

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию
Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева

В. Н. БОБЫЛЁВ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО МАССООБМЕНУ

Учебно-методическое пособие

Москва 2006

УДК 66.021.3(075)
ББК 35.113я73
Б72

Рецензент:

Кандидат технических наук, доцент Российского
химико-технологического университета им. Д. И. Менделеева
В. В. Скудин

Бобылёв В. Н.
Б72 Лабораторный практикум по массообмену: учеб.-метод. пособие/
В. Н. Бобылёв.—М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2006.—60 с.

В пособии приведены описания наиболее характерных лабораторных установок, даны рекомендации к выполнению работ и обработке экспериментальных данных в части изучения массообмена — раздела курса «Основные процессы и аппараты химической технологии». Пособие снабжено приложением, в котором даны таблицы физических свойств воды, насыщенного водяного пара и воздуха, являющихся основными средами при лабораторных исследованиях, приведены правила обозначения контрольно-измерительных приборов на схемах лабораторных установок.

Пособие предназначено для студентов химико-технологических специальностей вузов.

УДК 66.021.3(075)
ББК 35.113я73

© Бобылёв В. Н., 2006
© Российский химико-технологический
университет им. Д. И. Менделеева, 2006

ПРЕДИСЛОВИЕ

В предисловиях к пособиям «Лабораторный практикум по гидравлике» и «Лабораторный практикум по теплообмену» отмечалось значение курса «Процессы и аппараты химической технологии» и его составной части — лабораторного практикума — в общеинженерной подготовке студентов химико-технологических специальностей.

Настоящее пособие завершает серию учебно-методических пособий для выполнения лабораторных работ по указанному курсу и издаётся как третья часть единого пособия. Соответственно, здесь приведены описания наиболее характерных лабораторных установок, а также даны рекомендации к выполнению работ и обработке экспериментальных данных в части изучения массообмена. Нумерация работ, формул и рисунков предваряется цифрой «3» соответственно третьей части единого пособия.

Как и предыдущие части (см. «Лабораторный практикум по гидравлике» и «Лабораторный практикум по теплообмену»), данное издание снабжено приложением, в котором приведены таблицы физических свойств воды, насыщенного водяного пара и воздуха, являющихся основными средами при лабораторных исследованиях. Кроме того, в приложении приведены данные о фазовом равновесии в системе изопропанол – вода. Приложение содержит сведения об условных обозначениях контрольно-измерительных приборов на схемах.

При написании формул учтён стандарт ISO 31-0: 1992 буквенных обозначений физических величин.

Символы, наименования и единицы измерения основных физических величин

A – площадь [поверхности], м^2 ;	w_B – массовая доля компонента В в смеси, $(\text{кг В})/(\text{кг смеси})$;
a – удельная площадь поверхности, $\text{м}^2/\text{м}^3$;	x_B – молярная доля компонента В в растворе, $(\text{моль В})/(\text{моль раствора})$;
c_B – молярная концентрация компонента В, $(\text{моль В})/\text{м}^3$;	Y_B – массовое отношение компонента В к остальной части газовой смеси, 1;
D – коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$;	u_B – молярная доля компонента В в газовой смеси, $(\text{моль В})/(\text{моль смеси})$;
D – диаметр [аппарата], м;	β – коэффициент массоотдачи, $\text{м}/\text{с}$, или $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, или $\text{моль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ (в зависимости от единиц измерения концентрации компонента);
d – диаметр, м;	δ – толщина, м;
g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$;	ε – доля свободного объёма, 1;
h – высота, м;	ϑ – температура Цельсия, $^\circ\text{C}$;
K – коэффициент массопередачи, $\text{м}/\text{с}$, или $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, или $\text{моль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ (в зависимости от единиц измерения концентрации компонента);	μ – динамическая вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}$;
L – длина, м;	ν – кинематическая вязкость среды, $\text{м}^2/\text{с}$;
l – линейный размер, м;	P – осмотическое давление, Па;
M – молярная масса, $\text{кг}/\text{моль}$;	Π – периметр, м;
m – масса, кг;	ρ – плотность среды, $\text{кг}/\text{м}^3$;
\dot{m} – массовый расход, $\text{кг}/\text{с}$;	τ – время, с;
n – количество вещества, моль;	
\dot{n} – молярный расход, $\text{моль}/\text{с}$;	
p – давление, Па;	
pH – водородный показатель;	
S – площадь [сечения], м^2 ;	
T – температура термодинамическая, К;	
t – температура Цельсия, $^\circ\text{C}$;	
t – время, с;	
V – объём, м^3 ;	
\dot{V} – объёмный расход, $\text{м}^3/\text{с}$;	
v – скорость, $\text{м}/\text{с}$;	
\bar{v} – средняя скорость, $\text{м}/\text{с}$;	

3.1. РАЗДЕЛЕНИЕ БИНАРНОЙ СМЕСИ ЖИДКОСТЕЙ ПРОСТОЙ ПЕРЕГОНКОЙ

Содержание работы

Простая перегонка (или дистилляция) представляет собой процесс разделения смеси жидкостей на компоненты путём превращения жидкости в пар при кипении с последующей конденсацией пара.

Образующийся конденсат называют *дистиллятом* или *продуктом*, а жидкость, остающуюся в сосуде, в котором производится её кипячение (так называемом «кубе»), – *кубовой жидкостью* или *кубовым остатком*.

Если количество¹ жидкой исходной смеси равно n_F , количество образовавшегося дистиллята – n_D , а количество кубового остатка – n_W ², то материальный баланс системы в целом определяется выражением:

$$n_F = n_D + n_W. \quad (3.1.1)$$

Если молярная доля одного из компонентов в жидкой исходной смеси равна x_F , в дистилляте – x_D , а в кубовом остатке – x_W , то материальный баланс этого компонента определяется выражением:

$$x_F \cdot n_F = x_D \cdot n_D + x_W \cdot n_W. \quad (3.1.2)$$

Обычно уравнение (3.1.2) составляется для самого низкокипящего, то есть легколетучего компонента смеси.

В теории простой перегонки устанавливается также соотношение между количествами исходной смеси и кубового остатка и концентрациями. Это соотношение определяется уравнением:

$$\ln \frac{n_F}{n_W} = \int_{x=x_W}^{x=x_F} \frac{dx}{y^* - x}, \quad (3.1.3)$$

где y^* – молярная доля легколетучего компонента в паровой фазе, равновесная молярной доле его в жидкой фазе (x).

¹ Термин «количество» здесь употребляется в значении «физическая величина, определяемая числом структурных элементов (например, молекул), содержащихся в системе».

² Индексы “F”, “D” и “W” — на основе англ. feed – питание, distillate – дистиллят и waste – отходы, соответственно.

Уравнения (3.1.1)...(3.1.3) должны рассматриваться как система алгебраических уравнений, в которых фигурируют 6 переменных, а именно: n_F , n_D , n_W , x_F , x_D , x_W . Очевидно, эта система может быть решена аналитически относительно любых 3-х величин. Например, если известно количество исходной смеси, а также известны концентрации жидкой смеси в начале и в конце перегонки, то могут быть спрогнозированы количество получаемого дистиллята и его состав.

Количество вещества системы n может быть рассчитано по формуле:

$$n = \frac{\rho V}{M}, \quad (3.1.4)$$

где ρ – плотность системы;

V – объём системы;

M – молярная масса системы.

Молярная масса бинарной смеси, состоящей из компонентов А и В, в которой молярная доля компонента А равна x_A , вычисляется по формуле:

$$M = M_A \cdot x_A + M_B \cdot (1 - x_A), \quad (3.1.5)$$

где M_A и M_B – молярные массы компонентов А и В, соответственно.

Концентрация компонента в смеси может быть определена каким-либо инструментальным методом, например, по косвенному параметру – оптическому показателю преломления, определяемому методом рефрактометрии.

Кроме того, как известно, жидкие смеси определённого состава имеют вполне определённую температуру кипения; таким образом, температура кипения смеси может служить косвенным показателем её состава.

Цель работы: разделение жидкой бинарной смеси изопропиловый спирт — вода методом простой перегонки; сравнение экспериментально полученных значений количества и качества (состава) дистиллята со значениями, рассчитанными теоретически.

Схема лабораторной установки и её описание

Схема лабораторной установки изображена на рис. 3.1.

Основными элементами лабораторной установки являются куб-кипятыльник K , в котором находится разделяемая смесь жидкостей (раствор изопропилового спирта в воде), холодильник-конденсатор пара XK и сборник дистиллята C .

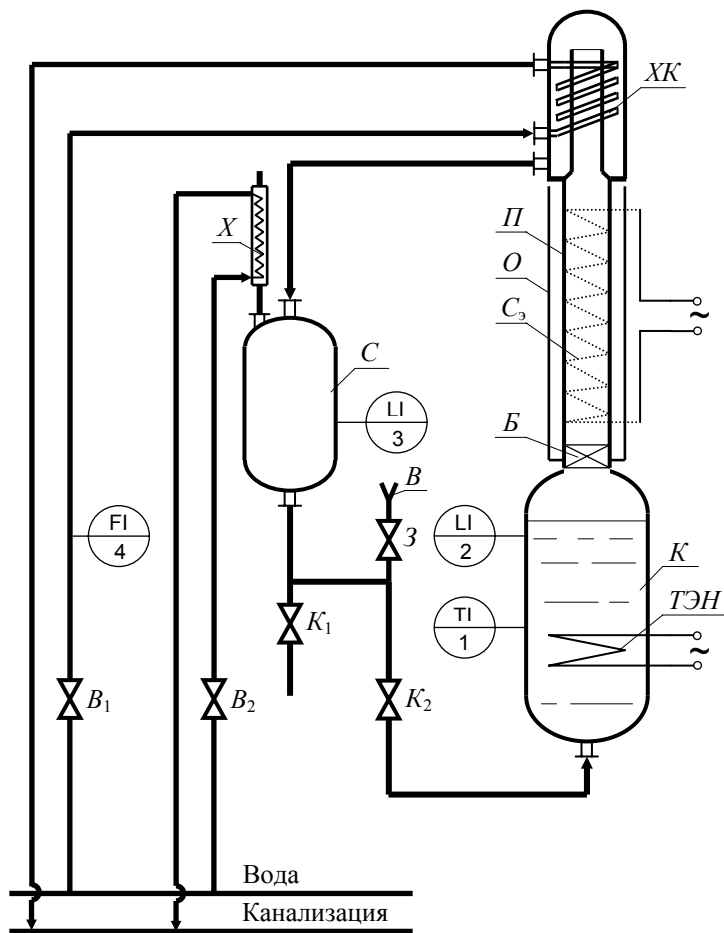


Рис. 3.1. Схема лабораторной установки для проведения простой перегонки смеси жидкостей

Для обеспечения кипения жидкости куб оборудован трубчатым электронагревателем $TЭH$. Температура жидкости в кубе фиксируется термометром (поз. 1); объём жидкости – по отградуированной шкале на поверхности сосуда (поз. 2). Образующиеся при кипении жидкости пары поступают в конденсатор XK по паропроводу Π .

В нижней части паропровода расположен брызгоотбойник B , предотвращающий попадание в паропровод капель жидкости. Во избежание конденсации пара на стенках паропровода, последний снабжён спиральным электронагревателем C_3 . Напряжение электрического тока, приложенное к спирали, регулируется лабораторным автотрансформатором (на схеме не показан). Снаружи паропровод имеет защитную стеклянную обечайку O .

Образующийся в холодильнике-конденсаторе XK дистиллят стекает в сборник C , соединённый с атмосферой обратным холодильником X , предотвращающим попадание органических паров в помещение лаборатории. Объём дистиллята в сборнике определяется по отградуированной шкале на поверхности сосуда (поз. 3).

Линия, перекрываемая краном K_1 , служит для отбора пробы дистиллята.

Возврат дистиллята из сборника C в куб-кипятыльник K осуществляется по соединительной линии при открытом кране K_2 .

Рекомендации по выполнению работы

Перед включением установки в работу убедиться, что кран K_1 на линии отбора пробы полностью закрыт, а кран K_2 на линии возврата дистиллята из сборника в куб-кипятыльник полностью открыт.

1. Зафиксировать объём исходной смеси V_F в кубе-кипятыльнике.
2. Открыть полностью вентиль B_1 на линии подачи воды в холодильник-конденсатор; приоткрыть на $\frac{1}{3}$ оборота маховика вентиль B_2 на линии подачи воды в обратный холодильник.
3. Включить тумблер подачи электропитания на спиральный нагреватель. Включить электропитание электронагревателя.

После того, как жидкая смесь в кубе закипит, выждать 7...10 минут, в течение которых достигается стационарный режим разделения.

4. Закрыть кран K_2 на линии возврата дистиллята из сборника в куб-кипятыльник.

Этот момент времени считается началом перегонки.

Отметить температуру кипения смеси t_F в этот момент времени.

5. По истечении заданного времени перегонки отключить подачу электропитания на трубчатый электронагреватель. Незамедлительно зафиксировать температуру кипения смеси t_W .

Отключить электропитание спирального нагревателя.

6. Через 20...30 минут, в течение которых дистиллят в сборнике охладится до комнатной температуры, зафиксировать объём дистиллята V_D в сборнике и произвести отбор пробы дистиллята для определения его состава.

Для этого, открыв кран K_1 , слить в заранее подготовленный 1-й химический стакан вместимостью 100 мл не менее 50 мл дистиллята после чего кран K_1 закрыть; стакан накрыть, например, листом бумаги во избежание испарения изопропилового спирта. Содержание изопропанола в этой жидкости, как правило, не адекватно среднему составу полученного дистиллята.

Затем налить несколько миллилитров дистиллята во 2-й химический стакан и незамедлительно определить содержание спирта в нём.

Концентрация изопропанола в дистилляте определяется по косвенному параметру – оптическому показателю преломления, измеряемому с помощью рефрактометра.

