

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра машин и аппаратов химических и пищевых производств

Е.В. Ганин, С.В. Антимонов, С.Ю. Соловых

РАСЧЕТ ПРОЦЕССА КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии, 18.03.01 Химическая технология

Оренбург
2019

УДК 66.02:664 (076.5)
ББК 35.11я+36.81я7
Г 19

Рецензент - кандидат технических наук, доцент Н.П. Владимиров

Ганин, Е.В.

Г 19 Расчет процесса конвективной сушки: методические указания / Е.В. Ганин, С.В. Антимонов, С.Ю. Соловых;. – Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2019. 39 с.

Методические указания предназначены для выполнения курсовых проектов и курсовых работ по курсу «Процессы и аппараты химической технологии». Изложены основы расчета процесса конвективной сушки в барабанной сушильной установке.

Предназначены для студентов всех форм обучения направлений подготовки: 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии; 18.03.01 Химическая технология. Методические указания могут использоваться также для самостоятельной работы студента.

УДК 66.02:664 (076.5)
ББК 35.11я+36.81я7

© Ганин Е.В.,
Антимонов С.В.,
Соловых С.Ю., 2019
© ОГУ, 2019

Содержание

Введение	4
1 Содержание и объём курсового проекта (работы).....	5
2 Конструкция и работа барабанной сушильной установки	8
3 Расчет процесса конвективной сушки	11
3.1 Исходные данные для расчета	11
3.2 Задание на проектирование	11
3.3 Технологический расчет	12
3.4 Конструктивный расчет	18
3.5 Расчет на прочность	24
Список использованных источников	30
Приложение А Давление насыщенного водяного пара при различных температурах.....	31
Приложение Б Диаграмма состояния влажного воздуха при различных температурах.....	32
Приложение В Свойства насыщенного водяного пара при различных температурах.....	34
Приложение Г Технические характеристики барабанных сушилок	37

Введение

Дисциплина «Процессы и аппараты химической технологии» составляет теоретические и инженерные основы химической технологии и занимает ведущее положение в подготовке специалистов по химической технике. Заключительным этапом самостоятельной работы студента при изучении данного курса является выполнение курсового проекта или курсовой работы на заданную тему.

При выполнении курсового проекта и курсовой работы по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии» студенты практически применяют знания, полученные при изучении ранее пройденных дисциплин «Физика», «Общая и неорганическая химия», «Органическая химия», «Инженерная графика», а также в смежных дисциплинах «Общая химическая технология», «Термодинамика и теплопередача», «Основы механики жидкости и газа», «Прикладная механика». Полученные навыки способствует пониманию и овладению дисциплинами «Тепло- и массообменные процессы химической технологии», «Основы проектирования химических и нефтехимических производств», «Безопасность эксплуатации оборудования», «Машины и аппараты химических производств», «Машины и аппараты химических производств».

В процессе работы, студенты изучают действующие нормативные материалы (ГОСТы, нормативные документы), справочную литературу, приобретают навыки расчета и выбора из числа стандартных аппаратов и оборудования, составление технико-экономических обоснований, оформления технической документации.

Настоящие методические указания включают общие положения и рекомендации по выполнению курсового проекта, основное внимание уделяется вопросам расчета процесса конвективной сушки в барабанной сушильной установке. Рассматриваются конструкция барабанных сушилок, приводятся методики расчета основных параметров процесса протекающего в аппарате. На основе выполненных расчетов определяют основные конструктивные размеры сушилки.

1 Содержание и объём курсового проекта (работы)

Курсовой проект (работа) состоит из двух частей: расчетно-пояснительной записки объемом 15-35 листов формата А4 (210 x 297 мм) и графической части объемом 2-4 листов формата А1 (594 x 841 мм) или А2 (420 x 594 мм).

Рекомендуется следующая последовательность представления материалов пояснительной записки:

Титульный лист.

Задание.

Аннотация

Содержание.

Введение.

1 Технологическая схема установки.

2 Технологический расчет.

3 Конструктивный расчет.

4 Расчет на прочность.

5 Расчет и подбор вспомогательного оборудования (по усмотрению преподавателя).

Заключение (выводы и предложения).

Список использованных источников.

Приложения.

Во «Введении» излагаются в краткой форме вопросы характеристики процесса конвективной сушки, а также конструкций и принципа действия барабанных сушилок в химической промышленности, конструкций выбора технологической схемы и района строительства установки.

«Технологическая схема установки» содержит рисунок принципиальной схемы установки и её описание в порядке движения сушильного агента и

высушиваемого материала с указанием позиций.

«Технологический расчет» включает: расчет количества удаляемой влаги, расхода воздуха, расчеты расхода воздуха, топлива, греющего пара.

«Конструктивный расчет» включает: расчет диаметра и длины барабана; определение угла наклона барабана и частоты его вращения, необходимых для обеспечения заданной производительности выбор барабана по каталогу,

«Расчет на прочность» содержит: поверочный расчет на прочность и допускаемый прогиб барабана; поверочный расчет бандажей; расчет диаметров опорных роликов и проверку их на контактную прочность; расчет ширины упорных роликов.

Расчетно-пояснительная записка должна быть написана от руки или напечатана на принтере на одной стороне листа чистой бумаги формата А4 (210 x 297 мм). Страницы записки нумеруются, а в содержании указываются номера страниц, соответствующие каждому разделу записки. Заголовки разделов должны быть краткими и соответствовать содержанию.

Терминология и определения в записке должны быть едиными и соответствовать установленным стандартам, а при их отсутствии – общепринятым в научно-технической литературе. Сокращения слов в тексте и подписях, как правило, не допускаются, за исключением сокращений, установленных ГОСТ Р 7.012-2011.

Все расчетные формулы в пояснительной записке приводятся сначала в общем виде, нумеруются, дается объяснение обозначений и размерностей всех входящих в формулу величин. Затем в формулу подставляют численные значения величин и записывают результат расчета. Все расчеты должны быть выполнены в международной системе единиц СИ. Если из справочников и других источников значения величин взяты в какой-либо другой системе единиц, перед подстановкой их в уравнения необходимо сделать пересчет в систему единиц СИ.

Все иллюстрации (графики, схемы, чертежи, фотографии) именуются рисунками. Рисунок располагают после ссылки на него. После рисунка пишут

слово «Рисунок» и далее через тире его номер. Все подписи, загромождающие рисунок, следует переносить в текстовую часть. Подписи под рисунками должны быть краткими, необходимые объяснения целесообразно приводить в тексте.

Все таблицы, как и рисунки, нумеруют. Заголовок таблицы помещают под словом «Таблица». Все слова в заголовках и надписях таблицы пишут полностью, без сокращений.

Графическая часть проекта (работы) состоит из технологической схемы установки (половина или один лист формата А1), чертежа общего вида барабанной сушилки (формат А1) и сборочных чертежей элементов барабанной сушилки с необходимыми разрезами, сечениями и узлами (один или два листа формата А1, в зависимости от технического задания).

Технологическая схема установки выполняется на основе принципиальной схемы установки, разработанной ранее в рамках расчетно-пояснительной записки. На схеме стрелками указываются направление потоков, даются значение их расходов, температур, давлений и других параметров. Наносятся точки контроля работы установки (измерение расхода, давление, температуры, уровня жидкости и т. д.)

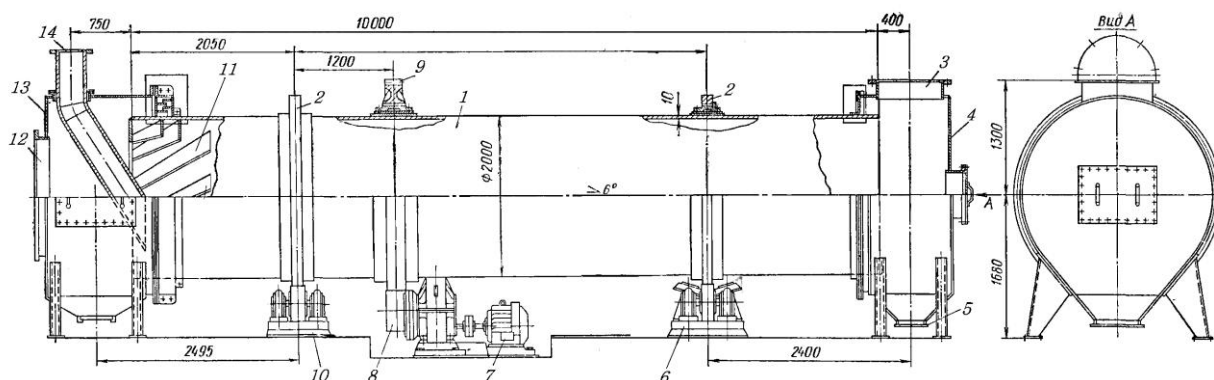
Чертежи общего вида сушильного барабана и сборочные представляют собой чертежи основного аппарата технологической схемы с основными размерами, узлами и сечениями, позволяющими «прочитать» принцип действия сушильного барабана.

