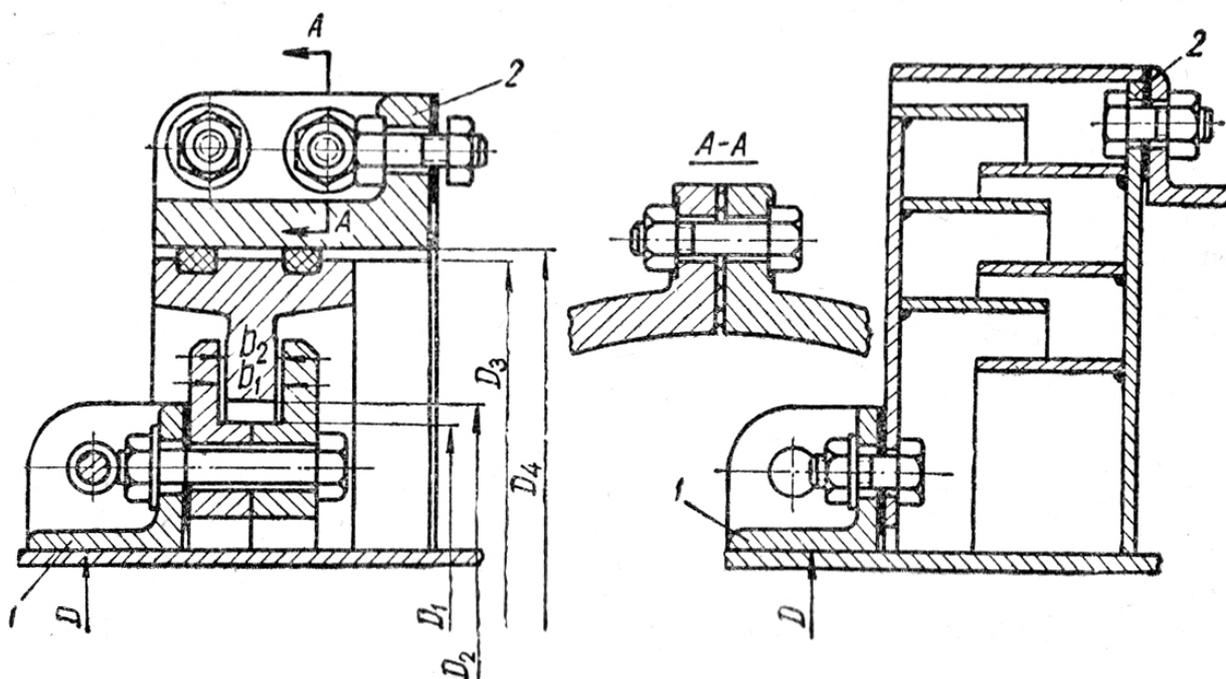


Рис. 4. Типы уплотняющих устройств:

а - плавающее сальниковое; б - лабиринтное

Принципиальная схема прямоточной барабанной сушильной установка показана на рис.6. Влажный материал из бункера 1 с помощью питателя 2 подается во вращающийся сушильный барабан 3. Параллельно материалу в сушилку подается сушильный агент, образующийся от сгорания топлива в топке 4 и смешения топочных газов с воздухом в смешительной камере 5. Воздух в топку и смешительную камеру подается вентиляторами 6 и 7. Высушенный материал с противоположного конца сушильного барабана поступает в промежуточный бункер 8, а из него на транспортирующее устройство 9. Отработанный сушильный агент перед выбросом в атмосферу очищается от пыли в циклоне 10. Транспортировка сушильного агента через сушильную установку осуществляется с помощью вентилятора 11. При этом установка находится под небольшим разрежением, что исключает утечку сушильного агента через неплотности установки. Барабан приводится во вращение электродвигателем через зубчатую передачу 12.

Существуют барабанные сушилки других конструкций. На рис.7 приведена схема двухходовой барабанной сушилки. Она представляет собой два барабана - внутренний и наружный. Внутренний барабан 2 состоит из трех частей, соединенных между собой болтами. Для компенсации температурных расширений в местах соединения поставлены специальные прокладки. Наружный барабан цельносварной. Внутренняя насадка обоих барабанов подъемно-лопастная. Материал из питателя 1 поступает во внутренний барабан. Сюда же подают агент сушки при температуре до 700 °С. Далее материал поступает во внешний барабан для окончательной сушки, отсюда в камеру, затем удаляется из сушилки. Газы из камеры направляются на очистку в циклоны.

Барabanные сушилки с комбинированным обогревом (рис.8) находят применение при сушке термоустойчивых материалов, так как процесс осуществляется в противотоке с сушильным агентом и в контакте с горячими стенками. Высушиваемый материал перемещается в кольцевом пространстве между стенками барабана и центральной трубы. Дымовые газы из топки 1 поступают внутрь трубы и отдают часть тепла высушиваемому материалу через стенку. Затем газы поступают в кольцевое пространство, вступая в контакт с материалом. Процесс сушки проходит интенсивно, с малым расходом сушильного агента, следовательно, и с минимальным пылеуносом.

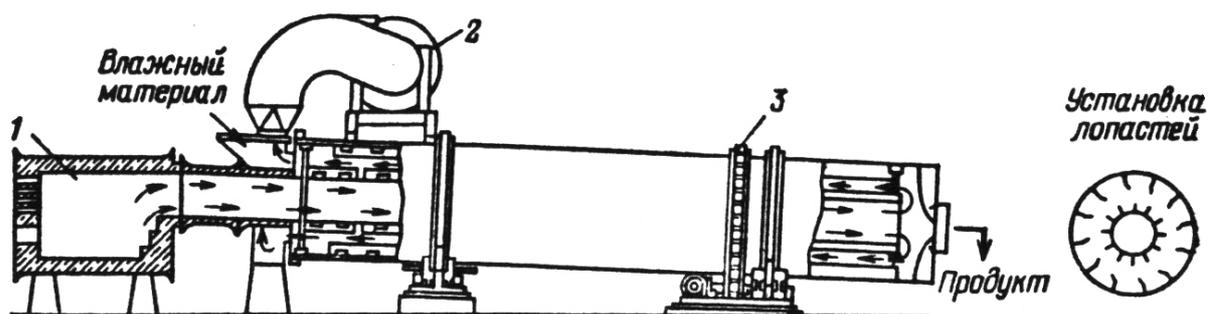


Рис.8. Барабанная сушилка с комбинированным подводом теплоты:
1 – топка; 2 – дымосос; 3 – барабан

На рис.9 показана барабанная сушилка с поперечной продувкой слоя материала агентом сушки. Благодаря поперечному движению материала и сушильного агента эти аппараты могут работать при более низких начальных температурах газа.

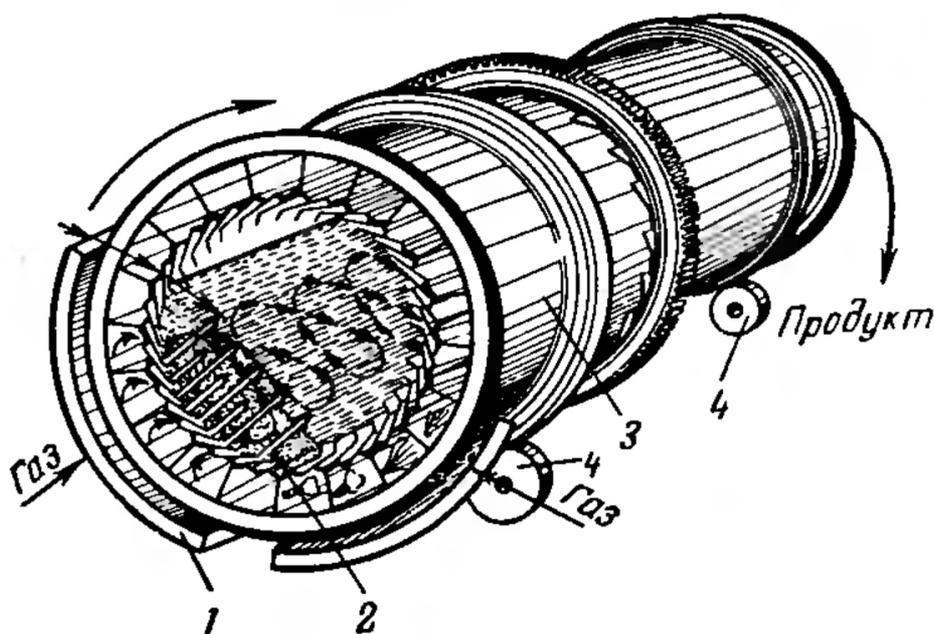


Рис.9. Барабанная сушилка с поперечной продувкой слоя материала:
1 – газовый короб; 2 – лопатки; 3 – барабан; 4 – опорные ролики

В барабанных сушилках сушка в большинстве случаев производится топочными газами. Топочные газы получают в специальных топках, и если они имеют высокую температуру, то для получения сушильного агента с требуемой температурой их разбавляют воздухом. При использовании рециркуляции сушильного агента необходима установка специальных циклонов для очистки отработавших газов от пыли. Иногда в качестве сушильного агента вместо топочных газов используется воздух, нагреваемый в паровых калориферах до 100-150°С.

Конструкции топок для получения сушильного агента и пылеулавливающих устройств приведены в методических указаниях «Расчет и проектирование пневматической сушильной установки».

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СУШИЛЬНОГО БАРАБАНА

В табл. 1 (см. Приложения) приведены обозначения физических величин, принятых в настоящем учебно-методическом пособии. Исходные данные для расчета барабанной сушильной установки, согласно Вашему варианту, приведены в табл. 2 (см. Приложения).

Возможные схемы получения сушильного агента: А – прямоточная; Б – с камерой смешения (задан коэффициент избытка воздуха в топке).

Температуру материала и топлива (кроме мазута) условно принимаем равной температуре окружающего воздуха.

Материальный баланс сушильной установки

Начальное, критическое и конечное влагосодержания сушеного материала

$$u_0 = W_0 / (100 - W_0), \text{ кг/кг}; \quad u_k = W_k / (100 - W_k), \text{ кг/кг};$$

$$u_2 = W_2 / (100 - W_2), \text{ кг/кг}.$$

Начальное и конечное влагосодержания могут быть любыми (начать и закончить процесс сушки можно в любой момент), но критическое влагосодержание зависит от свойств материала. Критическое влагосодержание характеризует переход от испарения поверхностной к удалению внутренней влаги. Если критическое влагосодержание отсутствует, то у материала имеется только поверхностная влага.

