

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Т. Ф. ГОРБАЧЕВА»**

**Кафедра энергоресурсосберегающих процессов
в химической и нефтегазовой технологиях**

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ В КОНВЕКТИВНОЙ СУШИЛКЕ

**Методические указания к лабораторной работе № 16 по дисциплине
«Процессы и аппараты химической технологии»
для обучающихся направлений подготовки
18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы
в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии,
18.03.01 Химическая технология
всех форм обучения**

**Составители Н. Н. Изотов
Н. В. Тиунова
А. Б.Евграфова**

**Рассмотрены и утверждены
на заседании кафедры
Протокол № 2 от 09.10.2018
Рекомендованы к печати
учебно-методической комиссией
направления подготовки 18.03.02
Протокол № 2 от 09.10.2018
Электронная копия находится
в библиотеке КузГТУ**

Кемерово 2018

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель работы – экспериментальное исследование и освоение расчетно-теоретического анализа конвективной сушки.

Задача работы – исследование зависимости скорости сушки от влажности материала при данном состоянии сушильного агента, определение полных и удельных расходов воздуха и тепла на сушку, расчет коэффициента полезного действия сушилки.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Термической сушкой называют процесс удаления из твердых материалов содержащейся в них влаги путем ее испарения и отвода образовавшихся паров.

По способу подвода тепла к высушиваемому материалу различают следующие **виды сушки**: конвективная, контактная, терморadiационная, диэлектрическая (токами высокой частоты), сублимационная.

Дисперсные материалы, имеющие *капиллярно-пористую структуру*, к которым относятся зернистые, порошкообразные, гранулированные, дробленые, высушивают главным образом конвективным способом. Примером капиллярно-пористого материала может служить песок SiO_2 , активированный уголь, керамзит, обожженная глина и т. д.

Конвективной сушкой называется процесс, в котором тепло для процесса сушки несет нагретый газообразный сушильный агент, непосредственно соприкасающийся с поверхностью высушиваемого материала.

По характеру работы различают сушилки *периодического действия* с периодической загрузкой и выгрузкой всего высушиваемого материала и *непрерывного действия*, в которых загрузка и выгрузка материала производится непрерывно.

Теплоноситель, используемый для сушки влажных материалов, называют **сушильным агентом**.

В качестве сушильного агента применяют *нагретый воздух* (наиболее часто), *азот* и *топочные газы*. На процесс сушки существенно влияют параметры сушильного агента: температура t ,

относительная влажность φ , скорость движения относительно материала u , давление в сушильной камере p . Сушильный агент выполняет роль тепло- и влагоносителя.

В промышленности используют различные конструкции конвективных сушилок: *камерные* сушилки периодического действия (материал, находящийся в камерах на полках сушится в неподвижном состоянии); *туннельные (коридорные)* сушилки непрерывного действия (материал передвигается на ленте или в вогонетках вдоль коридора); *барабанные* сушилки (материал перемещается во вращающемся цилиндрическом наклонном барабане); *пневматические* сушилки (материал сушится во взвешенном состоянии, передвигаясь по каналам вместе с сушильным агентом); *распылительные* сушилки (материал представляет собой жидкий раствор и распыляется в сушильной камере посредством механических форсунок); сушилки с *кипящим (псевдооживленным)* слоем (материал образует кипящий слой в восходящем потоке сушильного агента).

В настоящей работе используется камерная сушилка периодического действия с гидродинамическим режимом движения нагретого воздуха через слой неподвижного высушиваемого материала.

При непосредственном взаимодействии влажного материала с сушильным агентом *из-за разности температур поверхности влажного материала и окружающего воздуха (движущая сила сушки)* происходит испарение влаги, т. е. фазовый переход из жидкого в парообразное состояние. Одновременно осуществляется перенос массы паров влаги в окружающий воздух, обусловленный *разностью парциальных давлений паров влаги над влажной поверхностью материала и в окружающем воздухе (движущая сила сушки)*. Процесс переноса влаги с поверхности материала в окружающий воздух называется *внешним влагопереносом*. В результате испарения влаги с поверхности и отвода образовавшихся паров возникают условия внутреннего перемещения влаги из глубинных (внутренних) слоев к поверхности испарения. Этот механизм переноса называется *внутренним влагопереносом*.

По схеме П. А. Ребиндера различают следующие **формы связи влаги с материалом** в порядке убывания величины энергии связи:

– *химическая форма связи*, которая представляет собой прочную связь воды гидрата с веществом в виде гидроксильных ионов и воды типа кристаллогидратов и которую можно выделить химическим взаимодействием или прокаливанием, а не сушкой;

– *физико-химическая форма связи*, которая образуется за счет адсорбции молекул пара из окружающей среды на внешней и внутренней поверхностях;

– *физико-механическая форма связи*, которая представляет собой жидкость, находящуюся на поверхности, в порах и капиллярах материала (*капиллярно связанная влага*).

Капилляры радиусом $r > 10^{-7}$ м носят название макрокапилляров. Влага макрокапилляров и макропор слабо связана с мате-

риалом и называется *свободной (несвязанной) влагой*. К свободной влаге относят механически захваченную воду, удерживаемую в дисперсной системе, и воду смачивания и влагу в макрокапиллярах.

На практике для получения материала в так называемом воздушно-сухом (сыпучем) состоянии обычно ограничиваются удалением свободной влаги.

Испарение влаги происходит не со всей геометрической поверхности тела, а только с поверхности ме-

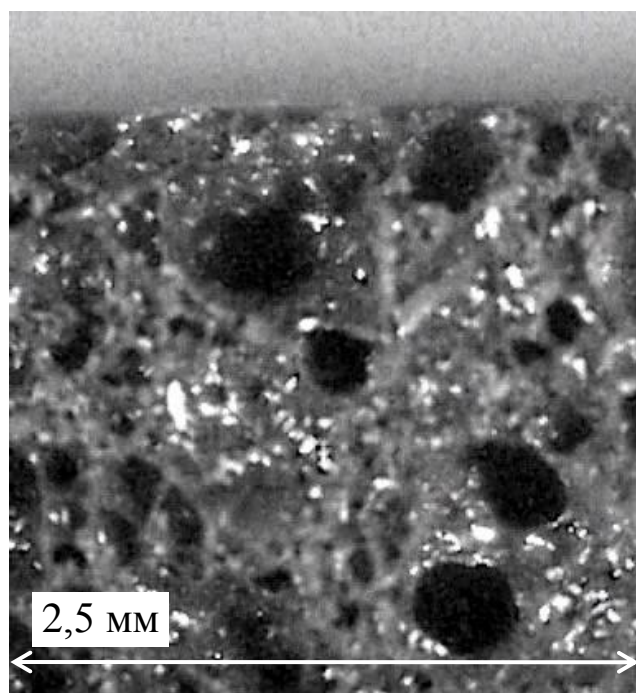


Рис. 1. Электронно-микроскопический снимок внутренней структуры керамзита

нисков жидкости, заключенной в порах и капиллярах. На рис. 1 изображен фрагмент 60-кратного увеличения капиллярно-пористого тела керамзита, используемого при исследовании про-

