

УДК  
ББК  
С

**Сидельников И.И.**

С.. Определение коэффициентов массо- и теплопередачи при контакте воздуха и воды на колпачковых тарелках массообменных колонных аппаратов: Лабораторная работа / Сост.: И.И. Сидельников. – М. – 2010. – 20 с.

УДК  
ББК

© И.И. Сидельников, 2010

### 3.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МАССО- И ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПРИ КОНТАКТЕ ВОЗДУХА И ВОДЫ НА КОЛПАЧКОВЫХ ТАРЕЛКАХ МАССООБМЕННЫХ КОЛОННЫХ АППАРАТОВ

#### ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ

##### *Массопередача*

При взаимодействии двух фаз (если система не находится в состоянии равновесия) происходит перенос вещества из одной фазы в другую (в данном случае вода в виде водяного пара переходит в газовую фазу – воздух).

Для стационарного процесса расход переносимого из фазы в фазу компонента определяют из основного уравнения массопередачи

$$M = K_{yM} \Delta u_{cp} F, \quad (3.5.1)$$

где  $M$  – расход переносимого из фазы в фазу компонента;

$\Delta u_{cp}$  – средняя движущая сила процесса;

$F$  – поверхность контакта фаз;

$K_{yM}$  – коэффициент массопередачи, характеризующий скорость переноса компонента из одной фазы в другую и являющийся величиной, обратной общему сопротивлению процесса массопередачи  $R_{yM}$ , т.е.  $R_{yM} = 1 / K_{yM}$ .

Общее сопротивление процесса переноса компонента из фазы в фазу  $R_{yM}$  складывается из сопротивлений, участвующих в массопередаче фаз  $r_{1M}$  и  $r_{2M}$ .

$$R_{yM} = r_{1M} + r_{2M}. \quad (3.5.2)$$

Уравнение (3.5.2.) может быть представлено в виде

$$\frac{1}{K_{yM}} = \frac{1}{\beta_y} + \frac{A_p}{\beta_x}, \quad (3.5.3)$$

где  $R_{yM} = 1 / K_{yM}$ ,  $r_{1M} = 1 / \beta_y$ ,  $r_{2M} = A_p / \beta_x$ ;

$\beta_y$  – коэффициент массоотдачи в газовой фазе, характеризующий скорость переноса в ней компонента;

$\beta_x$  – коэффициент массоотдачи в жидкой фазе, характеризующий скорость переноса в ней компонента;

$A_p$  – коэффициент уравнения равновесия  $y_p = A_p x$ ;

$y_p$  и  $x$  – соответственно концентрации компонента в газовой и жидкой фазах, находящихся в равновесии.

Для системы воздух–вода определяемый  $K_{ym}$  при испарении воды в воздух равен коэффициенту массоотдачи в газовой фазе  $\beta_y$ , так как диффузионное сопротивление в жидкой фазе равно нулю. Изложенный способ определения  $\beta_y$  используют при обследовании контактных устройств.

Экспериментально  $K_{ym}$  находят из уравнения (3.5.1), где  $F$  заменяется на  $F_6$  (площадь барботажа тарелки) из-за практической сложности точного определения  $F$  для барботажных аппаратов

$$K_{ym} = \frac{M}{\Delta y_{cp} F_6}. \quad (3.5.4)$$

Среднюю движущую силу  $\Delta y_{cp}$  рассчитывают по уравнению

$$\Delta y_{cp} = \frac{(y_{pH} - y_n) - (y_{pK} - y_k)}{\ln \frac{y_{pH} - y_n}{y_{pK} - y_k}}, \quad (3.5.5)$$

где  $y_n$  и  $y_k$  – соответственно концентрации влаги в воздухе перед тарелкой и после нее, кг влаги/кг сухого воздуха;

$y_p$  – концентрация влаги в воздухе предельно насыщенного водяными парами (условие равновесия) при данной температуре, кг влаги/кг сухого воздуха;

$M$  – расход компонента, кг влаги/ч.

Использование уравнения (3.5.5) предполагает наличие полного перемешивания жидкости на тарелке.

