

Министерство образования Российской Федерации
Владимирский государственный университет
Кафедра технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов

ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Методические указания к лабораторным работам

Составитель
В.А. ЛАБУТИН

Владимир 2003

УДК 518.12 (076.5)

Рецензент

Кандидат химических наук, профессор кафедры «Химия»
Владимирского государственного университета

Б.А. Кухтин

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Владимирского государственного университета

Тепло- и массообменные процессы химической технологии: Метод. указания к лабораторным работам / Владим. гос. ун-т; Сост.: В.А. Лабутин. Владимир, 2003. 36 с.

Составлены в соответствии с программами лабораторных занятий по курсу «Процессы и аппараты химической технологии».

Содержит методические указания для выполнения четырех лабораторных работ по второй части курса «Процессы и аппараты химической технологии».

Предназначены для студентов специальностей 250600 – технология переработки пластмасс и эластомеров и 250800 – химическая технология тугоплавких неметаллических и материалов всех форм обучения.

Табл.6 Ил. 8 Библиогр.: 7 назв.

УДК 518.12 (076.5)

Лабораторная работа № 1

КОНВЕКТИВНАЯ СУШКА ВЛАЖНОГО МАТЕРИАЛА

Цель работы

1. Экспериментальное изучение процесса конвективной сушки влажного материала и определение константы скорости процесса.
2. Расчетное определение продолжительности процесса.
3. Ознакомление с сушильными установками по литературе.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В настоящее время широкое распространение получили следующие способы сушки: 1) конвективная; 2) кондуктивная; 3) радиационно-конвективная; 4) сушка в электромагнитном поле; 5) сублимационная; 6) комбинированные способы.

Использование того или иного способа сушки обуславливается, прежде всего, двумя факторами: экономикой процесса, или стоимостью процесса сушки по сравнению со стоимостью высушенного продукта, и требованиями, предъявляемыми к качеству высушенного продукта.

Все многообразие влажных материалов, подвергающихся сушке, в соответствии с классификацией А.В. Лыкова, условно подразделяют на три большие группы:

1. Типичные коллоидные тела. При удалении влаги эти тела значительно изменяют свои размеры (сжимаются), но сохраняют свойства (желатин, прессованное мучное тесто).

2. Капиллярнопористые тела. При удалении влаги эти тела становятся хрупкими, мало сжимаются и могут быть превращены в порошок (слабо обожженные керамические материалы, кварцевый песок, древесный уголь и т.д.).

3. Коллоидно-капиллярнопористые тела, обладающие свойствами первых двух видов. К числу этих видов принадлежит подавляющее большинство материалов, подвергающихся сушке.

Все влажные материалы, подвергаемые сушке, изменяют свои физические свойства. Эти изменения обусловлены молекулярным характером связи влаги с веществом тела. Кроме того, перенос влаги внутри высушиваемого тела зависит от характера молекулярной связи жидкости, содержащейся в теле, с веществом скелета тела. Поэтому анализ связи влаги с материалом представляет особый интерес для физики переноса тепла и массы.

Процесс удаления жидкости из тела сопровождается нарушением связи ее с телом, на что затрачивается определенная энергия. Поэтому классификация формы связи влаги с материалом должна быть построена по принципу изучения интенсивности энергии связи. По такому принципу построена схема академика П.А. Ребиндера, согласно которой различают химическую, физико-химическую и физико-механическую формы связи. Химически связанная влага удерживается наиболее прочно и представляет собой воду, которая входит в химическую структуру вещества, например кристаллогидраты ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Вода физико-химической связи представлена водой, способной удерживаться на поверхности материала за счет молекулярных сил. Основная масса данной формы связи воды является свободной и сохраняет свои свойства.

Одним из самых распространенных способов удаления влаги из материала является сушка *в токе нагретого воздуха*, или *конвективная сушка*.

Движущей силой процесса сушки является разность упругости водяных паров непосредственно над высушиваемым материалом R_m и парциального давления водяных паров в окружающем пространстве R_p . При соприкосновении влажного материала с нагретым воздухом начинается испарение влаги с поверхности материала и образующийся пар диффундирует через пограничный слой в окружающий воздух. В материале возникает разность концентрации влаги (на поверхности и в центре тела), и она начинает перемещаться из внутренних слоев к поверхности. Пока влага из внутренних слоев подводится в количестве, достаточном для полного смачивания поверхности, скорость сушки (количество испаренной влаги в единицу времени с единицы поверхности) остается постоянной и зависит от влагосодержания материала при постоянстве условий: температуры воздуха, его скорости, направления движения и влагосодержания. В течение периода постоянной скорости процесс сушки определяется, главным образом, скоростью диффузии испаренной влаги через пограничный слой воздуха, т.е. внешними условиями. В этот период в основном удаляется влага физико-механической формы связи.

В общем случае скорость процесса зависит от величины движущей силы, параметров сушильного агента, его скорости, от формы связи влаги с материалом, механизма перемещения влаги и пр. В зависимости от скорости сушки определяется продолжительность высушивания.

Кинетика сушки характеризуется изменением во времени средней влажности материала, отнесенной к количеству абсолютно сухого материала U .

Зависимость между влажностью материала U и временем τ изображается кривой сушки, которую отроят по опытным данным (рис. 1).

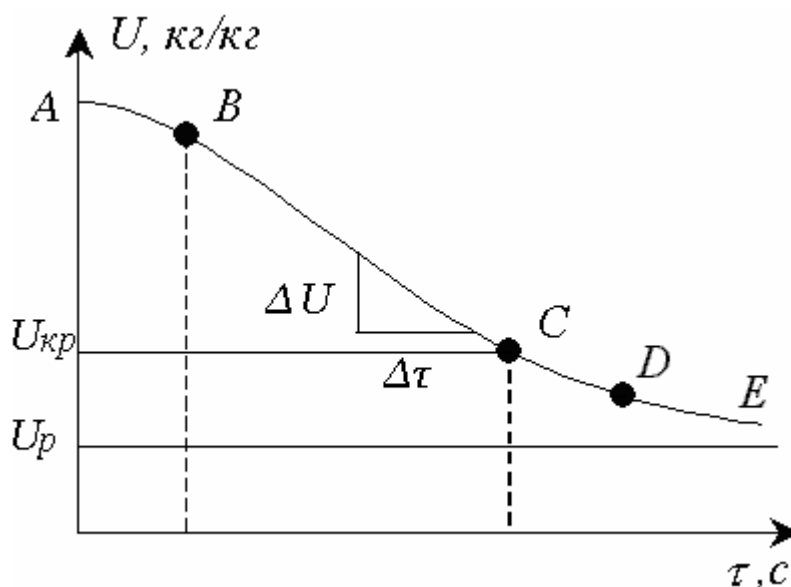


Рис. 1. Кривая сушки

На рис. 1 обозначены:

AB – период прогрева материала;

BC – период постоянной скорости сушки (влажность материала интенсивно уменьшается по прямолинейному закону – 1-й период);

CE – период падающей скорости сушки, состоящий в общем случае из двух подпериодов, представляемых участками различной кривизны CD и DE (2-й период);

Так как в случае воздушной сушки тепло к влажному материалу подводится только через поверхность, с которой испаряется влага, в течение этого периода температура материала приблизительно равна температуре мокрого термометра. Когда влагосодержание материала становится меньше критического влагосодержания $U_{кр}$, количество влаги, подводимой к поверхности, становится меньше, чем может испариться, и

поверхности, становится меньше, чем может испариться, и тогда скорость сушки начинает падать. Период падающей скорости сушки продолжается до тех пор, пока материал не достигнет равновесного влагосодержания с окружающей средой.

В периоде падающей скорости сушки процесс сушки зависит от скорости, с которой влага диффундирует внутри материала, т.е. обуславливается «внутренней диффузией». Скорость внутренней диффузии зависит от внешних условий процесса. На рис. 2 период падающей скорости характеризуется участком CE.