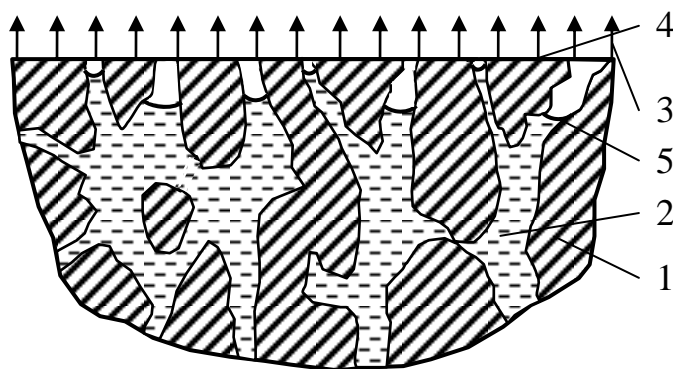


Рис. 2. Фрагмент капиллярно-пористого тела: 1 – скелет твердого тела; 2 – влага в поре (капилляре); 3 – поток пара; 4 – геометрическая поверхность тела; 5 – мениск

цесса конвективной сушки. На рис. 2 изображена схема фрагмента большего увеличения. В процессе сушки мениски отступают в глубь материала, причем в широких порах этот процесс идет интенсивнее, чем в узких, так как для случая менисков при $r < 10^{-7}$ м в них капиллярное давление больше (для выпуклой поверхности

капиллярное давление положительно, для вогнутой оно отрицательно), поэтому происходит отсос влаги из широких пор в узкие через соединяющие их каналы. По формуле Томсона–Кельвина (1870) давление пара над мениском радиуса r равно

$$p(r) = p_n \exp\left(\pm \frac{2\sigma}{r} \frac{v_j}{RT}\right), \quad (1)$$

где σ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м; p_n – давление насыщенного пара над плоской поверхностью, Па; v_j – мольный объем жидкости, м³/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – абсолютная температура, К; знак «плюс» относится к выпуклой поверхности (отсутствие смачивания), знак «минус» – к вогнутой поверхности (случай смачивания).

В процессе сушки параметры влажного воздуха непрерывно изменяются.

Влажный воздух является смесью сухого воздуха и водяного пара и как влаго- и теплоноситель характеризуется **следующими основными параметрами.**

Абсолютная влажность воздуха – это есть концентрация влаги в воздухе ρ_p , которая определяется массой водяного пара m_p (кг), содержащегося в 1 м³ влажного воздуха. Из размерности ρ_p (кг/м³) видно, что это есть *плотность водяных паров* при их парциальном давлении p_p . *Абсолютно сухая часть воздуха* в том же 1 м³ влажного воздуха есть *плотность сухого воздуха* $\rho_{с.в}$ при своем парциальном давлении $p_{с.в}$.

Относительная влажность (степень насыщения) – отношение массы водяного пара в 1 м³ влажного воздуха $\rho_{\text{п}}$ (*плотность ненасыщенного пара*) при данных условиях (t, p) к максимально возможной массе водяного пара в 1 м³ воздуха $\rho_{\text{н}}$ (*плотности насыщенного пара*) при тех же условиях:

$$\varphi = \rho_{\text{п}} / \rho_{\text{н}}. \quad (2)$$

При увеличении температуры воздуха понижается φ из-за повышения $\rho_{\text{н}}$.

Если применить к пару уравнение Менделеева–Клапейрона, то для влажного воздуха вместо соотношения (2) можно использовать следующее соотношение:

$$\varphi \cong \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}} \text{ или } p_{\text{п}} \cong \varphi p_{\text{н}}, \quad (3)$$

где $p_{\text{п}}$ и $p_{\text{н}}$ – соответственно парциальное давление водяного пара и давление насыщенного пара при температуре смеси t (при температуре сухого термометра), Па. Величина $p_{\text{п}}$ может изменяться от нуля (абсолютно сухой воздух) до максимально возможного значения $p_{\text{н}}$ и ее можно определить по диаграмме влажного воздуха Л. К. Рамзина (см. рис. 2 Приложения).

Количество водяного пара $m_{\text{п}}$ (кг), содержащегося во влажном воздухе и приходящегося на 1 кг абсолютно сухого воздуха $m_{\text{с.в.}}$, называется **влажностью** воздуха (кг *влаги*/кг *сухого воздуха*):

$$x = \frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{с.в.}}} = \frac{\mu_{\text{п}}}{\mu_{\text{с.в.}}} \frac{p_{\text{п}}}{P - p_{\text{п}}} = 0,622 \frac{\varphi p_{\text{н}}}{P - \varphi p_{\text{н}}}, \quad (4)$$

где $\mu_{\text{п}}$ и $\mu_{\text{с.в.}}$ – молярные массы соответственно пара и сухого воздуха, кг/кмоль; P – барометрическое давление (Па), которое согласно закону Дальтона, если в первом приближении считать влажный воздух как бинарную смесь водяного пара и сухого воздуха, равно сумме парциальных давлений сухого воздуха $p_{\text{с.в.}}$ и водяного пара $p_{\text{п}}$, т. е.

$$P = p_{\text{с.в.}} + p_{\text{п}}.$$

Давление насыщенного водяного пара $p_{\text{н}}$ зависит только от температуры, т. е. $p_{\text{н}} = f(t)$, и определяется из таблиц равновесия пар–жидкость, а также может быть рассчитано с погрешностью, не превышающей 1 %, по формуле (Па)

$$\lg\left(\frac{p_n}{133,3}\right) = 8,07 - \frac{1733}{t + 234}, \quad (5)$$

где t – температура, °С, при которой происходит испарение воды (например, *температура мокрого термометра* t_m). Температурные пределы применения для формулы (5) от 20 до 100 °С.

Температурой мокрого термометра t_m называется температура, принимаемая жидкостью при испарении ее после достижения теплового равновесия. Это температура, измеряемая термометром, шарик которого покрыт влажной тканью, с которой происходит испарение влаги.

В большинстве случаев процессы конвективной сушки протекают при атмосферном давлении сушильного агента. Поэтому будем пользоваться теплоемкостью воздуха c при постоянном давлении (нижний индекс p опускаем).

Удельную теплоемкость влажного воздуха c относят к 1 кг сухого воздуха:

$$c = c_{с.в} + c_n x, \quad (6)$$

где $c_{с.в}$ и c_n – теплоемкости соответственно сухого воздуха и водяного пара, кДж/(кг·К). В диапазоне температур (от 0 до 100 °С) можно принять $c_{с.в} = 1,005 \div 1,01$ кДж/(кг сухого воздуха·К), а $c_n = 1,97$ кДж/(кг·К).