Производительность сушильной установки по абсолютно сухой массе

$$G_{\text{сух}} = G_2 / (1 + u_2), \text{ кг/ч}.$$

Расход влажного материала

$$G_1 = G_{\text{сух}} (1 + u_0), \text{ кг/ч}.$$

Количество испаряемой влаги

$$W = G_{\text{сух}} (u_0 - u_2), \text{ кг/ч}.$$

Состав и теплота сгорания топлива

Состав твердого топлива на рабочую массу берется по заданию (см. Приложения, табл. 3)

$$W^r + A^r + C^r + H^r + N^r + O^r + S_{p+o}^r = 100 \% .$$

Если для получения топочных газов используется твердое топливо, которое сушится в установке, необходимо выполнить перерасчет элементного состава топлива на конечную влажность W_2 , при которой топливо выходит из сушилки.

В задании дано топливо такое же, как у Вас, но с другой влажностью. Вы вначале сушите топливо в сушилке до влажности W_2 , а затем часть этого топлива сжигаете для получения дымовых газов.

$$A_2^r = A^r \cdot (100 - W_2^r) / (100 - W^r) = A^r \cdot K, \%;$$

$$C_2^r = K \cdot C^r; \quad H_2^r = K \cdot H^r; \quad N_2^r = K \cdot N^r; \quad O_2^r = K \cdot O^r; \quad S_{(p+o)2}^r = K \cdot S_{(p+o)}^r;$$

$$W_2^r + A_2^r + C_2^r + H_2^r + N_2^r + O_2^r + S_{(p+o)2}^r = 100 \% .$$

Здесь K – коэффициент пересчета равный $K = (100 - W_2^r) / (100 - W^r)$.

В дальнейших расчетах используются новые значения элементного состава. Индекс «2» для простоты отбрасываем.

По данной методике все расчеты ведутся на высшую теплоту сгорания топлива и на кг топлива (в том числе и для газа).

Низшая теплота сгорания топлива берется по заданию (см. Приложения, табл. 3). Если Вы не знаете теплоту сгорания, то высшую теплоту сгорания твёрдого и жидкого топлива определяют по формуле Д.И.Менделеева

$$Q_s^r = 340C^r + 1260H^r - 109(O^r - S_{p+o}^r), \text{ кДж/кг}$$

или

$$Q_s^r = Q_i^r + 25,14 \cdot (9H^r + W^r), \text{ кДж/кг} .$$

Состав газообразного топлива берется в соответствии с заданием (см. Приложения, табл. 4).

Низшая теплота сгорания сухого газообразного топлива

$$Q_i^d = 22,4 (22,3 \text{ CH}_4 + 21,16 \text{ C}_2\text{H}_6 + 20,7 \text{ C}_3\text{H}_8 + 20,41 \text{ C}_4\text{H}_{10} + \\ + 4,53 \text{ CO} + 53,42 \text{ H}_2 + 6,87 \text{ H}_2\text{S}), \text{ кДж/кг} .$$

Высшая теплота сгорания газообразного топлива

$$Q_S^d = Q_i^d + 2514 \cdot \sum \frac{0,09 \cdot n}{12m + n} \cdot C_m H_n, \text{ кДж/кг.}$$

где $C_m H_n$ – составляющие газообразного топлива в процентах по массе.

Соотношение между единицами физических величин (работы, энергии и количества теплоты) и единицами в системе СИ приведено в Приложении, табл. 5.

Определение основных параметров топочных газов

Теоретическое количество воздуха, необходимое для полного сгорания твердого или жидкого топлива

$$L_o = 0,115C^r + 0,345H^r - 0,043(O^r - S_{p+o}^r), \text{ кг/кг.}$$

Теоретическое количество воздуха, необходимое для полного сгорания газообразного топлива

$$L_o = 1,38 \cdot (0,0179 \cdot CO + 0,248 \cdot H_2 + 0,44 \cdot H_2S + \sum \frac{m+n/4}{12 \cdot m+n} \cdot C_m H_n - O_2), \text{ кг/кг.}$$

Коэффициент избытка воздуха в топке (только схема а) для твердого или жидкого топлива

$$\beta_T = \frac{Q_S^r \cdot z_T + c_{ТЛ} t_{ТЛ} - (1 - \frac{9H^r + W^r + A^r}{100}) c_{сг} t_{сг} - \frac{9H^r + W^r}{100} i_{п}}{L_o (c_{сг} t_{сг} + \frac{i_{п} d_o}{1000} - I_o)} + \frac{W_{п} (i'_{п} - i_{п})}{L_o (c_{сг} t_{сг} + \frac{i_{п} d_o}{1000} - I_o)}.$$

Для газообразного топлива коэффициент избытка воздуха в топке

$$\beta_T = \frac{Q_S^r \cdot z_T + c_{ТЛ} t_{ТЛ} - (1 - \sum \frac{0,09 n}{12 m + n} C_m H_n) c_{сг} t_{сг} - (\sum \frac{0,09 n}{12 m + n} C_m H_n) i_{п}}{L_o (c_{сг} t_{сг} + \frac{i_{п} d_o}{1000} - I_o)}$$

Здесь $W_{п}, i'_{п}$ – масса и энтальпия водяного пара, применяемого для дутья или для распыливания топлива; $i_{п}$ – энтальпия водяного пара при температуре $t_{сг} = t_1$; $c_{сг}$ – средняя массовая теплоёмкость продуктов

сгорания при температуре $t_{сг} = t_1$ (см. Приложения, табл. 6). При $\beta_T > 5$ теплоёмкость продуктов сгорания равна теплоёмкости воздуха. Если вы не сжигаете мазут $W_{п} = 0$.

Масса сухих продуктов сгорания для твёрдого или жидкого топлива

$$G_{сг} = 1 + \beta_T L_o - \frac{A^r + 9 \cdot H^r + W^r}{100}, \text{ кг/кг.}$$

Масса сухих продуктов сгорания для газообразного топлива

$$G_{сг} = 1 + \beta_T L_o - \sum \frac{0,09 n}{12 \cdot m + n} C_m H_n, \text{ кг/кг.}$$

Масса водяных паров в составе продуктов сгорания для твёрдого или жидкого топлива

$$G_{п} = \frac{9H^r + W^r}{100} + \frac{\beta_T L_o d_o}{1000} + W_{п}, \text{ кг/кг.}$$

Масса водяных паров в составе продуктов сгорания для сухого газообразного топлива

$$G_{п} = \sum \frac{0,09 n}{12 \cdot m + n} C_m H_n + \frac{\beta_T L_o d_o}{1000}, \text{ кг/кг.}$$

Энтальпия продуктов сгорания на выходе из топки

$$I_T = \frac{Q_s^r \cdot z_T + c_{тл} t_{тл} + \beta_T L_o I_o + W_{п} i'_{п}}{G_{сг}}, \text{ кДж/кг.}$$

Влагосодержание продуктов сгорания на выходе из топки

$$d_T = \frac{1000 \cdot G_{п}}{G_{сг}}, \text{ г/кг.}$$

Коэффициент избытка воздуха, дополнительно подаваемого в камеру смешения (только для схемы б)

$$\beta_{доп} = \frac{Q_s^r \cdot z_T + c_{тл} t_{тл} + \beta_T L_o I_o - G_{сг} c_{сг} t_{см} - G_{п} i_{см}}{L_o (c_v t_{см} + \frac{i_{см} d_o}{1000} - I_o)}.$$

Здесь $i_{см}$ – энтальпия водяного пара при температуре смеси $t_{см} = t_1$.

Энтальпия смеси продуктов сгорания и присадочного воздуха на выходе из камеры смешения (для схемы б)

$$I_{\text{см}} = \frac{Q_S^r \cdot z_T + c_{\text{ТЛ}} t_{\text{ТЛ}} + (\beta_{\text{доп}} + \beta_T) L_0 I_0}{G_{\text{сг}} + \beta_{\text{доп}} L_0}, \quad \text{кДж/кг}.$$

Кратность смешения продуктов сгорания и присадочного воздуха (для схемы б)

$$n = \frac{I_T - I_{\text{см}}}{I_{\text{см}} - I_0}$$

Влагосодержание смеси продуктов сгорания и присадочного воздуха на выходе из камеры смешения (для схемы б)

$$d_{\text{см}} = \frac{d_T + n \cdot d_0}{1 + n}, \quad \text{г/кг}.$$

Определение основных параметров сушильного агента в процессе сушки материала (по I-d диаграмме)

Температура материала на выходе из сушилки при $u_0 > u_k > u_2$

$$g_2 = g_M + (t_2 - g_M)(u_k - u_2)/u_k, \quad ^\circ\text{C}.$$

Температура материала на выходе из сушилки при $u_k > u_0$

$$g_2 = g_M + (t_2 - g_M)(u_0 - u_2)/u_0, \quad ^\circ\text{C}.$$

Температура материала на выходе из сушилки при $u_2 > u_k$ (или u_k – отсутствует)

$$g_2 = g_M, \quad ^\circ\text{C}.$$

На I-d диаграмме ставим точку на пересечении линий $I_T = I_1$ и $d_T = d_1$ (для схемы а) и $I_{\text{см}}$ и $d_{\text{см}}$ (для схемы б). Точка лежит на вершине угла, образованного линиями $I = \text{const}$ и $d = \text{const}$. Из вершины проводим луч процесса (примерно по биссектрисе) до линии $\varphi = 100\%$ и определяем температуру в точке пересечения. Она примерно совпадает по значению с температурой смоченного термометра g_M (рис. 10).