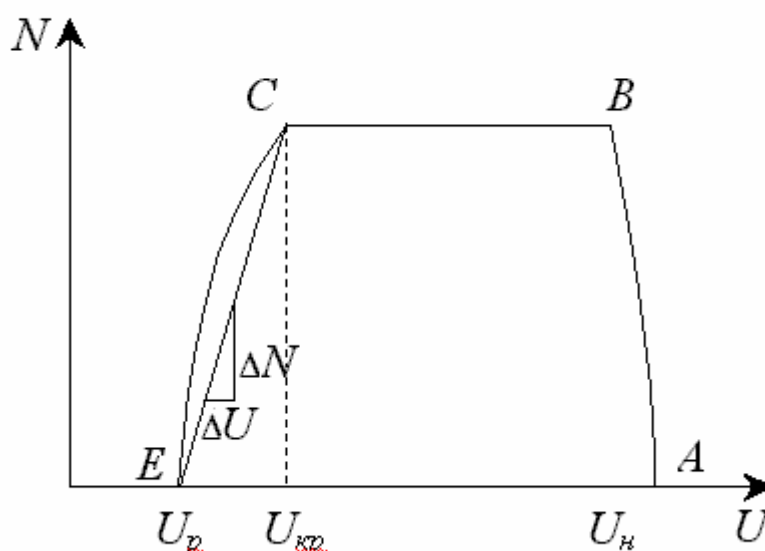


Рис. 2. Кривая скорости сушки

Этот участок характеризует испарение влаги с ненасыщенной поверхности, т.е. когда на поверхности материала начинают появляться сухие островки. Хотя скорость сушки со смоченной поверхности остается равной скорости сушки в 1-м периоде, за счет уменьшения поверхности испарения скорость сушки падает.

Так как влагосодержание начинает убывать, то наступает такой момент, когда влага с поверхности полностью испарилась и отсутствует подвод влаги из центральных слоев. В этом случае скорость сушки определяется внутренней диффузией пара, так как в этот период удаляется главным образом влага физико-химической формы связи, которая не способна передвигаться внутри материала под действием капиллярных сил. В периоде

падающей скорости сушки температура материала повышается и при достижении материалом равновесного влагосодержания U_p становится равной температуре окружающего воздуха.

Сушка производится до конечной влажности U_k , или когда масса материала практически перестает изменяться: $U_k = U_p$. Скорость сушки определяется путем графического дифференцирования зависимости $U = f(\tau)$.

Типичная зависимость, полученная таким путем, представлена на рис. 2.

В период падающей скорости закономерности изменения U могут быть различными в зависимости от свойств материалов.

Основными кинетическими характеристиками процесса сушки влажных материалов являются безразмерный температурный коэффициент сушки K и коэффициент сушки K_c . Безразмерный температурный коэффициент сушки зависит от влагосодержания и определяется по следующему соотношению:

$$K = v \frac{U_n}{T_c}, \quad (1)$$

где v – температурный коэффициент сушки; U_n – начальное влагосодержание, кг/кг; T_c – температура среды, K .

В свою очередь, температурный коэффициент сушки определяется как

$$v = \frac{d\bar{T}}{dU}, \quad (2)$$

т.е. равен отношению скорости нарастания средней температуры тела относительно скорости изменения влагосодержания. Таким образом, чтобы определить температурный коэффициент сушки v , необходимо знать зависимость изменения температуры тела и его влагосодержания.

Коэффициент сушки K_c рассчитывают по длительности периода постоянной скорости сушки и характерными влагосодержаниями, исходя из следующего выражения:

$$\tau_1 = \frac{1}{K_c} \frac{U_n - U_{кр}}{U_{кр} - U_p}, \quad (3)$$

τ_1 – длительность периода постоянной скорости, с;

U_n , $U_{кр}$, U_p – начальное, критическое и равновесное влагосодержание, кг/кг.

В первом приближении коэффициент сушки может быть определен по величине скорости сушки в 1-м периоде v и относительному коэффициенту сушки χ , который ориентировочно с достаточной степенью точности может быть вычислен по величине начального влагосодержания $\chi = 1,8 U_H$. Тогда коэффициент сушки K_c будет равен

$$K_c = \chi \cdot v = \frac{1,8 \cdot v}{U_H}. \quad (4)$$

Продолжительность сушки 1-го для периода

$$\tau_1 = \frac{1}{v}(U_H - U_{кр}), \quad (5)$$

Для 2-го периода определение скорости сушки значительно осложняется вследствие сложной и различной конфигурации кривых (см. рис. 1) $U = f(\tau)$.

Наиболее распространен метод расчета, предложенный А.В. Лыковым, с коэффициентом сушки K_c .

Для определения K_c кривую СЕ заменяют усредняющей прямой, при этом

$$K_c = \frac{v}{U_{кр} - U_p}, \quad (6)$$

где $U_{кр}$ – критическая влажность (см. рис. 1), поскольку

$$v = \frac{dU}{d\tau} = K_c(U_{кр} - U_p). \quad (7)$$

Интегрируя это выражение в пределах от $U_{кр}$ до U_p , получают для τ_2 следующее выражение:

$$\tau_2 = \frac{1}{K_c} \ln \frac{U_{кр} - U_p}{U_k - U_p}, \quad (8)$$

или с учетом выражения (6)

$$\tau_2 = \frac{1}{v}(U_{кр} - U_p) \ln \frac{U_{кр} - U_p}{U_k - U_p}. \quad (9)$$

Тогда продолжительность сушки составит

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{U_H - U_{кр}}{\nu} + \frac{U_{кр} - U_p}{\nu} \ln \frac{U_{кр} - U_p}{U_k - U_p}. \quad (10)$$

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка (рис. 3) состоит из сушильного шкафа 1, весов 2, крючок для влажного материала 3 и тяги 4. Включение шкафа производят переключателем 5, регулирование температуры – ручкой 6, контроль работы регулятора осуществляют по сигнальной лампочке 7. Температура в сушильном шкафу замеряется термометром, установленном в сушильной камере.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ

1. Включить сушильный шкаф и прогреть его до заданной температуры.

2. Проверить работу весов: шкала должна быть настроена на нуль, а тяга 4 должна проходить через центр отверстия сушильного шкафа.

3. Взять сухую пластинку пористого твердого материала (картон), проделать в нем отверстие, повесить на крюк и взвесить; затем снять с крюка материал, увлажнить его в течение 1 – 2 мин и взвесить, после чего опять снять с крюка.

4. После достижения в сушильном шкафу заданной температуры, повесить на крюк увлажненный материал (крюк присоединен к левой чашке весов) и уравновесить гирями на правой чаше весов.

5. Отметить начало сушки включением секундомера. Далее при включенных весах фиксировать время удаления равного количества влаги (400 мг) с помощью разновесов, последовательно помещаемых на левую чашу весов. Опыт закончить, когда в течение нескольких замеров (2 – 3) масса удаляемой влаги не изменится.

6. Результаты замеров свести в табл. 1.

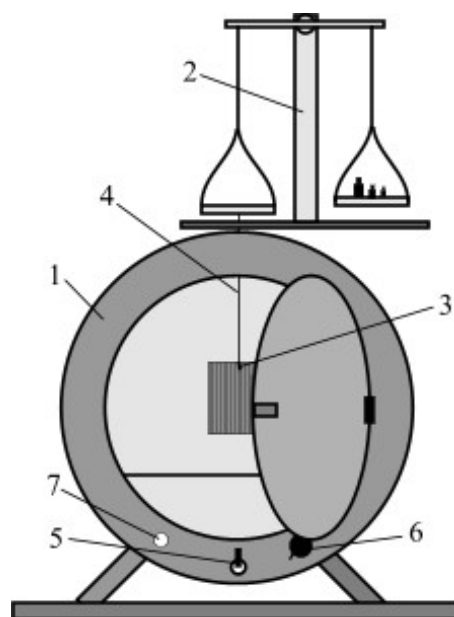


Рис. 3. Схема лабораторной установки

7. Выключить сушильный шкаф, весы и привести в порядок рабочее место.