Энтальпия влажного воздуха I относится к 1 кг абсолютно сухого воздуха (кДж/(кг сухого воздуха)) и определяется при данной температуре воздуха t как сумма энтальпий абсолютно сухого воздуха и водяного пара:

$$I = c_{с.в} t + x i_n. \quad (7)$$

Здесь первое слагаемое представляет собой энтальпию сухого воздуха, а второе – вклад энтальпии водяного пара i_n с учетом его доли x , приходящейся на 1 кг сухого воздуха; t – температура воздуха по сухому термометру, °С; i_n – энтальпия перегретого водяного пара, кДж/кг.

Энтальпию перегретого водяного пара можно представить как сумму теплоты испарения при 0 °С и теплоты нагрева водяных паров до рабочей температуры t (кДж/кг):

$$i_n = r + c_n t = 2493 + 1,97t, \quad (8)$$

где $r = 2493$ кДж/кг – постоянный коэффициент, равный энтальпии пара при 0°C .

Основные параметры влажного воздуха можно с достаточной для технических расчетов точностью определять при помощи ***I–x диаграммы***, впервые разработанной Л. К. Рамзиным и представленной на рис. 2 Приложения.

Состояние влажного материала определяется его температурой и количеством влаги. Как правило, в сушилках периодического действия известными являются масса влажного материала, загружаемого в сушилку G_1 , масса высушенного материала после удаления части влаги G_2 . Масса абсолютно сухого материала G_c определяется экспериментальным путем длительной сушкой.

Количество влаги W_1 , содержащееся в материале перед началом процесса сушки, определяют по формуле (кг)

$$W_1 = G_1 - G_c. \quad (9)$$

Количество влаги W_2 , содержащееся в материале после процесса сушки, определяют по формуле (кг)

$$W_2 = G_2 - G_c. \quad (10)$$

Количество влаги W , удаленной в процессе сушки из влажного материала (кг):

$$W = W_1 - W_2. \quad (11)$$

Тогда материальный баланс по всему количеству вещества выразится равенством (кг)

$$G_1 = G_2 + W. \quad (12)$$

Влажность материала (на сухое тело) определяют по формуле

$$\omega_i = \frac{W_i}{G_c}, \quad (13)$$

где W_i , ω_i – количество влаги, содержащейся в материале и его влажность соответственно через i -тое время после начала процесса сушки, кг и кг/кг.

На *I–x* диаграмме изображают процессы изменения состояния воздуха в процессе сушки (рис. 3). При нагревании влажного воздуха в калорифере его относительная влажность ϕ уменьшается, а влагосодержание x остается постоянным, т. е. $x_0 = x_1$. На диа-

грамме процесс *нагрева* воздуха в калорифере изображается линией 0–1. В сушильной камере при *адиабатической сушке* влага из материала будет испаряться *только* за счет тепла, передаваемого материалу воздухом. При этом, если температура высушиваемого материала не изменяется, энтальпия воздуха после сушилки I_2 будет равна его энтальпии перед сушилкой I_1 , так как все тепло, отданное воздухом на испарение влаги, возвращается обратно в воздух с удаляющимися из материала парами, процесс 1–2. Одновременно понижается температура и увеличивается влагосодержание и относительная влажность воздуха. Такой процесс носит название **теоретического процесса сушки**, а *теоретической сушилкой* называется сушилка, работающая без тепловых потерь, в которой отсутствуют потери тепла в окружающую среду, на нагревание транспортных устройств, высушиваемого материала, нет дополнительного подвода теплоты в сушильную камеру и в которой температура материала при входе и выходе из сушильной камеры принимается равной 0 °С.

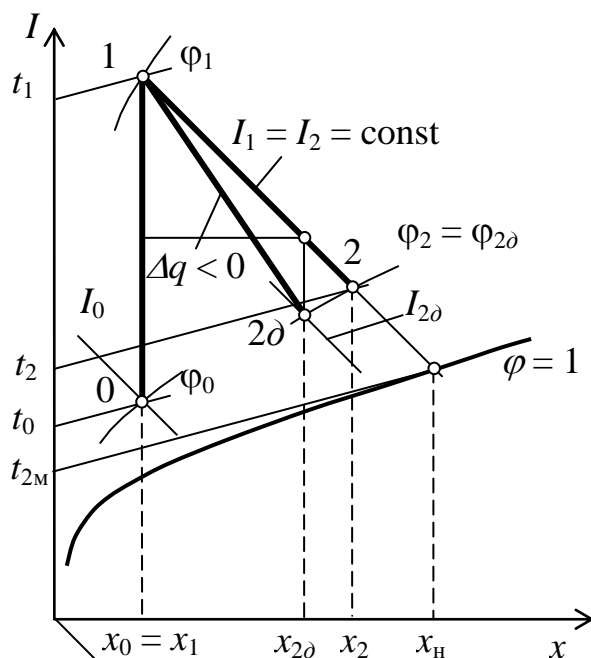


Рис. 3. Изображение процесса сушки на I - x диаграмме

сушилки I_2 будет равна его энтальпии перед сушилкой I_1 , так как все тепло, отданное воздухом на испарение влаги, возвращается обратно в воздух с удаляющимися из материала парами, процесс 1–2. Одновременно понижается температура и увеличивается влагосодержание и относительная влажность воздуха. Такой процесс носит название **теоретического процесса сушки**, а *теоретической сушилкой* называется сушилка, работающая без тепловых потерь, в которой

отсутствуют потери тепла в окружающую среду, на нагревание транспортных устройств, высушиваемого материала, нет дополнительного подвода теплоты в сушильную камеру и в которой температура материала при входе и выходе из сушильной камеры принимается равной 0 °С.

К числу основных задач расчета сушильных установок относится определение расхода воздуха и тепла на сушку.

Рассмотрим случай для сушилки периодического действия. Расчет материальных и тепловых потоков ведем для первого периода сушки.

Баланс влаги в сушилке выражается равенством

$$Lx_2 = Lx_0 + W, \quad (14)$$

где x_0 и x_2 – влагосодержание влажного воздуха на входе в сушилку и на выходе из сушилки, кг *влаги*/(кг *сухого воздуха*); W – количество испаряемой влаги из материала и уходящей с отрабо-

таным воздухом в единицу времени первого периода сушки, кг *влаги*/с; L – расход абсолютно сухого воздуха, кг *сухого воздуха*/с.

Из (14) расход воздуха составит

$$L = \frac{W}{x_2 - x_0}. \quad (15)$$

Удельный расход воздуха (на 1 кг *испаренной влаги*) составит (кг *сухого воздуха*/(кг *влаги*)):

$$l = \frac{L}{W} = \frac{1}{x_2 - x_0}. \quad (16)$$

Поток теплоты в калорифере Q_k (кДж/с, кВт) или удельный поток теплоты q_k (кДж/кг *влаги*) находим из теплового баланса сушильного агента:

$$Q_k = L(I_1 - I_0) \text{ или } q_k = l(I_1 - I_0) = \frac{I_1 - I_0}{x_2 - x_0} \quad (17)$$

где I_0 и I_1 – энтальпия воздуха соответственно на входе в калорифер и на выходе из него, кДж/(кг *сухого воздуха*).