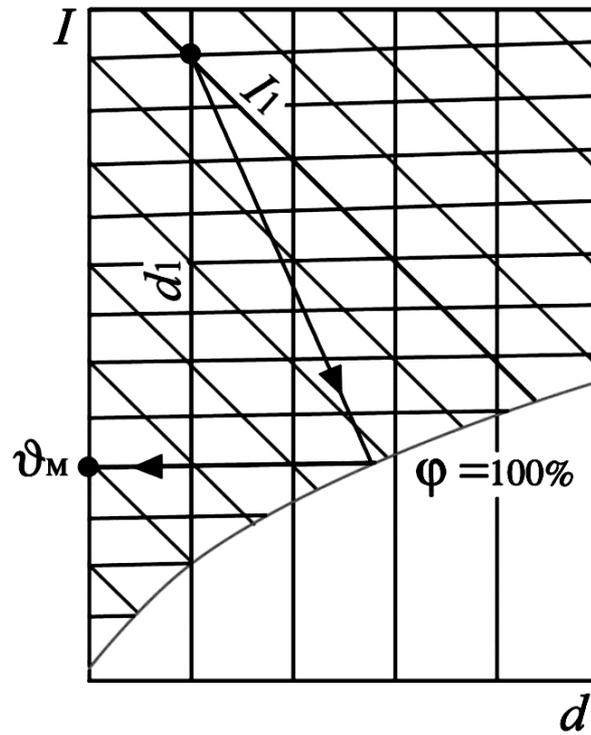


Рис. 10. Схема определения температуры смоченного термометра по I-d диаграмме

Удельный расход теплоты на испарение влаги

$$q_{\text{исп}} = (i_o + c_{\text{п}} t_2 - c_w g_o), \text{ кДж/кг.}$$

Удельный расход теплоты на нагрев материала

$$q_{\text{наг}} = \frac{(c_{\text{м}} + c_w \cdot u_2) \cdot (g_2 - g_o)}{u_o - u_2}, \text{ кДж/кг.}$$

Потери теплоты в окружающую среду от 10 до 12 %.

$$q_{\text{окр}} = (0,1 \div 0,12)(q_{\text{исп}} + q_{\text{наг}}), \text{ кДж/кг.}$$

Термовлажностное отношение, или угловой коэффициент процесса

$$D = c_w g_o - (q_{\text{наг}} + q_{\text{окр}}) = \frac{g_o(c_w u_o + c_{\text{м}}) - g_2(c_w u_2 + c_{\text{м}})}{(u_o - u_2)} - q_{\text{окр}}.$$

Энтальпия сушильного агента на выходе из сушильной установки

$$I_2 = \frac{c_{\text{в2}} \cdot t_2 \cdot D + \left(\frac{d_1}{1000} \cdot D - I_1\right)(i_o + c_{\text{п}} t_2)}{D - (i_o + c_{\text{п}} t_2)}, \text{ кДж/кг.}$$

Здесь: $I_1 = I_{\text{т}}$ и $d_1 = d_{\text{т}}$ (для схемы **а**); $I_1 = I_{\text{см}}$ и $d_1 = d_{\text{см}}$ (для схемы **б**);

$c_{\text{в2}}$ - теплоёмкость сушильного агента, равная теплоёмкости воздуха при температуре t_2 на выходе из сушильной установки.

Влагосодержание сушильного агента на выходе из сушильной установки

$$d_2 = d_1 + \frac{1000 (I_2 - I_1)}{D}, \text{ г/кг.}$$

Порядок построения процессов на I-d диаграмме

Сначала на I-d диаграмму наносится точка **0**, соответствующая параметрам наружного воздуха. Далее по рассчитанным значениям энтальпии I_T и влагосодержанию d_T строится точка **T**, соответствующая параметрам топочных газов на выходе из **топки**.

При отсутствии камеры смешения (рис.11а) координаты точек **T** и **1** совпадают.

При наличии камеры смешения (рис.11б) точка **C** или **CM**, соответствующая параметрам **смеси** на выходе из камеры смешения, лежит на прямой, соединяющей **0** и **T**. При этом параметры точек **C (CM)** и **1** совпадают.

Параметры точки **2** соответствуют состоянию сушильного агента на выходе из сушильной камеры, а линия, соединяющая точки **1** и **2** является линией действительного процесса сушки.

Расход топочных газов присадочного воздуха, сушильного агента и топлива

Расход сушильного агента для схем:

$$\text{а) } L_{\text{сг}} = \frac{1000 \cdot W}{d_2 - d_{\text{м}}} ; \quad \text{б) } L_{\text{сг}} = \frac{1000 \cdot W}{d_2 - d_{\text{см}}} .$$

Расход присадочного воздуха для схемы **(б)**

$$L_{\text{в}} = \frac{L_{\text{сг}} \cdot n}{1 + n}, \text{ кг/ч.}$$

Расход топочных газов для схемы **(б)**

$$L_{\text{т}} = \frac{L_{\text{сг}}}{1 + n}, \text{ кг/ч.}$$

Часовой расход топлива для схем:

$$\text{а) } B_{\text{т}} = \frac{L_{\text{сг}}}{G_{\text{сг}}} ; \quad \text{б) } B_{\text{т}} = \frac{L_{\text{сг}}}{G_{\text{сг}} (1 + n)}, \text{ кг/ч.}$$

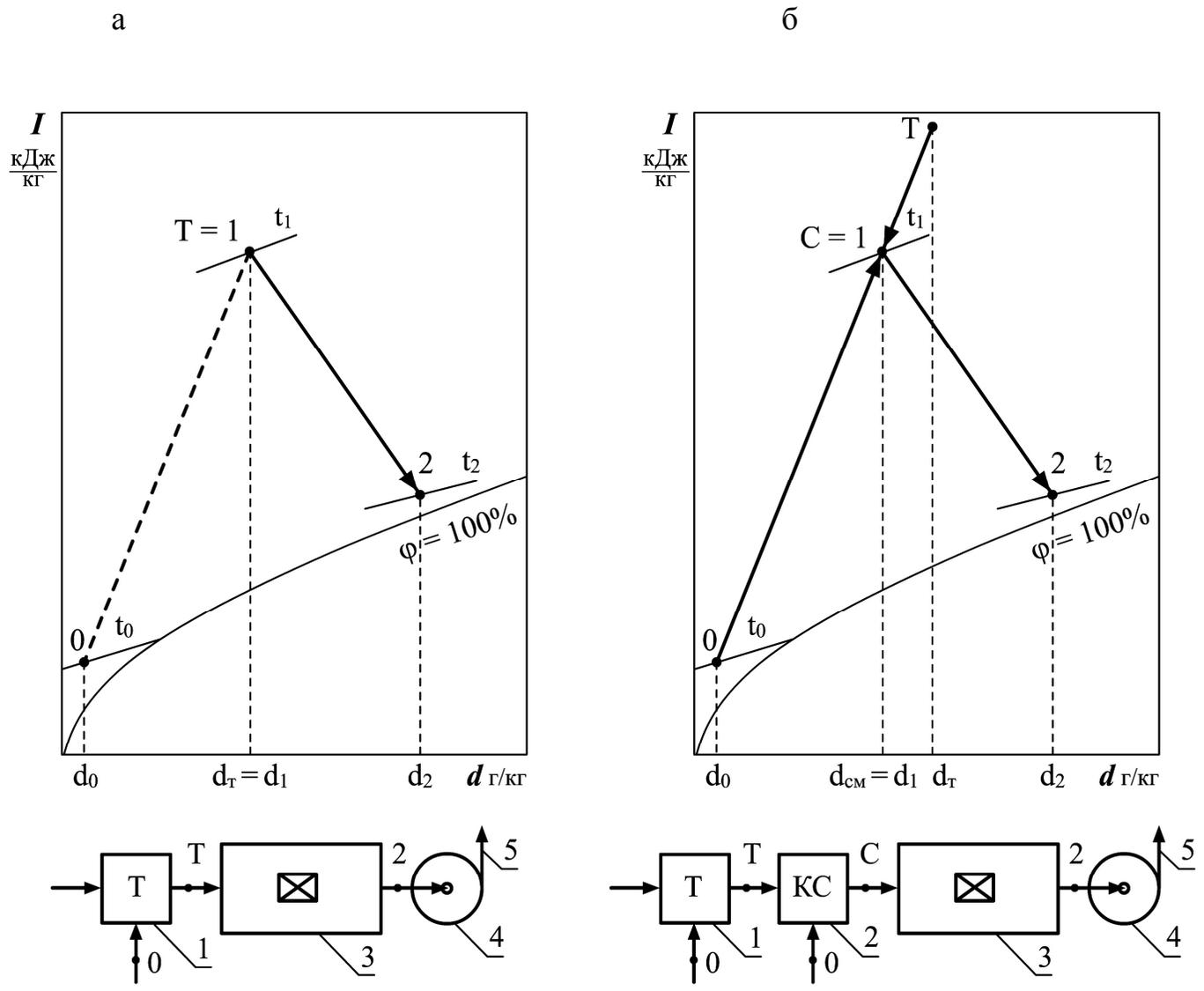


Рис.11. Изменение параметров сушильного агента на I-d диаграмме для схемы а и б.

На схеме следующие обозначения: 1 - топка; 2 - камера смешения; 3 - сушильная камера; 4 - дымосос; 5 - уходящие газы

Объем топочной камеры для получения сушильного агента

$$V_T = \frac{B_T Q_s^r}{3600 q_v}, \text{ м}^3.$$

Напряжение топочного объема принимается в зависимости от способа сжигания и вида топлива (см. Приложения, табл. 7).

Выбор скорости газов, определение кинетических коэффициентов и объёма барабана

Объем сушильного пространства V_6 складывается из объема $V_{пр}$, необходимого для прогрева влажного материала до температуры, при которой начинается интенсивное испарение влаги (до температуры смоченного термометра сушильного агента \mathcal{G}_M) и объема V_c , требуемого для проведения процесса испарения влаги, т.е. $V_6 = V_{пр} + V_c$.

В соответствии с этим весь процесс сушки разбивают на два этапа: **прогрев и испарение**.

Снижение энтальпии сушильного агента в период прогрева с учётом потерь в окружающую среду (при $u_k > u_o$, $(u_o - u_k) q_{окр} = 0$)

$$\Delta I_{пр} = \frac{G_{сух} (d_2 - d_1) [(c_m + c_w u_o) (\mathcal{G}_M - \mathcal{G}_o) + (u_o - u_k) q_{окр}]}{1000 \cdot W}.$$

Энтальпия сушильного агента в конце периода прогрева

$$I_{пр} = I_1 - \Delta I_{пр}, \text{ кДж/кг}.$$

Температура сушильного агента в конце периода прогрева

$$t_{пр} = \frac{I_{пр} - \frac{i_o d_1}{1000}}{c_v + \frac{c_{п d_1}}{1000}}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Параметры сушильного агента в конце периода прогрева нужно показать на графике (рис. 12а). Для этого откладываем на I - d диаграмме из точки **1** вертикально вниз по линии $d = \text{const}$ отрезок, численно равный $\Delta I_{пр}$. В полученной точке (**П** или **ПР**) получаем энтальпию $I_{пр}$ и температуру $t_{пр}$ сушильного агента в конце периода прогрева и уточняем ранее принятое значение температуры смоченного термометра \mathcal{G}_M . Точку **П** на графике соединяем с точкой **2**.

