

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/м³ ρ_с ρ_р ρ_д Вязкость фаз, Па·с: Коэф-т молекулярной диффузии, м²/с, D_{с.109} Критерий Шмидта, S_{сс} Коэф-т пов. натяжения, Н/м, σ .10³ сплошной, μс.10³ дисперсной, μд.10³ 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 φ = 60° 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 кдкон влияние угла наклона ротора φ авторами [3, 4]. предложено учитывать введением добавочного множителя к коэффициенту массопередачи при свободном движении капель кд через синус этого угла: $k_{дкон} \sim k_{д} (\sin \varphi)^n$. (1) Для определения входящих в уравнение (1) коэффициентов массопередачи кд при свободном движении капель во вращающейся сплошной жидкости использовано обобщенное критериальное уравнение: , (2) полученное авторами [3, 4] на основе обработки экспериментальных данных на шести невязких системах с лимитирующим сопротивлением в дисперсной фазе для случая движения одиночных капель в цилиндрическом роторе, имеющем угол конусности $\varphi = 90^\circ$. Здесь: - массообменный критерий Шервуда (Нуссельта - Nuд); - критерий Рейнольдса; - центробежный критерий Фруда; - критерий Шмидта (Прандтля - Prд). 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): $k_{д} = 1,36 \cdot 10^{-3} U_{2,1} d_{0,72} D_{д0,30} \sigma m \varphi_{0,1} (\sigma_{пс} + \sigma_{пд})^{-0,47} \times ((\mu_{д}/\mu_{с})/(\rho_{д}/\rho_{с}))^{0,7} \rho_{с}^{1,03} \mu_{с}^{-0,65}$. (3) На основе количественной оценки экспериментальных значений коэффициентов массопередачи при свободном движении капель во вращающейся жидкости (кд) и коэффициентов массопередачи при их движении по вращающейся конической поверхности (кдкон), рассчитанных по уравнению (3), установлено, что последние снижаются с уменьшением угла конусности ротора. Этот факт объясняется своеобразной деформацией капель для различных значений угла φ и значительным изменением условий обтекания капель 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 одностороннего обтекания капли потоком сплошной фазы 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 $k_{\text{дкон}} \sim k_{\text{д}} (\sin \varphi)^{0,84}$. (4) С учетом развернутого уравнения (3) для коэффициентов массопередачи при свободном полете капель, получено обобщенное уравнение для коэффициентов массопередачи для случая движения капель по конической поверхности в виде: $k_{\text{дкон}} = 1,5 U_{2,1} d^{0,72} (\sin \varphi)^{0,84}$. (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 капель, кроме традиционных критериев подобия Рейнольдса ($Re_{\text{д}}$) и Шмидта ($Sc_{\text{д}}$), 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 капель под действием центробежных сил, с учетом особенностей движения и обтекания частиц на подвижной границе раздела капля - среда во вращающейся невязкой жидкости: $Sh_{\text{д}} = f(Re_{\text{д}}, