

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ КОНТАКТА ФАЗ ХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ В УВЛАЖНИТЕЛЕ СО ВСТРЕЧНЫМИ ЗАКРУЧЕННЫМИ ПОТОКАМИ

И.А. Тимонов, Е.Т. Тимонова

УДК 544: 697.94

РЕФЕРАТ

КОНТАКТНЫЙ АППАРАТ, ХЕМОСОРБЦИЯ, ПОВЕРХНОСТЬ КОНТАКТА ФАЗ, ТЕПЛООБМЕН, КОЭФФИЦИЕНТЫ ТЕПЛОМАССООБМЕНА

В статье представлены результаты исследований по выявлению возможности использования химического метода для определения истинной поверхности контакта фаз в аппарате форсуночного типа – увлажнителе со встречными закрученными потоками. Сущность метода заключается в определении характеристик массопереноса при абсорбции, сопровождаемой химической реакцией, и установлении связи этих характеристик с кинетикой протекающей химической реакции. Установлено, что поверхность контакта фаз пропорциональна гидродинамическим условиям работы – коэффициенту орошения и массовой скорости воздуха. Полученные данные показали, что применение химического метода позволяет определять истинную поверхность контакта фаз в теплообменных аппаратах.

ABSTRACT

CONTACT DEVICE, HEMOSORPTION, SURFACE OF CONTACT OF PHASES, HEAT EXCHANGE, HEAT MASS EXCHANGE COEFFICIENTS

The results of the researches of the chemical methods for determining the true surface contact between the phases and heat and mass transfer coefficients for the machine-humidifier with counter swirling flow are shown. This method can be used in other heat and mass transfer devices of the industrial air-conditioning systems.

Тепломассообменные процессы широко распространены в различных отраслях промышленности. Для проведения таких процессов используется большое количество аппаратов, характеризующееся значительным разнообразием конструкций и условий работы. Одним из важнейших факторов, определяющих эффективность теплообменных аппаратов, является поверхность контакта фаз (ПКФ) между газом и жидкостью. Прежде всего это относится к контактному аппарату для тепловлажностной обработки в промышленных установках кондиционирования воздуха. Основная сложность при расчетах коэффициентов переноса в них связана с определением действительной поверхности взаимодействия воздуха и воды. Поэтому при обработке экспериментальных данных обычно применяют условную ПКФ, равную площади поперечного сечения или объема камеры аппарата,

считая ее величиной постоянной. По принятой ПКФ вычисляются условные средние коэффициенты переноса тепла и влаги. В действительности величина межфазной поверхности зависит от многих конструктивных и режимных параметров аппарата и изменяется в широких пределах.

В данной работе была предпринята попытка экспериментального определения ПКФ в увлажнителе со встречными закрученными потоками (ВЗП-У) с помощью химического метода, который использовался в пенно-барботажных и вихревых газожидкостных аппаратах [1, 2]. Этот метод позволяет определять интегральную ПКФ независимо от структуры двухфазного потока. Сущность метода заключается в определении характеристик массопереноса при абсорбции, сопровождаемой химической реакцией (хемосорбцией), и установлении связи этих характеристик с кинетикой протекающей химической

реакции. Для этой цели использовалась реакция поглощения CO_2 из смеси с воздухом водным раствором $NaOH$.

Указанная реакция протекает по «псевдопервому» порядку. В этом случае истинный коэффициент массоотдачи в жидкой фазе $\beta_{ж}$ (м/с) при хемосорбции не зависит от гидродинамики слоя и полностью определяется скоростью химической реакции.

$$\beta_{ж} = \sqrt{k_2 D_a \bar{c}}, \quad (1)$$

где k_2 – константа скорости химической реакции, $m^3/(кмоль \cdot с)$; D_a – коэффициент диффузии CO_2 в растворе щелочи, $m^2/с$; \bar{c} – средняя концентрация щелочи в растворе, $кмоль/m^3$.

Константа скорости химической реакции k_2 определяется по следующим зависимостям:

$$\lg k_2 = \lg k_{20} + 0,133 \bar{c}, \quad (2)$$

$$\lg k_{20} = 13,4 - 2850/T, \quad (3)$$

где T – средняя абсолютная температура взаимодействующих сред, К.