Таблица 1

Результаты наблюдений

Время сушки τ , с.	Кол-во удаленной влаги $W_{уд}$, г	Масса сухого материала M_c , г	Масса влажного материала M , г	Кол-во влаги в материале M_v , г	Температура сушки T , °C

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Начальное влагосодержание определяется по выражению

$$U_n = \frac{M_v}{M_c} = \frac{M - M_c}{M_c}. \quad (11)$$

2. Текущее влагосодержание рассчитывают следующий образом:

$$U_i = \frac{M_{vi}}{M_c} = \frac{(M - W_{удi}) - M_c}{M_c}. \quad (12)$$

3. По полученным значениям влагосодержания строится кривая сушки в определенном масштабе. При выборе масштаба надо иметь в виду, что от него зависит точность построения кривой скорости сушки. Рекомендуется строить кривую сушки на миллиметровой бумаге, на поле размерами 200×300 мм.

Кривая скорости сушки строится по полученным данным, методом графического дифференцирования. Этот метод заключается в следующем: на кривой сушки находится ряд точек, равностоящих друг от друга.

От количества точек зависит точность построения. На криволинейном участке кривой сушки желательно разместить не менее семи точек. Для каждой точки строят произвольный прямоугольный треугольник, гипотенузой которого оканчивается участок касательной (к кривой), проведенной через эту точку. Рекомендуется вертикальные катеты треугольников проводить через соответствующие точки до одной горизонтали, на которой, таким образом, будут лежать горизонтальные катеты всех треугольников.

Скорость сушки определяется как тангенс угла наклона касательной для каждой точки

$$v = \frac{dU}{d\tau} \approx \frac{\Delta U}{\Delta \tau}.$$

Катет ΔU измеряется по масштабу, кг/кг, а катет $\Delta \tau$ – в секундах. По результатам вычислений строится кривая скорости сушки в координатах (см. рис. 2.)

$$\frac{dU}{d\tau} - U.$$

По полученному графику определяют критическое влагосодержание материала $U_{кр}$.

По $U_{кр}$ по формуле (5) определяют скорость сушки в 1-м периоде – v . Начальное влагосодержание материала и продолжительность 1-го периода τ_1 могут быть определены по этому графику.

По величине v определяется общая продолжительность сушки по формуле (10). Если для исследуемого материала в условиях сушки равновесная влажность U_p намного меньше критической, т.е. $U_p \leq U_{кр}$, возможно упрощение формулы (10):

$$\tau = \frac{1}{v}(U_n - U_{кр}) + \frac{U_{кр}}{v} \ln \frac{U_{кр}}{U_k}. \quad (13)$$

Приближенная формула (13) может быть использована для приближенных расчетов. Возможность ее использования всякий раз должна устанавливаться оценкой погрешности получаемой расчетной величины относительно экспериментальной. Результаты сопоставления опытного и расчетного значения τ заносят в табл. 2.

Вследствие неравномерного омывания поверхности материала воздухом и ряда других причин расчетные и опытные данные могут отличаться на 25 %.

Затем по уравнениям (3) и (4) определяют константу скорости процесса.

Результаты вычислений

Величина	Обозначение	Единица измерения	Значения
Влагосодержание начальное	U_n	кг/кг	
Влагосодержание критическое	$U_{кр}$	кг/кг	
Влагосодержание конечное	U_k	кг/кг	
Скорость сушки в 1-м периоде	v	1/с	
Время сушки опытное	τ	с	
Время сушки расчетное	τ	с	
Коэффициент сушки по результату эксперимента	K_c	1/с	
Коэффициент сушки (теоретический)	K_c	1/с	

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие бывают периоды сушки, чем характеризуются?
2. Каковы характерные влажности материала на кривой сушки?
3. Что такое влажность материала, скорость сушки?
4. Чем объясняется снижение скорости сушки при влажности материала ниже критической?
5. От чего зависит скорость сушки в обоих периодах?
6. Как изменяется температура материала в процессе сушки и от чего она зависит?

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении работы имеет место электроопасность и опасность получения термического ожога при касании внутренней стенки сушильного шкафа при подвешивании материала.

Перед началом работы студент в присутствии преподавателя должен:

- а) при внешнем осмотре убедиться в исправности установки, в отсутствии посторонних предметов на рабочем месте;
- б) проверить вид защиты от поражения электротоком.

Во время работы обязательно следить за показаниями параметров и не оставлять установку без присмотра.

Для защиты от поражения электрическим током необходимо проводить работу при наличии исправного зануления и исправной электроизоляции токоведущих частей.

Во избежание ожогов работу необходимо проводить при закрытой дверце сушильного шкафа. Студент обязан проводить работу в халате.

Лабораторная работа № 2

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ПОВЕРХНОСТНОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ

Цель работы

Исследование влияния температурного режима на эффективность процесса теплопередачи в пластинчатом теплообменнике – воздухоподогревателе.

Основные положения

Поверхностные теплообменники широко распространены в процессах химической технологии. К таковым относятся и пластинчатые теплообменники, представляющие собой пучок труб (или змеевик) с приваренными пластинами – рёбрами.

Расчёт процесса теплопередачи

Уравнение теплопередачи имеет вид: $Q = K \Delta T_{\text{ср}} F$,

где Q – тепловой поток, Вт;

K – коэффициент теплопередачи, Вт / (м² град);

$\Delta T_{\text{ср}}$ – средняя движущая сила, °С;

F – поверхность, равная 0,93 м².

Тепловой поток можно рассчитать по горячему теплоносителю (воде) или по холодному (воздух):

$$Q = G_1 C_1 (T_{1\text{н}} - T_{1\text{к}}),$$

$$Q = G_2 C_2 (T_{2\text{к}} - T_{2\text{н}}),$$

где G_1, G_2 – расход воды, воздуха, кг/с;

C_1, C_2 – удельная массовая теплоёмкость воды, воздуха при средней температуре теплоносителя, Дж / (кг · град.);

$T_{1\text{н}}, T_{1\text{к}}$ – начальная и конечная температура воды, °С;

$T_{2\text{н}}, T_{2\text{к}}$ – начальная и конечная температура воздуха, °С.

Расход воды G_1 можно рассчитать, предварительно измерив объёмный расход её V за какое-то время τ с помощью мерного цилиндра.

$$G_1 = \frac{V}{\tau} \rho_1,$$

где V – объём воды в мерном цилиндре, м^3 ;

τ – время, за которое объём воды набран в мерный цилиндр, с;

ρ_1 – плотность воды при средней температуре $T_{1\text{ср}}$, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Расход воздуха G_2 можно рассчитать по скорости воздуха в трубе на выходе из теплообменника $\omega_2 = 4,3$ м/с и диаметру трубы $d_{\text{тр}} = 0,145$ м.

$$G_2 = \omega_2 \frac{\pi d_{\text{тр}}^2}{4} \rho_2,$$

где ρ_2 – плотность газа при $T_{2\text{ср}}$, $\text{кг}/\text{м}^3$.

$$\rho_2 = \frac{M_{\text{г}}}{22,4} \frac{273}{273 + T_{2\text{к}}} \frac{P_0 + P_{\text{изб}}}{P_0},$$

где $M_{\text{г}}$ – молярная масса газа;

$T_{2\text{к}}$ – температура газа после теплообменника, °С;

$P_0, P_{\text{изб}}$ – атмосферное и избыточное давление.

Среднюю движущую силу теплопередачи находят по формуле

$$\Delta T_{\text{ср}} = \Delta T_{\text{ср.прот}} \varepsilon_{\Delta T},$$

$$\text{где } \Delta T_{\text{ср.прот}} = \frac{\Delta T_{\text{нб}} - \Delta T_{\text{нм}}}{2,3 \cdot \lg \frac{\Delta T_{\text{нб}}}{\Delta T_{\text{нм}}}},$$

где $\Delta T_{\text{нб}}, \Delta T_{\text{нм}}$ – наибольшая и наименьшая из двух граничных разности температур (рис. 1).