7. Открыть кран K_2 и слить дистиллят из сборника C в кубикопитильник K .

8. Вернуть в установку отобранные пробы дистиллята.

Для этого открыть заглушку Z (пробку) и через воронку B слить содержимое обоих стаканов.

9. Отключить подачу воды в холодильник-конденсатор и в обратный холодильник, закрыв вентили B_1 и B_2 .

Рекомендации по обработке экспериментальных данных

1. Определить молярные доли изопропанола в исходной смеси x_F и в кубовом остатке x_W .

Для этого по данным, представленным в таблице равновесных составов (см. с. 56), построить график зависимости состава жидкости от температуры кипения (для интервала 100,0... t_F , °C) и, используя значения зафиксированных температур t_F и t_W , определить искомые концентрации.

2. Определить экспериментальное значение молярной доли изопропанола в дистилляте $x_{D, \text{эксп}}$.

Для этого использовать измеренное значение показателя преломления дистиллята. Молярная доля x [в (моль C_3H_8O)/(моль раствора)] и показатель преломления³ r водного раствора изопропилового спирта связаны соотношением:

$$x = \exp(71,8504 \cdot r - 99,7753) . \quad (3.1.6)$$

3. Определить количества исходной смеси n_F и дистиллята $n_{D, \text{эксп}}$ по формуле (3.1.4).

Для этого использовать зафиксированные значения объёмов исходной смеси V_F и дистиллята V_D .

Плотность ρ (в $\text{кг}/\text{м}^3$) водного раствора изопропилового спирта при комнатной температуре может быть рассчитана по формуле:

$$\rho = (1,0064 \cdot 10^{-3} + 3,827 \cdot 10^{-4} \cdot x)^{-1} . \quad (3.1.7)$$

При расчёте по (3.1.5) молярной массы исследуемой системы рекомендуется считать компонентом А изопропиловый спирт, имеющий молярную массу $M_{C_3H_8O} = 60,096 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, а компонентом В — воду, молярная масса которой $M_{H_2O} = 18,015 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

4. Рассчитать теоретическую концентрацию изопропанола в дистилляте $x_{D, \text{расч}}$.

Полагая известными 3 параметра (x_F , x_W и n_F) и решая систему уравнений (3.1.1)...(3.1.3) относительно x_D , получают формулу для расчёта искомой концентрации:

$$x_{D, \text{расч}} = \frac{x_F \cdot e^S - x_W}{e^S - 1} , \quad (3.1.8)$$

$$\text{где } S = \int_{x=x_W}^{x=x_F} \frac{dx}{y^* - x} .$$

³ Здесь использован нетрадиционный для оптики символ показатель преломления « r », а не общепринятый « n_D^{20} » во избежание путаницы с обозначением количества вещества.

Для определения интеграла S рекомендуется предварительно вычислить значения интегрируемой функции $f = (y^* - x)^{-1}$ при различных значениях x , используя данные таблицы равновесных составов (см. с. 56). Значения y^* при $x = x_W$ и $x = x_F$ могут быть найдены линейной интерполяцией по известным ближайшим табличным величинам y^* . Величины $x_2 \dots x_{k-1}$ рекомендуется принять тождественными табличным. Подготовленную числовую информацию внести в таблицу:

№ п/п	$x \cdot 10^2$, МОЛЬ МОЛЬ	$y^* \cdot 10^2$, МОЛЬ МОЛЬ	$(x - y^*) \cdot 10^2$, МОЛЬ МОЛЬ	f
1	$[x_W]$			
2				
3				
...				
$k-2$				
$k-1$				
k	$[x_F]$			

Величина интеграла S , то есть площадь, ограниченная осью абсцисс, ординатами, проходящими через точки $x = x_W$ и $x = x_F$, и кривой функции f , может быть определена по одной из квадратурных формул. Здесь рекомендуется применить формулу трапеций:

$$S \cong \frac{f_1 + f_2}{2} \cdot (x_2 - x_1) + \left(\frac{f_2}{2} + f_3 + \dots + f_{k-2} + \frac{f_{k-1}}{2} \right) \cdot \Delta x + \frac{f_{k-1} + f_k}{2} \cdot (x_k - x_{k-1}). \quad (3.1.9)$$

При начальной концентрации раствора не более 0,04 моль/моль рекомендуется принять $\Delta x = 0,002$ моль/моль соответственно шагу изменения концентрации (в интервале $x = 0,0 \dots 0,04$ моль/моль) в указанной таблице. При $x_F > 0,04$ моль/моль рекомендуется принять $\Delta x = 0,005$ моль/моль.

5. Рассчитать теоретическое количество получаемого дистиллята $n_{D, \text{расч}}$.

Решая систему уравнений (3.1.1)...(3.1.3) относительно n_D , получают формулу для расчёта искомой величины:

$$n_{D, \text{расч}} = n_F \cdot (1 - e^{-S}). \quad (3.1.10)$$

Измеренные и рассчитанные параметры рекомендуется занести в таблицу:

№	Исходная смесь						Остаток	
	V_F , л	t_F , °C	x_F , МОЛЬ МОЛЬ	ρ_F , КГ М ³	M_F , Г МОЛЬ	n_F , МОЛЬ	t_W , °C	x_W , МОЛЬ МОЛЬ
1								
2								
3								

Дистиллят							
V_D , л	r	$x_{D, \text{эксп}}$, МОЛЬ МОЛЬ	ρ_D , КГ М ³	M_D , Г МОЛЬ	$n_{D, \text{эксп}}$, МОЛЬ	$x_{D, \text{расч}}$, МОЛЬ МОЛЬ	$n_{D, \text{расч}}$, МОЛЬ

Проанализировать значения количества и качества (состава) дистиллята, полученные экспериментально и рассчитанные теоретически, и сделать выводы по работе.

3.2. РАЗДЕЛЕНИЕ БИНАРНОЙ СМЕСИ ЖИДКОСТЕЙ РЕКТИФИКАЦИЕЙ

Содержание работы

Ректификация – процесс разделения жидких смесей компонентов, обладающих различной летучестью. Этот процесс подобен простой перегонке, но отличается от последнего тем, что часть жидкого продукта (дистиллята) возвращается на орошение ректификационной колонны. В колонне организовывается противоточное движение этой жидкости и пара, образующегося при кипении разделяемой смеси. При их взаимном контакте происходят многократно повторяющиеся акты испарения жидкости и конденсации пара. Вследствие этого пар, достигающий конденсатор, оказывается более обогащённым легколетучим компонентом по сравнению с тем паром, что поступает в конденсатор при простой перегонке.

Та часть конденсата, что возвращается на орошение колонны, называется *флегмой*.

Очевидно, флегма и продукт (дистиллят) – жидкости качественно одинаковые, то есть жидкости одного и того же состава. Но эти два потока в общем случае различаются количественно. Отношение расхода флегмы к расходу продукта называется *флегмовым числом*:

$$R = \frac{\dot{m}_\Phi}{\dot{m}_p} = \frac{\dot{n}_\Phi}{\dot{n}_p}, \quad (3.2.1)$$

где R – флегмовое число;

\dot{m}_Φ и \dot{m}_p – массовые расходы флегмы и продукта, соответственно;

\dot{n}_Φ и \dot{n}_p – молярные расходы флегмы и продукта, соответственно.

Качество получаемого при ректификации продукта в значительной мере определяется величиной флегмового числа.

Интенсивность процесса разделения может быть охарактеризована величиной среднего коэффициента массопередачи, например, по паровой фазе K_y , определяемого выражением:

$$K_y = \frac{j_A}{\Delta y \cdot A}, \quad (3.2.2)$$

где j_A – поток компонента А, перешедшего из одной фазы в другую за единицу времени;

Δy – средняя движущая сила массопередачи;

A – площадь поверхности массообмена.

При ректификации поток вещества обычно выражают в молярных единицах, то есть

$$j_A = \dot{n}_A, \quad (3.2.3)$$

где \dot{n}_A – молярный расход компонента А, перешедшего из одной фазы в другую (компонентом А традиционно считается легколетучий компонент).

Указанный выбор единиц измерения расхода компонента А обусловлен тем, что для большинства веществ молярные теплоты испарения (конденсации) близки между собой, в силу чего молярные расходы фаз по высоте колонны можно считать постоянными. Тогда молярный расход паровой фазы \dot{n}_G в любом сечении колонны определяется выражением:

$$\dot{n}_G = \dot{n}_p + \dot{n}_\Phi = \dot{n}_p \cdot (1 + R). \quad (3.2.4)$$

Поток компонента, перешедшего из одной фазы в другую:

$$\dot{n}_A = (y_k - y_n) \cdot \dot{n}_G, \quad (3.2.5)$$

где y_n и y_k – соответственно начальная (например, в нижнем сечении колонны) и конечная (например, в верхнем сечении колонны) молярная доля компонента в паровой фазе.

Средняя движущая сила массопередачи определяется выражением:

$$\Delta y = \frac{y_k - y_n}{\int_{y=y_n}^{y=y_k} \frac{dy}{y^* - y}}, \quad (3.2.6)$$

где y^* – молярная доля компонента А в паровой фазе, равновесная с концентрацией этого компонента в жидкой фазе в произвольном сечении колонны;

y – фактическая (рабочая) молярная доля компонента А в паровой фазе в том же сечении колонны.

В аппаратах с непрерывным контактом паровой и жидкой фаз, например, в насадочных колоннах, концентрации компонентов в фазах в произвольном сечении колонны связаны соотношением:

$$y = \frac{1}{R+1} \cdot x_p + \frac{R}{R+1} \cdot x, \quad (3.2.7)$$

где y и x – молярные доли легколетучего компонента в произвольном сечении колонны в паровой и в жидкой фазах, соответственно;

x_p – молярная доля легколетучего компонента в продукте.

Концентрация компонента в смеси может быть определена каким-либо инструментальным методом, например, по косвенному параметру – оптическому показателю преломления, определяемому методом рефрактометрии.

Кроме того, как известно, жидкие смеси определённого состава имеют вполне определённую температуру кипения; таким образом, температура кипения смеси может служить косвенным показателем её состава.

Цель работы: разделение жидкой бинарной смеси изопропанол – вода методом ректификации; определение качества (состава) дистиллята; расчёт коэффициента массопередачи по паровой фазе.

Схема лабораторной установки и её описание

Ректификационная установка выполнена из стандартных деталей, изготовленных фирмой SOVIREL (Франция).

Схема лабораторной установки изображена на рис. 3.2.

Основным аппаратом лабораторной установки с организацией периодического процесса разделения является ректификационная колонна KP внутренним диаметром 80 мм. Колонна заполнена насадкой H – стеклянными кольцами Рашига размером $7 \times 7 \times 1,5$ мм; высота слоя насадки в колонне равна 90 см.

Колонна установлена над кубом-кипятильником K , в котором находится разделяемая смесь жидкостей (раствор изопропилового спирта в воде). Для обеспечения кипения жидкости куб оборудован трубчатым электронагревателем $TЭН$. Температура жидкости в кубе фиксируется термометром (поз. 1).

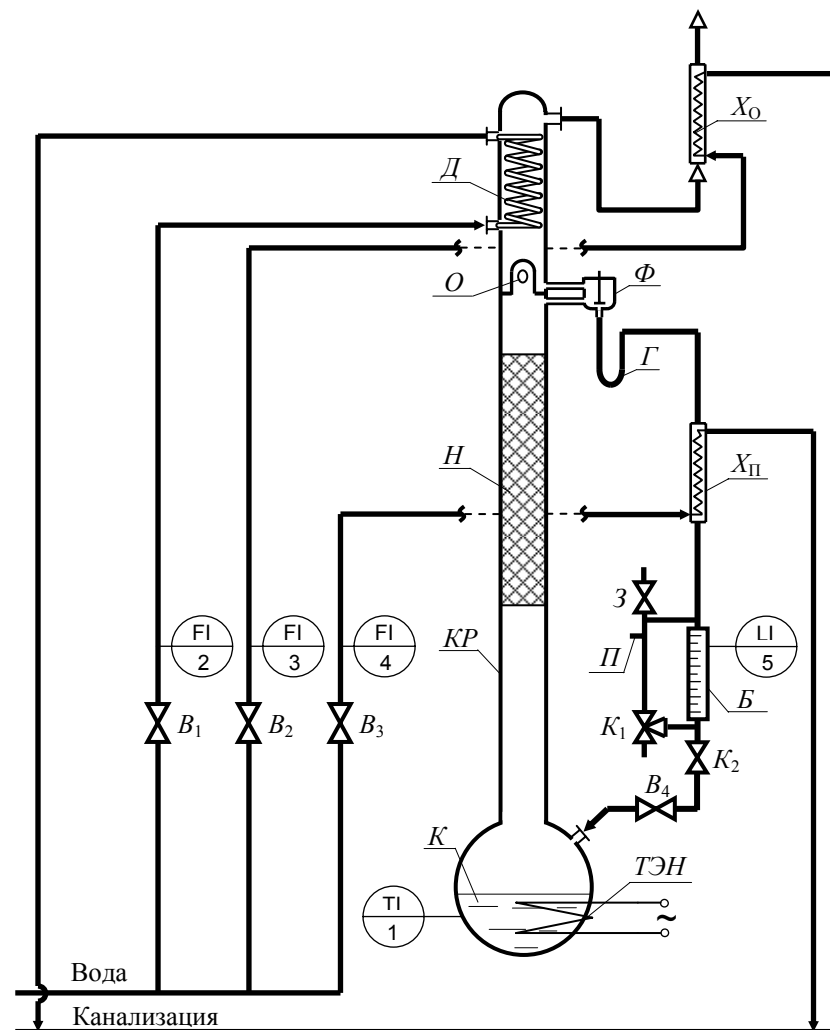


Рис. 3.2. Схема лабораторной ректификационной установки

Образующиеся при кипении жидкости пары поступают в колонну, где поднимаются вверх и контактируют в основном на поверхности насадки со стекающей жидкой флегмой.