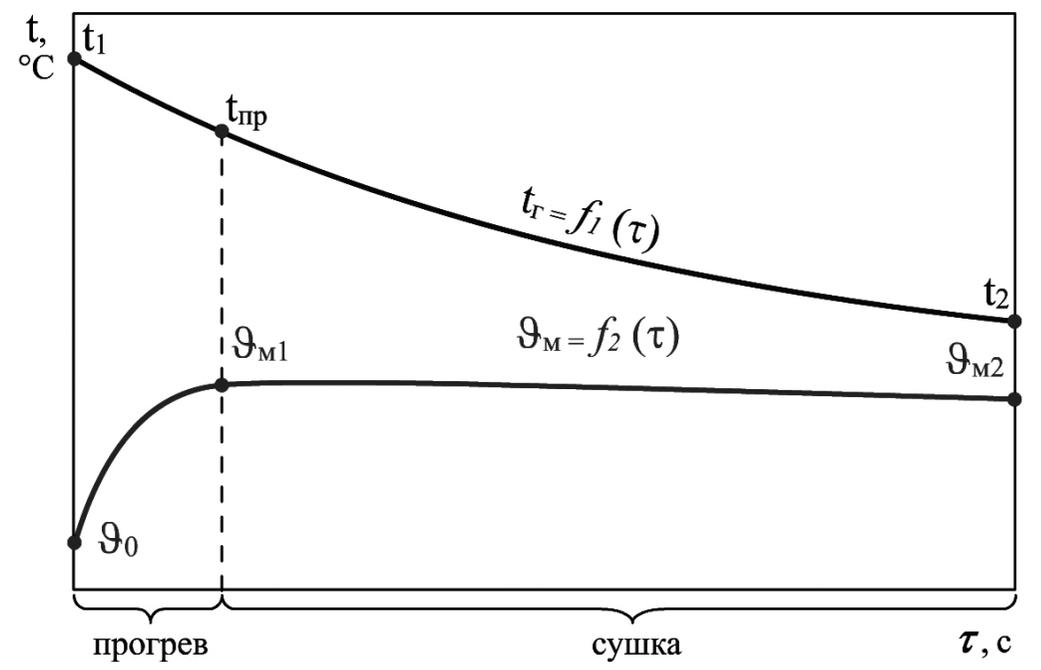
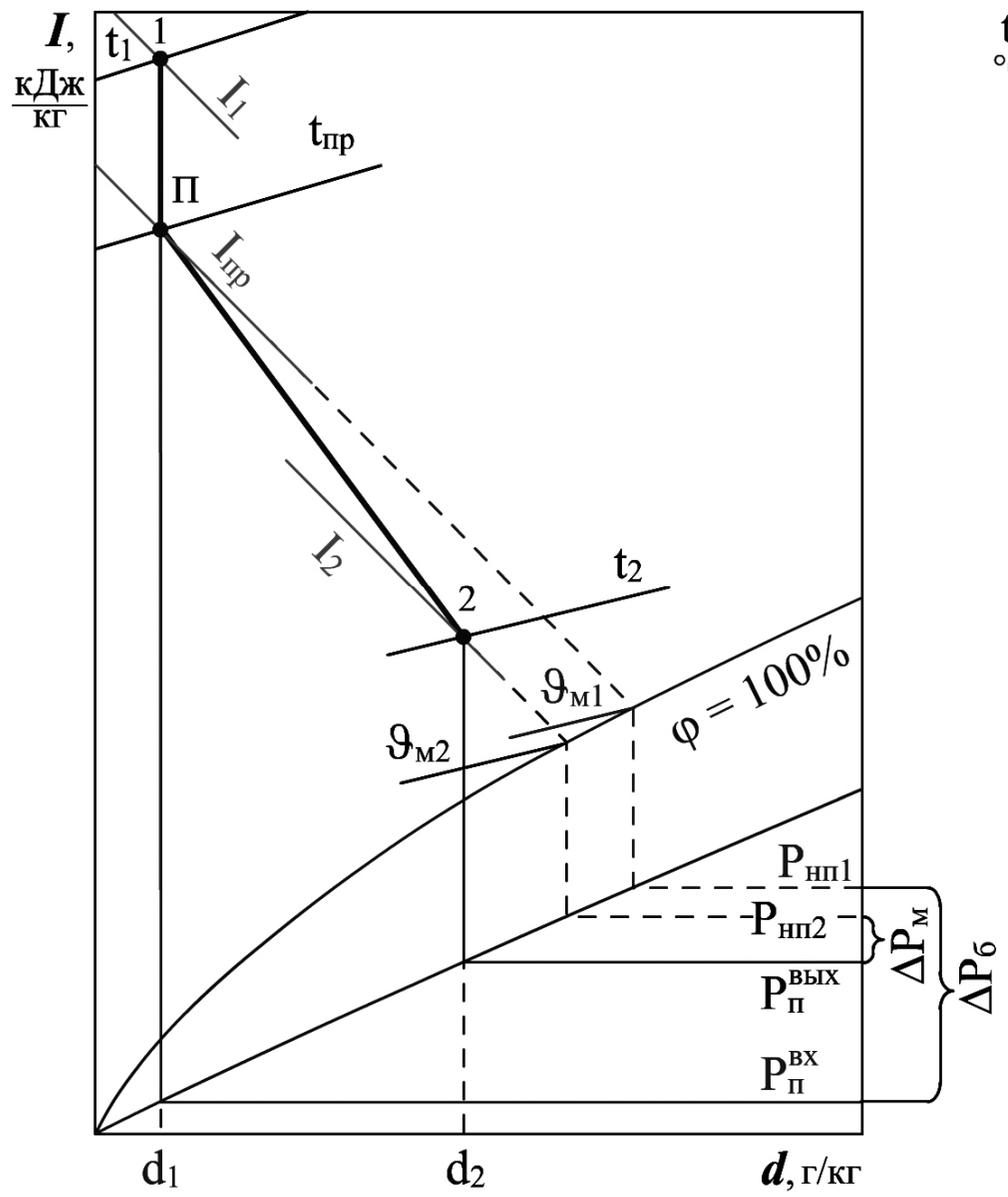


Рис.12. а) - Процесс на I-d диаграмме (к расчету потенциала массообмена); б) - температура сушильного агента и сушеного материала (к расчету температурного напора)

Количество теплоты, отданное сушильным агентом в период прогрева материала в среду (при $u_k > u_o$, $(u_o - u_k)q_{окр} = 0$)

$$Q_{np} = G_{сух} [(c_m + c_w u_o)(g_m - g_o) + (u_o - u_k)q_{окр}], \text{ кДж/ч}$$

Температурный напор на участке прогрева (рис. 12б)

$$\Delta t_{np} = \frac{(t_1 - g_o) - (t_{np} - g_m)}{\ln \frac{(t_1 - g_o)}{(t_{np} - g_m)}}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Средние значения физических параметров сушильного агента

Температура t_{cp} , влагосодержание d_{cp} , плотность ρ_r , коэффициент кинематической вязкости ν_r и коэффициент теплопроводности λ_r

$$t_{cp} = \frac{t_1 + t_2}{2}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad d_{cp} = \frac{d_1 + d_2}{2 \cdot 1000}, \text{ кг/кг};$$

$$\rho_r = \frac{c_o \cdot 273 \cdot 622 \cdot (1 + d_{cp})}{(273 + t_{cp})(622 + d_{cp})}, \text{ кг/м}^3; \quad \text{где } c_o = 1,293 \text{ кг/м}^3.$$

Здесь значения ν_r сушильного агента принимаются при температуре t_{cp} (см. Приложения, табл. 8, 9).

Средние значения влагосодержания u_{cp} , и плотности ρ_m сушимого материала

$$u_{cp} = \frac{u_o + u_2}{2}, \text{ кг/кг}; \quad c_m = c_{m_0} (1 + u_{cp}), \text{ кг/м}^3.$$

Парциальное давление водяных паров в газе на входе и выходе из сушилки

$$P_{п}^{вх} = \frac{d_1 \cdot P_6}{622 + d_1}, \text{ Па}; \quad P_{п}^{вых} = \frac{d_2 \cdot P_6}{622 + d_2}, \text{ Па}.$$

Среднее значение парциального давления водяных паров

$$P_{п}^{cp} = \frac{P_{п}^{вх} + P_{п}^{вых}}{2}, \text{ Па}.$$

Потенциал массообмена, выраженный через парциальные давления пара

$$ДР_{ср} = \frac{(P_{нп1} - P_{п}^{ВХ}) - (P_{нп2} - P_{п}^{ВЫХ})}{\ln \frac{P_{нп1} - P_{п}^{ВХ}}{P_{нп2} - P_{п}^{ВЫХ}}}, \text{ Па} .$$

Здесь $P_{нп1}$ и $P_{нп2}$ – давления насыщенного водяного пара при температуре смоченного термометра сушильного агента в начале и конце процесса сушки определяют по I-d диаграмме или давлению насыщенного пара (см. Приложения, табл. 10).

Температуры смоченного термометра на входе и выходе из сушилки могут отличаться друг от друга и от ранее принятого среднего значения ϑ_M (рис. 12а).

Уточняем значения температур смоченного термометра, так, чтобы разности в скобках $(P_{нп1} - P_{п}^{ВХ})$ и $(P_{нп2} - P_{п}^{ВЫХ})$ были положительными.