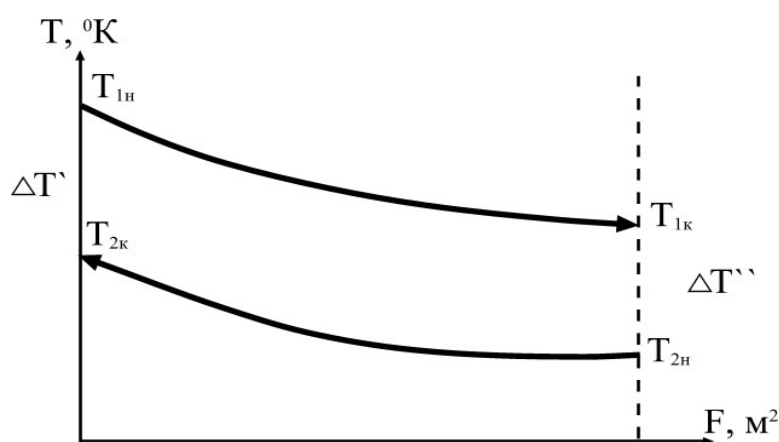


Рис. 1. Распределение температур теплоносителей в теплообменнике

$\varepsilon_{\Delta T}$ находят по графику $\varepsilon_{\Delta T} = f(R, P)$, представленному на рис. 2.

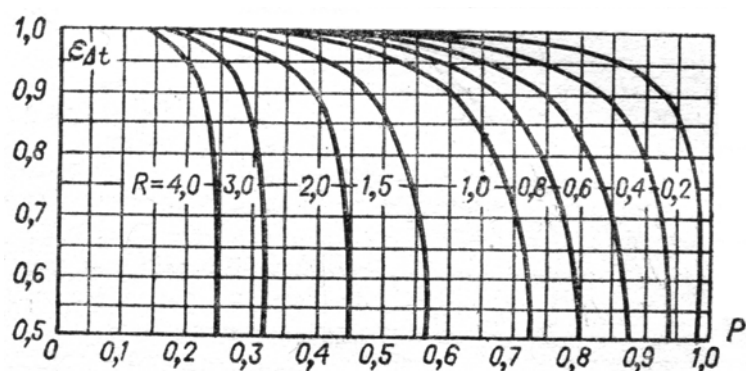


Рис. 2. Зависимость $\varepsilon_{\Delta T} = f(R, P)$

R и P рассчитывают по формулам

$$R = \frac{T_{1H} - T_{1K}}{T_{2K} - T_{2H}},$$

$$P = \frac{T_{2K} - T_{2H}}{T_{1H} - T_{2H}}.$$

$T_{\text{ср.пр}}$ рассчитывают по формуле

$$\Delta T_{\text{ср.пр}} = \frac{\Delta T_{\text{Hб}} - \Delta T_{\text{Hм}}}{2,3 \cdot \lg \frac{\Delta T_{\text{Hб}}}{\Delta T_{\text{Hм}}}},$$

где $\Delta T_{\text{Hб}}$, $\Delta T_{\text{Hм}}$ – соответственно наибольшее и наименьшее значения из граничных ΔT :

$$\Delta T = T_{1H} - T_{2K} \text{ и } \Delta T' = T_{1K} - T_{2H}.$$

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Схема установки представлена на рис. 3.

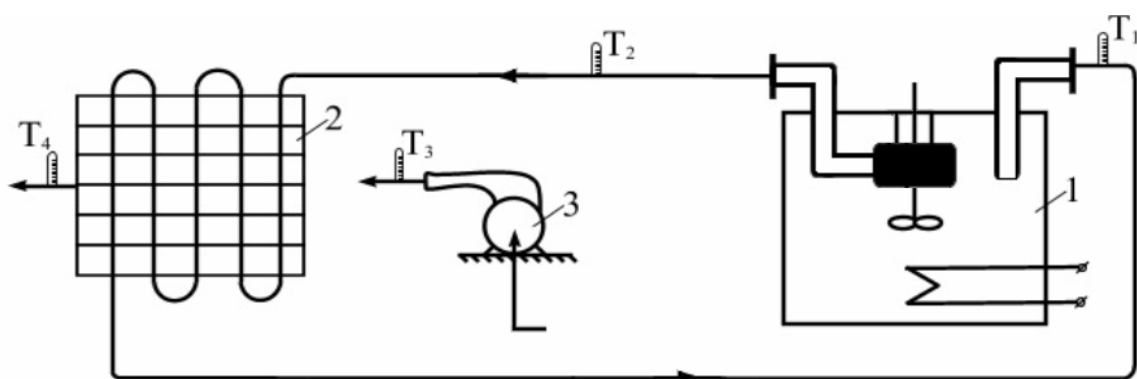


Рис. 3. Схема лабораторной установки: 1 – термостат горячего теплоносителя (воды); 2 – калорифер; T_1 , T_2 , T_3 , T_4 – термометры; 3 – вентилятор

Из термостата, снабжённого контактным термометром для поддержания заданной температуры, вода насосом подаётся в трубки калорифера 2, через который пропускают воздух посредством вентилятора 3. Температуры теплоносителей измеряются с помощью термометров T_1 и T_2 (начальная и конечная температуры воды), а также T_3 и T_4 (начальная и конечная температуры воздуха).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Получить задание у преподавателя (задаются значения T_1 и расход горячего теплоносителя).
2. Включить термостат 1 и установить заданное значение T_1 и расхода воды.
3. Включить вентилятор 3.
4. После установления постоянных температур теплоносителей:
 - а) снять показания термометров;
 - б) проверить установленный расход воды (с помощью мерного цилиндра).
5. Произвести расчёт G_1 , G_2 , $T_{1\text{ср}}$, $T_{2\text{ср}}$, Q , $T_{\text{ср}}$, K по приведенным выше формулам.
6. Изменять в соответствии с заданием параметры теплоносителей и повторить расчёт. Результаты измерений и расчёта внести в таблицу).

Таблица измерений и результатов

№ п/п	$T_{1\text{н}},$ °C	$T_{1\text{к}},$ °C	$T_{2\text{н}},$ °C	$T_{2\text{к}},$ °C	$T_{1\text{ср}},$ °C	$T_{2\text{ср}},$ °C	$\rho_1,$ кг/м ³	$\rho_2,$ кг/м ³	$C_1,$ Дж/(кг·°C)	$C_2,$ Дж/(кг·°C)	$Q_1,$ Вт	$Q_2,$ Вт	$T_{\text{ср}},$ °C	$K,$ Вт/м ² ·°C

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы уравнения, описывающие процесс теплопередачи?
2. В чем состоит физический смысл и содержание коэффициента теплопередачи?
3. Какие факторы влияют на процесс теплопередачи?
4. Дать понятие движущей силы и средней движущей силы процесса.
5. Объяснить тепловой баланс процесса по каждому теплоносителю.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

1. Корпус термостата и вентилятора должны быть заземлены или занулены.
2. Соблюдать осторожность при пользовании ртутным термометром.
3. Не прикасаться к поверхностям термостата, имеющим высокую температуру.
4. Остерегаться вращающихся лопастей вентилятора.

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ

Цель работы

1. Ознакомиться с методом экспериментального исследования сушки в кипящем слое.
2. Научиться пользоваться I-x-диаграммой для определения параметров состояния влажного воздуха.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Сушка влажных материалов – один из наиболее распространенных технологических процессов в химической промышленности. На многих производствах для интенсификации технологических процессов, связанных с взаимодействием твердой дисперсной фазы с газовой, используются установки взвешенного (кипящего, псевдооживленного) слоя. К таким процессам относится сушка в кипящем слое.