При выполнении чертежей строго соблюдаются правила ГОСТ 2.001-2013 «Единая система конструкторской документации (ЕСКД)».

2 Конструкция и работа барабанной сушильной установки

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

Барабанная сушилка (рисунок 1) представляет собой установленный наклонно вращающийся барабан 1, который с помощью насаженных на него бандажей 2 опирается на ролики опорной 10 и упорно-опорной 6 станций. Бандажами барабан опирается на четыре ролика 6 и 10, установленные на рамах. Два опорных ролика 10 ограничивают осевое смещение корпуса барабана. Торцы барабана заходят в загрузочную 13 и разгрузочную 4 камеры.



1 – барабан; 2 – бандаж; 3 – штуцер отсоса сушильного агента;
4 – разгрузочная камера; 5 – штуцер вывода продукта; 6 – опорно-упорные ролики; 7 – электропривод; 8 – подвенцовая шестерня; 9 – венцовая шестерня; 10 – опорные ролики; 11 – приемно-винтовая насадка; 12 – штуцер ввода газа; 13 – загрузочная камера; 14 – штуцер ввода продукта.

Рисунок 1 – Барабанная конвективная сушилка

Барабан установлен наклонно под небольшим наклоном ($1^{\circ} - 6^{\circ}$) в сторону разгрузки. Барабан вращается с частотой до 8 об/мин от электропривода 7 через подвенцовую 8 и венцовую 9 шестерни; последняя закреплена на барабане. С помощью загрузочного устройства (питателя) через штуцер ввода продукта 14 материал поступает внутрь барабана поступает на приемно-винтовую насадку, приваренную к корпусу барабана (рисунок 2) и далее движется вдоль его оси, интенсивно перемешиваясь. Через штуцер 12 вдуваются подогретый воздух или дымовые газы, при непосредственном соприкосновении с которыми материал высушивается.

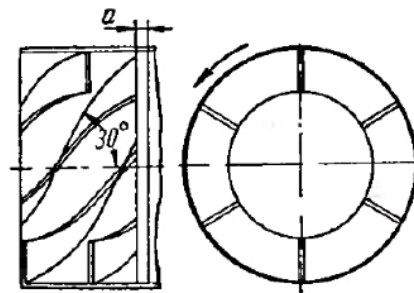
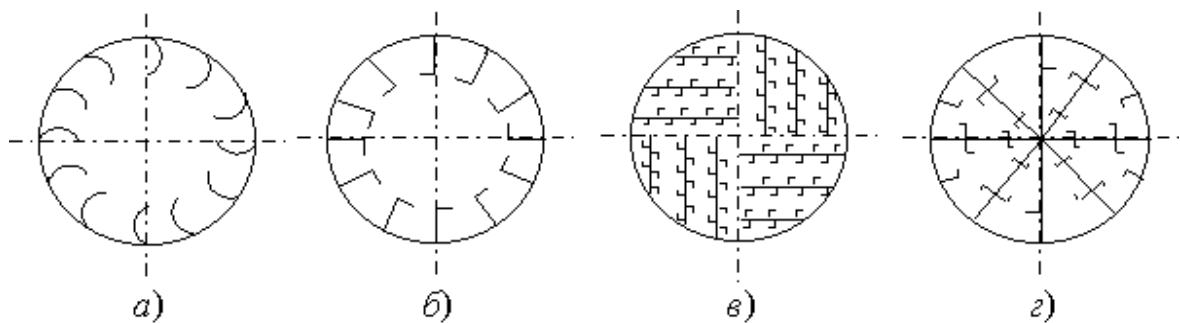


Рисунок 2 – Приемно-винтовая насадка

Внутри барабана, в зависимости от свойств высушиваемого материала, устанавливают различные насадки (рисунок 3).



а - лопастная; б - периферийно-лопастная; в - распределительная; г - секторная

Рисунок 3 – Схемы различных типов внутренних устройств барабана

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. Штуцер 5 предназначен для вывода продукта, штуцер 3 – для отсоса сушильного агента. Прямоточные сушилки выполняются с правым расположением привода (по ходу движения продукта в барабане). Противоточные сушилки выполняются с левым расположением привода. Правое или левое расположение привода, – это значит, что привод максимально удален от горячего конца барабана, т.е. расположен ближе к опорно-упорной станции барабанной сушилки. На обоих торцах барабана ставятся уплотняющие устройства, препятствующие выходу газов, но не мешающие вращению барабана.

3 Расчет процесса конвективной сушки

3.1 Исходные данные для расчета

Производительность по высушенному материалу G_k , кг/с; начальная влажность материала ω_n , %; конечная влажность материала ω_k , %; начальная температура материала t'_m , °С, конечная температура материала t''_m , °С; удельная массовая теплоемкость материала c_m , Дж/(кг·К), насыпная плотность материала $\rho_{нас}$, кг/м³; размер частиц материала $d_э$, мм, плотность частиц материала $\rho_{тв}$, кг/м³. Параметры воздуха окружающей среды: t_0 , °С, $\varphi_0=68$ %; барометрическое давление $P=745$ мм рт. ст. Температура воздуха на входе в барабан t_1 , °С, на выходе из барабана t_2 , °С, удельные потери тепла в окружающую среду на 1 кг испаренной влаги $q_n = 22,6 \cdot 10^3$ Дж/кг. Насадка в барабане периферийно-лопастная. Сушка производится воздухом при противотоке. Напряжение барабана по влаге A , кг/(м³·ч) и коэффициент заполнения барабана β , %.

3.2 Задание на проектирование

Варианты заданий, определяются преподавателем и утверждаются заведующим кафедрой.

3.3 Технологический расчет

3.3.1 Материальный баланс

3.3.1.1 Количество удаляемой влаги в сушильном барабане:

$$W = G_{\kappa} (U_{\text{н}} - U_{\kappa}), \quad (3.1)$$

где W – количество удаляемой влаги в сушильном барабане, кг/с;

G_{κ} – производительность по высушенному материалу, кг/с;

$U_{\text{н}}$, U_{κ} – относительная влажность материала соответственно на входе в барабан и на выходе из барабана, кг вл./кг с.м.

3.3.1.2 Относительная влажность материала на входе и на выходе из барабана:

$$U_{\text{н}} = \frac{\omega_{\text{н}}}{100 - \omega_{\text{н}}}, \quad (3.2)$$

$$U_{\kappa} = \frac{\omega_{\kappa}}{100 - \omega_{\kappa}}, \quad (3.3)$$

где $\omega_{\text{н}}$ – начальная влажность материала, %;

ω_{κ} – конечная влажность материала, %.

3.3.1.3 Количество исходного влажного материала $G_{\text{м.о}}$, кг/с:

$$G_{\text{м.о}} = G_{\kappa} + W \quad (3.4)$$

3.3.2 Расчет параметров сушильного агента в случае сушки атмосферным воздухом

3.3.2.1 Влагосодержание наружного воздуха, поступающего в калорифер x_0 , кг/кг:

$$x_0 = \frac{0,622 \cdot \varphi_0 \cdot p_n}{P - \varphi_0 \cdot p_n} \quad (3.6)$$

где φ_0 – относительная влажность наружного воздуха ($\varphi_0 = 0,68$);

P – барометрическое давление воздуха ($P = 745$ мм. рт. ст), Па;

p_n – давление насыщенного водяного пара, Па, при температуре наружного воздуха t_l , °С (таблица А.1, Приложение А).