Из теплового баланса сушильной установки для нормального (простого), процесса сушки следует:

$$Q = L(I_2 - I_0) - \sum Q_i, \quad (18)$$

где Q – количество подводимого тепла в сушилку, которое в общем случае складывается из тепла Q_k нагревания сушильного агента в калорифере и тепла $Q_{\text{доп}}$, сообщаемого в сушильной камере, а так как в нашем случае $Q_{\text{доп}} = 0$, то $Q = Q_k$, кВт; I_2 – энтальпия воздуха на выходе из сушилки; $\sum Q_i$ – сумма расходов теплоты в сушильной камере, не связанная с испарением влаги. В проводимой лабораторной работе для первого периода сушки имеют место только потери в окружающую среду, т. е. $\sum Q_i = Q_{\text{п}}$.

Сумма расходов теплоты $\sum Q_i$, отнесенная к количеству испаренной влаги W , определяется зависимостью

$$\Delta q = \frac{\sum Q_i}{W}. \quad (19)$$

Величина Δq , определяемая уравнением (19), называется *параметром сушки*.

Разделив все члены уравнения (18) на W (общее количество испаренной влаги) с учетом (19), приведем уравнение (18) к виду

$$l(I_2 - I_0) - q_k = \Delta q. \quad (20)$$

С учетом уравнения (17) для q_k получаем

$$l(I_2 - I_1) = \Delta q \text{ или } \frac{I_2 - I_1}{x_2 - x_0} = \Delta q. \quad (21)$$

Это выражение является основной формой теплового баланса конвективных сушилок.

В случае если сумма расходов теплоты в сушилке Δq равняется нулю, то такая сушилка называется теоретической и уравнение теплового баланса для теоретической сушилки имеет вид

$$Q_k = L(I_2 - I_0) \\ \text{или } q_k = l(I_2 - I_0) \quad (22)$$

Из формул (17) и (22) видно, что в теоретической сушилке $I_1 = I_2$.

Построение процесса в реальной сушилке сводится к определению наклона линии сушки. Эта линия имеет начальную точку 1 (рис. 3). Линия сушки в реальной сушилке соответствует уравнению (21) и практически всегда $\Delta q < 0$, т. е. $I_2 < I_1$, и соответственно линия сушки будет более крутой (линия 1–2д на рис. 3) и пройдет ниже $I_1 = \text{const}$.

Если известны параметры воздуха на выходе из сушилки в первый период сушки, т. е. при постоянной скорости сушки, которые соответствуют, например, параметрам в точке 2д (рис. 3), то уравнение (21) можно записать в виде

$$\frac{I_{2д} - I_1}{x_{2д} - x_0} = \Delta q. \quad (23)$$

Уравнение (23) показывает сумму расходов теплоты (параметр сушки) Δq в реальной сушилке, отнесенную к количеству испаренной влаги из материала W_0 в первый период сушки (кг *влаги*), т.е. в период постоянной скорости сушки. Для этого периода W_0 определяется следующим образом (см. рис. 4 и 5):

$$W_0 = W_n - W_{кр}, \quad (24)$$

где W_n и $W_{кр}$ — количество влаги, находящееся во влажном материале в начальный момент первого периода сушки и в конце это-

го периода, кг. Этот период характеризуется постоянной скоростью удаляемой влаги $W_{\text{и}} = W_{\text{д}} / (\tau_{\text{кр}} - \tau_{\text{н}})$, кг *влаги/с*, $\tau_{\text{н}}$ и $\tau_{\text{кр}}$ – время начала и конца первого периода сушки, с.

Согласно уравнению (23)

$$I_1 - I_{2\text{д}} = -\Delta q (x_{2\text{д}} - x_0) = -\frac{\Delta q}{l_{\text{д}}}, \quad (25)$$

где $l_{\text{д}}$ – удельный расход сухого воздуха на 1 кг испаренной влаги $W_{\text{д}}$. Таким образом, общий расход сухого воздуха в реальной сушилке $L_{\text{д}}$ (кг *сухого воздуха/с*) для удаления влаги $W_{\text{д}}$ составит

$$L_{\text{д}} = l_{\text{д}} W_{\text{и}}. \quad (26)$$

Линия сушки теоретической сушилки проводится из точки 1 по линии $I = \text{const}$ (рис. 3) до пересечения с линией $\varphi_2 = \text{const}$, начинающейся из точки 2д. Конечная точка 2 характеризует состояние воздуха на выходе из теоретической сушилки.

Зная параметры в точке 2 и измеренный расход воздуха, по уравнению (15) можно определить скорость испаряемой влаги из материала в теоретической сушилке W (кг *влаги/с*) через удельный расход l , определяемый по формуле (16) как $l = (x_2 - x_0)^{-1}$, и по известному расходу сухого воздуха L , измеренному ротаметром, т. е.

$$W = \frac{L}{l}. \quad (27)$$

Заметим, что ротаметром измеряется расход влажного воздуха $L_{\text{в.в.}}$, по которому можно вычислить расход абсолютно сухого воздуха из очевидной зависимости:

$$L = L_{\text{в.в.}} (1 - x_0). \quad (28)$$

Тепловой КПД теоретической сушилки:

$$\eta_{\text{т}} = \frac{r}{q_{\text{к}}}, \quad (29)$$

где r – удельная теплота парообразования воды при температуре мокрого термометра $t_{\text{м}}$ воздуха, выходящего из сушилки, кДж/кг (см. табл. 4 Приложения).

Тепловой КПД действительной сушилки:

$$\eta_{\text{д}} = \frac{r}{q_{\text{к}} + \Delta q} = \frac{r}{q_{\text{д}}}. \quad (30)$$

Для первого периода сушки способность воздуха поглощать влагу из материала характеризуется **потенциалом сушки (движущей силой сушки)**, то есть разностью между температурой воздуха t по сухому термометру и температурой мокрого термометра t_m (температура поверхности влажного материала):

$$\varepsilon = t - t_m.$$

Потенциал сушки определяет скорость испарения влаги из материала, которая зависит от состояния воздуха, поэтому можно **потенциал сушки (движущую силу сушки)** выразить и через разность влагосодержаний, что более целесообразно:

$$\Delta x = x_n - x,$$

где x_n – влагосодержание насыщенного воздуха в поверхностном слое над материалом (см. рис. 3); x – влагосодержание ненасыщенного воздуха в ядре воздушного потока.

Пока влажность ω материала велика (в начале процесса), влага, диффундирующая из внутренних слоев к наружным, будет полностью смачивать поверхность материала. В этих условиях скорость сушки определяется скоростью, с которой влага диффундирует через пограничный слой воздуха, насыщенный влагой. При постоянстве внешних условий (температуры воздуха, его влагосодержания, скорости и направления движения и т. д.) скорость сушки $u = d\omega/d\tau$, т. е. масса влаги, испарившаяся из единицы массы материала за единицу времени, будет постоянной. Поэтому этот период сушки называют **периодом постоянной скорости** или **периодом внешней диффузии** (рис. 4, 5 период I, участок BC).