Преимуществом псевдооживленного слоя является возможность значительно увеличить поверхность контакта между частицами материала и сушильным агентом, интенсифицировать испарение влаги из материала и за счет этого сократить время сушки. Использование кипящего слоя дает возможность уменьшить габариты сушилок. Аппараты такого типа используются для сушки не только в слое время пребывания отдельных частиц существенно отличается от его средней величины. Поэтому применяют сушилки с расширяющимся кверху сечением, например, коническим. Скорость газа внизу камеры должна превышать скорость осаждения самых

крупных частиц, а сверху – быть меньше скорости сильносыпучих зернистых материалов, но также для материалов, подверженных комкованию, и пастообразных.

Установки для сушки материалов в кипящем слое могут работать как в периодическом, так и в непрерывном режимах. При периодическом процессе влажный материал загружают одновременно в аппарат, высушивают до заданного влагосодержания, после чего выгружают из аппарата.

При непрерывном процессе в сушилку непрерывно подают влажный материал и также удаляют из аппарата сухой.

По физической сути сушка в кипящем слое является разновидностью процесса конвективной сушки, и обезвоживание отдельной частицы может идти как в периоде постоянной, так и в периоде падающей скорости сушки.

В практике используют сушилки кипящего слоя как с цилиндрическим, так и с коническим корпусом. В сушилке с цилиндрическим корпусом наблюдается значительная неравномерность сушки, обусловленная тем, что при интенсивном перемешивании осаждения самых мелких частиц. При такой форме камеры достигается более оптимальная циркуляция твердых частиц. Благодаря снижению скорости газов по мере их подъема, улучшается распределение частиц по крупности и уменьшается унос пыли, повышается равномерность нагрева (более мелкие частицы, поднимающиеся выше, находятся в области более низких температур).

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка непрерывного действия (см. рисунок) состоит из цилиндро-конической сушилки 1. Влажный материал подается в сушильную камеру сверху постепенно. Выгрузка сухого продукта производится непрерывно через разгрузочный патрубок в приемник 2, соединенный с сушильной камерой резиновым шлангом.

Сушильный агент (воздух) засасывается из помещения газодувкой (3), проходит через печь 4 и поступает в сушилку. Температуру в печи задают и регулируют контактным термометром 5, соединенным через реле 6 с нагревательным элементом печи. Температуру воздуха, поступающего в печь, измеряют термометром 8. Расход воздуха замеряется трубкой Вентури с внутренним диаметром $d_0 = 10$ мм и контролируется тягонапорометром (7).

Температуру и влагосодержание воздуха, поступающего в сушилку (t_0 и x_0), измеряют психрометром, расположенным на стенде, а температуру и влагосодержание воздуха, покидающего аппарат (t_2 и x_2), – психрометром 9.

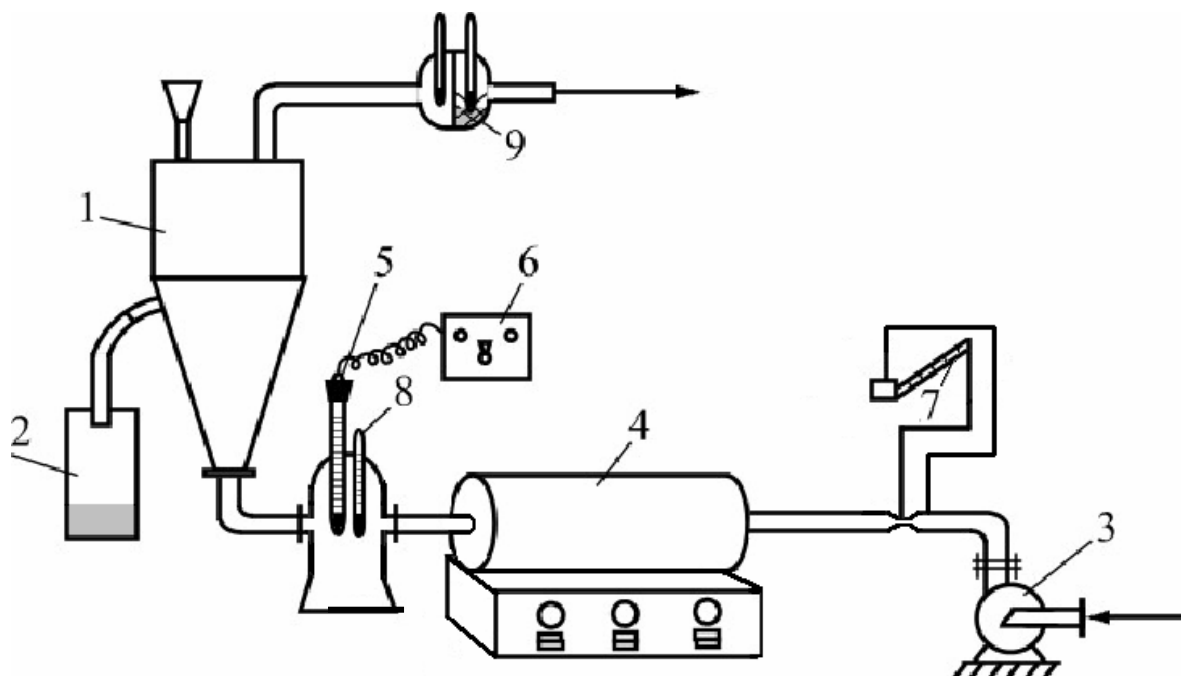


Схема лабораторной установки для сушки в кипящем слое: 1 – сушилка цилиндрико-коническая; 2 – приемник; 3 – газодувка; 4 – печь; 5 – термометр контактный; 6 – реле; 7 – тягонапоромер; 8 – термометр; 9 – психрометр

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Получить материал с известной влажностью для сушки .
2. Установить по контактному термометру заданную преподавателем температуру.
3. Включить печь для нагрева воздуха.
4. Включить газодувку для подачи воздуха в печь, установить заданный расход сушильного агента. Показание тягонапоромера записать в таблицу.
5. Записать показания сухого и влажного термометров t_0 и t_0^M и по таблице определить относительную влажность исходного воздуха.
6. Записать установившуюся температуру сушильного агента (воздуха) перед входом в сушилку t_1 .

7. Присоединить к разгрузочному патрубку приемник для сухого материала.

8. Когда установится постоянная температура воздуха, поступающего в печь, через загрузочное отверстие постепенно засыпать влажный материал в сушилку. Массу материала и время загрузки задает преподаватель. Засечь время начала загрузки материала в сушилку и время окончания сушки $\tau_{\text{раб}}$.

9. Записать температуру воздуха t_2 и $t_2^{\text{м}}$, выходящего из сушилки, по сухому и мокрому термометрам.

Результаты измерений занести в таблицу.

Количество начальной загрузки материала $G_{\text{загр}}$, кг	Общее количество влажного материала, поступившего в аппарат G , кг вл., кг	Показание тягонапоромера, м	Температура сухого термометра для исходного воздуха t_0 , °C	Температура мокрого термометра для исходного воздуха $t_0^{\text{м}}$, °C	Температура воздуха перед входом в сушилку t_1 , °C	Температура сухого термометра отходящего воздуха t_2 , °C	Температура мокрого термометра отходящего воздуха $t_2^{\text{м}}$, °C	Перепад давления в аппарате кипящего слоя $\Delta P_{\text{суш}}$, мм вод. ст.	Количество сухого материала, вышедшее из аппарата за время работы сушилки $G_{\text{с. вых}}$, кг	Время работы сушилки, $\tau_{\text{раб}}$, с.

5. Обработка результатов опыта

1. Расход сушильного агента (воздуха) L , м³/с:

$$L = \rho_0 \frac{\pi}{4} d_0^2 \cdot \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H \cdot \frac{\rho_{\text{ж}} - \rho_0}{\rho_0}},$$

где d_0 – внутренний диаметр отверстия трубки Вентури, м;

α – коэффициент расхода, принимается равным 0,62;

ρ_0 – плотность воздуха при t_0 , кг/м³;

$\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости в дифманометре, кг/м³;

H – разность уровней жидкости в дифманометре, присоединенном к трубке Вентури, м;

g – ускорение свободного падения, м/с².