3.3.2.2 Энтальпия наружного воздуха I_0 , кДж/кг:

$$I_0 = c_r t_{ex} + (r_0 + c_n t_{ex}) X_0 \quad (3.7)$$

где c_r – средняя удельная теплоемкость наружного воздуха при постоянном давлении, кДж/(кг·К); $c_r = 1,006$ кДж/(кг·К);

t_{ex} – температура наружного воздуха, $t_{ex} = 20$ °С;

r_0 – удельная теплота парообразования при 0°С, кДж/кг, $r_0 = 2495$ кДж/кг;

c_n – удельная теплоемкость пара при t_{ex} , кДж/(кг·К),

$c_n = 1,965$ кДж/(кг·К).

3.3.2.3 Энтальпия нагретого воздуха на входе в сушильный барабан I_1 (после калорифера), кДж/кг, учитывая, что $X_1=X_0$:

$$I_1 = c_r t_1 + (r_0 + c_n t_1) X_0 \quad (3.8)$$

где t_1 – температура воздуха на входе в барабан.

3.3.3 Тепловой баланс

3.3.3.1 Уравнение внутреннего теплового баланса сушильной установки:

$$\Delta = c_{жк} \cdot t_1 + q_{дон} - (q_m + q_n) \quad (3.9)$$

где Δ – разность между удельными приходом и расходом тепла непосредственно в сушильной камере, кДж/кг;

$c_{жк}$ – удельная теплоемкость влаги во влажном материале при температуре t_1 , кДж/(кг·К); $c_{жк} = 4,187$ кДж/(кг·К);

$q_{дон}$ – удельный подвод тепла в сушильной камере, $q_{дон} = 0$ кДж/кг;

q_n – удельные потери тепла в окружающую среду, $q_n = 127,5$ кДж/кг
 $q_{доп} = 0$ кДж/кг;

q_m – удельные потери тепла с материалом, кДж/кг.

3.3.3.2 Удельные потери тепла с материалом рассчитываются по формуле:

$$q_m = \frac{G_k \cdot c_m \cdot (t_m'' - t_m')}{W}, \quad (3.10)$$

где c_m – удельная теплоемкость сухого, кДж/(кг·К);

3.3.3.3 Построения процессов на I - x диаграмме

Нахождение всех параметров воздуха в конвективной сушильной установке возможно с помощью I - x диаграммы Л. К. Рамзина (рисунки Б.1, Б.2 приложения Б).

Для определения неизвестных параметров воздуха необходимо построить рабочую линию конвективной сушки воздухом (рисунок 4).

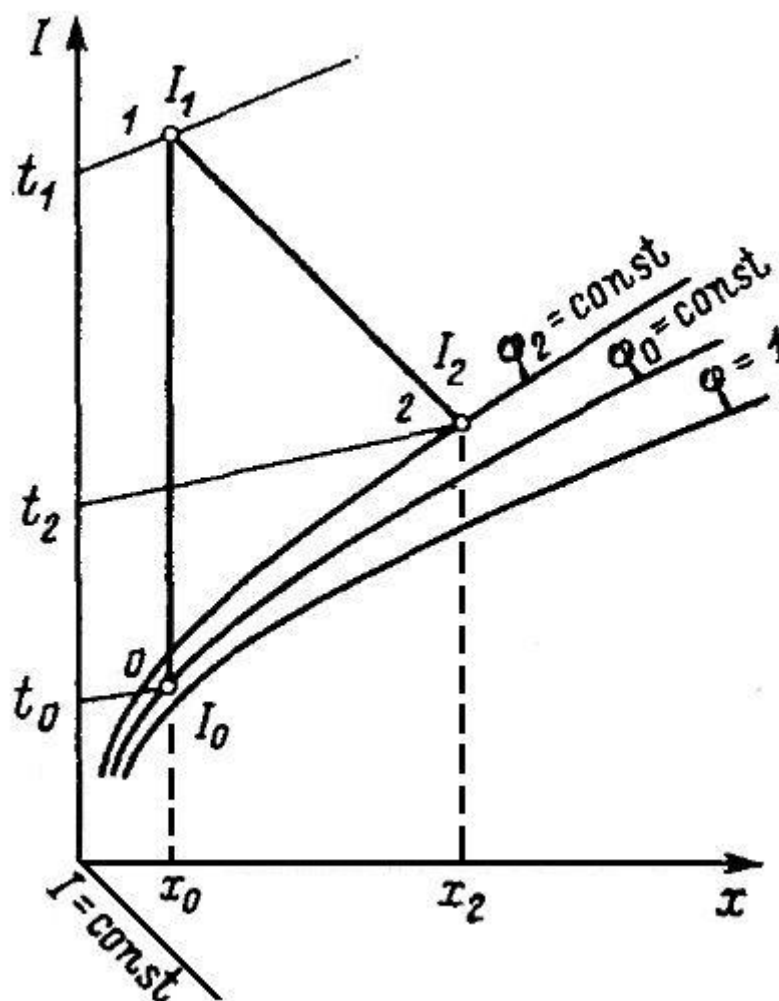


Рисунок 4 – Линия конвективной сушки воздухом на I - x диаграмме (теоретическая)

Нагрев воздуха в калорифере изображается прямой 0-1, идущей по вертикальной линии $x = \text{const}$ (т.е. $x_0 = x_1 = \text{const}$).

Точка 0 соответствует состоянию воздуха с параметрами (t_0, I_0) , а точка 1 – параметрам (t_1, I_1) и характеризует состояние нагретого воздуха перед входом в сушилку. Из точки 1 проходит линия $I = \text{const}$ (т.е. $I_1=I_2= \text{const}$) до пересечения с изотермой $t_2= \text{const}$ или линией $\varphi_2 = \text{const}$, получают точку 2, выражающую состояние отработанного воздуха на выходе из сушилки. Отрезок 1-2 ($I_1=I_2= \text{const}$) изображает охлаждение воздуха в процессе сушки.

В сушильной технике пользуются терминами «теоретический» и «действительный» процессы сушки. Если отсутствуют потери тепла и нет его дополнительных источников, а температура материала до и после сушки одинакова и равна нулю, то рабочая линия соответствует «теоретическому» процессу сушки. Такой процесс сушки изображается прямой, идущей по линии постоянной энтальпии

Построение процесса в реальной сушилке сводится к определению наклона линии сушки. Эта линия имеет начальную точку 1, но может отклоняться в ту или другую сторону от линии теоретической сушки 1-2, в зависимости от знака величины Δ (формула 3.9).

3.3.3.4 Уравнение рабочей линии сушки

Для построения рабочей линии сушки на $I - x$ диаграмме (см. рисунок 5) необходимо знать координаты точки 2 (x_2, I_2).

Координаты точки 0 (x_0, I_0) определяют по формуле 3.6 (x_0) и формуле 3.7 (I_0). Учитывая, что $x_1=x_0$ координаты точки 1 (x_1, I_1) определяют по формуле 3.6 ($x_1=x_0$), формуле 3.8 (I_1).