Из колонны пары через отверстие O в куполообразной перегородке поступают в дефлегматор D . В дефлегматоре (теплообменнике змеевикового типа) пары конденсируются. Теплота конденсации отводится водой, подаваемой в трубки змеевика. Расход воды регулируется вентилем B_1 и измеряется ротаметром (поз. 2).

Стекающий из дефлегматора конденсат делится на 2 потока: продукт (дистиллят) и флегму с помощью делителя флегмы Φ .

Делитель флегмы представляет собой устройство, снабжённое электромагнитным клапаном. В течение интервала времени, когда шток поднят и клапан открыт, жидкость направляется в линию отбора продукта; в течение интервала времени, когда шток опущен и клапан закрыт, жидкость (флегма) направляется на орошение колонны. Соответствующие интервалы времени устанавливаются и регулируются со специального пульта.

Продукт из делителя флегмы через гидравлический затвор G и холодильник продукта X_{II} либо возвращается в куб-кипятильник (при открытом кране K_2 и вентиле B_4), либо накапливается в мерной бюретке B (при закрытой трубопроводной арматуре). Объём жидкости в бюретке определяется по шкале, нанесённой на поверхность сосуда и отградуированной в см^3 (поз. 5).

Бюретка оборудована байпасом, на котором смонтирован трёхходовой кран K_1 и имеется пробоотборник II . Возврат пробы в установку осуществляется через патрубок с заглушкой (пробкой) $З$.

Во избежание попадания органических паров в помещение лаборатории установка имеет обратный холодильник X_O .

Рекомендации по выполнению работы

Перед включением установки в работу убедиться, что кран K_1 находится в положении «закрыто», кран K_2 также закрыт, а вентиль B_4 на линии возврата дистиллята в куб-кипятильник открыт.

1. Открыть вентили B_1 , B_2 и B_3 на линиях подачи воды в дефлегматор, в обратный холодильник и в холодильник продукта. Рекомендуемые расходы воды указаны на соответствующих ротаметрах.

2. Включить электропитание трубчатого нагревателя $TЭН$.

После того, как жидкая смесь в кубе закипит, выждать 7...10 минут, в течение которых пары достигнут дефлегматора и начнут конденсироваться. Появление первых капель конденсата фиксируется визуально.

3. Включить на пульте управления делитель флегмы и установить заданное флегмовое число, установив тумблеры задающего устройства в положения, соответствующие интервалам времени, в течение которых клапан делителя флегмы открыт или закрыт.

4. При появлении первых порций жидкости в мерной бюретке B открыть кран K_2 для возврата продукта в куб-кипятильник.

5. Через 20...30 минут, в течение которых достигается стационарный режим работы установки, отметить температуру кипения смеси t_w в кубе K .

6. Закрыть кран K_2 и произвести измерение объёмного расхода дистиллята с помощью мерной бюретки B и секундомера.

7. Отобрать пробу дистиллята. Для этого дождаться перелива жидкости из бюретки в байпас и через патрубок пробоотборника II налить несколько миллилитров дистиллята в заранее подготовленный химический стакан.

Отобрав пробу дистиллята, незамедлительно открыть кран K_2 на линии возврата жидкости из бюретки в куб-кипятильник, а кран K_1 установить в положение, обеспечивающее слив жидкости из байпаса в куб.

8. Определить содержание изопропилового спирта в пробе дистиллята. Концентрация изопропанола в дистилляте определяется по косвенному параметру – оптическому показателю преломления, измеряемому с помощью рефрактометра.

9. Вернуть в установку отобранную пробу дистиллята. Для этого открыть заглушку $З$ (пробку) и слить содержимое стакана.

10. Выключить установку в порядке, обратном включению; при этом подачу воды в теплообменники прекратить через 10...15 минут после выключения электронагревателя.

Рекомендации по обработке экспериментальных данных

1. Определить молярные доли изопропанола в кубе x_w и в продукте x_p .

Для определения значения молярной доли изопропанола в кубе x_w по данным, представленным в таблице равновесных составов

(см. с. 56), построить график⁴ зависимости состава жидкости от температуры кипения (для интервала $100,0 \dots t_w$, °C) и, используя значение зафиксированной температуры t_w , определить искомую концентрацию x_w .

Для определения значения молярной доли изопропанола в дистилляте x_p использовать измеренное значение показателя преломления⁵ r продукта и формулу (3.1.6).

2. Рассчитать молярные доли изопропанола в паре в нижнем сечении колонны y_n и в верхнем сечении колонны y_k , используя формулу (3.2.7) и принимая для нижнего сечения концентрацию спирта в жидкой фазе $x = x_w$, а для верхнего сечения — $x = x_p$.

3. Определить молярный расход продукта \dot{n}_p :

$$\dot{n}_p = \frac{V_p}{\tau} \cdot \frac{\rho_p}{M_p}, \quad (3.2.8)$$

где V_p – зафиксированный объём продукта в мерной бюретке;

τ – время заполнения мерной бюретки;

ρ_p – плотность продукта, рассчитываемая по (3.1.7);

M_p – молярная масса продукта, рассчитываемая по (3.1.5).

При расчёте молярной массы системы по (3.1.5) рекомендуется считать компонентом А изопропиловый спирт, имеющий молярную массу $M_{C_3H_8O} = 60,096 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, а компонентом В — воду, молярная масса которой $M_{H_2O} = 18,015 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

4. Рассчитать молярный расход изопропилового спирта $\dot{n}_{C_3H_8O}$, перешедшего из фазы в фазу, используя (3.2.5) и (3.2.4).

5. Рассчитать среднюю движущую силу процесса массопередачи, используя (3.2.6).

Для этого необходимо, прежде всего, рассчитать величину интеграла, фигурирующего в знаменателе формулы (3.2.6) и назы-

⁴ Построение указанного графика рекомендуется выполнить в течение периода достижения стационарного режима работы установки, отметив в это время приблизительное значение температуры кипения.

⁵ Здесь, как и в предыдущей работе, нетрадиционным для оптики символом « r » обозначен показатель преломления во избежание путаницы с обозначением количества вещества.

ваемого в теории массообмена *общее число единиц переноса*, которое определяется в данном случае по концентрациям в паровой фазе:

$$N_{o,y} = \int_{y=y_n}^{y=y_k} \frac{dy}{y^* - y}. \quad (3.2.9)$$

При расчёте общего числа единиц переноса $N_{o,y}$ рекомендуется предварительно вычислить значения интегрируемой функции $f = (y^* - y)^{-1}$ при различных значениях x в интервале от $x = x_w$ до $x = x_p$, используя уравнение (3.2.7) и данные таблицы равновесных составов (см. с. 56). Значения y^* при $x = x_w$ и при $x = x_p$ могут быть найдены линейной интерполяцией по известным ближайшим табличным величинам y^* . Величины $x_2 \dots x_{k-1}$ рекомендуется принять тождественными табличным. Подготовленную числовую информацию внести в таблицу:

№ п/п	$x \cdot 10^2$, МОЛЬ МОЛЬ	$y \cdot 10^2$, МОЛЬ МОЛЬ	$y^* \cdot 10^2$, МОЛЬ МОЛЬ	$(y^* - y) \cdot 10^2$, МОЛЬ МОЛЬ	f
1	$[x_w]$	$[y_n]$			
2					
3					
...					
$k - 2$					
$k - 1$					
k	$[x_p]$	$[y_k]$			

Для численного интегрирования может быть применена одна из квадратурных формул. Здесь рекомендуется применить формулу трапеций (3.1.9).

6. Рассчитать площадь поверхности массопередачи A .

Площадь поверхности массопередачи в установке может быть принята равной величине геометрической поверхности насадки:

$$A = a \cdot \frac{\pi D_{вн}^2}{4} \cdot h_{нас}, \quad (3.2.10)$$

где $a = 750 \text{ м}^2/\text{м}^3$ – удельная поверхность насадки в колонне;

$D_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр колонны;
 $h_{\text{нас}}$ – высота слоя насадки.

7. Рассчитать среднее значение коэффициента массопередачи по паровой фазе K_y по (3.2.2).

Измеренные и рассчитанные параметры рекомендуется занести в таблицу:

R	$t_w, \text{ } ^\circ\text{C}$	$x_w, \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{МОЛЬ}}$	r	$x_p, \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{МОЛЬ}}$	$\rho_p, \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$	$M_p, \frac{\text{Г}}{\text{МОЛЬ}}$	$V_p, \text{ см}^3$	$\tau, \text{ с}$	$\dot{n}_p \cdot 10^3, \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{С}}$	$\dot{n}_G \cdot 10^3, \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{С}}$

$y_{\text{н}}, \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{МОЛЬ}}$	$y_{\text{к}}, \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{МОЛЬ}}$	$\dot{n}_{\text{C}_3\text{H}_8\text{O}} \cdot 10^3, \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{С}}$	$N_{o,y}$	$\overline{\Delta y}, \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{МОЛЬ}}$	$A, \text{ м}^2$	$K_y \cdot 10^3, \frac{\text{МОЛЬ Н}_2\text{О}}{\text{М}^2 \cdot \text{С}}$

Проанализировать полученные значения; сравнить качества (составы) дистиллятов, полученных разделением смесей ректификацией и простой перегонкой, и сделать выводы по работе.

3.3. КОЭФФИЦИЕНТ МАССООТДАЧИ В ЖИДКОЙ ФАЗЕ

Содержание работы

Скорость протекания любого массообменного процесса, то есть процесса переноса одного или нескольких компонентов из одной фазы в другую, определяется скоростями переноса вещества в каждой из фаз.

Интенсивность переноса вещества из ядра фазы к межфазной поверхности (или наоборот) может быть охарактеризована величиной локального коэффициента массоотдачи $\beta_{\text{лок}}$, который, согласно уравнению массоотдачи, равен:

$$\beta_{\text{лок}} = \frac{\delta j}{(c - c_{\text{тр}}) dA}, \quad (3.3.1)$$

где δj – элементарный (локальный) поток вещества;

c – концентрация компонента в ядре фазы;

$c_{\text{тр}}$ – концентрация компонента в той же фазе, но у границы раздела фаз;

dA – элементарная площадь межфазной поверхности.

Заметим, что поток вещества может быть выражен либо в массовых единицах [тогда $\delta j = \delta \dot{m}$ (в кг/с)], либо в молярных единицах [тогда $\delta j = \delta \dot{n}$ (в моль/с)].

В формуле (3.3.1) символом « c » условно обозначена концентрация компонента без привязки этого символа к конкретным единицам измерения концентрации.

Если указанная разность концентраций компонента изменяется вдоль поверхности массообмена, то интенсивность процесса характеризуют средней величиной коэффициента массоотдачи – β (символ осреднения опущен):

$$\beta = \frac{j}{(c - c_{\text{тр}}) A}, \quad (3.3.2)$$

где j – поток вещества из ядра фазы к межфазной поверхности (или наоборот) или, что то же самое, масса либо количество вещества, переносимого за единицу времени;

$\overline{(c - c_{гр})}$ – средняя вдоль поверхности массообмена разность концентрации или, что то же самое, средняя движущая сила процесса массоотдачи;

A – площадь поверхности массообмена.

Экспериментальное измерение концентраций у границы раздела фаз сопряжено с определёнными трудностями.

Вместе с тем, если диффузионное сопротивление переносу компонента из одной фазы в другую (в системе газ — жидкость) целиком сосредоточено в одной из фаз, например, в жидкой, то коэффициент массоотдачи численно равен коэффициенту массопередачи K_x , определяемому выражением:

$$K_x = \frac{\delta j}{(c - c^*) dA}, \quad (3.3.3)$$

где c^* – концентрация компонента в жидкой фазе, равновесная с концентрацией его в газе.

Заметим, что в формуле (3.3.3) индекс «x» у символа коэффициента массопередачи K_x в данном случае не означает молярную долю компонента, а является лишь формальным указанием на определение концентраций именно в жидкой фазе.

Среднее для всего аппарата значение коэффициента массопередачи (символ осреднения вновь опущен) определяется выражением:

$$K_x = \frac{j}{(c - c^*) A} = \frac{j}{\Delta c A}, \quad (3.3.4)$$

где $\overline{\Delta c}$ – средняя (вдоль поверхности массообмена) движущая сила массопередачи.

При определённых условиях средняя движущая сила массопередачи вычисляется по формуле:

$$\overline{\Delta c} = \frac{\Delta c_n - \Delta c_k}{\ln \frac{\Delta c_n}{\Delta c_k}}, \quad (3.3.5)$$

где Δc_n и Δc_k – соответственно, разность рабочей (в ядре фазы) и равновесной концентраций в начальном (например, нижнем) и конечном (например, верхнем) сечениях аппарата.

Все величины, фигурирующие в (3.3.4), легко поддаются инструментальному измерению. Следовательно, определив экспериментально величину K_x , с уверенностью можно судить о равновеликом значении β_x , то есть

$$\beta_x \cong K_x. \quad (3.3.6)$$

Единственным необходимым условием для выполнения равенства (3.3.6) является пренебрежимо малое значение диффузионного сопротивления переносу компонента в газовой фазе. Такому условию отвечают процессы абсорбции (десорбции) очень слабо растворимых газов жидкостями, например, процессы в системе вода + диоксид углерода — воздух + диоксид углерода.

Концентрация диоксида углерода в воде, при растворении которого образуется угольная кислота, может быть определена инструментально, например, методом рН-метрии.

Цель работы: экспериментальное определение среднего коэффициента массоотдачи в жидкой фазе при десорбции диоксида углерода из воды в воздух в плёночном аппарате; сравнение полученного значения со значением, рассчитанным по эмпирической формуле.

Схема лабораторной установки и её описание

Схема лабораторной установки изображена на рис. 3.3.