## Теплопередача

При контакте двух сред (в данном случае воздух–вода), кроме переноса массы, происходит перенос тепла от среды с большей температурой к среде с меньшей температурой. Тепло тратится также и на обеспечение переноса влаги (испарение) в результате массообмена между фазами. От стационарного процесса теплопередачи количество передаваемого тепла определяется по основному уравнению теплопередачи

$$Q = K_T \Delta t_{\text{cp}} F, \quad (3.5.6)$$

где  $Q$  – количество тепла, передаваемого от одной среды к другой;  
 $\Delta t_{\text{cp}}$  – средняя разность температур сред, участвующих в теплопередаче (движущая сила);

$F$  – поверхность контакта сред;

$K_T$  – коэффициент теплопередачи, характеризующийся величиной, обратной общему сопротивлению процессу теплопередачи  $R_T$ .

Общее сопротивление процессу теплопередачи  $R_T$  складывается из сопротивлений, участвующих в теплопередаче сред. Если число сред равно двум (воздух, вода), то

$$R_T = r_{\text{г}} + r_{\text{ж}}. \quad (3.5.7)$$

Уравнение (3.5.7) может быть представлено в виде

$$\frac{1}{K_T} = \frac{1}{\alpha_{\text{г}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{ж}}}, \quad (3.5.8)$$

где  $R_T = \frac{1}{K_T}$ ;  $r_{\text{г}} = \frac{1}{\alpha_{\text{г}}}$ ;  $r_{\text{ж}} = \frac{1}{\alpha_{\text{ж}}}$ ;

$\alpha_{\text{г}}$  – коэффициент теплоотдачи в газовой фазе, характеризующий скорость переноса тепла в газе;

$\alpha_{\text{ж}}$  – коэффициент теплоотдачи в жидкой фазе, характеризующий скорость переноса тепла в жидкости.

Для системы воздух–вода  $\alpha_{\text{ж}}$  в среднем в 15–20 раз больше значения  $\alpha_{\text{г}}$ . Следовательно,  $K_{\text{т}} \cong \alpha_{\text{г}}$ , т.е. основное сопротивление процессу теплопередачи сосредоточено в газовой среде (воздухе).

Экспериментально значение  $K_{\text{т}}$  определяют на основе уравнения (3.5.6)

$$K_{\text{т}} = \frac{Q}{\Delta t_{\text{ср}} F_6}, \quad (3.5.9)$$

где истинная поверхность теплообмена  $F$  для барботажных аппаратов заменяется на  $F_6$  (площадь барботажа тарелки).

Среднюю разность температур определяют по уравнению

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{(t_{\text{гн}} - t_{\text{жк}}) - (t_{\text{гк}} - t_{\text{жк}})}{\ln \frac{t_{\text{гн}} - t_{\text{жк}}}{t_{\text{гк}} - t_{\text{жк}}}}, \quad (3.5.10)$$

где  $t_{\text{гн}}$  и  $t_{\text{гк}}$  – соответственно температуры воздуха на входе и выходе массообменного аппарата, °С;

$t_{\text{жк}}$  – температура жидкости (воды) на выходе с контактного устройства.

Согласно обычно принимаемой модели структуры потоков на контактных тарелках – полного перемешивания по жидкой фазе и полного вытеснения по газовой (паровой) фазе,  $t_{\text{жн}}$  мгновенно меняется на  $t_{\text{жк}}$  и далее по всей площади барботажа остается постоянной.

### ЦЕЛЬ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Определение коэффициентов массо- и теплопередачи при контакте воздуха и воды на контактных устройствах (тарелках) массообменных колонных аппаратов.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Схема лабораторной установке показана на рис. 3.5.1. Основной аппарат установки – цилиндрическая колонна 1, выполненная из стеклянных царг с внутренним диаметром 200 мм и двумя колпачковыми тарелками 2. В верхней части колонны установлен брызгоотбойник 3. Вода подается в колонну через ультразвуковой счетчик 4 с импульсным выходом (300 импульсов/л), с помощью которого определяется объемный и массовый –  $L$  [кг/ч] расход воды на орошение тарелок. Воздух в аппарат подается снизу. На трубопроводе подачи воздуха установлена диафрагма 5, по перепаду давления на которой определяется объемный  $V$  [м<sup>3</sup>/ч] и массовый  $G$  [кг/ч] расходы воздуха.

Установка оборудована датчиками и вторичными приборами для замера параметров сред, участвующих в тепло-массообменном процессе на тарелках колонны.

С помощью них определяются:

$t_{жн}$  – начальная температура воды (при входе на контактные тарелки колонны), °С;

$t_{жк}$  – конечная температура воды (при выходе с контактных тарелок). °С.