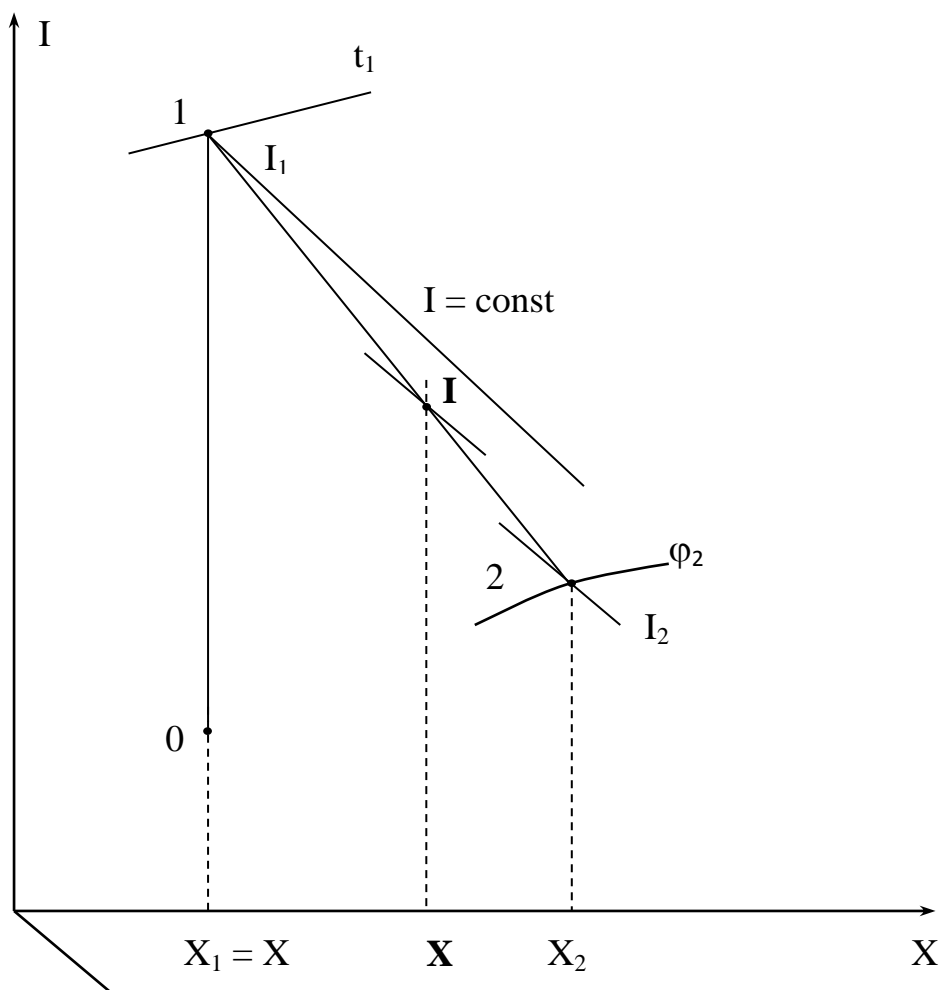


Рисунок 5 – Построение линии реальной сушки в I - x диаграмме

Для определения координат точки 2 воспользуемся уравнением рабочей линии сушки:

$$\Delta = \frac{I - I_1}{x - x_1} \quad \text{или} \quad I = I_1 + \Delta(x - x_1), \quad (3.11)$$

где I и x – параметры воздуха в произвольном сечении сушильного барабана (задаются произвольно).

Для нахождения координат точки 2 сначала задаются произвольным значением x (например $x = 0,1$ кг/кг) и определяют соответствующее ему значение I из формулы 2.11, подставляя туда ранее найденные значения x_1, I_1 и

Δ. Через точку 1 и точку I проводят линию сушки до пересечения с изотермой t_2 (точка 2). В точке пересечения находят параметры отработанного сушильного агента: x_2 , кг/кг и I_2 , КДж/кг.

3.3.3.5 Расход сухого воздуха на процесс сушки, кг/с

$$L_{\text{воз}} = \frac{W}{(x_2 - x_0)} \quad (3.12)$$

3.3.3.6 Расход тепла в калорифере, кДж/кг

$$Q_c = L_{\text{воз}} \cdot (I_1 - I_0) \quad (3.13)$$

3.3.3.7 Расход греющего пара на подогрев воздуха в калорифере, кг/с

$$G_{\text{г.п.}} = \frac{Q_c}{r_0} \quad (3.14)$$

r_0 - удельная теплота парообразования воды при 100°C , $r_0 = 2260$ кДж/кг;

3.4 Конструктивный расчет

3.4.1 Требуемый объем барабана сушилки, м^3

$$V_{\text{б}} = 3600 \cdot \frac{W}{A_v}, \quad (3.15)$$

где A_v - напряжение барабана по испаряемой влаге, $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$ (таблица 4.2).

Таблица 4.2 - Теплофизические свойства материалов и кинетические характеристики барабанных сушилок

Материал	Размер частиц d_c , мм	Плотность частиц $\rho_{тв}$, кг/м ³	Насыпная плотность материала, $\rho_{нас}$, кг/м ³	Теплоемкость c_m кДж/(кг·К)	Напряжение по влаге, A_v , кг/(м ³ ·ч)	Тип внутренних распределительных систем барабана
Глина	0,2-0,5	1600	1380	0,84	50-60	Периферийно-лопастная
Известняк	1-15	2650	1800	0,92	45-65	Периферийно-лопастная
Песок	0,5-2	1500	1200	0,8	80-88	Распределительная
Железный колчедан	2,5	5000	3300	0,5	20-30	Периферийно-лопастная
Уголь каменный	10-40	1350	800	1,09	32-40	Периферийно-лопастная
Фосфориты	1-10	1350	1160	1,05	45-60	Периферийно-лопастная
Na ₂ CO ₃	0,5-1	1450	800	1,04	7	Периферийно-лопастная
NaCl	1-2,5	2350	1020	0,89	7,2	Периферийно-лопастная

3.4.2 Диаметр барабана, м

Отношение длины барабана к его диаметру должно быть равно $L_\delta/D_\delta = 3,5 - 7$, принимаем $L_\delta/D_\delta = 5$. Тогда,

$$D_{\delta} = \sqrt[3]{\frac{V_{\delta}}{3,925}} \quad (3.16)$$

3.4.3 Длина барабана, м

$$L_{\delta} = 5 \cdot D_{\delta} \quad (3.17)$$

По таблице Г.1 (приложение Г) определяют предварительно размеры барабана: длину L_{δ} и диаметр D_{δ} .

Уточняем объем выбранного барабана, м³

$$V_{\delta} = \frac{\pi D_{\delta}^2}{4} \cdot L_{\delta} \quad (3.18)$$

Уточняем напряжение барабана по испарившейся влаге, кг/(м³·ч)

$$A_v = \frac{W}{V_{\delta}} \quad (3.19)$$

3.4.4 Действительная скорость газов в барабане, м/с

$$\omega_{\delta} = \frac{V_2}{0,785 \cdot D_{\delta}^2} \quad (3.20)$$

где V_2 - объемная производительность по газу, м³/с

$$V_2 = \frac{L_{603}}{\rho_2} \quad (3.21)$$

где ρ_r - плотность воздуха при средней температуре в барабане t_{cp} , кг/м³

$$t_{cp} = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (3.22)$$

$$\rho_2 = 1,293 \cdot \frac{273}{273 + t_{cp}} \quad (3.23)$$

Необходимо проверить условие уноса частиц материала из барабана.

3.4.5 Скорость уноса, равную скорости свободного витания частицы определяют из уравнения, м/с

$$\omega_{cv} = \frac{\mu_{cv}}{d_c \cdot \rho_2} \cdot \left(\frac{Ar}{18 + 0,575 \cdot \sqrt{Ar}} \right) \quad (3.24)$$

где μ_{cv} – вязкость сушильного агента при средней температуре, $\mu_{cv} = 2,21 \cdot 10^{-5}$ Па*с;

Ar - критерий Архимеда.

$$Ar = \frac{d_c^3 \cdot \rho_{ms} \cdot \rho_2 \cdot g}{\mu_{cv}^2} \quad (3.25)$$

где ρ_{ms} - плотность частиц, кг/м³

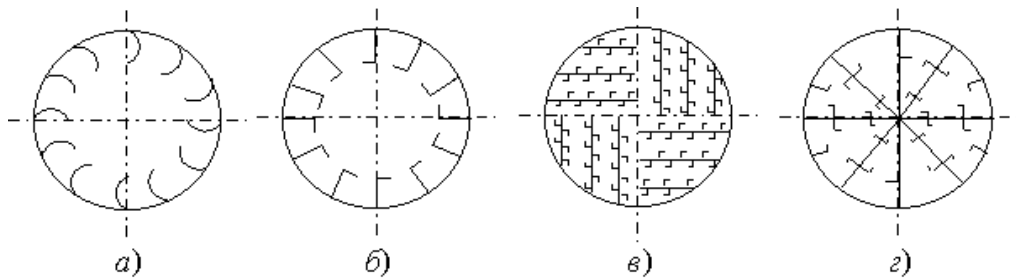
Если не выполняется условие $\omega_d < \omega_{cv}$ то принимают барабан с большим диаметром и объемом.

3.4.6 Время сушки $\tau_{суш}$, мин,

$$\tau_{\text{суш}} = \frac{120 \cdot \beta_m \cdot \rho_{\text{нас}} (\omega_H - \omega_K)}{A_V (200 - (\omega_H - \omega_K))} \quad (3.26)$$

где β_m - коэффициент заполнения барабана материалом (рисунок б),

$\beta_m = 0,12$ - для лопастной насадки.



