

М. А. Закиров

МАССОПЕРЕДАЧА ПРИ ДВИЖЕНИИ ОДИНОЧНЫХ КАПЕЛЬ ПО КОНИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ РОТОРА

Ключевые слова: центробежная экстракция, процесс массопередачи в дисперсных системах, коэффициенты массопередачи в каплях.

На основе обработки экспериментальных данных для процесса массопередачи в дисперсной фазы в насадочной зоне центробежных экстракторов получено критериальное уравнение, описывающее коэффициенты массопередачи в одиночных каплях, движущихся в равномерно вращающейся невязкой жидкости по конической поверхности ротора.

Keywords: centrifugal extraction, mass transfer process in dispersed systems, mass transfer coefficients in drops.

On base of experimental date processing of mass transfer process in dispersed phase in packed zone of centrifugal extractors in this article has been suggested a criterial equation for mass transfer coefficients in single drops, moving in stationary rotating inviscid liquid on surface of conical rotor.

В центробежных экстракторах, обладающих более высокими технико-экономическими показателями по сравнению с гравитационными аппаратами, процесс взаимодействия рабочих сред осуществляется в капельном режиме движения одной из жидкостей [1]. Под действием центробежных сил инерции во вращающейся жидкости капли дисперсной фазы в центробежных аппаратах подвергаются более тонкому диспергированию, создавая большую поверхность контакта фаз в единице объема экстрактора. Кроме того, во вращающейся жидкости капли движутся с более высокими относительными скоростями, обеспечивая более высокие коэффициенты массоотдачи и массопередачи в фазах, позволяя тем самым уменьшить геометрические размеры зон контакта и сепарации жидких фаз, что, в конечном счете, позволяет снизить габариты и массу центробежных экстракторов.

С целью увеличения эффективности взаимодействия фаз за счет многократного обновления поверхности контакта фаз, в рабочей зоне контакта и сепарации фаз центробежных аппаратов устанавливают различные виды насадок. Наиболее эффективными контактными элементами центробежных экстракторов являются волнообразные и X-образные насадки [3], установленные в зоне контакта фаз и состоящие из конических элементов вращения. Для обеспечения эффективного разделения фаз в тонких слоях сплошной и дисперсной фаз в центральной и периферийных участках зон контакта центробежных аппаратов устанавливают сепараторы, состоящие также из пакета конических тарелок. В связи с этим, при расчете и проектировании центробежных экстракторов необходимо располагать надежными кинетическими характеристиками процесса движения и массопередачи внутри и вокруг капель не только при свободном полете их во вращающейся жидкости, но и при стесненном движении капель, в частности, по конической поверхности вращения центробежных насадок.

Экспериментальные исследования процесса массопередачи при движении одиночных капель в сплошной невязкой жидкости по конической поверхности вращающегося ротора были проведены

ранее в работах [3, 4]. Опыты проводились в системе с лимитирующим сопротивлением в дисперсной фазе диизопропиловый эфир – бензойная кислота – вода, при движении одиночных капель воды в сплошной легкой жидкости органической фазы. Физико-химические свойства исследованной системы представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические свойства исследованной системы

№ системы	Система: (сплошная фаза – распределяемый компонент – дисперсная фаза)	Плотность фаз, кг/м ³	
		ρ_c	ρ_d
1	Диизопропиловый эфир – бензойная кислота – вода	730	998

Окончание табл. 1

Вязкость фаз, Па·с:		Коэф-т молекулярной диффузии, м ² /с, D _c ·10 ⁹	Критерий Шмидта, Sc _c	Коэф-т пов. натяжения, Н/м, $\sigma \cdot 10^3$
сплошной, $\mu_c \cdot 10^3$	дисперсной, $\mu_d \cdot 10^3$			
0,349	0,998	1,02	980,3	17,07

Коэффициенты массопередачи в каплях определялись экспериментально на двух конических роторах с углами между осью вращения и образующей конуса $\varphi = 60^\circ$ и 20° , путем замера концентраций в двух точках отбора дисперсной фазы, расположенных на различных радиусах ротора, для исключения влияния «концевых эффектов». Основной задачей исследования ставилось проведение сравнительной оценки коэффициентов массопередачи в случае свободного движения капель в цилиндрическом роторе (с углом на вершине $\varphi = 90^\circ$) с коэффициентами массопередачи в каплях при их движении по конической поверхности вращающегося ротора с углами 60° и 20° соответственно.