Для определения параметров воздуха, установка снабжена электронными гигрометрами, позволяющими измерять:

$t_{гн}$  – начальную (входную) температуру воздуха, °С;

$\varphi_n$  – начальную (входную) относительную влажность воздуха, %;

$t_{гк}$  – конечную (выходную) температуру воздуха, °С;

$\varphi_k$  – конечную (выходную) относительную влажность воздуха, %.

Электронный барометр измеряет атмосферное барометрическое давление –  $B$ .

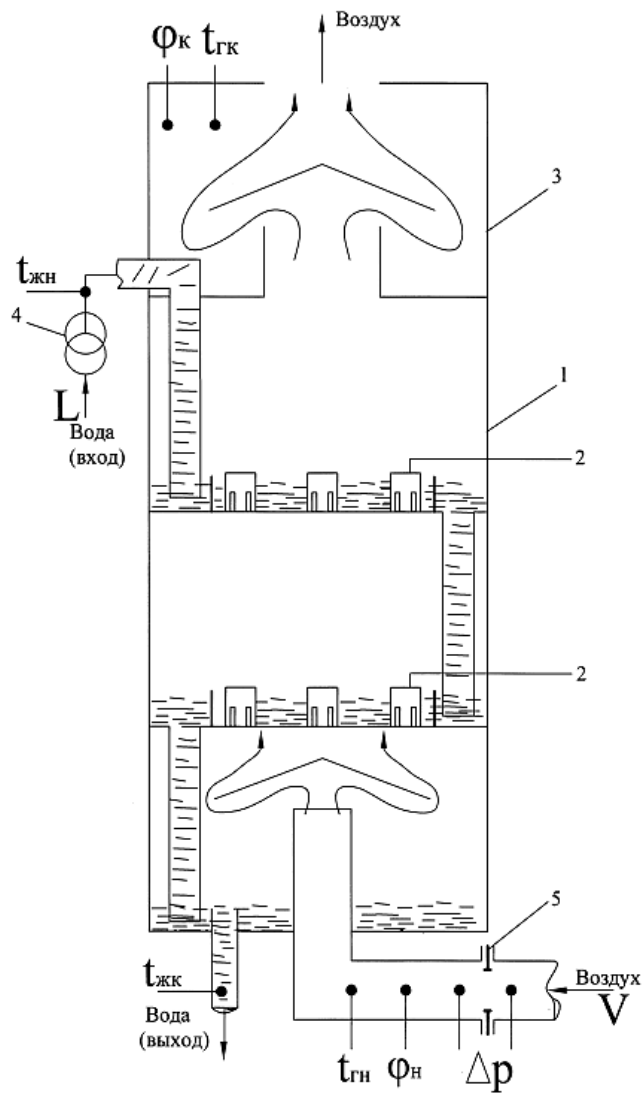


Рис. 3.5.1. Схема лабораторной установки:  
 1 – цилиндрическая обечайка; 2 – колпачковые гарелки;  
 3 – брызгоотбойник; 4 – счетчик расхода воды;  
 5 – измерительная диафрагма

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Включают установку на щите управления. Ключ выбора лабораторной работы устанавливают в положение «тепло- массо-обмен», при этом включаются все вторичные измерительные приборы, воздуходувка и электроклапан подачи воды на контактные тарелки. Вентилем устанавливают определенный ее расход (~ 130 л/час – остается неизменным для всех режимов), с помощью ступенчатого регулятора и устанавливают определенный начальный расход воздуха.

После достижения устойчивого режима барботажа на тарелках газовой фазы в жидкую и стабилизации показаний измерительных приборов записывают рабочие параметры в таблицу по форме 3.5.1.

Таблица 3.5.1

№ п/п	Перепад давления на диафрагме $\Delta P$ , Па	Воздух				Вода	
		$t_{гн}$ , °С	$\phi_n$ , %	$t_{гк}$ , °С	$\phi_k$ , %	$t_{жн}$ , °С	$t_{жк}$ , °С
1							
2							
3							
4							
5							
6							

$$B = \text{_____ мм. рт. ст.} \quad L = \text{_____ кг/ч}$$

Далее с помощью ступенчатого переключателя изменяют расход воздуха и через 2–3 минуты записывают рабочие параметры процесса в табл. 3.5.1 и так 5–6 опытов.



## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

1. *Определение влагосодержания воздуха на входе в колонну –  $y_n$ , на выходе –  $y_k$ ,  $y_{рн}$  и  $y_{рк}$  – равновесных влагосодержаний воздуха соответственно на входе и выходе.*

Влагосодержание воздуха  $y$  (кг влаги/кг сухого воздуха) определяют по уравнению

$$y = 0,622 \frac{\varphi P_c}{B - \varphi P_c}, \quad (3.5.11)$$

где  $\varphi$  – относительная влажность воздуха, равная отношению фактической массы водяных паров в воздухе к максимально возможной (равновесной) при данной температуре и давлении;

$P_c$  – давление насыщенных водяных паров, определяемое по температуре воздуха из табл. 3.5.2, мм. рт. ст.;

$B$  – атмосферное барометрическое давление, мм. рт. ст.

По этому уравнению для каждого проведенного опыта определяют:

$y_n$  – влагосодержание воздуха на входе, кг влаги/кг сухого воздуха;

$y_k$  – влагосодержание воздуха на выходе, кг влаги/кг сухого воздуха;

$y_{рн}$  и  $y_{рк}$  – соответственно равновесное влагосодержание на входе и выходе при  $\varphi = 1$ , кг влаги/кг сухого воздуха.

Таблица 3.5.2

Давление водяного пара (в мм. рт. ст.)

Температура, °С	Давление	Температура, °С	Давление
1	4,926	26	25,209
2	5,294	27	26,739
3	5,685	28	28,349
4	6,101	29	30,043
5	6,543	30	31,824
6	7,013	31	33,695
7	7,513	32	35,663
8	8,045	33	37,729
9	8,609	34	39,898
10	9,209	35	42,175
11	9,844	36	44,565
12	10,518	37	47,067
13	11,231	38	49,692
14	11,987	39	52,442
15	12,788	40	55,324
16	13,634	41	58,34
17	14,530	42	61,50
18	15,477	43	64,80
19	16,477	44	68,26
20	17,535	45	71,88
21	18,650	46	75,65
22	19,827	47	79,60
23	21,068	48	83,71
24	22,377	49	88,02
25	23,756	50	92,51

Объемный расход воздуха определяют по перепаду давления  $\Delta P$  на измерительной диафрагме по уравнению

$$V = 2\sqrt{\Delta P}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (3.5.12)$$

где  $\Delta P$  – перепад давления на диафрагме, Па.

Скорость воздуха на свободное сечение аппарата рассчитывают по формуле

$$w = \frac{4V}{\pi \cdot 0,2^2 \cdot 3600}, \text{ м/с.} \quad (3.5.13)$$

Массовый расход воздуха

$$G = V \cdot \rho_{\text{возд.}}, \text{ кг/ч,} \quad (3.5.14)$$

где  $\rho_{\text{возд.}}$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Плотность воздуха определяется в зависимости от температуры и барометрического давления по формуле

$$\rho_{\text{возд.}} = 1,29 \cdot \frac{273 \cdot B}{T \cdot 760}, \quad (3.5.15)$$

где  $T$  – температура воздуха, К;

$B$  – барометрическое давление, мм. рт. ст.

Результаты расчетов по каждому опыту заносятся в табл. 3.5.3.

Таблица 3.5.3

№ п/п	Объемный расход воздуха $V$ , м <sup>3</sup> /ч	Скорость воздуха на свободное сечение $w$ , м/с	Массовый расход воздуха $G$ , кг/ч	$y_n$	$y_{рн}$	$y_k$	$y_{рк}$
1							
2							
3							
4							
5							
6							

2. *Определение расхода испарившейся воды и составление теплового баланса контактных устройств (тарелок).*

Массовый расход испарившейся воды в воздух

$$L_n = G(y_k - y_n), \text{ кг/ч,} \quad (3.5.16)$$

где  $G$  – массовый расход воздуха, кг/ч.

Уравнение теплового баланса контактных устройств имеет вид:

$$Gc_{\Gamma}t_{\Gamma\text{н}} + Lc_{\text{ж}}t_{\text{жн}} = Gc_{\Gamma}t_{\Gamma\text{к}} + (L - L_{\text{и}})c_{\text{ж}}t_{\text{жк}} + L(r_{\text{ж}} + c_{\text{п}}t_{\Gamma\text{к}}) + Q_{\text{п}}. \quad (3.5.17)$$

Левая часть уравнения – сумма потоков тепла, приходящих на контактные устройства:

$Gc_{\Gamma}t_{\Gamma\text{н}}$  – поток тепла с приходящим воздухом, кДж/ч,

где  $c_{\Gamma}$  – теплоемкость воздуха, равная  $1,005 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}^{\circ}\text{С}}$ ;

$Lc_{\text{ж}}t_{\text{жн}}$  – поток тепла с приходящей водой, кДж/ч,

где  $c_{\text{ж}}$  – теплоемкость воды, равная  $4,19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}^{\circ}\text{С}}$ .