а - лопастная, $\beta = 12 \%$; б - периферийно - лопастная, $\beta = 14 \%$;

в - распределительная, $\beta = 20,6 \%$; г - секторная, $\beta = 27,5 \%$

Рисунок б – Типы перевалочных устройств, применяемых в барабанных сушилках и степень заполнения барабана β

3.4.7 Объем материала, находящегося в барабане, м ,

$$V_m = \frac{\tau_{\text{суш}} (G_{\text{мо}} + G_K)}{2 \cdot 60 \cdot \rho_{\text{нас}}} \quad (3.27)$$

3.4.8 Уточним коэффициент заполнения барабана материалом:

$$\beta_m = \frac{V_m}{V_{\text{ан}}} \quad (3.28)$$

3.4.9 Число оборотов барабана для сушилок с периферийно-лопастной и комбинированной насадкой n , об/мин,

$$n = \frac{m \cdot k \cdot L_{\sigma}}{\tau_{\text{суш}} \cdot D_{\sigma} \cdot \text{tg} \alpha} \quad (3.29)$$

где m , k - коэффициенты, зависящие от типа насадки и направления движения теплоносителя для лопастной секторной насадки $m = 0,75... 1,0$, $k \geq 0,7$ (прямоток), $k \leq 2,0$ (противоток);

τ - время пребывания материала в барабане, сек;

α - угол наклона барабана ($\alpha = 2,5^\circ$),

3.4.10 Угол наклона барабана α , град.

$$\alpha = \left(\frac{30 \cdot L_{\sigma}}{D_{\sigma} \cdot n \cdot \tau_{\text{суш}}} + 0,007 \cdot \omega_{\sigma} \right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (3.30)$$

где n - число оборотов барабана в минуту.

Если угол наклона барабана $\alpha < 2,5^\circ$, то принятую частоту вращения барабана уменьшают и повторяют расчет.

3.4.12 Мощность, затрачиваемая на вращения барабана

$$N = 0,0078 \cdot D_{\sigma} \cdot L_{\sigma} \cdot \rho_{\text{нас}} \cdot \sigma \cdot n \quad (3.31)$$

где σ – коэффициент, зависящий от вида насадки и степени заполнения барабана (см. таблицу Г.4 приложение Г)

3.5 Расчет на прочность

3.5.1 Расчет на прочность барабана сушилки

Толщину стенки s выбираем по нормали или определяем из соотношения $S_{\sigma} = (0,007 \div 0,011)D_{\sigma}$, а затем проверяем на прочность и прогиб как балку, свободно лежащую на двух опорах и нагруженную равномерно распределенной нагрузкой q от веса барабана, насадки, бандажей, загружаемого материала (рисунок 7, а).

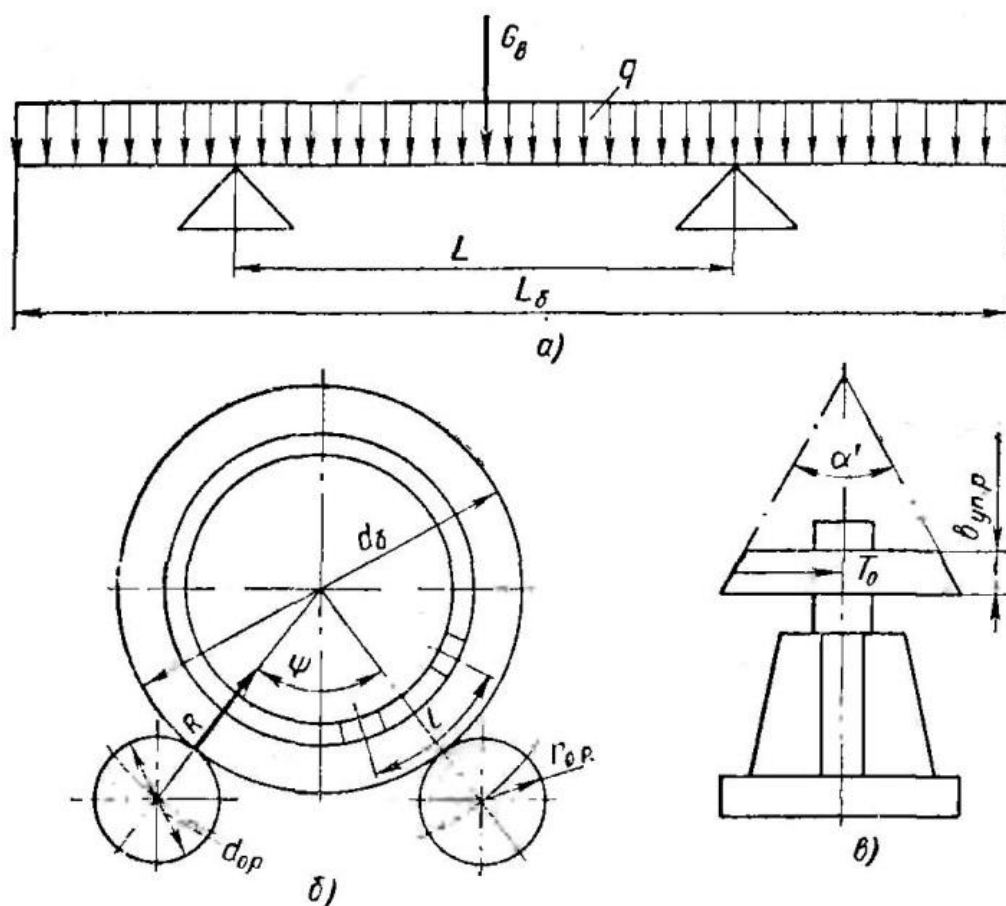


Рисунок 7 – Расчетная схема

Вес венцовой шестерни рассматриваем как сосредоточенную силу.

3.5.1.1 Условие прочности барабана имеет вид

$$\sigma_n = \frac{M_p}{W} \leq \sigma_{u \text{ доп}} \quad (3.31)$$

где M_p - расчетный (приведенный) момент, МН·м;

W - момент сопротивления барабана, м³.

$$M_p = 0,35 \cdot M + 0,65 \cdot \sqrt{M^2 + M_{кр}^2}, \quad (3.32)$$

где M - суммарный изгибающий момент;

$M_{кр}$ - крутящий момент.

Суммарный изгибающий момент

$$M = M_1 + M_2, \quad (3.33)$$

где M_1 - изгибающий момент от равномерно распределенной нагрузки между опорами:

$$M_1 = \frac{G_{\sigma} + G_m}{2} \cdot \frac{L}{2} - q \cdot \frac{L_{\sigma}^2}{8}, \quad (3.34)$$

где $L = 0,586L_{\sigma}$;

M_2 - изгибающий момент от сосредоточенной нагрузки венцовой шестерни:

$$M_2 = \frac{G_6 L}{4}. \quad (3.35)$$

где G_{σ}, G_m, G_6 - силы тяжести соответственно барабана, находящегося в нем материала и венцовой шестерни.

Крутящий момент

$$M_{кр} = \frac{N}{2000 \cdot \pi \cdot n}. \quad (3.36)$$

Момент сопротивления барабана

$$W = 0,785 \cdot D_{\sigma}^2 \cdot S_{\sigma}. \quad (3.37)$$

Затем барабан проверяем на прогиб. Для нормальной работы допускается прогиб не более 1/3 мм на 1 м длины :

$$f \leq 0,0003 \cdot L, \quad (3.38)$$

где L – расстояние между бандажами, м;

f – общий прогиб, м.

Общий прогиб складывается из прогиба f_1 от действия равномерно распределенной нагрузки и прогиба f_2 от сосредоточенной силы, т.е.

$$f = f_1 + f_2. \quad (3.39)$$

где f_1 – прогиб от действия равномерно распределенной нагрузки, м;

f_2 – прогиб от действия сосредоточенной силы, м.

Значения f_1 и f_2 определяем по формулам:

$$f_1 = \frac{5qL}{384EJ}; \quad (3.40)$$

$$f_2 = \frac{G_B L^3}{48EJ}, \quad (3.41)$$

где E - модуль упругости материала, МПа;

J - осевой момент инерции для поперечного сечения барабана, м⁴.

Если условие формулы (3.39) не соблюдается, то увеличивают толщину барабана S_{σ} .