Для описания коэффициентов массопередачи при движении капель по конической поверхности $K_d^{\text{кон}}$ влияние угла наклона ротора φ авторами [3, 4] предложено учитывать введением добавочного

множителя к коэффициенту массопередачи при свободном движении каплей k_d через синус этого угла:

$$k_d^{\text{кон}} \sim k_d (\sin \varphi)^n. \quad (1)$$

Для определения входящих в уравнение (1) коэффициентов массопередачи k_d при свободном движении каплей во вращающейся сплошной жидкости использовано обобщенное критериальное уравнение:

$$Sh_d = 260 \cdot 10^{-3} \cdot Re_d^{1.35} Fr_d^{0.2} Sc_d^{0.70} \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_c}\right)^{0.34} \left(\frac{\sigma_{\text{мф}}}{\sigma_{\text{пс}} + \sigma_{\text{пд}}}\right)^{0.47}, \quad (2)$$

полученное авторами [3, 4] на основе обработки экспериментальных данных на шести невязких системах с лимитирующим сопротивлением в дисперсной фазе для случая движения одиночных каплей в цилиндрическом роторе, имеющем угол конусности $\varphi = 90^\circ$.

Здесь: $Sh_d = \frac{k_d d}{D_d}$ – массообменный критерий Шервуда (Нуссельта – Nu_d); $Re_d = \frac{U d \rho_d}{\mu_d}$ – критерий Рейнольдса; $Fr_d = \frac{\omega^2 R d}{U^2}$ – центробежный критерий Фруда; $Sc_d = \frac{\mu_d}{\rho_d D_d}$ – критерий Шмидта (Прандтля – Pr_d).

Индексы «д» здесь и далее относится к жидкости дисперсной фазы (к каплям), индекс «с» – к жидкости сплошной фазы соответственно.

Для расчета численных значений коэффициентов массопередачи в каплях при их свободном движении, авторами [3, 4] использована развернутая форма критериального уравнения (2):

$$k_d = 1,36 \cdot 10^{-3} U^{2,1} d^{0,72} D_d^{0,30} \sigma_{\text{мф}}^{0,1} (\sigma_{\text{пс}} + \sigma_{\text{пд}})^{-0,47} \times ((\mu_d / \mu_c) / (\rho_d / \rho_c))^{0,7} \rho_c^{1,03} \mu_c^{-0,65}. \quad (3)$$

На основе количественной оценки экспериментальных значений коэффициентов массопередачи при свободном движении каплей во вращающейся жидкости (k_d) и коэффициентов массопередачи при их движении по вращающейся конической поверхности ($k_d^{\text{кон}}$), рассчитанных по уравнению (3), установлено, что последние снижаются с уменьшением угла конусности ротора. Этот факт объясняется своеобразной деформацией каплей для различных значений угла φ и значительным изменением условий обтекания каплей сплошной фазой и соответствующей гидродинамической картиной линий тока на поверхности и внутри капли.

По данным [3, 4], капля, движущаяся по поверхности конуса с углом $\varphi = 60^\circ$, имеет форму сплющенного эллипсоида и всей поверхностью контактирует со сплошной фазой, вызывая снижение коэффициентов массопередачи по сравнению со свободным полетом в среднем в 1,12 раза.

При уменьшении угла наклона образующей конуса до 20° , капля деформируется до сплющенного эллипсоида с тремя различными осями, прижимаясь к поверхности конуса в направлении радиуса ротора, что приводит к значительному уменьшению коэффициентов массопередачи в результате одно-стороннего обтекания капли потоком сплошной фа-

зы вблизи поверхности конуса. В последнем случае коэффициенты массопередачи в каплях, движущихся по конической поверхности, по сравнению со свободным полетом уменьшились в 2,48 раза.