Потенциал массообмена, выраженный через концентрацию пара

$$ДС_{ср} = \frac{18 \cdot 273 \cdot ДР_{ср}}{22,4(273 + t_{ср})P_{\delta}}, \text{ кг/м}^3 .$$

Объёмный коэффициент теплоотдачи для сушильного барабана α_v зависит от степени заполнения барабана β , частоты вращения n , скорости газов W_{δ} , дисперсности материала и может быть рассчитан по эмпирическому уравнению М. В. Лыкова:

$$\alpha_v = 16(c_{гщ_{\delta}})^{0,9} \cdot n^{0,7} \cdot v^{0,54}, \text{ Вт/м}^3\text{К} .$$

Данное уравнение справедливо при:

$$n = 1,5 \div 5 \text{ оборот/мин}; \quad \beta = 10 \div 25 \%; \quad \rho_{г}W_{\delta} = 0,6 \div 1,8 \text{ кг/(м}^2 \text{ с)}.$$

Скорость газа в барабане ограничивается уносом частиц мелких фракций и не должна превышать значения (см. Приложения, табл. 11).

Коэффициент заполнения барабана материалом зависит от типа перевалочных устройств, %, для:

- подъёмно-лопастного $\beta = 12 \div 14$;
- распределительного $\beta = 20$;
- распределительного с закрытыми ячейками $\beta = 25 \div 28$.

Объёмный коэффициент массообмена может быть рассчитан по эмпирическому уравнению

$$V_v = \frac{1,6 \cdot 10^{-2} (c_{гщб})^{0,9} \cdot n^{0,7} \cdot v^{0,54} \cdot P_{б}}{c_{г} c_{г} (P_{б} - P_{п}^{ср})}, \quad c^{-1}.$$

Объём сушильного барабана, необходимый для прогрева материала

$$V_{пр} = \frac{Q_{пр}}{3,6 \cdot b_v \cdot Dt_{пр}}, \quad m^3.$$

Объём сушильного барабана, необходимый для испарения влаги

$$V_c = \frac{W}{3600 \cdot v_v \cdot DC_{ср}}, \quad m^3.$$

Общий объём сушильного барабана

$$V_{б} = V_{пр} + V_c, \quad m^3.$$

Напряжение рабочего объёма барабана по испаренной влаге

$$A_v = \frac{W}{V_{б}}, \quad \text{кг}/(m^3 \text{ч}).$$

Барабанные сушилки в России изготавливаются стандартных размеров согласно ГОСТ. Технические характеристики и типоразмеры некоторых барабанов приведены в Приложениях, табл. 12.

Выбираем ближайший по объёму стандартный барабан по ГОСТ 27120-86 или 27134-86 и находим его основные характеристики – длину $L_{б}$ и диаметр $D_{б}$.

Площадь живого сечения барабана для прохода сушильного агента

$$F_{б} = \frac{p \cdot D_{б}^2 (100 - v)}{4 \cdot 100}, \quad m^2.$$

Действительная скорость газов в барабане

$$v_{щб} = \frac{L_{сг} (1 + d_{ср})}{3600 \cdot c_{г} \cdot F_{б}}, \quad \text{м}/\text{с}.$$

Если расхождение между действительной и ранее принятой скоростями газов больше 30 %, то необходимо повторить расчет, внося соответствующие коррективы (изменить частоту вращения или коэффициент заполнения барабана материалом).

Расчет угла наклона и проверка работоспособности барабана по уносу частиц

Средняя продолжительность пребывания материала в сушилке

$$\phi = \frac{36 \cdot V_{\delta} \cdot v \cdot c_M}{G_2 + \frac{W}{2}}, \text{ с.}$$

Угол наклона барабана рассчитывают по формуле Митчела

$$\angle \delta = \frac{180}{\rho} \left(\frac{30 \cdot L_{\delta}}{D_{\delta} \cdot n \cdot \phi} + 0,007 \cdot \psi'_{\delta} \right), \text{ град.}$$

Если полученное значение угла наклона α меньше 0,5 градусов, то число оборотов барабана n уменьшают и повторяют расчёт.

Необходимо проверить допустимую скорость газов, исходя из условия, что частицы высушиваемого материала наименьшего диаметра $d_{ч \min}$ не должны уноситься потоком сушильного агента из барабана. Скорость уноса, равную скорости витания частиц, определяют по уравнению Тодеса

$$\psi_{ун} = \frac{Ar \cdot n_{\Gamma}}{d_{ч \min} (18 + 0,61 \sqrt{Ar})}, \text{ м/с.}$$

Критерий Архимеда рассчитывается по формуле

$$Ar = \frac{d_{ч \min}^3 (c_M - c_{\Gamma}) \cdot g}{n_{\Gamma}^2 \cdot c_{\Gamma}}.$$

Если действительная скорость сушильного агента в барабане оказалась больше, чем скорость уноса частиц наименьшего размера ($W'_{\delta} > W_{ун}$), то уменьшают ранее принятую скорость сушильного агента W_{δ} и повторяют расчет.

Расчет гидравлического сопротивления сушильной установки и расхода электроэнергии

Потери напора при трении сушильного агента о стенки газопроводов

$$\Delta P_{тр} = \frac{L_{тр} \cdot l}{D_{эк}} \cdot \frac{c_{\Gamma} W_{\Gamma}^2}{2}, \text{ Па.}$$

Здесь:

$$W_{\Gamma} = \frac{L_{\text{сг}}}{3600 \cdot c_{\Gamma} \cdot F_{\Gamma}} - \text{скорость газов в газоходе (принимается не более } 15 \div 17 \text{ м/с);}$$

$$D_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\Gamma}}{\rho}} - \text{эквивалентный диаметр газохода, м; } l - \text{длина газохода, м}$$

(принимается из конструктивных соображений);

$$F_{\Gamma} = \frac{L_{\text{сг}}}{3600 \cdot c_{\Gamma} \cdot W_{\Gamma}} - \text{сечение газохода, м}^2 ;$$

$$l_{\text{тр}} = \frac{64}{\text{Re}} + \frac{0,136}{\text{Re}^{0,18}} \quad \text{при } 2,3 \cdot 10^3 < \text{Re} < 10^6 .$$

Потери напора в местных сопротивлениях (сужениях, поворотах).
Число поворотов выбирается из конструктивных соображений.

$$\Delta P_{\text{м}} = \sum o_{\text{м}} \cdot \frac{c_{\Gamma} W_{\Gamma}^2}{2}, \quad \text{Па} .$$

Задавшись условной скоростью газа в сечении циклона ($W_y = 3 - 4 \text{ м/с}$)
определяем диаметр циклона

$$D_{\text{ц}} = \sqrt{\frac{4L_{\text{сг}}}{3600 \cdot \rho \cdot W_y \cdot c_{\Gamma}}}, \quad \text{м} .$$

Габариты стандартных циклонов серии ЦН выбираются по каталогу
оборудования (см. учебное пособие «Тепломассообменное оборудование
предприятий (сушильные установки)»).

Гидравлическое сопротивление циклона

$$\Delta P_{\text{ц}} = o_{\text{ц}} \cdot \frac{W_y^2 \cdot c_{\Gamma}}{2}, \quad \text{Па} .$$

Здесь $\xi_{\text{ц}} = 105$ - коэффициент гидравлического сопротивления циклона.

Полное гидравлическое сопротивление сушильной установки

$$\Delta P = \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{ц}}, \quad \text{Па} .$$

По найденному полному сопротивлению ΔP и расходу сушильного
агента $L_{\text{сг}}$ производится выбор тягодутьевого оборудования.

Мощность тягодутьевой установки

$$N = \frac{L_{сч} \cdot ДР}{3600 \cdot \eta_d} \cdot \sigma, \text{ Вт},$$

где $\eta_d = 0,65$ - КПД тягодутьевой установки.

Мощность и конкретный тип дымососа (вентилятора дымоудаления) выбирается по каталогу тягодутьевого оборудования (см. учебное пособие «Тепломассообменное оборудование предприятий (сушильные установки)»).

Расход электроэнергии на вращение барабана рассчитывается по уравнению Ворошилова

$$N_{эл} = 1,3 \cdot 10^{-3} \cdot D_{б}^3 \cdot L_{б} \cdot c_{м} \cdot n \cdot \sigma, \text{ кВт}.$$

Здесь σ - константа, зависящая от конструкции насадки и степени заполнения барабана β . %, для:

<i>лопастной насадки при:</i>	$\beta = 10$	$\sigma = 0,038;$
	$\beta = 25$	$\sigma = 0,071;$
<i>распределительной насадки при:</i>	$\beta = 10$	$\sigma = 0,013;$
	$\beta = 25$	$\sigma = 0,044;$
<i>секторной насадки при</i>	$\beta = 10$	$\sigma = 0,012;$
	$\beta = 25$	$\sigma = 0,022.$

П Р И Л О Ж Е Н И Я

Таблица 1

Обозначения физических величин,
принятые в настоящем учебно-методическом пособии

Наименование физической величины и ее размерность	Обозначение
1	2
Зольность, %	A^r
Коэффициент избытка воздуха в топке	α_T
Коэффициент избытка воздуха в камере смешения	$\alpha_{доп}$
Коэффициент избытка воздуха после камеры смешения	$\alpha_{общ}$
Напряжение объема барабана по испаряемой влаге, кг/(м ³ ч)	A_v
Критерий Архимеда	$A\gamma$
Угол наклона барабана, град.	α
Объемный коэффициент теплообмена, Вт/(м ³ °С)	α_v
Расход топлива, кг/ч	B_T
Коэффициент заполнения барабана материалом, %	β
Объемный коэффициент массообмена, 1/с	β_v
Содержание углерода в топливе, %	C^r
Теплоемкость топлива, кДж/(кг °С)	$c_{ТЛ}$
Теплоемкость сухих топочных газов, кДж/(кг °С)	$c_{сг}$
Теплоемкость воды, кДж/(кг °С)	c_w
Теплоемкость сухого материала, кДж/(кг °С)	c_m
Теплоемкость водяного пара, кДж/(кг °С)	$c_{п}$
Потенциал массообмена (разность концентраций пара), кг/м ³	ΔC
Диаметр сушильного барабана, м	$D_б$
Влагосодержание наружного воздуха, г/кг	d_o
Влагосодержание газов на выходе из топки, г/кг	d_T
Влагосодержание смеси на выходе из камеры смешения, г/кг	$d_{см}$
Влагосодержание агента на входе в барабан, г/кг	d_1
Влагосодержание агента в конце периода прогрева, г/кг	$d_{пр}$
Влагосодержание агента на выходе из барабана, г/кг	d_2
Среднее влагосодержание газов, кг/кг	$d_{ср}$
Влагосодержание воздуха при $\varphi=100\%$, г/кг	d_m
Диаметр частиц материала данной фракции, мм	d_i
Минимальный диаметр частиц материала, мм	$d_{ч min}$
Средний диаметр частиц материала, мм	$d_{ч ср}$
Термовлажностное соотношение, кДж/кг	Δ
Площадь живого сечения барабана, м ²	$F_б$
Расход материала по абсолютно сухой массе, кг/ч	$G_{сух}$