3.5.1.2 Расчет на прочность бандажей сушилки

Рассматривая участок бандажа между двумя башмаками (опорами) (рисунок 7, б) как кривой брус, можно ориентировочно полагать, что он работает на изгиб.

Условие прочности имеет вид:

$$\sigma_u = \frac{M_{\max}}{W} \leq \sigma_{\text{идоп}}, \quad (3.42)$$

где M_{\max} – максимальный изгибающий момент в месте контакта опорного ролика и бандажа, Н*м;

W – момент сопротивления прямоугольного сечения бандажа, м³.

Момент сопротивления прямоугольного сечения бандажа:

$$W = \frac{b_{\sigma} h_{\sigma}^2}{6}, \quad (3.43)$$

где b_{σ} и h_{σ} – ширина и высота бандажа, м.

Максимальный изгибающий момент в месте контакта опорного ролика и бандажа:

$$M_{\max} = \frac{Rl}{4}, \quad (3.44)$$

где l – расстояние между башмаками, м (при числе башмаков m расстояние $l = \frac{\pi D_{\sigma}}{m}$);

R – реакция опорного ролика, МН.

Реакцию опорного ролика определяют по формуле:

$$R = \frac{P}{2 \cos \frac{\psi}{2}}; \quad (3.45)$$

где ψ – угол между опорными роликами (обычно $\psi = 60^\circ$);

P – нагрузка на один бандаж, МН.

Нагрузка на один бандаж:

$$P = \frac{G}{z} \cos \alpha \quad (3.45)$$

где z – число бандажей;

G – сила тяжести барабана с материалом и насадкой, МН;

α – угол наклона барабана.

3.5.1.3 Расчет на прочность опорных роликов

Диаметр бандажей d_{σ} и опорных роликов d_{op} (см. рисунок 7, б) предварительно выбирают по каталогу, а затем выполняют проверку их на контактную прочность.

При отсутствии каталогов ширину бандажа определяют по формуле :

$$d_{\sigma} \geq \frac{R}{q_B}, \quad (3.46)$$

где $q_B = 200$ Н/м – опытное значение допускаемой удельной нагрузки.

Ширина ролика b_{op} должна быть больше ширины бандажа b_{σ} примерно на 30 мм.

Соотношение между диаметром опорного ролика d_{op} и бандажа d_{σ}

$$0,25d_{\sigma} \leq d_{op} \leq 0,33d_{\sigma}. \quad (3.47)$$

Условие контактной прочности в месте соприкосновения ролика и бандажа, где происходит их смятие по образующей, имеет вид

$$\sigma_c = 0,418 \sqrt{\frac{R}{b_{\sigma}} E \frac{r_{\sigma} + r_{op}}{r_{\sigma} r_{op}}} \leq \sigma_{c\text{доп}}; \quad (3.48)$$

где E – модуль упругости материала роликов;

$\sigma_{c\text{доп}}$ – допускаемое напряжение на смятие (для стального литья

$\sigma_{c\text{доп}} = 300 \div 500$ МПа, для чугуна $\sigma_{c\text{доп}} = 350$ МПа);

r_{σ} и r_{op} – наружные радиусы бандажа и опорного ролика.

Схема к расчету на прочность опорных роликов представлена на рисунке 7, в.

Ширину их b_{ynp} (см. рисунок 7, в) выбирают из условия прочности на смятие под действием осевой силы T_0 :

$$\sigma_c = 0,418 \sqrt{\frac{T_0 E}{b_{ynp} r_{\sigma} \sin \frac{\alpha'}{2}}} \leq \sigma_{c\text{доп}}, \quad (3.48)$$

где $T_0 = G \sin \alpha$;

α – угол конусности упорного ролика (обычного $\alpha' \approx 17^\circ$).

Список использованных источников

- 1 Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии : в 2 кн.: учеб. для вузов / Ю.И Дытнерский – М.: Химия, 2002.
- 2 Криворот, А.С. Конструкция и основы проектирования машин и аппаратов химической промышленности : учеб. Пособие для техникумов / А.С. Криворот. – М.: Машиностроение, 1976. – 376 с.
- 3 Основные процессы и аппараты химической технологии: / Г. С. Борисов, В. П. Брыков, Ю. И. Дытнерский [и др.]; Под ред. Ю. И. Дытнерского. – 2е изд., перераб. и дополн. – М.: Химия, 1991. – 446 с.
- 4 Плановский, А.Н. Процессы и аппараты химической технологии. учеб. для техникумов / А.Н. Плановский, В.М. Рамм, С.З. Каган. – М., 1968. – 848 с.
- 5 Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии./ К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. – М.: Химия, 1964. – 634 с.
- 6 Поникаров, И.И. Машины и аппараты химических производств и нефтегазопереработки: учебник. / И.И. Поникаров. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Альфа-М, 2006. – 608 с.
- 7 Расчёты машин и аппаратов химических производств и нефтегазопереработки: учеб. пособие / И. И. Поникаров, С. И. Поникаров, С. А. Рачковский. – М.: Альфа-М, 2008. – 720 с.

Приложение А (справочное)

Давление насыщенного водяного пара при различных температурах

Таблица А.1 – Давление насыщенного водяного пара при температуре от – 20 °С до 100 °С

$t, ^\circ\text{C}$	$p,$ мм рт.мт.	$t, ^\circ\text{C}$	$p,$ мм рт.мт.	$t, ^\circ\text{C}$	$p,$ мм рт.мт.	$t, ^\circ\text{C}$	$p,$ мм рт.мт.	$t, ^\circ\text{C}$	$p,$ мм рт.мт.	$t, ^\circ\text{C}$	$p,$ мм рт.мт.
-19	0,850	+1	4,93	21	18,65	41	58,34	61	156,4	81	369,7
-18	0,935	+2	5,29	22	19,83	42	61,50	62	163,8	82	384,9
-17	1,027	+3	5,69	23	21,07	43	64,80	63	171,4	83	400,6
-16	1,128	+4	6,10	24	22,38	44	68,26	64	179,3	84	416,8
-15	1,238	5	6,54	25	23,76	45	71,88	65	187,5	85	433,6
-14	1,357	6	7,01	26	25,21	46	75,65	66	196,1	86	450,9
-13	1,486	7	7,51	27	26,74	47	79,60	67	205,0	87	468,7
-12	1,627	8	8,05	28	28,35	48	83,71	68	214,2	88	487,1
-11	1,780	9	8,61	29	30,04	49	88,02	69	223,7	89	506,1
-10	1,946	10	9,21	30	31,82	50	92,51	70	233,7	90	525,8
-9	2,125	11	9,84	31	33,70	51	97,20	71	243,9	91	546,1
-8	2,321	12	10,52	32	35,66	52	102,1	72	254,6	92	567,0
-7	2,532	13	11,23	33	37,73	53	107,2	73	265,7	93	588,6
-6	2,761	14	11,99	34	39,90	54	112,5	74	277,2	94	610,9
-5	3,008	15	12,79	35	42,18	55	118,0	75	289,1	95	633,9
-4	3,276	16	13,63	36	44,56	56	123,8	76	301,4	96	657,6
-3	3,566	17	14,53	37	47,07	57	129,8	77	314,1	97	682,1
-2	3,879	18	15,48	38	49,65	58	136,1	78	327,3	98	707,3
-1	4,216	19	16,48	39	52,44	59	142,6	79	341,0	99	733,2
0	4,579	20	17,54	40	55,32	60	149,4	80	355,1	100	760,0

Приложение Б (справочное)