Основным элементом лабораторной установки является вертикальная трубчатая колонка T внутренним диаметром 20 мм и длиной (высотой) рабочей части 750 мм, выполненная из стекла.

В колонку подаётся вода, насыщенная диоксидом углерода, из напорной ёмкости E_1 . Расход подаваемой жидкости регулируется вентилем B_1 и измеряется ротаметром (поз. 1). Расход жидкости через указанный ротаметр определяется по формуле:

$$\dot{V} = 1,67 \cdot 10^{-3} + 1,028 \cdot 10^{-4} s, \quad (3.3.7)$$

где \dot{V} – объёмный расход жидкости, $\text{дм}^3/\text{с}$;

s – число делений шкалы, обозначенное положением поплавка ротаметра.

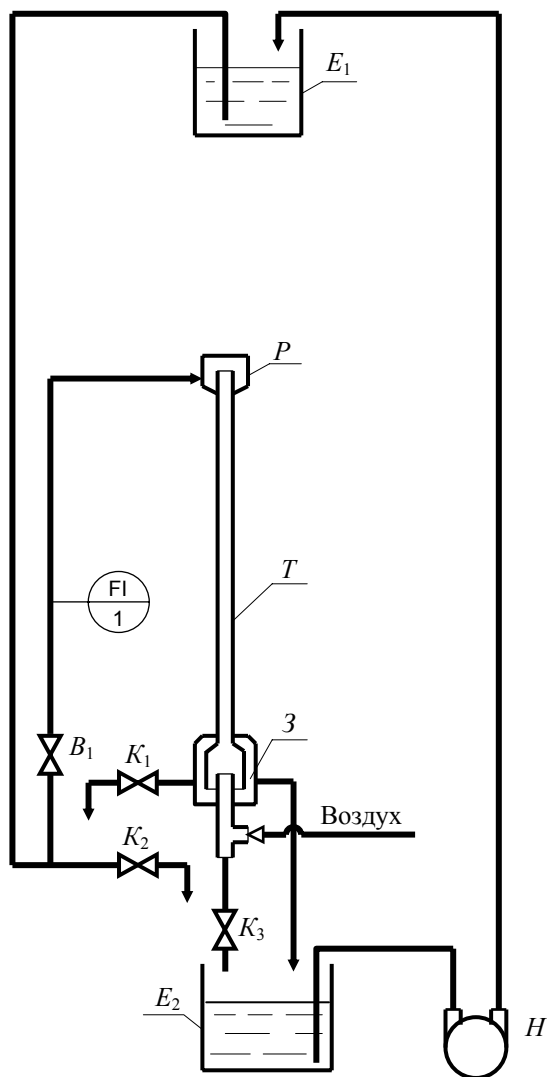


Рис. 3.3. Схема лабораторной установки для определения коэффициента массоотдачи в жидкой фазе

В верхней части трубчатой колонки смонтировано распределительное устройство P , обеспечивающее равномерное распределение жидкости в виде тонкой плёнки по периметру колонки.

Стекающая вниз колонки вода через гидравлический затвор 3 отводится в сборную ёмкость E_2 .

При опорожнении напорной ёмкости E_1 в неё перекачивается вода из сборника E_2 вихревым насосом H .

Для отвода продукта десорбции из объёма колонки во время проведения эксперимента осуществляется подача воздуха вентилятором или воздуходувкой (на схеме не показано).

Рекомендации по выполнению работы

Перед выполнением эксперимента убедиться, что напорная ёмкость заполнена водой. Сатурация воды в напорной ёмкости диоксидом углерода осуществляется лаборантом кафедры.

После подготовки установки к проведению исследований рекомендуется следующий порядок выполнения работы.

1. Включить вентилятор (или воздуходувку).

2. Открыть вентиль B_1 и установить фиксируемый расход воды в колонку.

Для обеспечения полного смачивания внутренней поверхности трубки рекомендуется вначале открыть вентиль B_1 полностью, а затем убавить расход до заданного значения. Удовлетворительное смачивание всей поверхности наблюдается при расходе жидкости не менее $7 \cdot 10^{-3}$ $\text{дм}^3/\text{с}$.

3. Произвести отбор пробы жидкости, поступающей на десорбцию, с целью определения концентрации CO_2 в ней. Для этого открыть кран K_2 и наполнить жидкостью заранее подготовленный химический стакан вместимостью 100 мл.

4. Незамедлительно измерить концентрацию CO_2 во взятой пробе с помощью pH-метра.

5. Произвести отбор пробы жидкости, покидающей массообменный аппарат, через кран K_1 и определить её состав.

6. Через 2...3 минуты повторить отбор проб и определение их составов. В случае постоянства концентраций диоксида углерода в исходной и в десатурированной жидкостях (по сравнению с предыдущим измерением) считать эксперимент законченным.

7. По завершении работы закрыть вентиль B_1 , отключить подачу воздуха в аппарат.

Рекомендации по обработке экспериментальных данных

1. Рассчитать экспериментальное значение коэффициента массоотдачи в жидкой фазе $\beta_{ж, \text{эксп}}$, используя (3.3.6) и (3.3.4). Для этого необходимо выполнить следующее:

1.1. Рассчитать молярные концентрации CO_2 в исходном растворе c_n и в десатурированной жидкости c_k .

При растворении диоксида углерода в воде образуется угольная кислота, которая диссоциирует в основном лишь по первой ступени. Тогда молярная концентрация растворённого вещества при измеренном значении pH раствора может быть найдена по формуле:

$$c = \frac{(10^{-\text{pH}})^2}{K_1}, \quad (3.3.8)$$

где $K_1 = 4,45 \cdot 10^{-7}$ л/моль – константа диссоциации угольной кислоты по первой ступени, учитывающая равновесие ионов со всем количеством диоксида углерода в растворе (как в форме CO_2 , так и в виде угольной кислоты).

1.2. Рассчитать молярный расход десорбированного газа:

$$\dot{n}_{\text{CO}_2} = (c_n - c_k) \dot{V}_L, \quad (3.3.9)$$

где \dot{V}_L – объёмный расход водного раствора диоксида углерода, л/с.

1.3. Рассчитать движущую силу массопередачи в аппарате.

При расчёте движущей силы процесса рекомендуется сделать допущение о том, что содержание CO_2 в атмосферном воздухе пренебрежимо мало, и, учитывая крайне низкую растворимость этого газа в воде, можно принять, что равновесная концентрация CO_2 в растворе $c^* = 0$ по всему объёму аппарата.

Тогда движущая сила массопередачи в верхнем сечении аппарата

$$\Delta c_n = c_n - c^* = c_n, \quad (3.3.10)$$

а в нижнем сечении аппарата

$$\Delta c_k = c_k - c^* = c_k. \quad (3.3.11)$$

По формуле (3.3.5) рассчитать среднюю движущую силу массобменного процесса.

1.4. Рассчитать площадь поверхности массообмена, полагая, что она равна геометрической поверхности трубчатой колонки.

1.5. Рассчитать по (3.3.4) коэффициент массопередачи $K_{ж, \text{эксп}}$ в аппарате.

Следует иметь в виду, что движущая сила процесса здесь выражена в единицах молярной концентрации [моль/л], или, что то же самое, [моль/дм³], а площадь поверхности массообмена – в [м²].

Рассчитанное значение кинетического коэффициента можно считать равным искомому коэффициенту массоотдачи $\beta_{ж, \text{эксп}}$.

2. Полученное экспериментальное значение коэффициента массоотдачи сравнивается со значением $\beta_{ж, \text{расч}}$, рассчитанным по эмпирическим формулам. При этом может быть использовано критериальное уравнение Г. С. Борисова для определения коэффициента массоотдачи в жидкой фазе в аппарате плёночного типа:

• если $300 < \text{Re} < 1600$, то

$$\text{Sh} = 1,21 \cdot 10^6 \cdot 0,909^m \text{Re}^n \text{Sc}^{0,5} \text{Ga}^{-m/3}, \quad (3.3.12)$$

где $\text{Sh} = \frac{\beta_{ж} \delta_{\text{пр}}}{D}$ – критерий Шервуда⁶;

$$\text{Re} = \frac{\bar{v} d_s \rho_L}{\mu_L} = \frac{4 \dot{V}_L \rho_L}{\Pi \mu_L} \text{ – критерий Рейнольдса};$$

$$\text{Sc} = \frac{\mu_L}{\rho_L D} \text{ – критерий Шмидта}^7;$$

$$\text{Ga} = \frac{h^3}{\delta_{\text{пр}}^3} = \frac{h^3 g \rho_L^2}{\mu_L^2} \text{ – критерий Галилея}.$$

В выражениях критериев массообменного и гидродинамического подобия:

$\beta_{ж}$ – коэффициент массоотдачи в жидкой фазе;

$$\delta_{\text{пр}} = 3 \sqrt{\frac{\mu_L^2}{g \rho_L^2}} \text{ – приведённая толщина плёнки};$$

ρ_L – плотность жидкой фазы;

⁶ Критерий Шервуда в отечественной литературе обычно называется «диффузионный критерий Нуссельта» и обозначается «Nu'».

⁷ Критерий Шмидта в отечественной литературе обычно называется «диффузионный критерий Прандтля» и обозначается «Pr'».

μ_L – динамическая вязкость жидкой фазы;
 g – ускорение свободного падения;
 D – коэффициент диффузии распределяемого компонента в жидкости. Коэффициент диффузии CO_2 в воде при 20°C
 $D = 1,8 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$;
 \bar{v} – средняя скорость течения плёнки;
 \dot{V}_L – объёмный расход жидкой фазы;
 d_0 – эквивалентный диаметр плёнки жидкости;
 Π – смоченный периметр. Здесь $\Pi = \pi d$;
 d – внутренний диаметр трубчатой колонки;
 h – высота орошаемой поверхности.

Фигурирующие в уравнении (3.3.12) показатели степени зависят от числа Рейнольдса и определяются по формулам:

$$m = \frac{3,2 - \lg \text{Re}}{1,47} \quad \text{и} \quad n = \frac{m}{3} - 2,18. \quad (3.3.13)$$

Результаты измерений и вычислений рекомендуется занести в таблицы:

№ п/п	s	$\dot{V} \cdot 10^3$, дм ³ /с	pH _н	$c_n \cdot 10^4$, моль/л	pH _к	$c_k \cdot 10^4$, моль/л	\dot{n}_{CO_2} , моль/с	$\bar{\Delta c}$, моль/л	$\beta_{\text{ж, эксп}}$, м/с
1									
2									
3									

№ п/п	$\delta_{\text{пр}} \cdot 10^5$, м	Re	Sc	Ga	Sh	$\beta_{\text{ж, расч}}$, м/с
1						
2						
3						

Все экспериментальные данные обобщаются и аппроксимируются зависимостью вида:

$$\beta_{\text{ж, эксп}} = C \cdot \text{Re}^n. \quad (3.3.14)$$

Проанализировать значения коэффициентов массоотдачи, полученных экспериментально и рассчитанных по эмпирической формуле, а также проанализировать значения коэффициентов C и n уравнения (3.3.14) и сделать выводы по работе.

3.4. КОЭФФИЦИЕНТ МАССООТДАЧИ В ГАЗОВОЙ ФАЗЕ

Содержание работы

Как отмечалось в описании предыдущей работы, скорость протекания любого массообменного процесса, то есть процесса переноса одного или нескольких компонентов из одной фазы в другую, определяется скоростями переноса вещества в каждой из фаз. При этом интенсивность переноса вещества из ядра фазы к межфазной поверхности (или наоборот) может быть охарактеризована величиной коэффициента массоотдачи. Теория и практика определения коэффициента массоотдачи в жидкой фазе (в системе газ — жидкость) описана в работе 3.3.

В том случае, если выполнение данной работы предшествует определению коэффициента массоотдачи в жидкой фазе, необходимо ознакомиться с введением к работе 3.3.

Здесь же ещё раз отметим, что если диффузионное сопротивление переносу компонента из одной фазы в другую (в системе газ — жидкость) целиком сосредоточено в газовой фазе, то коэффициент массоотдачи численно равен коэффициенту массопередачи K_y , среднее значение которого определяется выражением:

$$K_y = \frac{j}{\Delta c A}, \quad (3.4.1)$$

где j – поток вещества из одной фазы в другую или, что то же самое, масса \dot{m} либо количество \dot{n} вещества, переносимого за единицу времени;

$\bar{\Delta c}$ – средняя (вдоль поверхности массообмена) движущая сила массопередачи;

A – площадь поверхности массообмена.

При определённых условиях средняя движущая сила массопередачи вычисляется по формуле:

$$\bar{\Delta c} = \frac{\Delta c_n - \Delta c_k}{\ln \frac{\Delta c_n}{\Delta c_k}}, \quad (3.4.2)$$

где Δc_n и Δc_k – соответственно, разность рабочей (в ядре фазы) и равновесной концентраций в начальном (например, нижнем) и конечном (например, верхнем) сечениях аппарата.

Заметим, что в формуле (3.4.1) индекс «у» у символа коэффициента массопередачи K_y в данном случае не означает молярную долю компонента, а является лишь формальным указанием на определение концентраций именно в газовой фазе. В той же формуле символом «с» условно обозначена концентрация компонента в фазе без привязки этого символа к конкретным единицам измерения концентрации.

Все величины, фигурирующие в (3.4.1) легко поддаются инструментальному измерению. Следовательно, определив экспериментально величину K_y , с уверенностью можно судить о равновесном значении коэффициента массоотдачи β_y , то есть

$$\beta_y \cong K_y. \quad (3.4.3)$$

Единственным необходимым условием для выполнения равенства (3.4.3) является пренебрежимо малое значение диффузионного сопротивления переносу компонента в жидкой фазе. Такому условию отвечают процессы абсорбции (десорбции) очень хорошо растворимых газов жидкостями, например, процессы в системе вода + аммиак — воздух + аммиак, а также процессы испарения жидкости в газ или процессы поглощения жидкостью паров того же вещества из газовой фазы.