Правая часть – сумма потоков тепла, уходящих с контактных устройств:

$Gc_{\Gamma}t_{\Gamma\text{к}}$  – поток тепла, уходящий с воздухом, кДж/ч;

$(L - L_{\text{и}})c_{\text{ж}}t_{\text{жк}}$  – поток тепла, уходящий с водой, кДж/ч;

$L_{\text{и}}(r_{\text{ж}} + c_{\text{п}}t_{\Gamma\text{к}})$  – поток тепла, уходящий с испарившейся жидкостью, кДж/ч,

где  $r_{\text{ж}}$  – удельная теплота испарения воды при средней температуре ее на контактных тарелках, кДж/кг;

$c_{\text{п}}$  – теплоемкость водяного пара, равная  $1,97 \text{ кДж}/(\text{кг}^{\circ}\text{С})$ ;

$Q_{\text{п}}$  – потери тепла в окружающую среду, которыми в условиях данного эксперимента можно пренебречь;

$L$  – массовый расход воды, кг/ч.

*3. Определение коэффициента массопередачи (равного коэффициенту массоотдачи в газовой фазе).*

Коэффициент массопередачи вычисляют по уравнению (3.5.4) с использованием уравнения (3.5.5) для определения  $\Delta u_{\text{ср}}$ .

$$K_{\text{уср}} = \frac{L_{\text{и}}}{F_{\text{б}} \frac{(y_{\text{рн}} - y_{\text{н}}) - (y_{\text{рк}} - y_{\text{к}})}{\ln \frac{y_{\text{рн}} - y_{\text{н}}}{y_{\text{рк}} - y_{\text{к}}}}}, \quad (3.5.18)$$

где  $F_{\text{б}} = 2 \cdot 0,025 = 0,05 \text{ м}^2$  общая площадь барботажа (контакта воздуха и воды) двух тарелок колонны.

Результаты расчета  $K_{\text{уср}}$  для каждого опыта заносятся в табл. 3.5.4.

Таблица 3.5.4.

№ п/п	Массовый расход испарившейся влаги $L_{\text{и}}$ , кг/ч	Средняя движущая сила $\Delta u_{\text{ср}}$ , кг вл./кг сух. возд.	Средняя движущая сила $\Delta t_{\text{ср}}$ , °С	Коэффициент массопередачи $K_{\text{уср}}$ , кг	Коэффициент теплопередачи $K_{\text{т}}$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°С}}$
				$\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot (\text{кг вл./кг сух. возд.})$	
1					
2					
3					
4					
5					
6					

4. *Определение коэффициента теплопередачи (равного коэффициенту теплоотдачи в газовой фазе).*

Коэффициент теплопередачи вычисляют по уравнению (3.5.9) с использованием уравнения (3.5.10) и рис. 3.5.2 для определения  $\Delta t_{\text{ср}}$ .

$$K_{\text{т}} = \frac{G_{\text{г}} (t_{\text{гн}} - t_{\text{гк}})}{F_{\text{б}} \frac{(t_{\text{гн}} - t_{\text{жк}}^{\text{ср}}) - (t_{\text{гк}} - t_{\text{жк}}^{\text{ср}})}{\ln \frac{t_{\text{гн}} - t_{\text{жк}}^{\text{ср}}}{t_{\text{гк}} - t_{\text{жк}}^{\text{ср}}}}}, \quad (3.5.19)$$

где  $t_{\text{жк}}^{\text{ср}}$  – средняя конечная температура воды, определяемая как

$$t_{\text{жк}}^{\text{ср}} = \frac{t_{\text{жк}}^1 + t_{\text{жк}}^2}{2}, \text{ для двух идентичных тарелок;}$$

$t_{\text{жк}}^1 = t_{\text{жк}}$  – конечная температура воды после первой (нижней) тарелки;

$t_{\text{жк}}^2 = t_{\text{жн}}^1$  – конечная температура воды после второй (верхней)

тарелки, определяемая как  $t_{\text{жк}}^2 = \frac{t_{\text{жн}} + t_{\text{жк}}}{2}$ ;

$t_{\text{жн}}^1$  – начальная температура воды на первой (нижней) тарелке.

Результаты расчета  $K_T$  для каждого опыта заносятся в табл. 3.5.4.