Этому периоду предшествует некоторый период прогрева материала до температуры сушки (рис. 4, 5 участок AB).

С момента, когда количество влаги, подводимой к поверхности, становится меньше того, которое могло бы испариться, скорость сушки будет падать. Влажность материала, при которой начинается период падающей скорости, называют **критической** $\omega_{кр}$.

Сушку обычно заканчивают по достижении некоторой конечной влажности, определяемой требованиями технологического процесса. В пределе же конвективная сушка может продолжаться до тех пор, пока материал не достигнет **равновесной влажности** ω_p .

В *период падающей скорости* течение процесса сушки обусловлено диффузией влаги к поверхности испарения, ско-

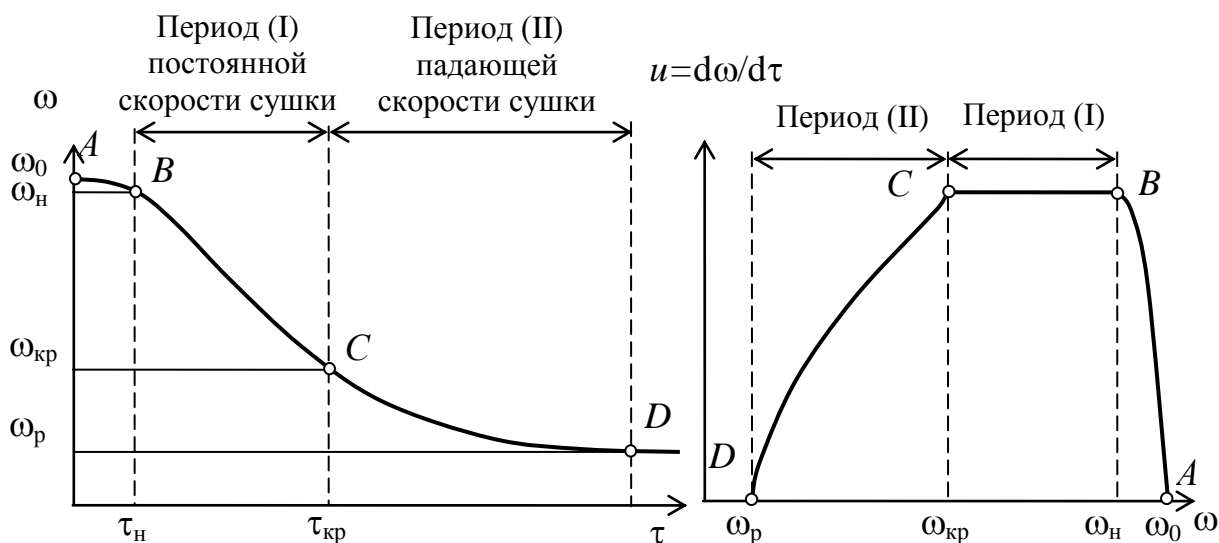


Рис. 4. Кривая сушки материала

Рис. 5. Кривая скорости сушки

рость которой определяется структурой материала и его температурой, но мало зависит от внешних условий (рис. 4, 5 период II, участок *CD*). В конце второго периода сушки влажность материала асимптотически приближается к *равновесной*. Достижение равновесной влажности ω_p обозначает полное прекращение дальнейшего испарения влаги из материала (точка *D*).

3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе экспериментально определяют влажность материала, скорость сушки и параметры сушильного агента (температуру, энтальпию, абсолютную и относительную влажность). Рассчитывают полные и удельные расходы воздуха и тепла, коэффициенты полезного действия реальной и теоретической сушилок. Также определяют количество удаленной влаги.

3.1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

До выполнения работы следует изучить устройство лабораторного стенда и правил техники безопасности.

Опытная установка (рис. 6) предназначена для изучения процесса конвективной сушки и состоит из сушильной камеры

8 и системы подачи воздуха. Воздух подается из помещения вентилятором 1, проходит электрический калорифер 6 и поступает в сушильную камеру 8. Калорифер подключен в сеть через лабораторный трансформатор 5. Для измерения расхода воздуха установлен ротаметр 3. Регулирование расхода осуществляется вентилем 2. Температуру и влажность воздуха, покидающего сушилку, измеряют психрометром 12.

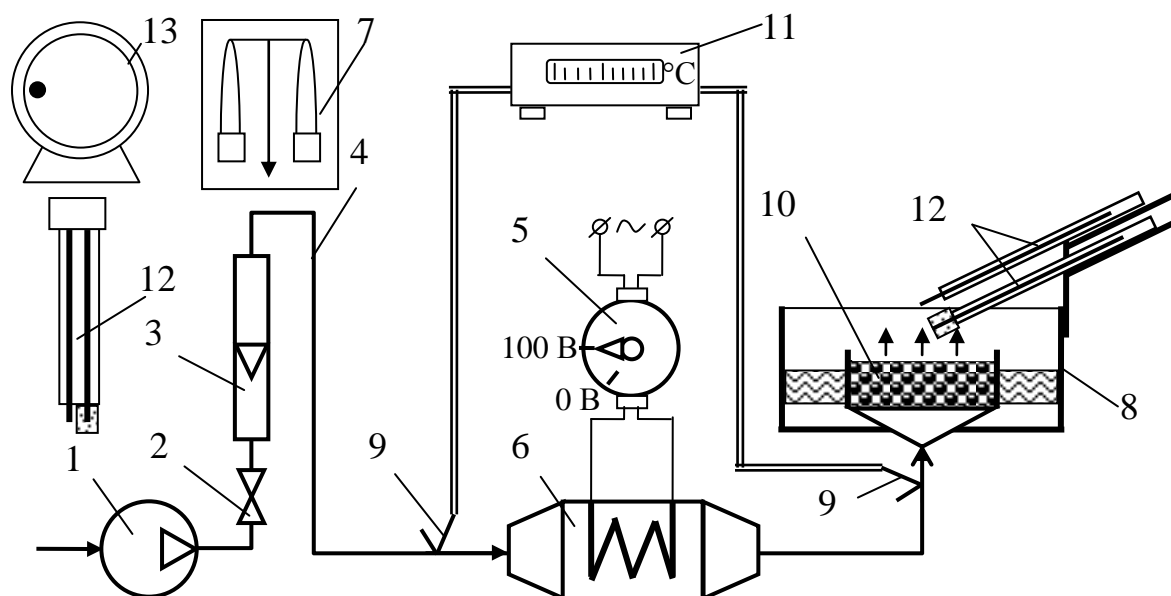


Рис. 6. Схема лабораторной установки:

- 1 – воздуходувка; 2 – вентиль; 3 – ротаметр; 4 – воздухопровод;
 5 – ЛАТР; 6 – калорифер; 7 – весы; 8 – сушильная камера;
 9 – термопара; 10 – материал; 11 – потенциометр;
 12 – психрометр; 13 – сушильный шкаф

Температура и относительная влажность воздуха, поступающего в сушилку, измеряется при помощи психрометра 12, находящегося в помещении. Для измерения температуры сушильного агента на входе в калорифер 6 и на выходе из него установлены две термопары 9 с потенциометром 11.