Следовательно, система воздух + водяной пар — вода может служить модельной системой для определения коэффициента массоотдачи в газовой фазе.

Содержание водяных паров в воздухе может быть определено инструментально, например, с помощью психрометра.

Цель работы: экспериментальное определение среднего коэффициента массоотдачи в газовой фазе при абсорбции водяного пара из воздуха водой в насадочном аппарате; сравнение полученного значения со значением, рассчитанным по эмпирической формуле.

Схема лабораторной установки и её описание

Схема лабораторной установки изображена на рис. 3.4.

Основным элементом лабораторной установки является стеклянная колонна K внутренним диаметром 100 мм, заполненная насадкой H из керамических колец Рашига размером $15 \times 15 \times 2$ мм; высота слоя насадки 200 мм.

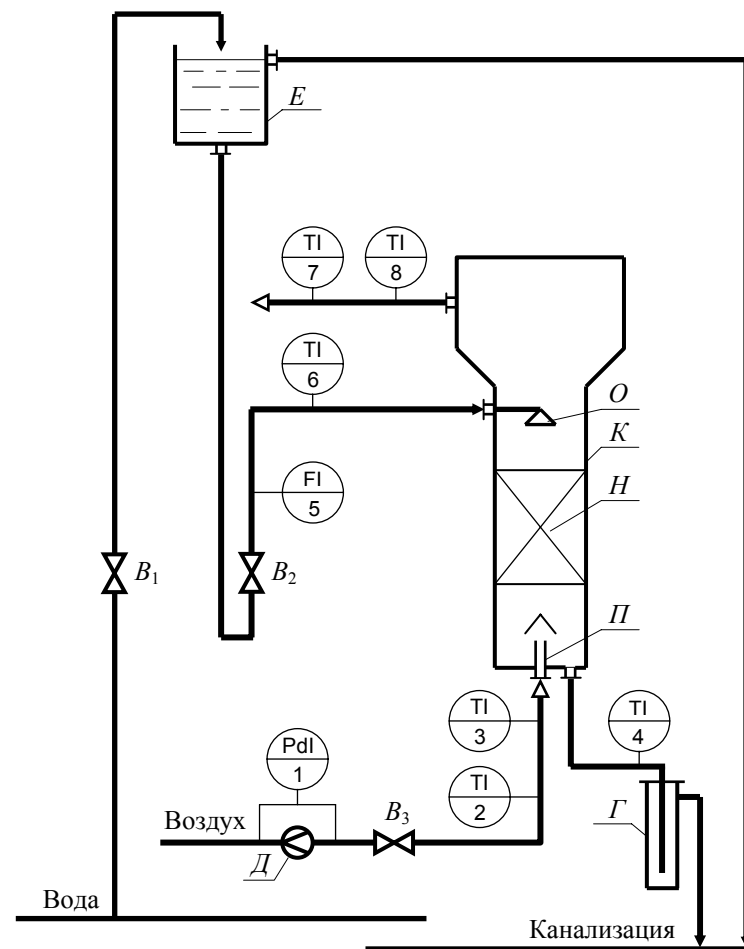


Рис. 3.4. Схема лабораторной установки для определения коэффициента массоотдачи в газовой фазе

В колонну подаётся воздух, нагнетаемый газодувкой (на рис. не показана) по трубопроводу внутренним диаметром 36 мм. Для измерения расхода воздуха на трубопроводе установлена мерная диафрагма D с отверстием диаметром 18 мм, соединённая с дифференциальным манометром (поз. 1), заполненным водой. Расход воздуха регулируется вентилем B_3 .

Для определения температуры и влажности воздуха, поступающего в колонну, на линии его подачи установлен психрометр, состоящий из «смоченного» (поз. 2) и «сухого» (поз. 3) термометров.

Воздух вводится в колонну через газовый патрубок $П$, прикрытый колпаком. Последний служит для равномерного распределения воздуха по сечению колонны и предотвращает попадание воды в газовую линию.

Температура и влажность воздуха, выходящего из колонны в атмосферу, измеряются психрометром, состоящим из «смоченного» (поз. 7) и «сухого» (поз. 8) термометров.

Вода в колонну подаётся из напорной ёмкости E . Расход воды регулируется вентилем B_2 и измеряется ротаметром (поз. 5). Расход жидкости через указанный ротаметр определяется по формуле:

$$\dot{V} = 1,5385 \cdot 10^{-2} + 9,231 \cdot 10^{-4} s, \quad (3.4.4)$$

где \dot{V} – объёмный расход жидкости, $\text{дм}^3/\text{с}$;

s – число делений шкалы, обозначенное положением поплавка ротаметра.

Температура воды, подаваемой в колонну, измеряется термометром (поз. 6).

В верхней части колонны смонтирован ороситель O , обеспечивающий равномерное распределение жидкости по сечению аппарата.

Стекающая вниз колонны вода удаляется через гидрозатвор Γ , который предотвращает выход воздуха из колонны по этой линии. Температура воды, вытекающей из колонны, измеряется термометром (поз. 4).

Рекомендации по выполнению работы

Перед выполнением эксперимента закрыть вентили B_2 и B_3 и заполнить напорную ёмкость E водой, открыв вентиль B_1 .

После подготовки установки к выполнению исследований рекомендуется следующий порядок выполнения работы.

1. Включить газодувку кнопкой пускателя и вентилем B_3 отрегулировать заданный расход воздуха в колонну.

2. Открыть вентиль B_2 и установить фиксируемый расход воды в колонну.

Подача воды в колонну допускается только после подачи воздуха; в противном случае возможно попадание воды в воздушную линию и искажение показаний «сухого» термометра.

3. Отслеживать показания всех термометров на установке. При достижении стационарного режима протекания процесса зафиксировать показания всех приборов.

4. Установить иные расходы фаз (в случае соответствующего задания) и по достижении нового стационарного режима протекания процесса зафиксировать показания всех приборов.

5. Завершив работу, закрыть вентиль B_2 , отключить подачу воздуха в аппарат.

Рекомендации по обработке экспериментальных данных

1. Рассчитать экспериментальное значение коэффициента массоотдачи в газовой фазе $\beta_{г, \text{экс}}$, используя (3.4.3) и (3.4.1). Для этого необходимо выполнить следующее:

1.1. Рассчитать массовые отношения H_2O к сухому воздуху в газе, поступающем в аппарат Y_n , и в воздухе, покидающем аппарат Y_k , используя формулу:

$$Y = \frac{p}{p_{\text{атм}} - p} \cdot \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{возд}}}, \quad (3.4.5)$$

где p – парциальное давление водяного пара в воздухе;

$p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление в лабораторном помещении;

$M_{\text{H}_2\text{O}} = 18,015 \cdot 10^{-3}$ кг/моль – молярная масса водяного пара;

$M_{\text{возд}} = 28,966 \cdot 10^{-3}$ кг/моль – молярная масса сухого воздуха.

Парциальное давление водяного пара в воздухе при измеренных психрометром значениях температур может быть рассчитано по формуле:

$$p = p_{\text{нас}} - 6,27 \cdot 10^{-4} \cdot (t_c - t_m) \cdot p_{\text{атм}}, \quad (3.4.6)$$

где $p_{\text{нас}}$ – давление насыщенного водяного пара при температуре «смоченного» термометра (см. с. 55);

t_c и t_m – температуры «сухого» и «смоченного» термометров, соответственно.

1.2. Рассчитать массовый расход сухого воздуха $\dot{m}_{\text{возд}}$ через массообменный аппарат.

Для этого использовать показание дифференциального манометра, соединённого с диафрагмой на линии подачи воздуха в колонну. Искомый расход воздуха определяется по формуле:

$$\dot{m}_{\text{возд}} = \rho_G \cdot \alpha \cdot \sqrt{2g \Delta h_m \frac{\rho_m - \rho_G}{\rho_G} \cdot \frac{\pi d_o^2}{4} \cdot (1 + Y_n)^{-1}}, \quad (3.4.7)$$

где ρ_G – плотность воздуха, поступающего в колонну;

$\alpha \cong 0,62$ – коэффициент расхода диафрагмы;

Δh_m – разность уровней манометрической жидкости в коленах дифференциального манометра;

$\rho_m \cong 1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность манометрической жидкости (воды);

d_o – диаметр отверстия в диафрагме.

1.3. Рассчитать массовый расход водяного пара, перешедшего из одной фазы в другую:

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = (Y_n - Y_k) \dot{m}_{\text{возд}}. \quad (3.4.8)$$

1.4. Определить движущую силу массопередачи в нижнем сечении аппарата (ΔY_n) и в верхнем сечении аппарата (ΔY_k), используя формулу:

$$\Delta Y = Y - Y^*, \quad (3.4.9)$$

где Y^* – равновесное с жидкой фазой массовое отношение водяного пара к сухому воздуху, определяемое по формуле (3.4.5), в которой теперь $p = p^*$ – давление насыщенного водяного пара при температуре воды (t_L) на выходе её из колонны (для нижнего сечения) или на входе её в колонну (для верхнего сечения).

1.5. Рассчитать среднюю движущую силу массопередачи в аппарате по (3.4.2).

1.6. Рассчитать площадь поверхности массообмена по формуле:

$$A = A_{\text{геом}} \cdot \left[1 - \exp(-0,167 \cdot \text{Re}_L^{0,415}) \right], \quad (3.4.10)$$

где $A_{\text{геом}} = a \cdot V$ – геометрическая площадь поверхности насадки;

$a = 330 \text{ м}^2/\text{м}^3$ – удельная площадь поверхности насадки;

V – объём, занятый насадкой в колонне;

$\text{Re}_L = \frac{4 \dot{V}_L \rho_L}{a S \mu_L}$ – критерий Рейнольдса для жидкой фазы (воды);

\dot{V}_L – объёмный расход жидкой фазы (воды);

S – площадь поперечного сечения колонны;

ρ_L – плотность жидкой фазы при её средней температуре;

μ_L – динамическая вязкость жидкой фазы.

1.7. Рассчитать по (3.4.3) коэффициент массопередачи $K_{Y, \text{эксп}}$ в аппарате.

Рассчитанное значение кинетического коэффициента можно считать равным искомому коэффициенту массоотдачи $\beta_{Y, \text{эксп}}$.

Найденное значение коэффициента массоотдачи выражено в [(кг сухого воздуха)/(м²·с)]. Для перевода β_Y в β_G , измеряемого в [м/с], используется соотношение:

$$\beta_G = \beta_Y / \rho_{\text{возд}}, \quad (3.4.11)$$

где $\rho_{\text{возд}}$ – плотность сухого воздуха.

2. Полученное экспериментальное значение коэффициента массоотдачи сравнивается со значением $\beta_{G, \text{расч}}$, рассчитанным по эмпирическим формулам. При этом может быть использовано критерияльное уравнение И. А. Гильденבלата для определения коэффициента массоотдачи в газовой фазе в аппарате насадочного типа:

$$\text{Sh} = 0,407 \text{Re}_G^{0,655} \text{Sc}^{1/3}, \quad (3.4.12)$$

где $\text{Sh} = \frac{\beta_G d_s}{D}$ – критерий Шервуда⁸;

⁸ См. сноску 6 на с. 28.

$$Re_G = \frac{v_o d_s \rho_G}{\varepsilon \mu_G} = \frac{4 v_o \rho_G}{a \mu_G} - \text{критерий Рейнольдса для газа;}$$

$$Sc = \frac{\mu_G}{\rho_G D} - \text{критерий Шмидта}^9.$$

В выражениях критериев массообменного и гидродинамического подобия:

β_r – коэффициент массоотдачи в газовой фазе;

$d_s = \frac{4\varepsilon}{a}$ – эквивалентный диаметр свободного пространства в насадке;

D – коэффициент диффузии распределяемого компонента в газе. Коэффициент диффузии H_2O в воздухе при нормальных физических условиях ($p_o = 101325 \text{ Па} = 760 \text{ мм рт. ст.}$ и $T_o = 273,15 \text{ К}$) $D_o = 2,19 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$,

$$\text{при других физических условиях } D = D_o \frac{p_o}{p} \left(\frac{T}{T_o} \right)^{3/2};$$

v_o – фиктивная скорость газа в аппарате;

$\varepsilon = 0,70 \text{ м}^3/\text{м}^3$ – доля свободного объёма насадки;

ρ_G – плотность газовой фазы;

μ_G – динамическая вязкость газовой фазы.

Ввиду обычно малого содержания водяных паров в воздухе свойства газовой фазы могут считаться равными свойствам сухого воздуха, а фиктивная скорость газа в аппарате может рассчитываться по расходу сухого воздуха.

Результаты измерений и вычислений рекомендуется занести в таблицы:

№ п/п	Нижнее сечение колонны							
	$t_{G, c},$ °C	$t_{G, m},$ °C	$p_{н},$ кПа	$Y_{н},$ кг/кг	$t_L,$ °C	$p_{н}^*,$ кПа	$Y_{н}^*,$ кг/кг	$\Delta Y_{н},$ кг/кг
1								
2								
3								

№ п/п	Верхнее сечение колонны							
	$t_{G, c},$ °C	$t_{G, m},$ °C	$p_{к},$ кПа	$Y_{к},$ кг/кг	$t_L,$ °C	$p_{к}^*,$ кПа	$Y_{к}^*,$ кг/кг	$\Delta Y_{к},$ кг/кг
1								
2								
3								

№ п/п	$\Delta h_m,$ мм	$\dot{m}_{\text{возд}},$ кг/с	$\dot{m}_{H_2O},$ кг/с	s	$\dot{V}_L,$ л/с	Re_L	$A,$ м ²	$\overline{\Delta Y},$ кг/кг	$\beta_{Y, \text{экс}},$ кг/(м ² ·с)	$\beta_{r, \text{экс}},$ м/с
1										
2										
3										

№ п/п	$D,$ м ² /с	$v_o,$ м/с	$d_s,$ м	Re_G	Sc	Sh	$\beta_{r, \text{расч}},$ м/с
1							
2							
3							

Все экспериментальные данные обобщаются и аппроксимируются зависимостью вида:

$$\beta_{r, \text{экс}} = C \cdot Re_G^n. \quad (3.4.13)$$

Проанализировать значения коэффициентов массоотдачи, полученных экспериментально и рассчитанных по эмпирической формуле, а также проанализировать значения коэффициентов C и n уравнения (3.4.13) и сделать выводы по работе.