Для исследованной системы диизопропиловый эфир – бензойная кислота – вода опытные данные [3, 4] скоррелированы частной степенной зависимостью

$$k_d^{\text{кон}} \sim k_d (\sin \varphi)^{0,84}. \quad (4)$$

С учетом развернутого уравнения (3) для коэффициентов массопередачи при свободном полете каплей, получено обобщенное уравнение для коэффициентов массопередачи для случая движения каплей по конической поверхности в виде:

$$k_d^{\text{кон}} = 1,5 U^{2,1} d^{0,72} (\sin \varphi)^{0,84}. \quad (5)$$

Последнее уравнение рекомендовано авторами [3, 4] для использования на жидких системах с близкими физико-химическими свойствами рабочих сред и в области исследованных режимов движения и массопередачи в каплях.

Практическое использование предложенных уравнений (2, 3, 5) в инженерных расчетах центробежных экстракторов вызывает ряд затруднений. Критериальное уравнение (2) для случая свободного полета каплей, кроме традиционных критериев подобия Рейнольдса (Re_d) и Шмидта (Sc_d), включает ряд дополнительных критериев подобия, в частности, определяющий критерий Фруда, симплексы вязкостей, плотностей и коэффициентов поверхностного и межфазного натяжения. Последние, как известно, не входят в известные для поля тяжести теоретические решения уравнений массопередачи в каплях и сплошной фазе, полученные на основе модельных приближений, в также эмпирических уравнений, полученных на основе обработки экспериментальных данных.

В связи с этим, в данной работе предпринята попытка обобщения опытных данных [3, 4] по массопередаче в каплях, движущихся по поверхности вращающегося конуса, через критериальное уравнение, полученные нами в работе [5] на основе теоретического анализа уравнений движения и массопередачи при свободном движении одиночных каплей под действием центробежных сил, с учетом особенностей движения и обтекания частиц на подвижной границе раздела капля – среда во вращающейся невязкой жидкости:

$$Sh_d = f(Re_d, Sc_d, Ek, \mu_c / \mu_d). \quad (6)$$

Данное уравнение включает традиционные гидродинамические критерии подобия Re_d , Sc_d и симплекс вязкостей μ_c / μ_d , которые входят в известные теоретические решения внутренней задачи массообмена в каплях, движущихся под действием гравитационных сил в поле тяжести. Так указанные критерии подобия входят в циркуляционную модель Левича [6] для мелких сферических каплей с ламинарным режимом обтекания при $Re_c \ll 1$, в турбулентную модель Хэндлоса и Барона [7], полученную для крупных сплюснутых каплей с вихревым режимом обтекания при $Re_c \square 100$, а также в эмпирические уравнения Розена с cotr . [8, 9].

В отличие от перечисленных моделей для поля тяжести, последнее уравнение (6) содержит дополнительный критерий Экмана $Ek = \mu_c / (\omega d^2)$, учитывающий специфические особенности движения частиц под действием центробежных сил [10], в частности, возможность двумерного обтекания твердых и жидких частиц во вращающейся невязкой жидкости.

С учетом уравнения (1), предложенного в [3, 4], для учета влияния угла конусности на коэффициент массопередачи, в обобщающее критериальное уравнение (6), полученное для свободного полета капель, следует ввести дополнительный множитель в виде синуса угла φ , т.е. уравнение (6) можно записать в виде:

$$Sh_d^{кон} = f(Re_d, Sc_d, Ek, \mu_c / \mu_d, \sin \varphi). \quad (7)$$

Для количественной оценки степени влияния на определяемый массообменный критерий Шервуда $Sh_d^{кон}$ входящих в последнее уравнение (7) определяющих критериев подобия, на рис. 1 представлены экспериментальные данные [3, 4] для исследованной системы в безразмерных координатах $Sh_d - Re_d$:

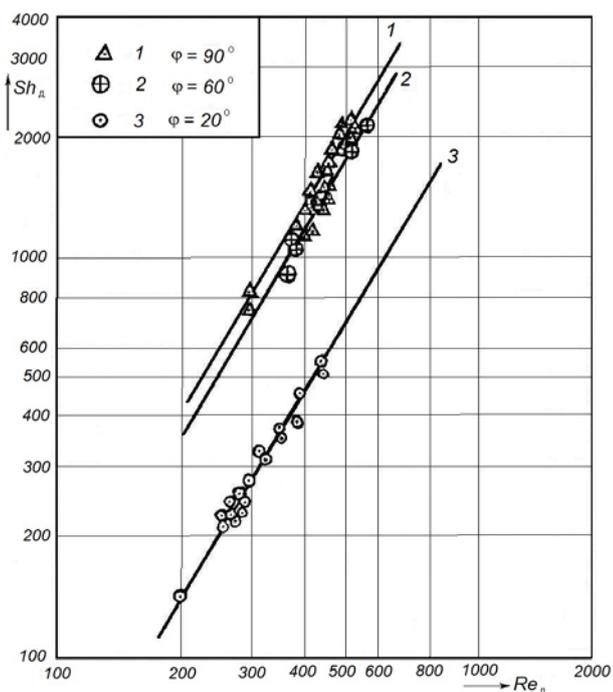


Рис. 1 – Зависимость $Sh_d^{кон} - Re_d$ для системы диизопропиловый эфир – бензойная кислота – вода для углов конусности ротора 90° (1), 60° (2) и 20° (3) соответственно

Как следует из рис. 1, влияние гидродинамических параметров движения капель на коэффициенты массопередачи в каплях при их свободном полете и по поверхности вращающегося конуса в безразмерной форме можно записать одной частной степенной критериальной зависимостью

$$Sh_d^{кон} = A_1 \cdot Re_d^{1,72}. \quad (8)$$

Аналогичная частная степенная зависимость получена и для коэффициентов массопередачи в каплях, свободно движущихся в равномерно

вращающейся невязкой жидкости на 6 системах с лимитирующим сопротивлением в дисперсной [11] и на 4 системах с лимитирующим сопротивлением в сплошной [12] фазах. Это свидетельствует об определяющем влиянии гидродинамической обстановки на поверхности и вблизи границы раздела капля – сплошная среда на процессе массопередачи в каплях, движущихся во вращающейся жидкости под действием центробежных сил инерции.

Для оценки влияния угла конусности на коэффициенты массопередачи в каплях на рис. 2 представлена зависимость экспериментальных значений критерия $Sh_d^{кон}$ [3, 4] от синуса угла φ при исследованных углах 20° и 60° . Здесь же представлены экспериментальные данные для коэффициентов массопередачи для данной системы, полученные при свободном движении капель [3, 4], т.е. при угле конусности 90° .

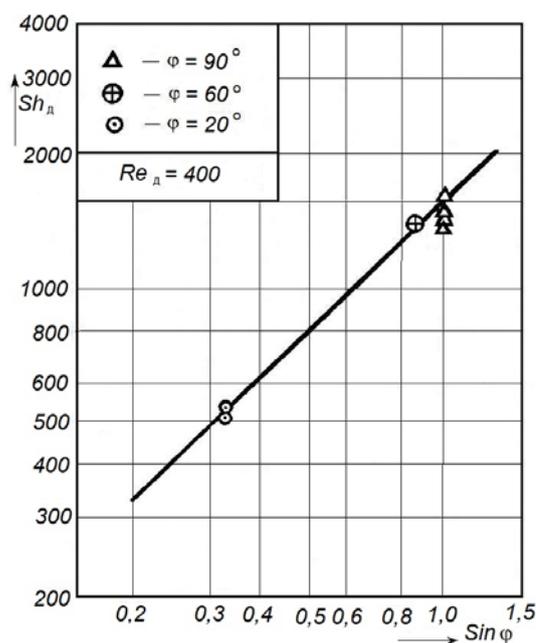


Рис. 2 – Влияние угла конусности φ на коэффициенты массопередачи в каплях в системе диизопропиловый эфир – бензойная кислота – вода