Диаграмма состояния влажного воздуха при различных температурах

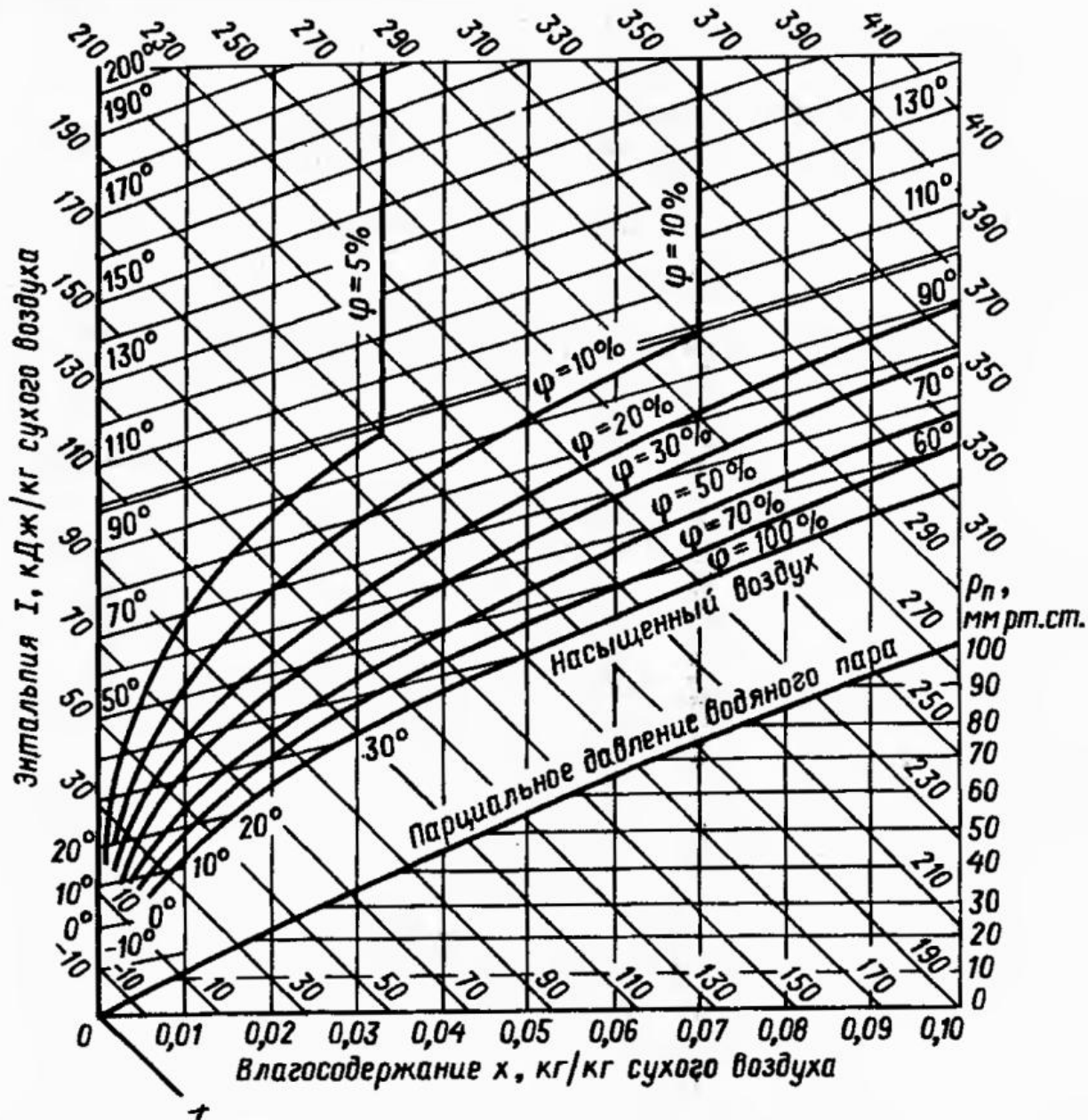


Рисунок Б.1 – I - x диаграмма влажного воздуха (до 200 °С)

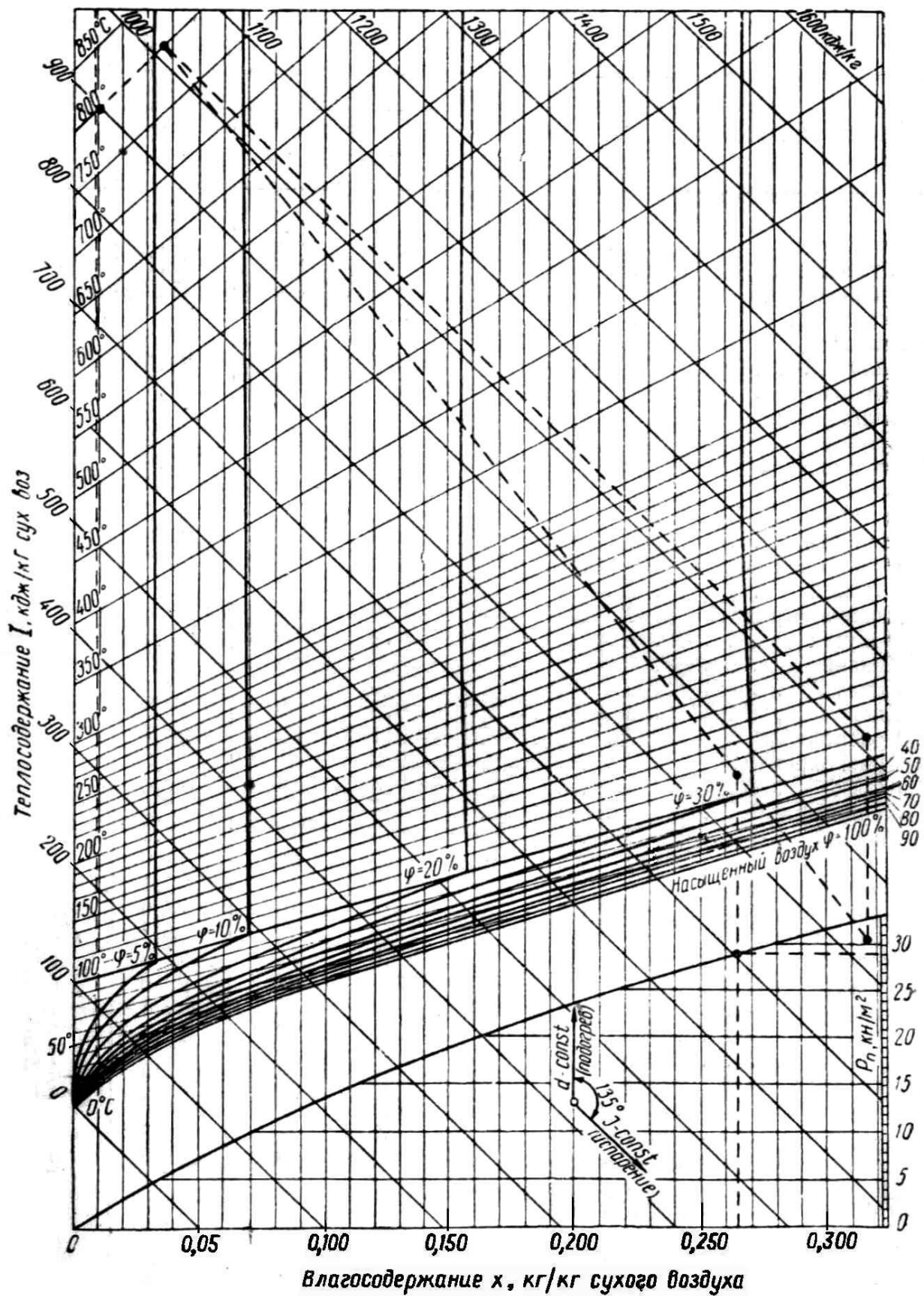


Рисунок Б.2 – I - x диаграмма влажного воздуха при высоких температурах (до 800°C)

Приложение В (справочное)

Свойства насыщенного водяного пара при различных температурах

Таблица В.1 – Свойства насыщенного водяного пара в зависимости от температуры

Температура, °С	Давление (абсолютное), кгс/см ²	Удельный объем, м ³ /кг	Плотность, кг/м ³	Удельная энтальпия жидкости i' , кДж/кг	Удельная энтальпия пара i'' , кДж/кг	Удельная теплота парообразования r , кДж/кг
1	2	3	4	5	6	7
0	0,0062	206,5	0,00484	0	2493,1	2493,1
5	0,0089	147,1	0,00680	20,95	2502,7	2481,7
10	0,0125	106,4	0,00940	41,90	2512,3	2470,4
15	0,0174	77,9	0,01283	62,85	2522,4	2459,5
20	0,0238	57,8	0,01729	83,80	2532,0	2448,2
25	0,0323	43,40	0,02304	104,75	2541,7	2436,9
30	0,0433	32,93	0,03036	125,70	2551,3	2425,6
35	0,0573	25,25	0,03960	146,65	2561,0	2414,3
40	0,0752	19,55	0,05114	167,60	2570,6	2403,0
45	0,0977	15,28	0,06543	188,55	2579,8	2391,3
50	0,1258	12,054	0,0830	209,50	2589,5	2380,0
55	0,1605	9,589	0,1043	230,45	2598,7	2368,2
60	0,2031	7,687	0,1301	251,40	2608,3	2356,9
65	0,2550	6,209	0,1611	272,35	2617,5	2345,2
70	0,3177	5,052	0,1979	293,30	2626,3	2333,0
75	0,393	4,139	0,2416	314,3	2636	2321