Влажный материал 10 устанавливают внутрь сушильной камеры 8 в сетчатой корзине на распределительную решетку.

Для определения влажности материала в процессе сушки отбираемые пробы взвешивают на аналитических весах 7, потом пробы помещают в сушильный шкаф 13 для удаления влаги и вторично взвешивают.

Измерение температуры и влажности воздуха, покидающего сушилку, производят психрометром 12.

3.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В первую очередь необходимо проверить заземление и изучить работу лабораторного стенда.

Подготовка материала.

Необходимо приготовить сыпучий материал, который будет использован в опыте в качестве высушиваемого материала.

1. Помещают в заранее включенный сушильный шкаф 13 рабочее вещество (керамзит) и оставляют на 20 мин при температуре 90–95 °С, т. е. удаляют излишнюю влагу из материала.

2. Прогретый в сушильном шкафу рабочий материал (сухой) взвешивают на аналитических весах 7. Записывают массу сухого материала в табл. 1 Приложения.

3. Увлажняют материал и вновь взвешивают. Делают запись массы влажного материала в табл. 1 Приложения.

Прогрев сушильного агента

4. Включают вентилятор 1, и при помощи крана 2 устанавливают необходимый расход воздуха 40÷80 делений ротаметра 3.

5. Включают калорифер 6, устанавливают напряжение 100 В на лабораторном трансформаторе.

6. Потенциометром 11 измеряют температуру на входе в калорифер и на входе в сушильную камеру переключением клавиши. Необходимо дождаться стационарного процесса (температура на выходе из калорифера должна быть постоянной), тогда можно начинать проведение процесса сушки материала.

Процесс сушки

7. Влажный материал помещают в сушильную камеру, включают секундомер и устанавливают в камеру психрометр.

8. Через 1 мин измеряют температуру по сухому и мокрому термометру (психрометр) на выходе из сушилки (записывают в табл. 1 Приложения) и отбирают пробу в заранее приготовленную взвешенную тару (фильтровальную бумагу).

9. Повторяют пункт 8 десять-двенадцать раз.

Обработка проб

10. В ходе процесса пробы влажного материала последовательно взвешивают, вес фиксируют в табл. 1 Приложения, вычитая вес тары.

11. Затем взвешенные, влажные пробы помещают в сушильный шкаф на 30 мин.

12. После удаления влаги пробы вновь взвешивают на аналитических весах с целью определения количества влаги, содержащейся в материале проб. Вес сухих проб записывают в табл. 1 Приложения.

Затем по результатам измерений проводят расчеты.

3.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Определяют остаточное количество влаги в образцах материала по формуле $W_i = G_{Bi} - G_{Ci}$, где i – номер пробы.

2. Вычисляют влажность образцов материала (на сухое вещество) $\omega_i = \frac{W_i}{G_{Ci}}$ и записывают в табл. 1 Приложения.

3. Строят кривую сушки (пример на рис. 4), то есть изменение средней влажности материала ω , отнесенной к количеству абсолютно сухого материала, во времени τ .

4. Затем определяют скорость сушки в каждой точке процесса сушки графическим дифференцированием как тангенс угла наклона касательной к кривой сушки, проведенной к заданной точке. Значения скорости сушки фиксируют в табл. 1 Приложения.

5. По полученным значениям строят кривую скорости сушки (пример на рис. 5), выделяют периоды сушки.

6. Далее определяют на диаграмме Рамзина (см. пример на рис. 3 и диаграмму Рамзина рис. 2 в Приложении) свойства сушильного агента в характерных точках 0, 1 и 2д для реальной сушилки и 2 для теоретической (для одного из замеров по указанию преподавателя).

Для точки 0 известны значения t_0 и $t_{0м}$ на входе в установку, по ним находим параметры сушильного агента.

Для определения параметров в точке 1 поднимаемся из точки 0 по линии постоянного влагосодержания до температуры перед сушильной камерой t_1 .

Для точки 2 δ известны температуры $t_{2\delta}$ и $t_{2\delta\text{м}}$ после камеры в первый период сушки.

Точку 2 находят на диаграмме, опускаясь из точки 1 по линии постоянной энтальпии до линии относительной влажности равной $\varphi_{2\delta}$.

Отсюда видно, что $x_0 = x_1$, $I_1 = I_2$ и $\varphi_{2\delta} = \varphi_2$.

Все найденные значения параметров в точках 0, 1, 2 δ и 2 заносят в табл. 2 Приложения.

7. Вычисляют сумму расходов теплоты (параметр сушки) Δq в реальной сушилке по уравнению (23) и заносят в табл. 3 Приложения.

8. Рассчитывают удельный расход воздуха для теоретической сушилки по уравнению (16) и для действительной сушилки по формуле

$$l_{\delta} = \frac{1}{x_{2\delta} - x_0}$$

и заносят в табл. 3 Приложения.

9. Определяют количество испаренной влаги в реальной сушилке в первый период сушки W_{δ} по уравнению

$$W_{\delta} = G_{\text{с0}}(\omega_{\text{н}} - \omega_{\text{кр}})$$

и скорость испарения влаги из материала в первый период сушки реальной сушилки $W_{\text{и}}$ по зависимости

$$W_{\text{и}} = \frac{W_{\delta}}{\tau_{\text{кр}} - \tau_{\text{н}}}.$$

Полученные значения заносят в табл. 3 Приложения.

10. Далее из уравнения (26) определяют общий расход сухого воздуха в реальной сушилке L_{δ} и записывают в табл. 3 Приложения.

11. Рассчитывают общий расход сухого воздуха L для теоретической сушки по зависимости (28), учитывая, что массовый расход влажного воздуха определяем по зависимости:

$$L_{\text{в.в}} = \rho_{\text{в}} V = 1,293 \frac{273p}{p_0(273 + t_0)} V,$$

где V – расход воздуха, измеренный ротаметром из тарировочного графика (рис. 1 Приложения), м³/с; $p_0 = 101325$ Па – давление при нормальных условиях; p – действительное давление, при ко-

тором происходит измерение расхода (принимается равным 101600 Па); t_0 – температура воздуха на входе в сушильную установку, °С. Полученный расход фиксируют в табл. 3 Приложения.

12. Определяют по зависимости (27) скорость испаряемой влаги W из материала в теоретической сушилке и заносят в табл. 3 Приложения.

13. Сравнивают значения скоростей удаляемой влаги из материала W и $W_{\text{и}}$, полученные из разных балансовых уравнений.

14. Количество испаряемой влаги $W_{\text{т}}$ в теоретической сушилке рассчитывают по уравнению

$$W_{\text{т}} = W(\tau_{\text{кр}} - \tau_{\text{н}}).$$

15. Удельный расход тепла (Дж/кг) в теоретической сушилке находят по формуле (22), а в реальной сушилке

$$q_{\text{д}} = q_{\text{к}} + \Delta q.$$

Полученные расходы теплоты фиксируют в табл. 3 Приложения.