Средняя концентрация щелочи в растворе

$$\bar{c} = (c_n + c_k)/2, \quad (4)$$

где c_n и c_k – концентрации щелочи на входе и выходе из аппарата, $кмоль/m^3$.

Диффузионное сопротивление газовой фазы незначительно, поэтому можно принять объемный коэффициент массоотдачи в жидкой фазе при хемосорбции β_v равным объемному коэффициенту массопереноса k_v . Тогда

$$\beta_v = \frac{M}{V_{an} c_1}, \quad (5)$$

где M – количество CO_2 , поглощенное раствором щелочи, $кмоль/с$; V_{an} – объем рабочей камеры аппарата, m^3 ; c_1 – концентрация CO_2 в массе газа, $кмоль/m^3$.

Количество CO_2 , поглощенное раствором щелочи, определяется по выражению

$$M = \frac{G_p (c_n - c_k)}{z}, \quad (6)$$

где $G_p = G_{H_2O} + G_{NaOH}$ – расход раствора, $m^3/с$; $z = 2$ – стехиометрический коэффициент.

Пренебрегая сопротивлением газовой фазы, определим c_1 по закону Генри:

$$c_1 = \frac{P_{cp}}{m R T}, \quad (7)$$

где P_{cp} – среднее парциальное давление CO_2 в смеси, кПа; m – константа равновесия [3]; $R = 8,21$ – газовая постоянная, $m^3 \cdot кПа/(кмоль \cdot К)$.

Так как $\beta_v = \beta_{ж} \cdot a$, можно определить удельную ПКФ « a » (m^2/m^3), отнесенную к объему аппарата:

$$a = \frac{\beta_v}{\beta_{ж}} = \frac{G_p (c_n - c_k) m R T}{z \sqrt{k_2 \bar{c} D_a} P_{cp} V_{an}}, \quad (8)$$

где V_{an} – объем рабочей камеры аппарата, m^3 .

Тогда истинная ПКФ будет равна:

$$F = a \cdot V_{an}. \quad (9)$$

Данная методика использовалась для определения истинной ПКФ в аппарате ВЗП-У с диаметром 260 мм при высоте рабочей камеры 730 мм [4].

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рисунке 1.

Воздух, поступающий в аппарат 1, смешивался в заданном соотношении с углекислым газом, подаваемым из баллона 2. Раствор щелочи из бака 3 насосом перекачивался к аппарату, где центробежными форсунками 4 распылялся в рабочей камере аппарата. После взаимодействия с газом раствор стекал в поддон, откуда откачивался насосом. Газ удалялся через верхний патрубок аппарата.

Объемная доля CO_2 в воздухе изменялась от 1,4 до 1,8 %, щелочи в растворе – от 1,9 до 2,7 $кмоль/m^3$. Температура газа и жидкости измерялась лабораторными термометрами, расход воздуха и углекислого газа – мерными шайбами, расход раствора – ротаметрами. Концентрацию

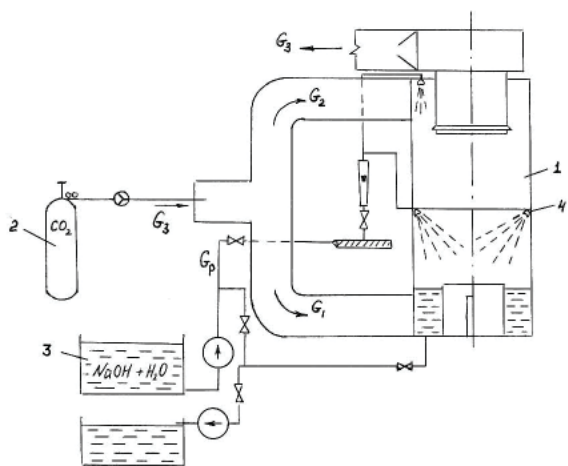


Рисунок 1 – Принципиальная схема экспериментальной установки

раствора в отобранных пробах определяли титрованием соляной кислоты в присутствии фенолфталеина и избыточного количества хлористого бария для нейтрализации соды.