Как следует из рис. 2, опытные данные [3, 4] для указанной системы, полученные при исследованной области углов конусности 20° , 60° и 90° , можно обобщать частной критериальной зависимостью

$$Sh_d^{кон} = A_2 \cdot \sin \varphi^{1,00}. \quad (9)$$

Эта зависимость отличается от уравнения (4), полученного в [3, 4] величиной показателя степени при синусе угла φ , поскольку обобщение опытных данных авторами [3, 4] производилось по уравнению (1) непосредственно по числовым значениям коэффициентов массопередачи, тогда как в данной работе обобщение тех же экспериментальных данных осуществлялось по уравнению (7) через безразмерные критерии подобия.

Математической обработкой экспериментальных данных [3, 4] получено обобщающее критериальное уравнение

$$\text{Sh}_d^{\text{кон}} = 0,0454 \cdot \text{Re}_d^{1,72} \cdot \sin \varphi^{1,00}, \quad (10)$$

удовлетворительно описывающее коэффициенты массопередачи в каплях, движущихся по поверхности вращающегося конуса при углах наклона от 20° до 90° в системе диизопропиловый эфир – бензойная кислота – вода с лимитирующим сопротивлением в дисперсной фазе. Разброс экспериментальных данных от расчетных значений не превышает ± 15%.

В развернутой форме критериальное уравнение (10) преобразуется к виду:

$$k_d^{\text{кон}} = 0,0454 \cdot U^{1,72} d^{0,72} (\rho_d / \mu_d)^{1,72} D^{1,00} (\sin \varphi)^{1,00}. \quad (11)$$

Последнее уравнение позволяет непосредственно определить численные значения коэффициентов массопередачи в каплях, движущихся в невязких жидких системах с лимитирующим сопротивлением в дисперсной фазе по коническим элементам насадок с углом конусности от 20 до 90° в области физико-механических свойств жидких систем, близких к свойствам исследованной в [3, 4] жидкой системы.

Литература

1. *Последние достижения в области жидкостной экстракции.* / Под ред. К. Хансона. / Пер. с англ. Химия, Москва, 1974. – 484 с.
2. Ю.А. Дулатов. Дисс. канд. тех. наук. Казан. хим.-технол. ин-т, Казань, 1970. – 216 с.
3. В.В. Кафаров, И.И. Поникаров, В.В. Зайцев, *Журн. прикл. химии*, **2**, №5, 1089 – 1095 (1974).
4. В.В. Зайцев, Дисс. канд. тех. наук. Казан. хим.-технол. ин-т, Казань, 1971. 206 с.
5. М.А. Закиров, И.И. Поникаров, Деп. в ОНИИТЭХим г. Черкассы, № 994 хп-Д83, 25 с. (1983).
6. В.Г. Левич, В.С. Крылов, В.П. Воротилин, *Докл. АН СССР*, **161**, № 3, 648 – 651 (1965).
7. А.Е. Handlos, T. Baron, *A.I.Ch.E. Journal*, **3**, №1, 127 – 136 (1957).
8. А.М. Розен, А.И. Беззубова, В.А. Васильев, Б.В. Елатомцев, Л.И. Лапавок. В Сб.: *Процессы жидкостной экстракции и хемосорбции*. Химия, Москва, 99 – 112 (1966).
9. А.М. Розен, А.И. Беззубова, *Теор. основы хим. технол.*, **2**, №6, 850 – 862 (1968).
10. В.И. Соколов *Центрифугирование*, Химия, Москва, 408 с. (1976).
11. М.А. Закиров, *Вестник Казан. технол. ун-та*, **15**, №11, 79 – 83 (2013).
12. М.А. Закиров, *Вестник Казан. технол. ун-та*, **16**, №3, 85 – 87 (201).