1	2
Расход влажного материала, подлежащего сушке, кг/ч	G_1
Производительность по готовой продукции, кг/ч	G_2
Масса сухих продуктов сгорания, кг/кг	$G_{сг}$
Масса водяных паров, кг/кг	$G_{п}$
Энтальпия наружного воздуха, кДж/кг	I_0
Энтальпия газов на выходе из топки, кДж/кг	I_T
Энтальпия смеси на выходе из камеры смешения, кДж/кг	$I_{см}$
Энтальпия агента на входе в барабан, кДж/кг	I_1
Энтальпия агента в конце периода прогрева, кДж/кг	$I_{пр}$
Энтальпия агента на выходе из барабана, кДж/кг	I_2
Энтальпия пара при 0°C , кДж/кг	i_0
Энтальпия пара, кДж/кг	$i_{п}$
Энтальпия пара применяемого для дутья, кДж/кг	$i_{п}'$
Начальная температура материала, $^\circ\text{C}$	ϑ_0
Температура смоченного термометра, $^\circ\text{C}$	ϑ_T
Конечная температура материала, $^\circ\text{C}$	ϑ_2
Кратность рециркуляции	k_p
Теоретическое количество воздуха, необходимое для горения, кг/кг	L_0
Расход сушильного агента, кг/ч	$L_{сг}$
Расход смеси из камеры смешения, кг/ч	$L_{см}$
Количество рециркулирующего сушильного агента, кг/ч	L_p
Количество присадочного воздуха, кг/ч	L_B
Количество топочных газов, кг/ч	L_T
Длина барабана, м	$L_б$
Коэффициент теплопроводности влажного газа, Вт/(м $^\circ\text{C}$)	λ_T
Коэффициент теплопроводности сухого газа, Вт/(м $^\circ\text{C}$)	$\lambda_{1ср}$
Коэффициент теплопроводности пара, Вт/(м $^\circ\text{C}$)	$\lambda_{п}$
Коэффициент полезного действия топки	η_T
Краткость смешения дымовых газов и воздуха	$n_{см}$
Частота вращения барабана, 1/с	n
Коэффициент кинематической вязкости пара, $\text{м}^2/\text{с}$	$\nu_{п}$
Коэффициент кинематической вязкости газа, $\text{м}^2/\text{с}$	$\nu_{ср}$
Расход электроэнергии на вращение барабана, кВт	$N_{эл}$
Парциальное давление вод. пара на входе в барабан, Па	$P_{п}^{вх}$
Парциальное давление вод. пара на выходе из барабана, Па	$P_{п}^{вых}$
Потенциал массообмена, Па	$\Delta P_{ср}$
Давление насыщенного вод. пара на входе в барабан, Па	$P_{нп1}$

1	2
Давление насыщенного вод. пара на выходе из барабана, Па	$P_{\text{нп2}}$
Барометрическое давление воздуха, Па	$P_{\text{б}}$
Низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг	Q_i^r
Высшая теплота сгорания топлива, кДж/кг	Q_s^r
Расход теплоты на прогрев влажного материала, кВт	$Q_{\text{пр}}$
Расход теплоты на прогрев и сушку материала, кВт	$Q_{\text{общ}}$
Удельные потери теплоты кДж/кг	$q_{\text{окр}}$
Средняя плотность газа, кг/м ³	$\rho_{\text{г}}$
Средняя плотность материала, кг/м ³	$\rho_{\text{м}}$
Средняя температура сушильного агента, °С	$t_{\text{ср}}$
Температурный напор в период прогрева, °С	$\Delta t_{\text{пр}}$
Температура топлива, °С	$t_{\text{гл}}$
Температура продуктов сгорания, °С	$t_{\text{сг}}$
Температура газов на выходе из топки, °С	$t_{\text{т}}$
Температура смеси после камеры смешения, °С	$t_{\text{см}}$
Температура сушильного агента на входе в барабан, °С	t
Температура сушильного агента после прогрева, °С	$t_{\text{пр}}$
Температура сушильного агента на выходе из барабана, °С	t_2
Продолжительность пребывания материала в барабане, с	τ
Начальное влагосодержание материала, кг/кг	u_0
Критическое влагосодержание материала, кг/кг	$u_{\text{кр}}$
Конечное влагосодержание материала, кг/кг	u_2
Расчетный объем сушильного барабана, м ³	$V_{\text{б}}$
Объем барабана требуемый для прогрева материала, м ³	$V_{\text{пр}}$
Объем барабана требуемый для испарения влаги, м ³	$V_{\text{с}}$
Объем стандартного барабана по ГОСТ, м ³	$V_{\text{ГОСТ}}$
Принятая скорость сушильного агента в барабане, м/с	$w_{\text{г}}$
Действительная скорость сушильного агента в барабане, м/с	$w'_{\text{г}}$
Скорость уноса частиц материала, м/с	$w_{\text{ун}}$
Массовый расход пара на форсунки, кг/ч	$W_{\text{п}}$
Количество испаряемой влаги, кг/ч	W
Начальная относительная влажность материала, %	W_0
Критическая влажность материала, %	$W_{\text{кр}}$
Конечная относительная влажность материала, %	W_2
Рабочая влажность топлива (табличная), %	W^r
Массовая доля отдельных фракций материала	x_i

Таблица 2

Исходные данные для расчета барабанной сушильной установки

№	Материал	ρ , кг/м ³	C_m , кДж/(кг·С)	Размер, мм			Влажность, %			G_2 , т/ч	Дымовые газы		Воздух		Топливо	№ топлива	Схема	α топки
				доля фракции			W_o	W_k	W_2		t_1	t_2	t_o	d_o				
				0,5	0,3	0,2												
1	Глина простая	2000	0,84	1	1,5	3	22	—	15	1	600	100	20	10	мазут	17	А	—
2	Глина огнеупорная	1800	1,09	2	3	4	9	—	0,7	2	800	120	10	4	мазут	18	А	—
3	Известняк	1870	0,92	0,5	1	1,2	5	—	0,1	80	800	110	20	12	уголь	11	Б	1,15
4	Мел	2000	0,88	0,1	0,3	0,5	51	—	24	20	540	270	10	6	уголь	9	Б	1,1
5	Песок речной	1500	0,92	1	1,5	2	10	—	0,5	7,5	900	120	20	12	уголь	5	Б	1,15
6	Руда магнетитовая	3000	0,78	1	2,5	4	6	—	0,5	1,2	730	120	25	12	мазут	17	А	—
7	Руда марганцевая	3450	0,78	5	2	1	15	—	2	1,5	120	60	25	12	уголь	7	А	—
8	Железный колчедан	3300	0,5	2	1	0,5	12	—	3	2	350	100	15	6	уголь	8	А	—
9	Сернокислый аммоний	800	1,4	1	3	2	5	—	0,4	2,5	120	55	25	12	газ	22	Б	1,02
10	Сланцы (Лен. обл.)	1100	1,34	3	2	1	38	40	28	1,1	600	100	20	8	сланцы	13	А	—
11	Уголь каменный	1400	1,3	1	2	5	9	35	0,6	1,2	800	120	25	12	уголь	3	А	—
12	Уголь бурый (Подмоск.)	800	1,13	2	2	1	47	40	38	1,6	500	160	20	8	уголь	6	Б	1,1
13	Торф фрезерный	245	1,76	2	1	3	48	42	38	1,2	550	140	10	4	торф	14	А	—
14	Кузнецкий уголь	1300	1,1	4	1	2	12	35	0,7	1,3	350	88	20	8	уголь	2	А	—
15	Антрацит штыб	730	1,09	4	3	1	14	40	5	1,5	400	120	20	12	уголь	10	А	—
16	Шлам промывки угля	1200	1,2	0,2	0,5	2	50	40	1	5	750	120	15	6	уголь	1	А	—
17	Опилки	250	2,5	4	2	1	45	43	35	1,3	300	100	20	10	древ	15	А	—
18	Аммофос	1500	1,1	4	2	1	12	—	1,5	12	350	110	20	12	уголь	12	А	—
19	Диаммофос	1700	1,2	4	2	1	4	—	1	1,4	200	90	10	4	мазут	16	Б	1,1
20	Суперфосфат	2390	1,2	1	0,5	2	22	—	3	10	750	80	20	8	мазут	16	А	—
21	Преципитат	870	1,13	1	2	1	55	—	3	6	550	120	25	8	уголь	4	Б	1,2
22	Фтористый алюминий	900	1,5	0,5	1	0,3	50	—	5	1,2	750	250	25	12	мазут	18	Б	1,05
23	Соль поваренная	200	0,89	1	2	1	6	—	1	1,2	200	85	25	14	газ	20	Б	1,1
24	Сахарный песок (кукуруз)	600	1,23	2	1	2	14	—	8	1,4	90	40	20	12	газ	21	Б	1,01
25	Жом свекловичный	800	1,6	2	3	1	84	40	30	0,5	750	100	10	4	газ	19	А	—