⁹ См. сноску 7 на с. 28.

3.5. КОЭФФИЦИЕНТ МАССОПЕРЕДАЧИ ПРИ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКЕ МАТЕРИАЛА

Содержание работы

Конвективной сушкой называется процесс удаления влаги из материала в поток нагретого газа, например, воздуха.

Скорость процесса сушки u определяется массой влаги m_w , испаряемой с единицы площади поверхности A за единицу времени t :

$$u = \frac{dm_w}{A \cdot dt}. \quad (3.5.1)$$

Согласно основному уравнению массопередачи эта скорость пропорциональна движущей силе процесса:

$$u = K \cdot \bar{\Delta}, \quad (3.5.2)$$

где K – коэффициент массопередачи;

$\bar{\Delta}$ – средняя движущая сила процесса.

Кинетика сушки может быть определена путём взвешивания образца высушиваемого материала через определённые промежутки времени.

График зависимости массы материала $m_{\text{мат}}$ от времени t проведения процесса называется *кривой сушки*¹⁰.

Так как

$$\frac{dm_w}{A \cdot dt} = - \frac{dm_{\text{мат}}}{A \cdot dt}, \quad (3.5.3)$$

то дифференцирование кривой сушки позволяет установить зависимость скорости сушки от массы материала. График такой зависимости называется *кривой скорости сушки*.

В общем случае кривая скорости сушки даёт возможность установить различные периоды протекания процесса, в частности, выделить период постоянной скорости сушки.

В течение этого периода испарение влаги из материала происходит так же, как и со свободной поверхности некоторого объёма жидкости.

Сопrotивление процессу сушки в периоде постоянной скорости полностью определяется диффузией паров влаги в сушильный агент, и поэтому коэффициент массопередачи практически равен коэффициенту массоотдачи β_r от поверхности материала в поток газовой фазы:

$$K \cong \beta_r. \quad (3.5.4)$$

Движущая сила процесса массоотдачи может быть выражена либо как разность давления насыщенного водяного пара в непосредственной близости от влажной поверхности материала и парциального давления пара в объёме газа, либо как разность соответствующих указанным давлениям концентраций водяного пара в газе.

Содержание водяных паров в воздухе может быть определено инструментально, например, с помощью психрометра.

Цель работы: экспериментальное определение среднего коэффициента массоотдачи в газовой фазе при конвективной сушке влажного материала в периоде постоянной скорости процесса; сравнение полученного значения со значением, рассчитанным по эмпирической формуле.

Схема лабораторной установки и её описание

Схема лабораторной установки изображена на рис. 3.5.

В данной установке сушке подвергается влажный материал M , представляющий собой 4 пакета из фильтровальной бумаги. Пакеты имеют форму дисков диаметром 135 мм каждый. Все пакеты объединены в виде этажерки, которая расположена в сушильной камере C и подвешена к техническим весам (поз. 3). С помощью этих весов измеряется масса высушиваемого материала.

Атмосферный воздух нагнетается в установку вентилятором B . Для измерения расхода воздуха на трубопроводе установлена мерная диафрагма D с отверстием диаметром $d_o = 60$ мм. Разность давлений воздуха до диафрагмы и после неё измеряется U-образным дифференциальным манометром (поз. 4), заполненным водой.

¹⁰ Строго кривой сушки называется зависимость от времени массового отношения влаги к абсолютно сухой части материала. Однако концентрация влаги может быть заменена массой материала при условии, что сухая часть его не претерпевает иных изменений, кроме потери влаги.

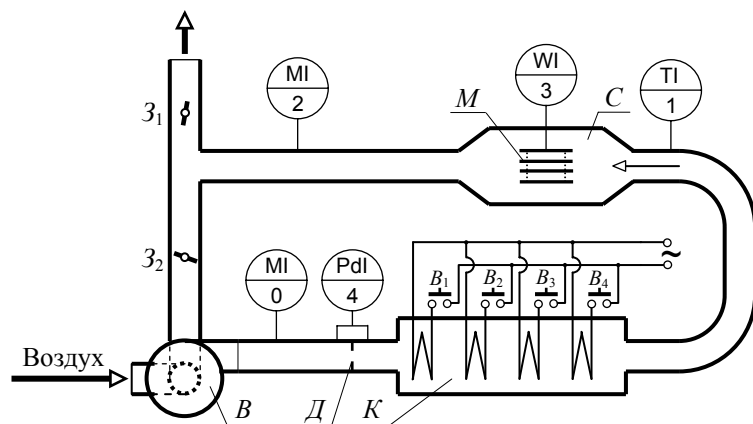


Рис. 3.5. Схема лабораторной установки для изучения процесса конвективной сушки материала

Температура и влажность воздуха, нагнетаемого вентилятором, измеряются психрометром (поз. 0)¹¹. Психрометр состоит из «сухого» и «смоченного» термометров.

Далее воздух нагревается в калорифере *K*, имеющим 4 секции электронагревателей. Каждая секция подключается к источнику электропитания индивидуальным выключателем $B_1 \dots B_4$. Температура нагретого воздуха измеряется термометром (поз. 1).

Нагретый воздух поступает в сушильную камеру *C* прямоугольного поперечного сечения размером 195×185 мм, где омывает поверхность влажного материала *M*; при этом влага испаряется в поток воздуха. Влажность и температура воздуха, выходящего из камеры, измеряются психрометром (поз. 2).

Увлажнённый воздух либо полностью выбрасывается в атмосферу, либо частично возвращается на рециркуляцию. Распределение потоков воздуха в установке обеспечивается с помощью заслонок 3_1 и 3_2 .

¹¹ В теории сушки принято обозначать параметры воздуха перед калорифером индексом «0»; после калорифера и перед сушильной камерой — индексом «1»; после сушильной камеры — индексом «2». В связи с этим в данной работе использовано нетрадиционное (начиная с цифры «0») обозначение позиций приборов.

Рекомендации по выполнению работы

Перед включением установки отметить показание весов, что условно соответствует массе сухого материала. Убедиться, что дверца сушильной камеры плотно закрыта.

1. Включить вентилятор тумблером, находящимся на щите электроприборов установки.

2. Включить 1 или 2 секции калорифера.

Отслеживать температуры воздуха в установке до калорифера и после сушильной камеры. Если эти температуры не претерпевают изменения во времени, считать, что достигнут установившийся температурный режим работы установки.

3. Открыть дверцу сушильной камеры и увлажнить с помощью промывной склянки пакеты материала, равномерно распределив 40...50 граммов воды по поверхностям дисков.

Плотно закрыть дверцу камеры. Отметить время начала процесса сушки ($t = 0$).

4. В течение всего процесса сушки, который длится обычно 60...80 минут, через каждые 3 минуты фиксировать показания всех контрольно-измерительных приборов.

5. Завершив исследование, выключить нагреватели калорифера, а после снижения температуры воздуха до 40 °С (по показанию термометра (поз. 1)) выключить вентилятор.

Рекомендации по обработке экспериментальных данных

1. Начертить кривую сушки — $m_{\text{мат}} = f(t)$.

2. Графически продифференцировать кривую сушки и начертить кривую скорости сушки — $u = f(m_{\text{мат}})$. Выделить на полученной кривой период постоянной скорости сушки.

3. Рассчитать для периода постоянной скорости сушки экспериментальное значение коэффициента массопередачи $K_{\text{эсп}}$.

В соответствии с (3.5.4) искомое значение $K_{\text{эсп}}$ равно коэффициенту массоотдачи в газовой фазе $\beta_{\Gamma, \text{эсп}}$. Для определения последнего необходимо вычислить движущую силу процесса массоотдачи.

Если движущая сила процесса будет выражаться через концентрации водяного пара в воздухе, например, через массовые отношения H_2O к сухому воздуху, называемые обычно в теории сушки «влажностью»¹² воздуха, то рекомендуется использовать формулы (3.4.5)...(3.4.9).

В данной работе рекомендуется определять движущую силу процесса через парциальные давления водяного пара в воздухе по формуле:

$$\overline{\Delta p} = \frac{(p_{\text{пов}} - p_1) - (p_{\text{пов}} - p_2)}{\ln \frac{p_{\text{пов}} - p_1}{p_{\text{пов}} - p_2}} = \frac{p_2 - p_1}{\ln \frac{p_{\text{пов}} - p_1}{p_{\text{пов}} - p_2}}, \quad (3.5.5)$$

где $p_1 = p_0$ – парциальное давление водяного пара в газовом потоке, поступающем в сушильную камеру;

p_2 – парциальное давление водяного пара в газовом потоке, выходящем из сушильной камеры;

$p_{\text{пов}}$ – парциальное давление водяного пара в непосредственной близости от влажной поверхности материала.

Парциальные давления водяного пара в воздухе (p_1 и p_2) при измеренных психрометрами значениях температур могут быть рассчитаны по формуле:

$$p = p_{\text{нас}} - 6,27 \cdot 10^{-4} \cdot (T_c - T_m) \cdot p_{\text{атм}}, \quad (3.5.6)$$

где $p_{\text{нас}}$ – давление насыщенного водяного пара при температуре «смоченного» термометра (см. с. 55);

T_c и T_m – температуры «сухого» и «смоченного» термометров, соответственно;

$p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление в лабораторном помещении.

Парциальное давление водяного пара в непосредственной близости от влажной поверхности материала с достаточной точностью может быть определено по формуле:

$$p_{\text{пов}} = p_0 + (p_{0,\text{нас}} - p_0) \cdot \frac{\bar{T} - T_p}{T_0 - T_p}, \quad (3.5.7)$$

где $\bar{T} = \frac{T_1 + T_{2,c}}{2}$ – температура воздуха в сушильной камере над

материалом;

T_1 – температура воздуха перед сушильной камерой;

$T_{2,c}$ – температура воздуха после камеры по показаниям «сухого» термометра;

T_p – температура точки росы при парциальном давлении водяного пара, равном p_0 .

$p_{0,\text{нас}}$ – давление насыщенного пара, определяемое при температуре «смоченного» термометра (поз. 0).

Температура точки росы ϑ_p (в °С) при парциальных давлениях водяного пара 1200...1900 Па может быть рассчитана по формуле:

$$\vartheta_p = 15,253 \ln p - 98,5. \quad (3.5.8)$$

Среднее значение коэффициента массоотдачи в газовой фазе рассчитывается по формуле:

$$\beta_p = \frac{u}{\Delta p}. \quad (3.5.9)$$

Найденное значение коэффициента массоотдачи выражено в (кг H_2O)/($\text{m}^2 \cdot \text{c} \cdot \text{Па}$). Для перевода β_p в β_r , измеряемого в м/с, используется соотношение:

$$\beta_r = \beta_p \frac{R \bar{T}}{M_{\text{H}_2\text{O}}}, \quad (3.5.10)$$

где $R = 8,31441$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная;

$M_{\text{H}_2\text{O}} = 18,015 \cdot 10^{-3}$ кг/моль – молярная масса водяного пара;

4. Полученное экспериментальное значение коэффициента массоотдачи сравнить со значением $\beta_{r,\text{расч}}$, рассчитанным по эмпирическим формулам. При этом может быть использовано критериальное уравнение А. В. Нестеренко:

$$\text{Sh} = 0,87 \text{Re}^{0,54} \text{Sc}^{1/3} \text{Gu}^{0,135}, \quad (3.5.11)$$

¹² В учебной литературе, изданной до настоящего времени, влажность воздуха обозначено символом « χ ».

где $Sh = \frac{\beta_r L}{D}$ – критерий Шервуда;

$Re = \frac{v L \rho}{\mu}$ – критерий Рейнольдса;

$Sc = \frac{\mu}{\rho D}$ – критерий Шмидта;

$Gu = \frac{\bar{T} - T^*}{\bar{T}}$ – критерий Гухмана, в котором фигурируют термодинамические температуры воздуха.

В выражениях критериев массообменного и гидродинамического подобия:

β_r – коэффициент массоотдачи в газовой фазе;

L – длина поверхности испарения в направлении движения воздуха. Здесь рекомендуется считать $L = \frac{\pi}{4} d$;

d – диаметр пакета высушиваемого материала;

D – коэффициент диффузии H_2O в воздухе (см. с. 37);

v – скорость воздуха в сушильной камере;

ρ – плотность газовой фазы;

μ – динамическая вязкость газовой фазы;

T^* – температура, соответствующая давлению $p_{пов}$ (см. с. 55).

Ввиду обычно малого содержания водяных паров в воздухе свойства газовой фазы могут считаться равными свойствам сухого воздуха, которые определяются при температуре \bar{T} .

Скорость воздуха в сушильной камере определяется расходом газа \dot{m}_G , который рассчитывается по формуле:

$$\dot{m}_G = \rho_G \cdot \alpha \cdot \sqrt{2g \Delta h_m \frac{\rho_m - \rho_G}{\rho_G} \cdot \frac{\pi d_o^2}{4}}, \quad (3.5.12)$$

где ρ_G – плотность воздуха, проходящего через диафрагму;

$\alpha \cong 0,62$ – коэффициент расхода диафрагмы;

Δh_m – разность уровней манометрической жидкости в коленах дифференциального манометра;

$\rho_m \cong 1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность манометрической жидкости (воды);
 d_o – диаметр отверстия в диафрагме.