2. По известным значениям t_0 , t_0 и t_2 , $t_{2\text{м}}$ определить относительную влажность воздуха ϕ_0 и ϕ_2 . Далее по диаграмме Рамзина найти влагосодержание воздуха на входе x_0 и на выходе x_2 из сушильного аппарата.

3. Определить расход абсолютно сухого воздуха, кг сухого воздуха/с:

$$L = \frac{L'}{1 + x_0}.$$

4. Рассчитать производительность сушилки по сухому материалу, кг/с:

$$P_{\text{сух.мат}} = \frac{G_{\text{сух.вых}}}{\tau_{\text{раб}}}.$$

5. Рассчитать производительность сушилки по влажному материалу:

$$P_{\text{вл.мат}} = \frac{G_{\text{влаж}}}{\tau_{\text{раб}}}.$$

6. Рассчитать производительность по абсолютно сухому материалу, кг абсол. сух, матер./с:

$$P_{\text{абс.сух}} = \frac{P_{\text{влаж}}}{1 + U_1},$$

где U_1 – влагосодержание исходного материала (в % мас.), задается преподавателем.

7. Определить производительность аппарата по испаренной из материала влаге:

$$W = L (x_2 - x_0).$$

8. Рассчитать из уравнения материального баланса по испаряемой влаге конечное влагосодержание выгружаемого материала U_2 :

$$G_{\text{абс.сух}} (U_1 - U_2) = W,$$

$$U_2 = U_1 - \frac{W}{G_{\text{абс.сух}}}.$$

9. Рассчитать удельный расход абсолютно сухого воздуха, в кг сухого воздуха/кг влаги:

$$l = \frac{L}{W}.$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. На чём основана организация процесса сушки в кипящем слое?
2. В чём заключаются достоинства сушки в кипящем слое?
3. Каким прибором измеряется расход сушильного агента?
4. Как измеряется температура мокрого термометра воздуха?
5. Как определяется относительная влажность воздуха?
6. Как определяется влагосодержание воздуха?

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении работы существует опасность поражения электрическим током при неисправности печи для нагрева сушильного агента, а также воздухоудувки.

Перед началом работы студент должен:

- 1) ознакомиться с методическими указаниями к данной работе;
- 2) получить от преподавателя допуск к выполнению лабораторной работы;
- 3) при внешнем осмотре убедиться в исправности установки.

Во время работы студент не должен:

- 1) оставлять без присмотра работающую установку;
- 2) о всех неисправностях, случившихся во время работы, сообщить преподавателю.

Лабораторная работа №4

ИССЛЕДОВАНИЕ МАССООБМЕНА

Цель работы

1. Ознакомиться с методами экспериментального исследования закономерностей массообмена.
2. Освоить методики определения величин, входящих в критерии.
3. Ознакомиться с методикой обработки экспериментальных данных при обобщении результатов исследования массообмена критериальной зависимостью (критериальным уравнением).

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Массообменные процессы – это процессы диффузионного взаимодействия между фазами, контактирующими друг с другом, в которых при наличии движущей силы происходит перенос одного или нескольких компонентов из одной фазы в другую через поверхность раздела этих фаз. Поскольку эти процессы осуществляются благодаря диффузии, то их называют еще и диффузионными.

Перенос вещества может осуществляться как за счет теплового хаотического движения отдельных молекул (молекулярной диффузии), так и за счет движения среды или отдельных ее частей (конвективной диффузии). Во втором случае на чисто конвективную диффузию накладывается и молекулярная диффузия.

Конвективный массообмен (конвективная диффузия) может происходить при естественном и вынужденном движении взаимодействующих фаз. Вынужденная конвекция обеспечивается принудительным перемещением одной или нескольких взаимодействующих фаз. В результате возникает относительное движение фаз.

Естественная конвекция возникает благодаря изменению плотности при изменении температуры среды или концентрации вещества в какой-либо части среды. Увеличение плотности приведет к опусканию этой части среды вниз, уменьшение – к поднятию вверх. Чем больше изменение плотности, тем больше скорость движения, следовательно интенсивнее массообмен. Интенсивность массообмена при свободной конвекции учитывается критерием Галилея $Ga = gl^3 / \nu^2$ и критерием Грасгофа $Gr = (gl^3 / \nu^2) \beta_v \Delta t$, если в процессе массообмена меняется и температура. В этих выражениях g -ускорение свободного падения, $\text{м}^2/\text{с}$; ν -коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; l -характерный размер, м ; β_v - коэффициент объемного расширения, $1/^\circ\text{C}$; Δt -изменение температуры среды, $^\circ\text{C}$. Интенсивность массообменных процессов оценивается удельным потоком вещества, или скоростью переноса m , определяемой формулой:

$$m = \beta_c \Delta c, \quad (1)$$

где β_c - коэффициент массоотдачи, $\text{кг}/[\text{м}^2 \times \text{с}(\text{кг}/\text{м}^3)]$;

Δc – движущая сила процесса (разность концентрации диффундирующего вещества на поверхности раздела фаз и в потоке среды), $\text{кг}/\text{м}^3$.

При известных коэффициенте массоотдачи и движущей силе производительность установки и определяется из уравнения массоотдачи:

$$M = \beta_c \Delta c S, \quad (2)$$

где S – поверхность массообмена в аппарате, м^2 .

Величина коэффициента массоотдачи определяется по результатам экспериментальных исследований, которые обычно представляются в критериальной форме, т.е. критериальным уравнением типа:

$$Nu_M = A Re^n Pr_M^m Ga^k Gr^f \Gamma_1^p \Gamma_2^q, \quad (3)$$

где $Nu_M = \beta_c l / D$ - массообменный критерий Нуссельта;

$Re = wl / \nu$ - критерий Рейнольдса;

$Pr_M = \nu / D$ - массообменный критерий Прандтля;

Γ_1, Γ_2 - геометрические симплексы (соотношения характерных размеров системы);

l - характерный размер, м ;

D - коэффициент диффузии, m^2/s ;

A, n, m, k, f, p, q - константы, подбираемые при обобщении экспериментальных данных уравнением (3).

Величины констант подбираются такими, чтобы формула (3) наиболее точно обобщала результаты эксперимента. Критерии Re, Pr_M, Ga, Gr в этом уравнении определяющие, т.е. они известны, а критерий Nu_M определяемый, так как в него входит искомый коэффициент массоотдачи, и уравнение (3) служит для его расчета. По данным, полученным при проведении экспериментов, коэффициент массоотдачи может быть определен из преобразованного уравнения (2):

$$\beta_c = M / (\Delta c \times S). \quad (4)$$

В лабораторной работе исследуется массообмен для случая испарения жидкости с плоской вертикальной пластины. При этом происходит сушка с удалением паров жидкости в окружающий воздух. Для этого случая в качестве движущей силы можно принять разность парциальных давлений пара на поверхности пластины и в окружающем воздухе. Эти давления эквивалентны соответствующим концентрациям пара, с учетом чего формулу (4) можно привести к виду

$$\beta_p = M / (\Delta P \times S). \quad (5)$$

Умножив числитель и знаменатель этого выражения на массу сухого материала M_c и заменив производительность через $M = M_\tau / \tau$, будем иметь

$$\beta_p = \frac{1}{\Delta P} \frac{M_\tau}{M_c \tau} \frac{M_c}{S}, (6)$$

или

$$\beta_p = \frac{1}{\Delta P} \frac{N}{s}, (7)$$

где $N = \frac{M_\tau}{M_c \tau}$ – скорость сушки, кг жидк./ (кг сух. мат. · с);

$s = S / M_c$ – удельная поверхность испарения (в расчёте на 1 кг сухого материала), м²/кг сух. мат.;

M_τ – масса жидкости, испаренной за время τ , кг.

Движущей силой процесса испарения жидкости из материала является разность давлений пара у поверхности материала и в окружающем воздухе. Их величины можно определить, пользуясь некоторыми положениями конвективной сушки.