Таблица 3

Состав и теплота сгорания твердых и жидких топлив

№	Бассейн, месторождение	Рабочая масса топлива, %							Теплота сгорания Q_i^r , кДж/кг
		W^r	A^r	$S_p^r + S_o^r$	C^r	H^r	N^r	O^r	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Твердое топливо (угли)									
1	Кузнецкий	12,0	13,2	0,4	58,6	4,2	1,9	9,7	22860
2	"	8,0	14,3	0,5	63,3	4,4	2,1	7,4	25250
3	"	6,0	14,1	0,6	72,5	3,4	1,7	1,7	27420
4	"	9,0	18,2	0,3	61,5	3,6	1,5	5,9	23570
5	"	7,0	14,6	0,5	70,2	3,0	1,7	3,0	25120
6	"	7,0	36,3	0,7	47,9	3,4	1,4	3,3	18760
7	"	7,0	32,6	0,3	51,9	3,3	1,6	3,3	19850
8	Аркагалинское	19,0	12,2	0,2	51,3	3,6	0,8	12,9	19090
9	Березовское	33,0	4,7	0,2	44,2	3,1	0,4	14,4	15660
10	Челябинский	17,0	32,4	0,9	35,9	2,6	1,00	10,2	13440
11	Подмосковный	32,1	30,6	2,5	24,3	1,9	0,4	8,2	8670
12	Печорский	5,5	28,4	0,9	55,5	3,6	1,7	4,4	22020
13	Интинский	11,5	27,4	2,5	45,8	3,1	1,5	8,2	17540
14	Кизеловский	6,0	34,8	5,3	45,5	3,4	0,8	4,2	18380
15	Минусинский	14,0	17,2	0,5	52,9	3,5	1,4	10,5	20100
16	Черемховское	13,0	27,0	1,0	46,2	3,4	0,7	8,7	17880
17	Букачачинское	8,0	10,1	0,6	67,2	4,7	0,8	8,6	26040
18	Никольское	6,0	18,2	0,4	59,6	4,2	1,1	10,5	22990
19	Партизанский	5,5	34,0	0,4	49,8	3,2	0,8	6,3	19470
20	Нерюнгри	10,0	19,8	0,2	60,0	3,1	0,6	6,3	22480

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Твердое (вторичное) топливо</i>									
21	Сланцы (Лен.область)	11,0	48,2	2,20	30,1	3,87	0,25	4,38	7660
22	Сланцы (Эстония)	12,0	44,4	2,27	32,2	4,10	0,10	4,90	9000
23	Торф фрезерный	48,5	6,43	0,14	25,5	2,70	1,13	15,6	8120
24	Торф кусковой	45,8	7,31	0,11	26,8	2,81	1,17	16,0	9250
25	Древесные опилки	40,0	0,60	0	30,3	3,60	0,4	25,1	10200
26	Лигнин (ЛГЗ)	65,0	1,15	0,13	21,3	1,92	10,5		6410
27	Лигнин (ЗГЗ)	65,0	4,00	0,08	20,6	1,68	8,64		6120
<i>Жидкое топливо (мазут)</i>									
28	Малосернистый	3,0	0,05	0,3	84,7	12	0,3		40280
29	Сернистый	3,0	0,1	1,4	83,8	11	0,5		39730
30	Высокосернистый	3,0	0,1	2,8	83,0	10	0,7		38770

Таблица 4

Состав и теплота сгорания газообразных топлив

№	Газопровод (тип газов)	Состав газа по объему, %												Теплота сгорания Q^d , кДж/кг	Плотность ρ , кг/м ³
		CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	C ₆ H ₁₄	CO	CO ₂	N ₂	O ₂	H ₂ S	H ₂		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Природные газы															
31	Уренгой-Надым-Пунга	98,7	0,12	0,01	< 0,01	—	—	—	0,14	1,00	—	—	—	35500	0,724
32	Уренгой-Ужгород	98,9	0,12	0,01	0,01	—	—	—	< 0,06	0,90	—	—	—	35590	0,724
33	Уренгой-Новопсков	98,9	0,13	0,01	< 0,01	—	—	—	0,08	0,87	—	—	—	35590	0,723
34	Уренгой-Сургут-Челябинск	98,2	0,29	0,2	0,09	0,04	—	—	0,14	1,00	—	—	—	35800	0,729
35	Надым-Пунга-Свердловск	98,7	0,16	0,08	0,01	—	—	—	0,08	1,00	—	—	—	35590	0,725
36	Н.Новгород-Иваново	99,0	0,25	0,04	0,02	—	—	—	0,10	0,60	—	—	—	35750	0,725
37	Бухара-Урал	94,2	3,0	0,89	0,39	0,17	0,13	—	0,28	0,90	—	—	—	37560	0,771
38	Средняя Азия-Центр	94,1	2,8	0,73	0,30	0,07	0,02	—	1,00	1,00	—	—	—	36760	0,771
39	Саратов-Москва	90,3	2,8	1,1	0,75	0,34	0,20	—	0,32	4,20	—	—	—	37010	0,807
40	Мострансгаз (кольцо)	96,6	1,4	0,4	0,18	0,07	0,03	—	0,15	1,20	—	—	—	36300	0,747
41	Оренбург-Александров Гай	86,4	3,9	1,72	0,87	0,30	0,07	—	0,01	6,70	—	—	—	36800	0,828
Попутные газы															
42	Каменный Лог-Пермь	38,7	22,6	10,7	2,7	0,7	—	—	—	23,80	—	0,80	—	42370	1,196
43	Ярино-Пермь	38,0	25,1	12,5	3,3	1,3	—	—	—	18,70	—	1,10	—	46890	1,196
44	Кулешовка-Самара	58,0	17,2	7,4	2,0	0,5	—	—	0,80	13,60	—	0,50	—	41740	1,052
45	Безенчук-Чапаевск	42,7	19,6	12,6	5,1	1,3	—	—	1,00	16,90	—	0,80	—	46980	1,196
46	Барса-Гельмес-Вышка	93,9	3,4	1,3	0,7	0,2	—	—	0,40	0,10	—	—	—	38100	0,778
47	Вход в Краснодар, Крымск	91,2	3,9	2	0,9	0,2	—	—	1,80	—	—	—	—	38270	0,810
48	Вознесенская-Грозный	76,7	13,2	5,4	2,5	2,2	—	—	—	—	—	—	—	47020	0,971
49	Тэбук-Сосновка	48,2	18,2	11,9	3,3	1	—	—	0,90	16,50	—	—	—	45130	1,164
50	Туймазы-Уфа	50,0	22,0	9,8	1,2	0,4	—	—	—	16,60	—	—	—	43040	1,095
51	Шкапово-Туймазы	44,1	22,0	5,2	1,4	0,3	—	—	—	27,00	—	—	—	3663	1,095
52	Казань-Бугульма	53,6	22,8	6,1	0,9	0,2	—	—	0,20	15,80	—	—	—	40610	1,046

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Промышленные газы															
53	Газ доменных печей	0,3	—	—	—	—	—	28,0	10,5	58,5	—	—	2,7	3940	1,293
54	Газ коксовых печей	25,0	2,0	—	—	—	—	7,00	3,0	4,0	1,0	—	58,0	18000	0,468
55	Газ генераторный	1,9	—	—	—	—	—	20,3	9,8	56,2	0,2	—	10,9	6200	1,121
56	Газ генераторный (из древес.)	6,5	—	—	—	—	—	29,0	6,5	46,9	0,2	—	14,0	6500	1,130
57	Газ пиролиза нефти	41,0	—	—	—	—	43,0	0,80	0,5	0,2	—	—	14,0	47500	1,100

Примечания:

- 1) Теплоемкость твердого топлива рассчитывается:

$$c_{\text{ТЛ}} = 0,012 W^{\text{Г}} + c_{\text{ТЛ}}^{\text{сух}} (1 - 0,01 W^{\text{Г}}), \text{ кДж}/(\text{кг } ^\circ\text{C}),$$

где $c_{\text{ТЛ}}^{\text{сух}}$ – теплоемкость сухой массы топлива составляет: для бурых углей – 1,13 кДж/(кг °С); для каменных углей - 1,09 кДж/(кг °С); для углей - 0,92 кДж/(кг °С).

Теплоемкость мазута рассчитывается:

$$c_{\text{маз}} = 1,74 + 0,0025 t_{\text{маз}}, \text{ кДж}/(\text{кг}^\circ\text{C}), \text{ где } t_{\text{маз}} = 90 \div 130^\circ\text{C}.$$

Расход пара на форсунки: $W_{\text{п}} = 0,3 + 0,35 \text{ кг}/\text{кг}$ при $P_{\text{нас}} = 0,6 \div 1,5 \text{ МПа}$.

- 2) Теплоемкость газообразного топлива рассчитывается:

$$c_{\text{газ}} = \sum (V_i \cdot c_i) / 100,$$

где V_i - объем составляющих газообразного топлива, % ;

c_i - теплоемкость составляющих газообразного топлива, кДж/(м³ °С):

$$c_{\text{CO}_2} = 1,59; \quad c_{\text{O}_2} = 1,30; \quad c_{\text{CH}_4} = 1,57; \quad c_{\text{N}_2} = 1,29; \quad c_{\text{H}_2} = 1,28; \quad c_{\text{CO}} = 1,30;$$

$$c_{\text{H}_2\text{S}} = 1,52; \quad c_{\text{C}_2\text{H}_6} = 2,78; \quad c_{\text{C}_3\text{H}_8} = 3,14; \quad c_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 4,24; \quad c_{\text{C}_5\text{H}_{12}} = 5,27; \quad c_{\text{C}_6\text{H}_{14}} = 6,30.$$

Таблица 5

Соотношение между единицами давления

Величина	Па	бар	тех. атм.	мм рт. ст	мм вод.ст.
1 Н/м ² =1 Па	1	10 ⁻⁵	1,02·10 ⁻⁵	7,5·10 ⁻³	0,102
1 бар	10 ⁵	1	1,02	750	1,02·10 ⁴
1 тех.атм=1кгс/см ²	9,81·10 ⁻⁴	10,981	1	735,6	10 ⁴
1 мм рт.ст.	133,3	133,3·10 ⁻⁵	1,36·10 ⁻³	1	13,6
1 мм вод.ст=1кгс/м	9,81	9,81·10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	7,356·10 ⁻²	1

Таблица 6

Теплоемкость и плотность горючих газов

Газ	Формула	Плотность, кг/м	Теплоемкость, кДж/(м ³ · °С)
Метан	CH ₄	0,717	1,55
Этан	C ₂ H ₆	1,342	2,21
Пропан	C ₃ H ₈	1,976	3,05
Бутан	C ₄ H ₁₀	2,598	4,13
Пентан	C ₅ H ₁₂	3,219	5,13
Гексан	C ₆ H ₁₄	3,84	-
Окись углерода	CO	1,25	1,29
Углекислый газ	CO ₂	1,98	1,6
Азот	N ₂	1,25	1,29
Кислород	O ₂	1,43	1,3
Сероводород	H ₂ S	1,539	1,51
Водород	H ₂	0,09	1,28

Таблица 7

Напряжение топочного объема для сушильных установок

Топливо	q _v , кВт/м ³
Доменный газ	230-350
Генераторный газ	230-290
Природный газ	350-460
Мазут	230-350
Торф, дрова	230-290
Каменные угли	290-350