продолжение таблицы В.1

1	2	3	4	5	6	7
80	0,483	3,414	0,2929	335,2	2644	2310
85	0,590	2,832	0,3531	356,2	2653	2297
90	0,715	2,365	0,4229	377,1	2662	2285
95	0,862	1,985	0,5039	398,1	2671	2273
100	1,033	1,675	0,5970	419,0	2679	2260
105	1,232	1,421	0,7036	440,4	2687	2248
110	1,461	1,212	0,8254	461,3	2696	2234
115	1,724	1,038	0,9635	482,7	2704	2221
120	2,025	0,893	1,1199	504,1	2711	2207
125	2,367	0,7715	1,296	525,4	2718	2194
130	2,755	0,6693	1,494	546,8	2726	2179
135	3,192	0,5831	1,715	568,2	2733	2165
140	3,685	0,5096	1,962	589,5	2740	2150
145	4,238	0,4469	2,238	611,3	2747	2125
150	4,855	0,3933	2,543	632,7	2753	2120
160	6,303	0,3075	3,252	654,1	2765	2089
170	8,080	0,2431	4,113	719,8	2776	2056
180	10,23	0,1944	5,145	763,8	2785	2021
190	12,80	0,1568	6,378	808,3	2792	1984
200	15,85	0,1276	7,840	852,7	2798	1945
210	19,55	0,1045	9,567	897,9	2801	1904
220	23,66	0,0862	11,600	943,2	2803	1860
230	28,53	0,07155	13,98	989,3	2802	1813
240	34,13	0,05967	16,76	1035	2799	1763
250	40,55	0,04998	20,01	1082	2792	1710
260	47,85	0,04199	23,82	1130	2783	1653

Продолжение таблицы В.1

1	2	3	4	5	6	7
270	56,11	0,03538	28,27	1178	2770	1593
280	65,42	0,02988	33,47	1226	2754	1528
290	75,88	0,02525	39,60	1275	2734	1459
300	87,6	0,02131	46,93	1327	2710	1384
310	100,7	0,01799	55,59	1380	2682	1302
320	115,2	0,01516	65,95	1437	2650	1213
330	131,3	0,01273	78,53	1498	2613	1117
340	149,0	0,01064	93,98	1564	2571	1009
350	15836	0,00884	113,2	1638	2519	881,2
360	190,3	0,00716	139,6	1730	2444	713,6
370	214,5	0,00585	171,0	1890	2304	411,5
374	225	0,00310	322,6	2100	2100	0
Примечание – Пересчет в СИ: $1 \text{ кгс/см}^3 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па}$.						

Приложение Г
(справочное)

Характеристики барабанных сушилок

Таблица Г.1 – Технические характеристики барабанных сушилок

Диаметр и длина барабана, мм		Толщина стенки барабана, мм	Основные размеры, мм								
D_6	L_6		l	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5^*	H	H_1^*	h
1000	4000	5	850	2300	800	1050	1030	490	967	1120	1155
	6000		1250	3500		1450	1430				
1200	6000	6			900	1475		525	1160	1220	1275
	8000		1650	4700		1875	1830				
	10000		2050	5900		2275	2230				
1600	8000	8	1650	4700	1600	1875	1900	575	1453	1420	1770
	10000		2050	5900		2275	2300				
	12000		2500	7000		2725	2750				
2000	8000	10	1650	4700	1200	1925	1960	600	1783	1620	2010
	10000		2050	5900		23325	2360				
	12000		2500	7000		2775	2810				
2200	10000	12	2050	5900	1200	2325	2375	700	1892	1720	2070
	12000		2500	7000		2775	2825				
	14000		2900	8200		3175	3225				
	16000		3350	9300		3625	3675				

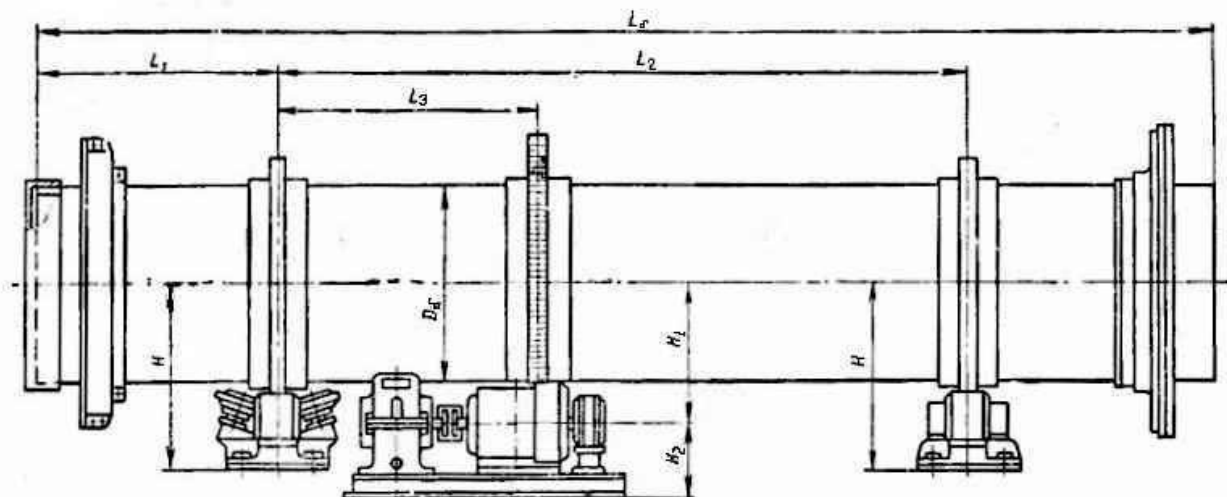


Рисунок Г.1 – Общий вид барабанной сушилки диаметром 1000-2200 мм.

Таблица Г.2 – Вес барабанных сушилок в зависимости от типа насадок

Диаметр и длина барабана, мм		Тип насадки	Вес, кг	Диаметр и длина барабана, мм		Тип насадки	Вес, кг	Диаметр и длина барабана, мм		Тип насадки	Вес, кг
D	L			D	L			D	L		
1000	4000	I	5550	1200	10000	I	10500	2000	8000	III	24580
		L	5200			L	9200		10000		26630
		III	5430			III	9860		12000		28930
	6000	I	6160	8000	I	16230	2200	8000	31720		
		II	5570			II		15380	10000	34120	
		III	6030			III		1690	12000	38490	
1200	6000	I	8460	1600	10000	I	17720	16000			40910
		II	7990			II	16620				
		III	8360			III	17450				
	8000	I	9350	12000	I	19060					
		II	8610		II	17720					
		III	9150		III	19000					

Примечание – I –внутреннее устройство, состоящее из винтовой и секторной насадок; II –внутреннее устройство, состоящее из винтовой и лопастной насадок; III–внутреннее устройство, состоящее из винтовой, лопастной и секторной насадок.

Таблица Г.3 – - Конструктивные показатели промышленных барабанных сушилок

Конструктивные показатели	Номер по заводской спецификации					
	7450	7119	6843	6720	7207	7208
Внутренний диаметр барабана, м	1,5	1,8	2,2	2,2	2,8	2,8
Длина барабана, м	8	12	12	14	12	14
Толщина стенок наружного цилиндра, мм	10	12	14	14	14	14
Объем сушильного пространства, м ³	14,1	30,5	45,6	53,2	74,0	86,2
Общая масса, т	13,6	24,7	42	45,7	65	70

Таблица Г.4 – Значения коэффициента σ

Насадка	Значения σ при степени заполнения барабана			
	0,1	0,15	0,20	0,25
Лопастная, периферийно-лопастная	0,038	0,053	0,063	0,071
Распределительная	0,013	0,026	0,038	0,044
Секторная	0,006	0,008	0,01	0,011