В настоящей работе исследовался процесс увлажнения и охлаждения воздуха. При прохождении воздуха через разбрызгиваемый форсунками раствор щелочи происходит одновременно хемосорбция CO_2 , увлажнение и охлаждение воздуха. Процесс хемосорбции позволяет измерить истинную ПКФ, а увлажнение и охлаждение воздуха – коэффициенты тепло- и массопереноса. Расчет коэффициентов тепло- и массопереноса основывается на исследованиях Льюиса и Меркеля [5].

В работе исследовалась теплоотдача от воздуха к воде. Коэффициент теплоотдачи α (Вт/(м² °С)) определялся по формуле:

$$\beta = \frac{G_3(d_2 - d_1)}{1000 \cdot 3600 \cdot \Delta K_{ср.л.} \cdot F}, \quad (10)$$

где G_3 – общий расход воздуха, поступающего в аппарат, кг/ч; c_p – теплоемкость сухого воздуха, кДж/(кг °С); t_1 и t_2 – температура воздуха на входе и выходе из аппарата, °С; F – истинная ПКФ, м²; $\Delta t_{ср.л.}$ – среднелогарифмический температурный напор, °С.

При исследовании испарения воды все диффузионное сопротивление сосредоточено в газовой фазе, поэтому коэффициент массопереноса k_g примерно равен коэффициенту теплоотдачи в газовой фазе β , м/с

$$\sigma = \frac{0,278G_3(t_1 - t_2)}{F\Delta i_{ср.л.}}, \quad (11)$$

где d_2 и d_1 – влагосодержание конечного и начального состояния воздуха, г/кг; $\Delta K_{ср.л.}$ – средне логарифмический напор концентраций водяного пара, кг/м³.

Коэффициент полного теплообмена σ , Вт/[м²(кДж/кг)] определяется по формуле

$$\sigma = \frac{0,278G_3(i_1 - i_2)}{F\Delta i_{ср.л.}}, \quad (12)$$

где i_1 и i_2 – энтальпия начального и конечного состояния воздуха, кДж/кг; $\Delta i_{ср.л.}$ – средне логарифмический напор энтальпий, кДж/кг.

При проведении эксперимента были выбраны три параметра, характеризующие режим работы аппарата ВЗП-У: коэффициент орошения $B = G_p / G_3$, массовая скорость воздуха в поперечном сечении аппарата νp и отношение расходов воздуха $\varepsilon = G_2 / G_3$ (G_2 – расход воздуха, поступающего в аппарат через верхний ввод).

Результаты экспериментальных исследований показаны в таблицах 1 и 2.

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что истинная ПКФ возрастает с увеличением коэффициента орошения B , массовой скорости воздуха νp и коэффициента ε . Причем влияние фактора ε на порядок ниже, чем B и νp . Это полностью согласуется с результатами ранее выполненных исследований, показавших, что эффективность процесса тепловлажностной обработки воздуха возрастает с увеличением указанных параметров. В свою очередь, увеличение коэффициентов α , β и σ происходит при уменьшении значений B , νp и ε .

В результате выполненной работы было установлено, что применение химического метода позволяет определять истинную ПКФ и коэффициенты тепло- и массообмена в различных контактных аппаратах, в частности в аппаратах форсуночного типа. Полученные результаты дают возможность осуществить более точный расчет процессов тепловлажностной обработки воздуха в увлажнителе со встречными закрученными потоками.