Конвективная сушка является тепломассообменным процессом, Так как тепло на испарение жидкости в материале подводится от окружающего воздуха конвективным теплообменом, а удаление образующихся паров в окружающую среду происходит за счет конвективного массообмена.

Теплоносителем и одновременно сушильным агентом здесь является влажный воздух. Его состояние характеризуется многими параметрами, из которых два должны быть известны. Остальные можно определить расчетом по формулам из известных параметров, или графически по I -х-диаграмме. Наиболее легко замеряемый параметр – температура воздуха. Другим параметром является температура мокрого термометра, т.е. та температура, которую принимает влажный материал, контактирующий с влажным воздухом. Экспериментально ее можно определить по влажному термометру или с помощью потенциометра, термопара которого находится во влажном материале. При этой температуре воздух у поверхности влажного материала находится в насыщенном состоянии, т.е. $\phi = 1$ (100 %).

Зная эти температуры, положение точки, отображающей состояние влажного воздуха, можно определить на I -х-диаграмме, представленной на рисунке, пре сечением линии $t = \text{const}$, соответствующей температуре воздуха, и линии $I = \text{const}$, проведенной из точки 2, характеризующей состояние

воздуха при температуре мокрого термометра. Точка 2 находится на линии $\varphi = 1$, соответствующей насыщенному влагой воздуху, причем ее положение здесь соответствует замеренной температуре мокрого термометра.

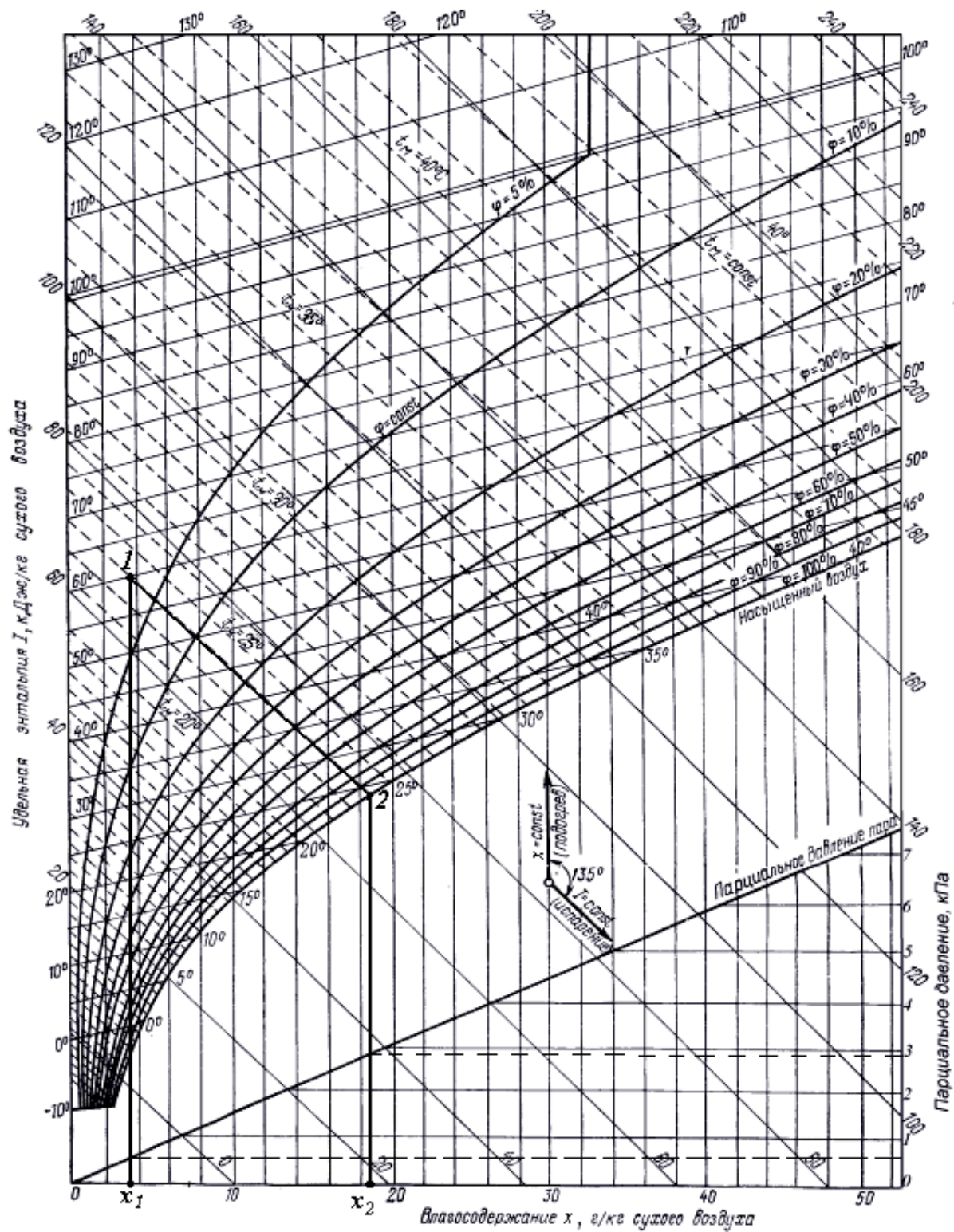


Рис. 1. I-x-диаграмма влажного воздуха

Влагосодержание воздуха определится проведением линии связи из точки 1 на ось x . Величина парциального давления паров, содержащихся в воздухе, рассчитывается по формуле:

$$P_n = \frac{P_o}{M_n / (xM_g) + 1}, \quad (8)$$

где P_n – парциальное давление паров воды, Па;

P_o – атмосферное давление, Па;

M_n и M_g – молярные массы паров и воздуха, кмоль/кг;

x – влагосодержание воздуха, кг.пара/кг.сух.возд.

Парциальное давление пара у поверхности влажного материала при режиме сушки в первом периоде определится подобным образом, но для точки 2, характеризующей состояние воздуха у поверхности влажного материала – при его сушке.

Сведения по I - x -диаграмме и пользованию ее можно найти в разделах конвективной сушки учебной литературы в той части, где рассматриваются параметры сушильного агента [1,2].

В данной работе исследование массообмена проводится при сушке плоского влажного материала в периоде постоянной скорости. При этом коэффициент массоотдачи определяется по формуле (7).

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Исследование массообмена осуществляется на лабораторной установке, представленной на рис. 3 (С.).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Получить задание у преподавателя.
2. Проверить работу весов: стрелка должна быть настроена на нуль, а тяга 4 должна проходить через центр отверстия сушильного шкафа.
3. Включить сушильный шкаф и прогреть его до заданной температуры.
4. Взять исследуемый образец (пластинку из твердого пористого материала – картона – с проделанным в ней отверстием), подвесить на крючок 3 тяги и взвесить.

5. Снять образец с крючка, увлажнить в чашке с водой, стряхнуть излишек жидкости.

6. Подвесить влажный материал на крючок весов и уравновесить гирьками на правой чаше весов с недостатком, т. е. образец должен немного перевешивать.

7. Начать отсчет времени включением секундомера. Отмечать момент времени прохождения стрелки весов через нуль с добавлением гирьки на ту чашу весов, где подвешен образец, или снятием гирьки с правой чаши.

8. При проведении опыта замерить температуру воздуха в сушильном шкафу, а также температуры сухого и мокрого термометра окружающего воздуха с помощью психрометра Августа.

9. Опыт закончить, когда масса образца не будет изменяться в течение промежутка времени в 2 – 3 раза большего, чем промежуток времени между предыдущими замерами.

10. Выключить сушильный шкаф, весы, привести рабочее место в порядок.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТА

Обработку результатов произвести по каждому из опытов.

1. По психрометрической таблице (см. приложение) определить относительную влажность воздуха, а по I -х-диаграмме (см. рисунок) определить влагосодержание окружающего воздуха.

2. По I -х-диаграмме определить температуру мокрого термометра и влагосодержание воздуха при этой температуре.