Таблица 8

Физические свойства дымовых газов

$$P_0 = 760 \text{ мм рт. ст.} = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}; \quad P_{\text{CO}_2} = 0,13; \quad P_{\text{H}_2\text{O}} = 0,11; \quad P_{\text{N}_2} = 0,76$$

t, °C	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/(кг°C)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м°C)	$a \cdot 10^6$, м ² /с	$\eta \cdot 10^6$, (Па·с)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
0	1,295	1,042	2,28	16,9	15,8	12,20	0,72
100	0,950	1,068	3,13	30,8	20,4	21,54	0,69
200	0,748	1,097	4,01	48,9	24,5	32,80	0,67
300	0,617	1,122	4,84	69,9	28,2	45,81	0,65
400	0,525	1,151	5,70	94,3	31,7	60,38	0,64
500	0,457	1,185	6,56	121,1	34,8	76,30	0,63
600	0,405	1,214	7,42	150,9	37,9	93,61	0,62
700	0,363	1,239	8,27	183,8	40,7	112,1	0,61
800	0,330	1,264	9,15	219,7	43,4	131,8	0,60
900	0,301	1,290	10,00	258,0	45,9	152,5	0,59
1000	0,275	1,306	10,90	303,4	48,4	174,3	0,58
1100	0,257	1,323	11,75	345,5	50,7	197,1	0,57
1200	0,240	1,340	12,62	392,4	53,0	221,0	0,56

Таблица 9

Физические свойства сухого воздуха

$$P_0 = 760 \text{ мм рт. ст.} = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

t, °C	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/(кг°C)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м°C)	$a \cdot 10^6$, м ² /с	$\eta \cdot 10^6$, (Па·с)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,3	0,707
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,1	0,688
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,9	0,680
300	0,615	1,047	4,60	71,8	29,7	48,3	0,674
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,0	63,1	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,4	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	39,1	96,9	0,699
700	0,362	1,135	6,71	163,4	41,8	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	188,8	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	216,2	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	245,9	49,0	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	276,2	51,2	199,3	0,722
1200	0,299	1,210	9,15	316,5	53,5	233,7	0,724

Таблица 10

Давление насыщенного водяного пара $P_{\text{нп}}$ (кПа)
при $P_6=1,01$ кПа для температур от 0 до 100 °С (над поверхностью воды)

t	$P_{\text{нп}}$	t	$P_{\text{нп}}$	t	$P_{\text{нп}}$	t	$P_{\text{нп}}$
0	0,610	26	3,36	52	13,61	78	43,6
1	0,657	27	3,55	53	14,29	79	45,5
2	0,705	28	3,78	54	15,00	80	47,3
3	0,758	29	4,00	55	15,73	81	49,2
4	0,813	30	4,24	56	16,50	82	51,3
5	0,871	31	4,49	57	17,30	83	53,4
6	0,934	32	4,75	58	18,14	84	55,6
7	1,001	33	5,03	59	19,01	85	57,8
8	1,073	34	5,32	60	19,92	86	60,1
9	1,148	35	5,62	61	20,25	87	62,5
10	1,228	36	5,94	62	21,93	88	64,9
11	1,312	37	6,27	63	22,85	89	67,5
12	1,402	38	6,52	64	23,90	90	70,1
13	1,497	39	5,99	65	24,99	91	72,8
14	1,598	40	7,37	66	26,14	92	75,6
15	1,705	41	7,78	67	27,33	93	78,5
16	1,817	42	8,20	68	28,55	94	81,4
17	1,937	43	8,64	69	29,32	95	84,5
18	2,063	44	9,10	70	31,15	96	87,7
19	2,196	45	9,58	71	32,51	97	90,9
20	2,338	46	10,03	72	33,94	98	94,3
21	2,486	47	10,61	73	35,42	99	97,7
22	2,643	48	11,16	74	36,95	100	101,3
23	2,809	49	11,73	75	38,54	-	-
24	2,983	50	12,33	76	40,18	-	-
25	3,167	51	12,96	77	41,87	-	-

Таблица 11

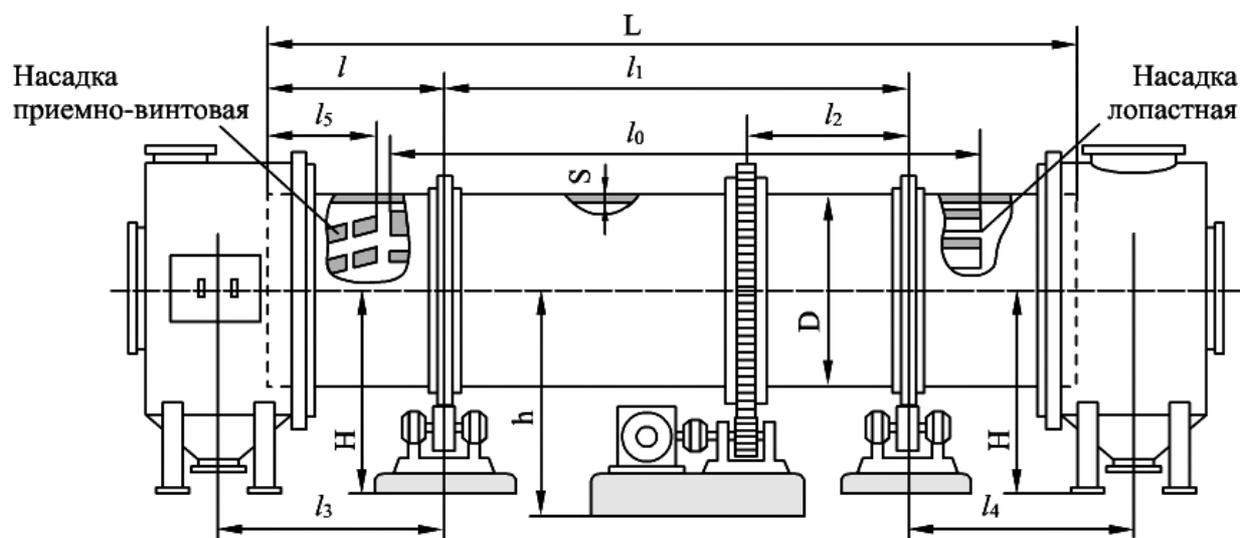
Максимально допустимые скорости сушильного агента в барабане

Средний размер частиц $d_{\text{ч}}$, мм	Значение скорости сушильного агента $W_{\text{г}}$, м/с (при плотности материала $\rho_{\text{м}}$, кг/м ³)				
	$\rho_{\text{м}}=350$	$\rho_{\text{м}}=1000$	$\rho_{\text{м}}=1400$	$\rho_{\text{м}}=1800$	$\rho_{\text{м}}=2200$
Менее 0,3	0,5	2,0	3,0	4,0	5,0
От 0,3 до 2	0,5 – 1,0	2,0 – 5,0	3,0 – 7,5	4,0 – 10,0	5,0 – 12,0
Более 2	1,3	5,3	8,0	10,5	13,0

Таблица 12

Технические характеристики барабанных сушилок

Габариты барабана		Толщина стенки S, мм	Частота вращения, об/мин	Тип насадки	Основные размеры барабана										Число лопастей насадки
Диаметр, D, м	Длина, L, м				l_0 , м	l_1 , м	l_2 , м	l_3 , м	l_4 , м	l_5 , м	H, мм	H ₁ , мм	h, мм		
1	4	5	4,06/5,06/8,12	Лопастная и секторная	3	0,85	2,3	0,8	1,050	1,030	0,5	967	1120	1155	6
	5				1,25	3,5	1,450	1,430							
	5						1,475								
1,2	8	6	4,06/5,06/8,12		7	1,65	4,7	0,9	1,875	1,830	0,6	1160	1220	1275	8
	9				2,05	5,9	2,275	2,230							
1,6	8	8	3,2/4,3/6,4		7	1,65	4,7		1,875	1,900	0,8	1453	1420	1770	12
	9				1,05	5,9	1,1	2,275	2,300						
2,0	10	10	3,2/4,3/6,4		11	2,50	7,0		2,725	1,750	1,4	1783	1620	2010	14
	6				1,65	4,7		1,925	1,960						
	8				2,05	5,0	1,2	2,325	2,360						
2,2	10	12	3,2/4,3/6,4	10	2,50	7,0		2,775	2,810	1,4	1892	1720	2070	16	
	9			2,05	5,9		2,325	2,375							
	11			2,50	7,0		2,775	2,825							
	12			12	2,90	8,2		3,175	3,225						
	16			14	3,35	9,3		3,625	3,675						



Библиографический список

Лебедев П.Д. Расчёт и проектирование сушильных установок. -М.-Л.: ГЭИ, 1963.

Баренбойм А.М., Галиева Т.М., Гинзбург Д.Б. и др. Тепловые расчёты печей и сушилок силикатной промышленности. -М.: Стройиздат, 1964.

Чернобыльский И.И., Тананайко Ю.М. Сушильные установки химической промышленности. -Киев: Техника, 1969.

Лыков М.В. Сушка в химической промышленности. -М.: Химия, 1970.

Жучков П.А. Тепловые процессы в целлюлозно-бумажном производстве. -М.: Лесная промышленность, 1978.

Бельский А.П., Ганичев В.А. Высокотемпературные и сушильные установки: учебное пособие / ЛТИЦБП. -Л., 1988.

Лакомкин В.Ю., Бельский А.П. Тепломассообменное оборудование предприятий (сушильные установки): учебное пособие / СПб ГТУ РП. -СПб., 2006.

Лакомкин В.Ю., Смородин С.Н. Расчет и проектирование пневматической сушильной установки: учебно-методическое пособие / СПб ГТУ РП. -СПб., 2012.

Оглавление

Конструкция и принцип работы барабанной сушильной установки	3
Методика расчета сушильного барабана	10
Материальный баланс сушильной установки	10
Состав и теплота сгорания топлива	11
Определение основных параметров топочных газов	12
Определение основных параметров сушильного агента в процессе сушки материала (по I-d диаграмме)	14
Расход топочных газов присадочного воздуха, сушильного агента и топлива	16
Выбор скорости газов, определение кинетических коэффициентов и объёма барабана.....	18
Расчет угла наклона и проверка работоспособности барабана по уносу частиц	23
Расчет гидравлического сопротивления сушильной установки и расхода электроэнергии	23
Приложения	26
Библиографический список	38