Таблица 1 – Параметры работы аппарата ВЗП-У

№ п/п	B , кг/кг	vr , кг/(м ² с)	G_3 , кг/ч	ϵ	G_p , кг/ч
1	0,6	5,24	1000	0,6	600
2	0,6	6,2	1180	0,4	708
3	1,2	5,24	1000	0,4	1200
4	1,2	6,2	1180	0,6	1416
5	0,6	5,24	1000	0,4	600
6	0,6	6,2	1180	0,6	708
7	1,2	5,24	1000	0,6	1200
8	1,2	6,2	1180	0,4	1416

Таблица 2 – Экспериментальные данные по определению ПКФ

№ п/п	$M \cdot 10^{-3}$, кмоль/с	c_n , кмоль/м ³	c_k , кмоль/м ³	\bar{c} , кмоль/м ³	T , К	m	P_{cp} , кПа	κ_2 , с ⁻¹	$D_a \cdot 10^{-9}$, м ² /с	a , м ² /м ³
1	0,179	2,66	2,54	2,60	298,1	2,29	1,7	15268	1,96	96,04
2	0,202	2,38	2,25	2,32	291,8	1,80	1,6	8748	1,76	149,2
3	0,188	2,00	1,82	1,91	298,8	1,96	1,8	13062	2,00	292,4
4	0,188	2,61	2,44	2,53	293,2	2,00	1,4	10371	1,81	431,8
5	0,184	2,13	2,02	2,07	297,0	1,96	1,7	11940	1,94	96,03
6	0,179	2,77	2,62	2,69	297,3	2,30	1,4	14307	1,96	172,4
7	0,184	2,10	1,91	2,00	297,7	1,96	1,7	12436	1,97	328,3
8	0,202	2,49	2,32	2,40	292,5	1,91	1,6	9526	1,78	387,0

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. К расчету поверхности контакта фаз в процессе абсорбции CO₂ растворами щелочей на ситчатых тарелках / А. И. Родионов, В. Е. Сорокин // Журн. прикл. хим. – 1970. – № 11 – С. 87-91.
2. Тепло- и массоперенос в закрученном газожидкостном слое / А. П. Бурдуков [и др.] // Журн. прикл. мех. и техн. физ. – Сибирское отделение АН СССР: Наука. – 1981. – № 6 – С. 52-55.

REFERENCES

1. Rodionov, A. I., Sorokin, V. E. (1970), On the calculation of surface contact between the phases in the process of CO₂ absorption alkalis on sieve trays [K raschetu poverkhnosti kontakta faz v processe absorbcii CO₂ rastvorami schelochei na sitchatych tarelkakh], Gurn. prikl. khim. T 43 № 11, pp. 2461-2465.
2. Burdukov, A. P. (1981), Heat and mass transfer in swirling gas-liquid laye [Teplo- i massoperenos v zakruchennom gazozhidkostnom sloe], Gurn. prikl. mekh. i tekhn. fiz. – Sibirskoe otdelenie AN

3. Рамм В. М. Абсорбция газов / В. М. Рамм. – Москва : Химия. 1976. – 655 с. SSSR: Nauka № 6, pp 68-72.
4. Омельчук В. С. Экспериментальное исследование полупромышленного увлажнителя со встречными закрученными потоками / В. С. Омельчук, И. А. Тимонов // Повышение эффективности тепломассообменных и гидродинамических процессов в текстильной промышленности и производстве химических волокон : межвуз. сборник научн. трудов / МТИ им. А.Н. Косыгина. – Москва, 1985. – С. 116-118.
5. Кокорин О. Я. Установки кондиционирования воздуха / О. Я. Кокорин. – Москва: Машиностроение. 1971. – 262 с.
3. Ramm, V.M. (1976), Absorption of gases [Absorbciya gazov]. Moskva: Khimiya, 655 pages.
4. Omelchuk, V.S., Timonov, I.A. (1985), Experimental research of semi-humidifier with counter swirling flows [Eksperimentalnoe issledovanie polupromyshlennogo uvlagnitelya so vstrechnymi zakruchennymi potokami] // Povyshenie effektivnosti teplomassoobmennykh i gidrodinamicheskikh processov v tekstilnoi promyshlennosti i proizvodstve khimicheskikh volokon: megvuz. Sbornik nauchnykh. trudov / MTI im. A.N. Kosygina. – Moskva, pp. 116-118.
5. Kokorin, O. Y. (1971), Installation of air conditioning [Ustanovki kondicionirovaniya vozdukh]. Moskva: Mashinostrojeniyе, 262 pages.

Статья поступила в редакцию 10.03.2014 г.