Результаты измерений и вычислений рекомендуется занести в таблицу:

№ п/п	t , мин	$m_{\text{мат}}$, г	$u \cdot 10^3$, кг/(м ² ·с)	$\vartheta_{0,с}$, °С	$\vartheta_{0,м}$, °С	$\vartheta_{1,с}$, °С	$\vartheta_{2,с}$, °С	$\vartheta_{0,м}$, °С	Δh_m , мм
1	0								
2	3								
k									

Проанализировать полученные значения коэффициентов массоотдачи и сделать выводы по работе.

3.6. РАЗДЕЛЕНИЕ РАСТВОРА ОБРАТНЫМ ОСМОСОМ

Содержание работы

Из раздела химии, описывающего свойства растворов, известно, что в том случае, когда раствор вещества и растворитель разделены полупроницаемой перегородкой – мембраной, наблюдается самопроизвольный переход частиц растворителя в раствор. Это явление называется *осмосом*.

Избыточное давление в растворе, останавливающее этот переход, называется *осмотическим давлением*. Величина осмотического давления определяется законом Я. Х. Вант-Гоффа:

$$\Pi = \nu \Phi c R T, \quad (3.6.1)$$

где Π – осмотическое давление;

ν – число ионов, образующихся при диссоциации 1 молекулы растворённого вещества;

Φ – осмотический фактор, зависящий от природы и концентрации растворённого вещества;

c – молярная концентрация растворённого вещества;

$R = 8,31441$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная;

T – термодинамическая температура раствора.

Если избыточное давление в растворе p превышает осмотическое давление, то есть $p > \Pi$, то наблюдается переход частиц растворителя в обратном направлении – из раствора в растворитель. Такое явление называется *обратным осмосом*.

Эффективность разделения растворов обратным осмосом характеризуется такими величинами, как селективность и удельная производительность мембраны.

Селективность мембраны φ в процессе разделения определяется выражением:

$$\varphi = \frac{c_F - c_P}{c_F}, \quad (3.6.2)$$

где c_F – концентрация компонента в исходном растворе;

c_P – концентрация в пермеате (от лат. permeare – проходить насквозь), то есть в жидкости, прошедшей сквозь мембрану.

Удельная производительность мембранного аппарата q равна:

$$q = \frac{V_P}{S t}, \quad (3.6.3)$$

где V_P – объём пермеата, полученный за время t ;

S – площадь поверхности мембраны.

Движущей силой процесса разделения растворов обратным осмосом считается разность давлений Δp , равная:

$$\Delta p = p - (\Pi_F - \Pi_P), \quad (3.6.4)$$

где Π_F и Π_P – осмотическое давление исходного раствора и пермеата, соответственно.

Отношение удельной производительности к движущей силе процесса для некоторых мембран является величиной постоянной:

$$\frac{q}{\Delta p} = C = \text{const}. \quad (3.6.5)$$

где C – константа проницаемости растворителя.

Величина константы проницаемости растворителя, полученная экспериментально при одних значениях движущей силы, может быть использована для прогнозирования производительности мембраны при иных значениях движущей силы.

Цель работы: разделение водного раствора неорганической соли (CuSO_4) обратным осмосом; экспериментальное определение удельной производительности и селективности мембраны, а также константы проницаемости растворителя.

Схема лабораторной установки и её описание

Схема лабораторной установки изображена на рис. 3.6.

Основным элементом лабораторной установки является мембранный модуль M , состоящий из двух фланцев, между которыми зажата полупроницаемая мембрана. Мембраной является ацетилцеллюлозная плёнка. Рабочая площадь поверхности мембраны равна 56 см^2 .

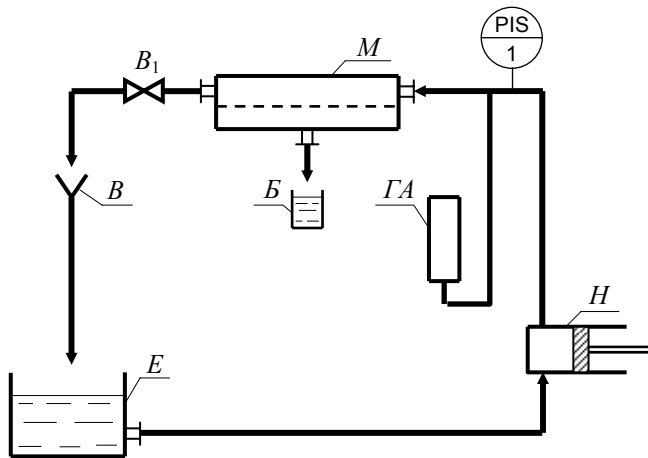


Рис. 3.6. Схема лабораторной установки для разделения раствора обратным осмосом

Водный раствор сульфата меди из ёмкости E подаётся плунжерным насосом H в мембранный модуль M . С целью сглаживания пульсаций давления, на линии подачи раствора установлен гидроаккумулятор $ГА$.

Давление в мембранном аппарате регулируется вентилем B_1 и измеряется манометром (поз. 1), снабжённым контактным устройством, выключающим насос при превышении давления установленной допустимой величины.

Образующийся при разделении пермеат собирается в бюкс B , а концентрированный раствор через воронку B возвращается в ёмкость E .

Рекомендации по выполнению работы

Перед включением установки в работу промыть бюкс и мерную пробирку, имеющуюся на рабочем столе и предназначенную для измерения производительности модуля; убедиться, что вентиль B_1 полностью открыт.

Далее рекомендуется следующий порядок выполнения работы.

1. Включить привод насоса. Дождаться заполнения системы разделяемым раствором, свидетельством чему будет появление жидкости в возвратной линии над воронкой B .

2. По истечении 3...5 минут отобрать пробу раствора, выходящего из мембранного аппарата.

Измерить оптический показатель преломления этого раствора с помощью рефрактометра.

Вернуть в установку (слить в воронку B) отобранную пробу исходного раствора.

3. Прикрыть вентиль B_1 , установив заданное давление в мембранном аппарате. Дождаться появления первых порций пермеата на выходе из мембранного модуля.

4. Зафиксировать «начальный» момент времени разделения. В течение времени t набрать в бюкс достаточное для измерения объёма количество пермеата. С помощью мерной пробирки определить объём полученного пермеата V_p .

5. Измерить оптический показатель преломления пермеата с помощью рефрактометра.

Вернуть в установку пермеат, отобранный для анализа.

6. При необходимости установить иное давление в мембранном модуле и повторить пункты 4 и 5 данного раздела.

7. По завершении экспериментальной части работы выключить привод насоса; полностью открыть вентиль B_1 .

Рекомендации по обработке экспериментальных данных

1. Определить экспериментальные значения массовой доли сульфата меди в исходном растворе w_F и в пермеате w_p .

Для этого использовать измеренные значения показателя преломления n_D^{20} жидкостей.

Массовая доля и показатель преломления водного раствора сульфата меди связаны соотношением:

$$w = 5,5229 \cdot n_D^{20} - 7,3620. \quad (3.6.6)$$

2. Рассчитать молярные концентрации сульфата меди в исходном растворе c_F и в пермеате c_p , используя соотношение:

$$c = w \cdot \rho / M_S, \quad (3.6.7)$$

где ρ – плотность раствора;

$M_S = 159,61 \cdot 10^{-3}$ кг/моль – молярная масса сульфата меди.

Плотность ρ (в кг/м³) водного раствора сульфата меди при температуре ϑ (в °С) может быть рассчитана по формуле:

$$\rho = \rho_{aq} \cdot \exp[w \cdot (1,0801 - 8,393 \cdot 10^{-4} \cdot \vartheta - 5,753 \cdot 10^{-6} \cdot \vartheta^2)], \quad (3.6.8)$$

где ρ_{aq} – плотность воды (в кг/м³) при температуре ϑ (в °С).

О температуре раствора судят по показанию одного из термометров, имеющих в лабораторном помещении.

3. Рассчитать селективность мембраны по формуле (3.6.2).

4. Рассчитать удельную производительность мембранного аппарата, используя формулу (3.6.3).

5. Рассчитать движущую силу процесса, используя формулы (3.6.4) и (3.6.1).

При этом осмотический фактор водного раствора сульфата меди (при $c < 800$ моль/м³) может быть найден по формуле:

$$\Phi = 1,1074 \cdot c^{-0,1498} \cdot \exp(1,4608 \cdot 10^{-4} \cdot c). \quad (3.6.9)$$

6. Рассчитать константы проницаемости растворителя C по формуле (3.6.5) в каждом из опытов.

Измеренные и рассчитанные параметры рекомендуется занести в таблицу:

№	p_1 , ат	p_2 , МПа	Исходный раствор				Пермеат				
			n_D^{20}	w_F , кг/кг	c_F , моль/м ³	Π_F , МПа	n_D^{20}	w_P , кг/кг	c_P , моль/м ³	Π_P , МПа	
1											
2											
3											

φ	$q \cdot 10^6$, м/с	$C \cdot 10^{15}$, м/(с·Па)

Проанализировать полученные значения и сделать выводы по работе.

П Р И Л О Ж Е Н И Е

Физические свойства воды на линии насыщения

t , °С	ρ , кг/м ³	$\mu \cdot 10^3$, Па·с	β , К ⁻¹	h' , кДж/кг	c_p , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	Pr
0	999,8	1,793	-0,683	0,0	4217,6	0,5665	13,33
1	999,9	1,732	-0,503	4,2	4214,0	0,5683	12,84
2	999,9	1,675	-0,328	8,4	4210,7	0,5701	12,37
3	1000,0	1,621	-0,160	12,6	4207,7	0,5718	11,93
4	1000,0	1,569	0,003	16,8	4204,8	0,5735	11,51
5	1000,0	1,520	0,161	21,0	4202,2	0,5751	11,11
6	999,9	1,474	0,313	25,2	4199,9	0,5767	10,74
7	999,9	1,429	0,461	29,4	4197,7	0,5783	10,37
8	999,8	1,387	0,605	33,6	4195,6	0,5798	10,04
9	998,8	1,347	0,744	37,8	4193,8	0,5813	9,718
10	999,7	1,308	0,880	42,0	4192,1	0,5828	9,408
11	999,6	1,271	1,012	46,2	4190,6	0,5844	9,115
12	999,5	1,236	1,141	50,4	4189,2	0,5859	8,836
13	999,4	1,202	1,267	54,6	4187,9	0,5875	8,570
14	999,2	1,1699	1,389	58,8	4186,7	0,5891	8,315
15	999,1	1,1391	1,509	62,9	4185,6	0,5906	8,073
16	998,9	1,1095	1,626	67,1	4184,7	0,5922	7,840
17	998,8	1,0811	1,740	71,3	4183,8	0,5937	7,618
18	998,6	1,0539	1,851	75,5	4183,0	0,5953	7,406
19	998,4	1,0278	1,961	79,7	4182,3	0,5968	7,202
20	998,2	1,0026	2,068	83,9	4181,7	0,5983	7,007
21	998,0	0,9785	2,173	88,0	4181,2	0,5999	6,820
22	997,8	0,9553	2,275	92,2	4180,7	0,6014	6,641
23	997,5	0,9330	2,376	96,4	4180,2	0,6029	6,468
24	997,3	0,9115	2,475	100,6	4179,8	0,6044	6,303
25	997,0	0,8907	2,572	104,8	4179,5	0,6059	6,144
26	996,8	0,8708	2,667	109,0	4179,2	0,6074	5,991
27	996,5	0,8515	2,761	113,1	4179,0	0,6089	5,844
28	996,2	0,8330	2,853	117,3	4178,8	0,6104	5,703
29	995,9	0,8150	2,944	121,5	4178,6	0,6119	5,566
30	995,6	0,7977	3,033	125,7	4178,5	0,6133	5,435
31	995,3	0,7810	3,120	129,8	4178,4	0,6148	5,309
32	995,0	0,7649	3,206	134,0	4178,3	0,6162	5,187
33	994,7	0,7493	3,291	138,2	4178,3	0,6176	5,069
34	994,4	0,7342	3,375	142,4	4178,2	0,6190	4,955
35	994,0	0,7196	3,457	146,6	4178,2	0,6204	4,846