3. Рассчитать давление паров в окружающем воздухе по формуле (8) и на поверхности влажного материала (при температуре мокрого термометра).

4. Заполнить столбцы 2 и 3 отчетной таблицы 1.

5. Рассчитать влагосодержание материала для каждой замеренной точки по формуле

$$U_i = \frac{M_g - M_c}{M_c} = \frac{W_i}{M_c}, \quad (9)$$

где M_g – масса влажного материала, г;

M_c – масса сухого материала (масса вещества после сушки), г;

W_i – масса жидкости в материале, г.
и занести в таблицу 1.

6. Построить кривую сушки.

7. Используя кривую сушки, выделить период постоянной скорости сушки и определить его границы.

8. Определить скорость сушки в выделенном периоде по формуле:

$$N_i = \frac{dU}{d\tau} = \frac{\Delta U_i}{\Delta \tau_i}, \quad (10)$$

где ΔU_i – изменение влагосодержания материала в периоде постоянной скорости, кг жидк./кг сух.мат.;

$\Delta \tau$ – промежуток времени, за который произошло изменение влагосодержания на величину ΔU , с;

ΔU можно брать по всему участку периода постоянной скорости сушки или по его части.

9. Определить размеры пластины и рассчитать её площадь с обеих сторон.

10. По формуле (7) определить коэффициент массоотдачи.

11. Рассчитать критерии Грасгофа и Нуссельта. Плотность воздуха при соответствующих температурах определить по уравнению Менделеева-Клапейрона. Коэффициент диффузии взять из табл. 3 Приложений при средней температуре диффузионного слоя.

12. Построить в логарифмических координатах зависимость критерия Нуссельта от критерия Грасгофа, проведя осредненно прямую линию в соответствии с расположением экспериментальных точек, нанесенных на этот график. Тангенс угла наклона прямой является показателем степени при критерии Грасгофа, а отрезок, отсекаемый на оси ординат, представляет собой логарифм коэффициента перед этим критерием. При проведении двух опытов эти константы определить также расчетным путем, используя каноническое уравнение прямой

$$(y_2 - y_1)/(x_2 - x_1) = (y_2 - y)/(x_2 - x), \quad (11)$$

где x – логарифм критерия Нуссельта; y – логарифм критерия Грасгофа. Решить это уравнение относительно y (критерия Нуссельта).

9. Сделать выводы о результатах проведенного исследования.

№ замера	Параметр				
	Время замера τ_i , с	Масса влажного образца $M_{вi}$, г	Масса влаги $M_{тi}$, г	Влагосодержание материала U_i , кг/кг	Прочие характеристики
1	2	3	4	5	7
					$t_0 =$ $\Phi_O =$ $X_o =$ $t_{MT} =$ $v =$ $\rho =$ $M_c =$ $M_\tau =$ $N =$ $l =$ $S =$ $\beta_p =$ $X_{MT} =$ $P_o =$ $P_n =$ $Pr_M =$ $D =$ $\beta_v =$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объяснить суть понятия массообменных процессов.
2. Объяснить суть понятия молекулярной и конвективной диффузий.
3. Охарактеризовать виды конвективной диффузии.
4. Какими критериями характеризуется конвективная диффузия?
5. Дать характеристику используемых критериев.
6. Объяснить суть понятия коэффициента массоотдачи.

7. Дать понятие интенсивности массообменного процесса.
8. Дать понятие движущей силы массообменного процесса.
9. В чем заключается смысл критериального уравнения?
10. Каков принцип использования психрометра Августа ?
11. Как определить температуру мокрого термометра по I-х диаграмме ?

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении работы существует опасность электрического и термического поражения. Сушильный шкаф подключен к сети напряжением 220 В. Термический ожог можно получить при касании внутренней стенки сушильного шкафа во время подвешивания материала на тягу. Работа проводится при температурах в шкафу 25 – 80 °С, но стенки шкафа могут иметь более высокую температуру. Перед началом работы необходимо посредством внешнего осмотра убедиться в исправности установки и отсутствии посторонних предметов на рабочем месте. Проверить защиту от поражения электрическим током. Во время работы обязательно контролировать показания и значения параметров и не оставлять работающую установку без присмотра. Для предотвращения поражения электрическим током работу проводить только при наличии исправного заземления и исправной изоляции токоведущих частей. Во избежание ожогов работу проводить при закрытой дверце сушильного шкафа, а при подвешивании образца не касаться руками стенок сушильного шкафа.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Психрометрическая таблица

Тем- пера- тура возду- ха t , °C	Относительная влажность воздуха (φ , %)												
	Психрометрическая разность ($t - t_m$)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
10	88	76	65	64	44	34	24	14	5	—			
11	88	77	66	56	46	36	26	17	8	—			
12	89	78	68	57	48	38	29	20	11	—			
13	89	79	69	59	49	40	31	23	14	6			
14	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9			
15	90	80	71	61	52	44	36	27	20	12			
16	90	81	71	62	54	46	37	30	22	15			
17	90	81	72	64	55	47	39	32	24	17			
18	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20			
19	91	82	74	65	58	50	43	35	29	22			
20	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24			
21	91	83	75	67	60	52	46	39	32	26			
22	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28			
23	92	84	76	69	61	55	48	42	36	30			
24	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31			
25	92	84	77	70	63	57	50	44	38	33			
30	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39			
	Психрометрическая разность ($t - t_m$)												
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
40	71,5	48	29	13	—	—	—	—	—	—	—	—	—
50	74	54	36,5	22	11,5	1,5	—	—	—	—	—	—	—
60	76,5	57,5	42	28,5	18	9,5	2,5	—	—	—	—	—	—
70	78,5	60,5	45,5	33,5	23,5	15,5	5	3	—	—	—	—	—
80	80	63	49	37,5	28	20	13,5	8	3	1	—	—	—
90	81,5	65,5	52,5	41	31,5	24	17,5	12	8	4,5	1,5	—	—
100	82,5	67,5	55	44	35	27	21	15,5	11	7,5	4,5	2,5	0,5

Коэффициент диффузии

Коэффициент диффузии паров воды в воздухе при $T = 273$ К и $P_o = 760$ мм рт. ст.

$$D_o = 21,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

При других температурах и давлениях коэффициент диффузии определяется из формулы

$$D = D_o \frac{P_o}{P} \left(\frac{T}{T_o} \right)^{3/2}.$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1973. – 528 с.
2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: Учеб. для химико-технолог. вузов. 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1975. – 752 с.
3. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. – М.: Химия, 1985. – 448 с.
4. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
5. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию / Под ред. Ю.И. Дытнерского. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1991 г. – 496 с.
6. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: Учеб. пособие для вузов / Под ред. П.Г. Романкова. 10-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1987. – 576 с.
7. Руководство к практическим занятиям в лаборатории процессов и аппаратов химической технологии / Под ред. П.Г. Романкова. – Л.: Химия, 1979. – 256 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Лабораторная работа №1. КОНВЕКТИВНАЯ СУШКА ВЛАЖНОГО МАТЕРИАЛА	
Лабораторная работа № 2. ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ПОВЕРХНОСТНОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ	
Лабораторная работа № 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ	
Лабораторная работа № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ МАССООБМЕНА	
Приложение	
Библиографический список.....	

ТАПЛО- И МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ
ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Методические указания к лабораторным работам

Составитель

ЛАБУТИН Виктор Алексеевич

Ответственный за выпуск – зав.кафедрой профессор А.И. Христофоров

Редактор Р.С. Кузина

Корректор

Верстальщик Е.Г. Радченко

ЛР № 020275. Подписано в печать 00.00.03.

Формат 60x84/16. Бумага для множит. техники. Гарнитура Таймс.

Печать офсетная. Усл.-печ. л. 0,00. Уч.-изд. л. 0,00. Тираж 000 экз.

Заказ

Редакционно-издательский комплекс

Владимирского государственного университета.

600000, Владимир, ул. Горького, 87.