На рис. 3.5.2 показан возможный характер изменения температур теплого воздуха и холодной воды на контактных тарелках по моделям полного вытеснения (ПВ) по воздуху и полного перемешивания (ПП) по воде. На испарение влаги из потока воды при массообмене требуется значительное количество тепла вследствие высокой величины удельной теплоты испарения воды (2493 кДж/кг при 0 °С). Тепло это переходит из потока воды вместе с испаренной влагой в воздух. Потеря тепла потоком воды должна быть скомпенсирована теплом потока воздуха при теплообменном процессе.

При малых расходах воздуха (т.е. при малых потоках тепла с приходящим воздухом) его тепла может оказаться недостаточно при тепло-массообмене для компенсации потерь тепла потоком воды на испарение.

В этом случае будет наблюдаться как понижение конечной температуры воздуха, так и понижение конечной температуры воды ( $t_{\text{жк}} < t_{\text{жн}}$ , рис. 3.5.2а).

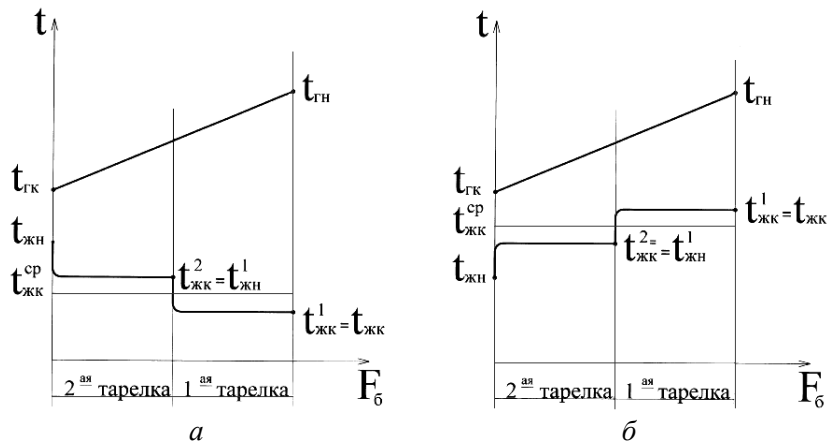


Рис. 3.5.2. Характер изменения температур сред на контактных тарелках (ПВ – по воздуху, ПП – по воде):  
*а* – при малых потоках тепла с воздухом;  
*б* – при больших потоках тепла с воздухом

При больших расходах (потоках тепла) более теплого воздуха конечная температура воды выше начальной ( $t_{жк} > t_{жн}$ , рис. 3.5.2б), так как его тепла будет достаточно для компенсации потерь тепла водой на испарение влаги и для ее нагревания выше начальной температуры.

#### СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

- цель работы;
- краткий конспект теоретической части;
- схему установки;
- таблицы данных экспериментов и расчетов;
- графики зависимостей  $K_{усп} = f(w)$ ,  $K_T = f(w)$ .

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Каков физический смысл коэффициентов массопередачи, теплопередачи, массоотдачи и теплоотдачи?
2. Как связаны коэффициенты массоотдачи с коэффициентом массопередачи и коэффициенты теплоотдачи с коэффициентом теплопередачи?
3. В чем отличие коэффициента массопередачи от коэффициента массоотдачи и коэффициента теплопередачи от коэффициента теплоотдачи?
4. В каких случаях коэффициент массопередачи равен одному из коэффициентов массоотдачи, а коэффициент теплопередачи одному из коэффициентов теплоотдачи?
5. Как выражается движущая сила массообменных и теплообменных процессов?
6. Для каких фаз на контактном элементе (тарелке) реализуются случаи: «полное (идеальное) перемешивание», «полное (идеальное) вытеснение»?
7. Как объяснить результаты экспериментов, что при малых расходах воздуха наблюдается понижение температур как воздуха, так и воды?
8. Какие элементы входят в экспериментальную установку?



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Плановский А.Н., Николаев П.И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. – М.: Химия, 1987.
2. Рамм В.М. Абсорбция газов. – М.: Химия, 1976.



Учебное издание

Составитель:  
Сидельников Иван Иванович

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ  
МАССО- И ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПРИ КОНТАКТЕ ВОЗДУ-  
ХА И ВОДЫ НА КОЛПАЧКОВЫХ ТАРЕЛКАХ МАССО-  
ОБМЕННЫХ КОЛОННЫХ АППАРАТОВ**

Подписано в печать 12.11.2010 г. Формат бум. 60 x 84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Объем 1,16 усл. п. л., уч.-изд. л. 1,25. Тираж экз. Зак.