Окончание таблицы

36	993,7	0,7054	3,539	150,7	4178,3	0,6218	4,740
37	993,3	0,6917	3,619	154,9	4178,3	0,6232	4,638
38	993,0	0,6785	3,698	159,1	4178,4	0,6246	4,539
39	992,6	0,6656	3,776	163,3	4178,5	0,6259	4,444
40	992,2	0,6532	3,853	167,5	4178,6	0,6273	4,351
41	991,8	0,6411	3,929	171,6	4178,7	0,6286	4,262
42	991,4	0,6294	4,004	175,8	4178,9	0,6299	4,175
43	991,0	0,6180	4,078	180,0	4179,1	0,6312	4,092
44	990,6	0,6070	4,151	184,2	4179,2	0,6325	4,011
45	990,2	0,5963	4,224	188,4	4179,4	0,6338	3,932
46	989,8	0,5859	4,295	192,5	4179,7	0,6351	3,856
47	989,4	0,5758	4,366	196,7	4179,9	0,6363	3,782
48	988,9	0,5660	4,437	200,9	4180,1	0,6375	3,711
49	988,5	0,5564	4,506	205,1	4180,4	0,6388	3,641
50	988,0	0,5471	4,575	209,3	4180,7	0,6400	3,574
52	987,1	0,5293	4,710	217,6	4181,3	0,6423	3,446
54	986,2	0,5124	4,844	226,0	4182,0	0,6446	3,324
56	985,2	0,4964	4,974	234,4	4182,7	0,6469	3,210
58	984,2	0,4812	5,103	242,7	4183,5	0,6490	3,102
60	983,2	0,4668	5,230	251,1	4184,4	0,6511	3,000
62	982,2	0,4531	5,355	259,5	4185,3	0,6532	2,903
64	981,1	0,4401	5,478	267,8	4186,3	0,6552	2,812
66	980,0	0,4276	5,599	276,2	4187,4	0,6571	2,725
68	978,9	0,4158	5,719	284,6	4188,5	0,6589	2,643
70	977,8	0,4045	5,838	293,0	4189,7	0,6607	2,565
72	976,6	0,3937	5,955	301,4	4190,9	0,6625	2,490
74	975,4	0,3833	6,071	309,7	4192,2	0,6641	2,420
76	974,2	0,3735	6,185	318,1	4193,6	0,6657	2,353
78	973,0	0,3640	6,299	326,5	4195,0	0,6672	2,289
80	971,8	0,3550	6,411	334,9	4196,5	0,6689	2,228
82	970,5	0,3463	6,523	343,3	4198,1	0,6704	2,170
84	969,3	0,3380	6,634	351,7	4199,7	0,6718	2,114
86	968,0	0,3300	6,744	360,1	4201,4	0,6730	2,062
88	966,7	0,3224	6,853	368,5	4203,2	0,6741	2,011
90	965,3	0,3150	6,962	376,9	4205,0	0,6751	1,963
92	964,0	0,3080	7,070	385,4	4207,0	0,6760	1,917
94	962,6	0,3012	7,178	393,8	4209,1	0,6768	1,873
96	961,2	0,2946	7,286	402,2	4211,4	0,6775	1,830
98	959,8	0,2883	7,393	410,6	4213,8	0,6782	1,790
100	958,4	0,2823	7,500	419,1	4216,4	0,6788	1,753

Физические свойства сухого воздуха

($p = 100$ кПа = 750 мм рт. ст.)

t , °C	T , К	ρ , кг/м ³	$\mu \cdot 10^6$, Па·с	t , °C	T , К	ρ , кг/м ³	$\mu \cdot 10^6$, Па·с
1,0	274,15	1,271	17,22	26,0	299,15	1,165	18,43
2,0	275,15	1,267	17,27	27,0	300,15	1,161	18,47
3,0	276,15	1,262	17,32	28,0	301,15	1,157	18,53
4,0	277,15	1,257	17,37	29,0	302,15	1,153	18,58
5,0	278,15	1,253	17,42	30,0	303,15	1,150	18,62
6,0	279,15	1,248	17,47	31,0	304,15	1,146	18,67
7,0	280,15	1,244	17,52	32,0	305,15	1,142	18,72
8,0	281,15	1,239	17,56	33,0	306,15	1,138	18,77
9,0	282,15	1,235	17,61	34,0	307,15	1,135	18,81
10,0	283,15	1,231	17,66	35,0	308,15	1,131	18,86
11,0	284,15	1,226	17,71	36,0	309,15	1,127	18,91
12,0	285,15	1,222	17,76	37,0	310,15	1,124	18,95
13,0	286,15	1,218	17,81	38,0	311,15	1,120	19,00
14,0	287,15	1,214	17,86	39,0	312,15	1,116	19,05
15,0	288,15	1,209	17,91	40,0	313,15	1,113	19,09
16,0	289,15	1,205	17,95	41,0	314,15	1,109	19,14
17,0	290,15	1,201	18,00	42,0	315,15	1,106	19,19
18,0	291,15	1,197	18,05	43,0	316,15	1,102	19,23
19,0	292,15	1,193	18,10	44,0	317,15	1,099	19,28
20,0	293,15	1,189	18,15	45,0	318,15	1,095	19,33
21,0	294,15	1,185	18,20	46,0	319,15	1,092	19,37
22,0	295,15	1,181	18,24	47,0	320,15	1,088	19,42
23,0	296,15	1,177	18,29	48,0	321,15	1,085	19,46
24,0	297,15	1,173	18,34	49,0	322,15	1,082	19,51
25,0	298,15	1,169	18,39	50,0	323,15	1,078	19,56

Физические свойства воздуха (плотность ρ и динамическая вязкость μ) при температурах и давлениях, не приведённых в таблице, с достаточной точностью могут быть рассчитаны по формулам:

$$\rho = \rho_0 \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T}; \quad (\text{П.1})$$

$$\mu = \mu_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,5}, \quad (\text{П.2})$$

где $\rho_0 = 1,2928$ кг/м³; $\mu_0 = 17,17 \cdot 10^{-6}$ Па·с — свойства воздуха при $T_0 = 273,15$ К и $p_0 = 101325$ Па; $C = 112,0$ К — константа Сазерленда для воздуха.

**Давление насыщенного водяного пара
в зависимости от температуры**

t , °C	T , К	p , кПа	t , °C	T , К	p , кПа	t , °C	T , К	p , кПа
5,0	278,15	0,8718	18,5	291,65	2,1284	32,0	305,15	4,7536
5,5	278,65	0,9027	19,0	292,15	2,1960	32,5	305,65	4,8896
6,0	279,15	0,9346	19,5	292,65	2,2654	33,0	306,15	5,0290
6,5	279,65	0,9674	20,0	293,15	2,3368	33,5	306,65	5,1718
7,0	280,15	1,0012	20,5	293,65	2,4102	34,0	307,15	5,3182
7,5	280,65	1,0361	21,0	294,15	2,4855	34,5	307,65	5,4681
8,0	281,15	1,0721	21,5	294,65	2,5629	35,0	308,15	5,6217
8,5	281,65	1,1091	22,0	295,15	2,6424	36,0	309,15	5,9401
9,0	282,15	1,1473	22,5	295,65	2,7241	37,0	310,15	6,2740
9,5	282,65	1,1866	23,0	296,15	2,8079	38,0	311,15	6,6240
10,0	283,15	1,2271	23,5	296,65	2,8940	39,0	312,15	6,9907
10,5	283,65	1,2688	24,0	297,15	2,9824	40,0	313,15	7,3749
11,0	284,15	1,3118	24,5	297,65	3,0731	41,0	314,15	7,7772
11,5	284,65	1,3560	25,0	298,15	3,1663	42,0	315,15	8,1983
12,0	285,15	1,4015	25,5	298,65	3,2619	43,0	316,15	8,6390
12,5	285,65	1,4484	26,0	299,15	3,3600	44,0	317,15	9,0998
13,0	286,15	1,4967	26,5	299,65	3,4606	45,0	318,15	9,5817
13,5	286,65	1,5463	27,0	300,15	3,5639	46,0	319,15	10,085
14,0	287,15	1,5974	27,5	300,65	3,6698	47,0	320,15	10,612
14,5	287,65	1,6500	28,0	301,15	3,7785	48,0	321,15	11,161
15,0	288,15	1,7041	28,5	301,65	3,8900	49,0	322,15	11,735
15,5	288,65	1,7598	29,0	302,15	4,0043	50,0	323,15	12,335
16,0	289,15	1,8170	29,5	302,65	4,1215	51,0	324,15	12,960
16,5	289,65	1,8759	30,0	303,15	4,2717	52,0	325,15	13,612
17,0	290,15	1,9364	30,5	303,65	4,3650	53,0	326,15	14,292
17,5	290,65	1,9986	31,0	304,15	4,4913	54,0	327,15	15,001
18,0	291,15	2,0626	31,5	304,65	4,6208	55,0	328,15	15,740

**Равновесные составы жидкости (x) и пара (y)
и температуры кипения (t)
бинарной смеси изопропанол — вода
($p = 101325 \text{ Па} = 760 \text{ мм рт. ст.}$)**

$x \cdot 10^2$, МОЛЬ МОЛЬ	$y \cdot 10^2$, МОЛЬ МОЛЬ	t , °C	$x \cdot 10^2$, МОЛЬ МОЛЬ	$y \cdot 10^2$, МОЛЬ МОЛЬ	t , °C	$x \cdot 10^2$, МОЛЬ МОЛЬ	$y \cdot 10^2$, МОЛЬ МОЛЬ	t , °C
0,0	0,00	100,0	3,0	37,70	87,3	10,0	50,61	82,4
0,2	4,41	98,7	3,2	38,93	86,8	15,0	52,65	81,8
0,4	8,16	97,8	3,4	40,02	86,4	20,0	53,68	81,5
0,6	11,57	96,9	3,6	40,96	86,0	25,0	54,81	81,2
0,8	14,70	96,0	3,8	41,83	85,7	30,0	55,77	81,1
1,0	17,59	95,2	4,0	42,69	85,4	35,0	56,60	80,9
1,2	20,27	94,3	4,5	44,54	84,8	40,0	57,61	80,7
1,4	22,75	93,5	5,0	45,80	84,4	45,0	59,09	80,5
1,6	25,05	92,7	5,5	46,55	84,0	50,0	60,81	80,4
1,8	27,19	91,9	6,0	47,51	83,7	60,0	64,25	80,1
2,0	29,17	91,0	6,5	48,18	83,4	68,40	68,40	80,05
2,2	31,00	90,1	7,0	48,71	83,2	70,0	69,40	80,1
2,4	32,69	89,2	7,5	49,13	83,0	80,0	76,40	80,3
2,6	34,48	88,5	8,0	49,49	82,8	90,0	86,34	80,9
2,8	36,33	87,9	9,0	50,07	82,6	100,0	100,0	82,4

**Условные обозначения контрольно-измерительных приборов
на схемах лабораторных установок**

Условные обозначения приборов и средств автоматизации стандартизированы только для схем технологических процессов. Тем не менее, известные стандарты внедрены в лабораторном практикуме при начертании схем лабораторных установок.

Из двух способов изображения средств контроля — развёрнутого и упрощённого — здесь рекомендуется применять упрощённый способ.

При упрощённом способе изображения средств автоматического контроля и регулирования параметров процесса на схеме не показываются первичные измерительные преобразователи и вся вспомогательная аппаратура.

Приборы и средства автоматизации, осуществляющие сложные функции и выполненные в виде отдельных блоков, изображаются одним условным графическим обозначением в виде круга $\varnothing 10$ мм с горизонтальной диаметральной линией. Этот круг соединяется тонкой сплошной линией с точкой отбора импульса в технологическом оборудовании.

В верхней половине круга приводятся обозначения измеряемых или регулируемых параметров, уточняющих значений измеряемых величин, а также обозначения функций, выполняемых прибором.

В приведённой ниже таблице указаны некоторые обозначения (символы) измеряемых или регулируемых параметров (в алфавитном порядке) и обозначение (символ) уточнения измеряемой величины. Для лучшего усвоения этих символов в таблице приводятся их английские этимоны.

Символ	П а р а м е т р	Этимон символа
E	Любая электрическая величина	Electrical – электрический
F	Расход	Flow – поток
L	Уровень	Level – уровень
M	Влажность	Moisture – влажность
P	Давление	Pressure – давление
S	Скорость, частота	Speed – скорость
T	Температура	Temperature – температура
Q	Концентрация, состав	Quality – качество
W	Масса	Weight – вес
d	Разность величин	difference – разность

В следующей таблице указаны обозначения (символы) функций, выполняемых приборами. Для лучшего усвоения символов в этой таблице также приводятся их английские этимоны.

Символ	Ф у н к ц и я	Этимон символа
I	Показание (индикация)	Indication – индикация
R	Регистрация	Registration – регистрация
C	Регулирование	Control – регулирование
S	Включение; переключение	Switch – переключение

В нижней половине круга, являющегося графическим изображением прибора, указывается номер позиции этого контрольно-измерительного устройства на схеме.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Шервуд Т.* Массопередача / Т. Шервуд, Р. Л. Пигфорд, Ч. Уилки: пер. с англ. под ред. В. А. Малюсова. –М.: Химия, 1982. –696 с.
2. *Комиссаров Ю. А.* Научные основы процессов ректификации: в 2 т.: учеб. пособие / Ю. А. Комиссаров, Л. С. Гордеев, Д. П. Вент; под ред. Л. А. Серафимова. –М.: Химия, 2004. –Т.1. –270 с.
3. *Рамм В. М.* Абсорбция газов / В. М. Рамм. –М.: Химия, 1976. –655 с.
4. *Лыков М. В.* Сушка в химической промышленности / М. В. Лыков. –М.: Химия, 1976. –432 с.
5. *Дытнерский Ю. И.* Обратный осмос и ультрафильтрация / Ю. И. Дытнерский. –М.: Химия, 1978. –352 с.
6. *Романков П. Г.* Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк, М. И. Курочкина. –СПб.: Химия, 1993. –496 с.

Учебное издание

О г л а в л е н и е

Предисловие	3
Символы, наименования и единицы измерения основных физических величин	4
3.1. Разделение бинарной смеси жидкостей простой перегонкой	5
3.2. Разделение бинарной смеси жидкостей ректификацией	13
3.3. Коэффициент массоотдачи в жидкой фазе	22
3.4. Коэффициент массоотдачи в газовой фазе	30
3.5. Коэффициент массопередачи при конвективной сушке материала	39
3.6. Разделение раствора обратным осмосом	47
Приложение	52
Физические свойства воды на линии насыщения	52
Физические свойства сухого воздуха	54
Давление насыщенного водяного пара в зависимости от температуры	55
Равновесные составы жидкости и пара и температуры кипения бинарной смеси изопропанол – вода	56
Условные обозначения контрольно-измерительных приборов на схемах лабораторных установок.	56
Библиографический список	58

БОБЫЛЁВ Владимир Николаевич

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО МАССООБМЕНУ

Редактор Н. А. Заходякина

Подписано в печать 10.01.06. Формат 60×84 1/16
Бумага SvetoCopy. Отпечатано на ризографе.
Усл. печ. л. 3,49. Уч.-изд. л. 3,07. Тираж 250 экз.
Заказ № 51

Российский химико-технологический
университет им. Д. И. Менделеева

Издательский центр

Адрес университета и издательского центра
125047 Москва, Миусская пл., 9