15. Тепловые КПД теоретической сушилки $\eta_{\text{т}}$ и реальной $\eta_{\text{д}}$ определяют соответственно по формулам (29) и (30), где удельную теплоту парообразования воды находят из табл. 4 Приложения по температуре мокрого термометра $t_{2\text{дм}}$ воздуха, выходящего из сушилки в первый период сушки (см. табл. 1 Приложения).

Полученные значения заносят в табл. 3 Приложения.

4. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

Перед работой все студенты обязаны пройти инструктаж по технике безопасности. Все виды работ выполняются студентами только по указанию и под руководством преподавателя или лаборанта.

ЗАПРЕЩАЕТСЯ:

- а) оставлять без присмотра находящуюся в работе установку;
- б) производить исправления в электрической схеме;
- в) работать с незаземленным оборудованием;
- г) производить работы на оборудовании, не относящемся к данной лабораторной установке.

5. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет оформляется на листах формата А4 и должен содержать:

- а) титульный лист установленной формы;
- б) кратко изложенные теоретические положения;
- в) принципиальную схему лабораторной установки;
- г) таблицы измеренных и рассчитанных величин;
- д) обработку результатов;
- е) графики $\omega = f(\tau)$, $u = f(\omega)$;
- ж) выводы по работе.

Чертежи, схемы и таблицы оформлять в соответствии со стандартом.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Цель работы. Дать определение процессу сушки. Виды сушки.
2. Что является движущей силой процесса сушки? Потенциал сушки.
3. Формы связи влаги с материалом по П. А. Ребиндеру.
4. Основные параметры влажного воздуха.
5. Построение кривых сушки и скорости сушки. Периоды сушки.
6. Что такое критическая, равновесная влажность материала?
7. Как изменяется температура материала в процессе конвективной сушки?
8. Определение термодинамических параметров влажного воздуха с использованием I – x диаграммы Рамзина.
9. Схема простой сушки и изображение процессов теоретической и действительной сушки на диаграмме Рамзина.
10. Схема сушки с промежуточным подогревом воздуха по зонам: принципиальная схема, изображение теоретического процесса на диаграмме Рамзина.

11. Схема сушилки с циркуляцией отработанного воздуха: принципиальная схема, изображение теоретического процесса на диаграмме Рамзина.
12. Тепловой баланс конвективной сушилки.
13. Схемы конструкций сушилок: камерной, барабанной, ленточной. Принципы действия.
14. Физическая сущность процессов при различных видах сушки.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – Москва: Альянс, 2014. – 753 с.
2. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: в 2 кн. Кн. 2 / под ред. В. Г. Айнштейна. – Москва: Высшая школа, 2002. – 872 с.
3. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов, машин и аппаратов химической технологии / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – Москва: Альянс, 2005. – 576 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Измеренные и расчетные параметры действительной сушки

Объемный расход воздуха $V_0 =$ дел = м³/с (при $t_0 =$ °С)

№ п/п	Теку- щее время τ, с	Температура воздуха, °С			Масса образ- цов, кг		Коли- чество влаги W_i , кг	Влажность материала на сухое вещество ω_i , кг/кг	Ско- рость сушки u , кг/(кг·с)
		на входе в ка- меру t_1	на выходе из сушилки						
			сухой термометр $t_{2\partial}$	мокрый термометр $t_{2\partial M}$	влаж- ного G_{Bi}	сухо- го G_{Ci}			
0	—	—	$t_0 =$	$t_{0M} =$	$G_{B0} =$	$G_{C0} =$	$W_0 =$	$\omega_0 =$	—
1									
...									

Таблица 2

Свойства влажного воздуха в характерных точках

№ точки	Тем- пера- тура t , °С	Температу- ра мокрого термометра t_m , °С	Темпера- тура точ- ки росы t_p , °С	Влагосо- держание x , кг/кг сух.возд.	Относи- тельная влажность ϕ , %	Энтальпия I , кДж/кг	Парциальное давление p_p , мм рт. ст.
0							
1							
2 ∂							
2							

Таблица 3

Расчетные величины действительной и теоретической сушки

Параметры	Действительная сушка	Теоретическая сушка
1. Параметр сушки, кДж/кг влаги	$\Delta q =$	$\Delta q_T = 0$
2. Скорость удаления влаги из материала в первый период сушки, кг влаги/с	$W_{и} =$	$W =$
3. Количество испаряемой влаги в первый период сушки, кг	$W_{\partial} =$	$W_T =$
4. Удельный расход воздуха, кг сух. возд. /кг влаги	$l_{\partial} =$	$l =$
5. Полный расход воздуха, кг сух. возд./с	$L_{\partial} =$	$L =$
6. Удельный расход тепла, кДж/кг влаги	$q_d =$	$q_k =$
7. Тепловой КПД, %	$\eta_d =$	$\eta_T =$

Таблица 4

Удельная теплота парообразования водяного пара

$t, ^\circ\text{C}$	$r, \text{кДж/кг}$	$t, ^\circ\text{C}$	$r, \text{кДж/кг}$	$t, ^\circ\text{C}$	$r, \text{кДж/кг}$	$t, ^\circ\text{C}$	$r, \text{кДж/кг}$
0	2493	30	2426	60	2357	90	2285
5	2482	35	2414	65	2345	95	2273
10	2470	40	2403	70	2333	100	2260
15	2460	45	2391	75	2321	105	2248
20	2448	50	2380	80	2310	110	2234
25	2437	55	2368	85	2297	115	2221

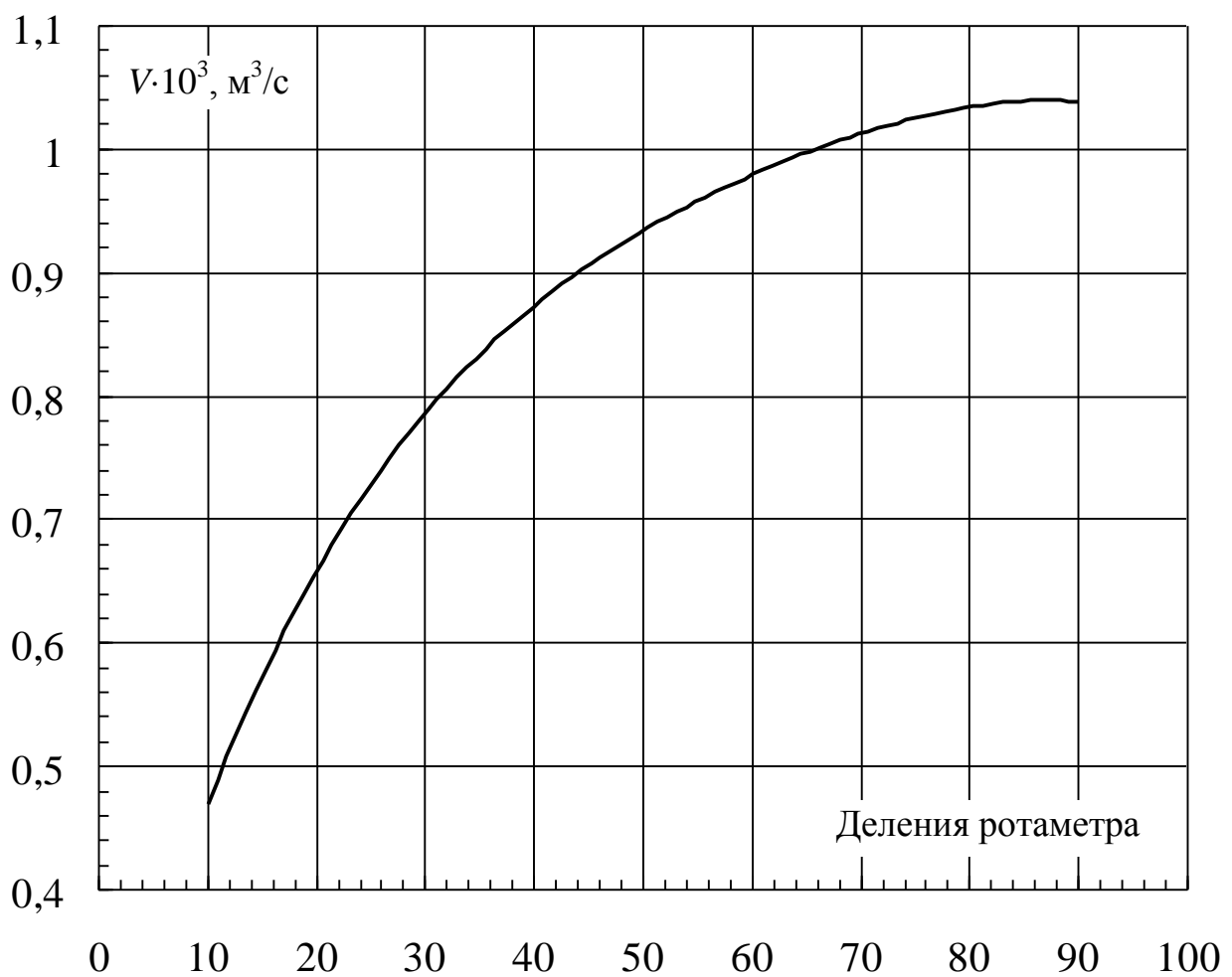
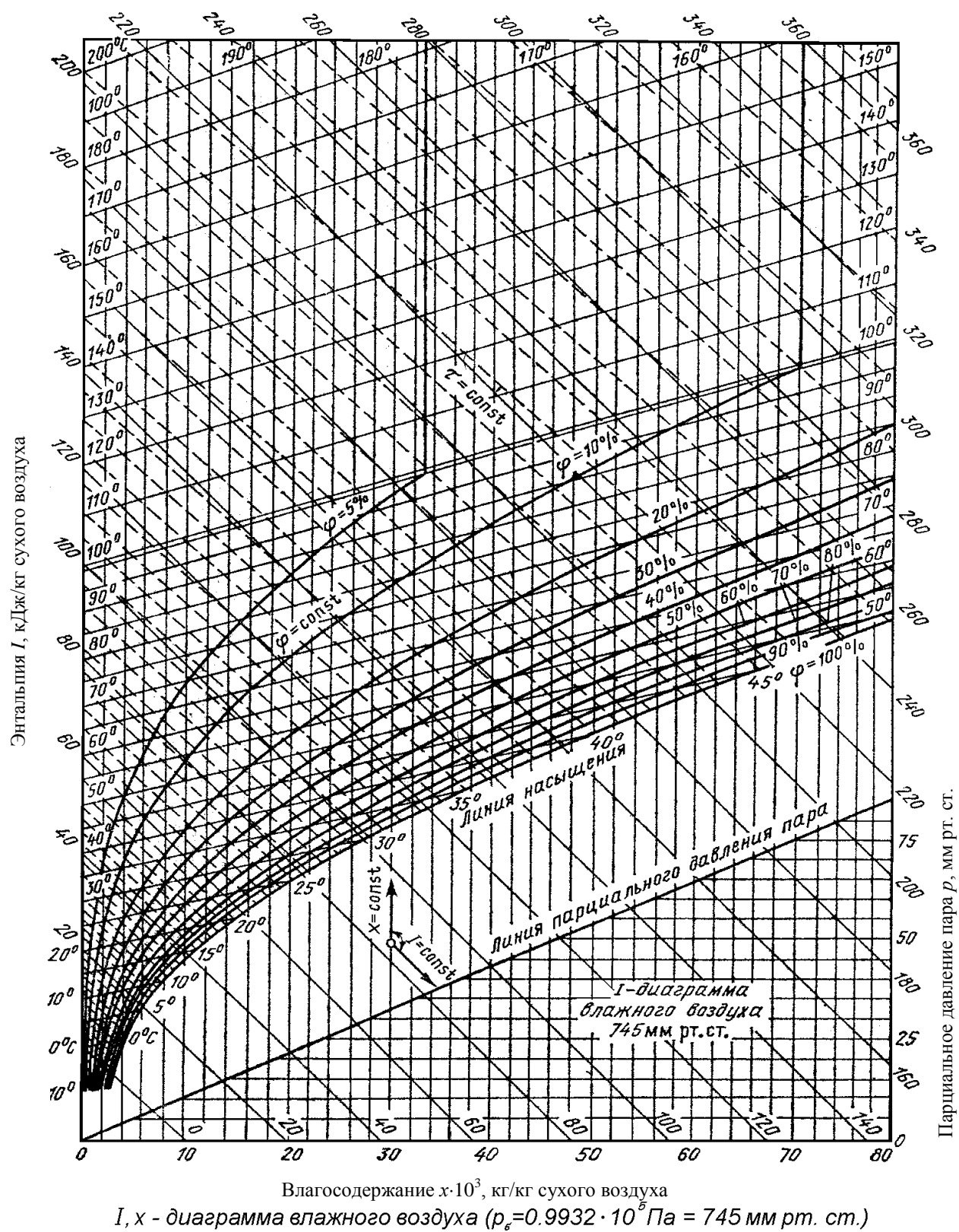


Рис. 1. Тарировочная кривая расхода воздуха



Составители
Тиунова Наталья Владимировна,
Изотов Николай Николаевич,
Евграфова Анна Борисовна

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ В КОНВЕКТИВНОЙ СУШИЛКЕ

Методические указания к лабораторной работе № 16 по дисциплине
«Процессы и аппараты химической технологии»
для обучающихся направлений подготовки
18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы
в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии,
18.03.01 Химическая технология
всех форм обучения

Печатается в авторской редакции

Рецензент Михайлов Геннадий Сергеевич

Подписано в печать 06.11.2018. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Уч-изд. л. 1,3.

Тираж 34 экз. Заказ .

КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Издательский центр УИП КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Бедного, 4а.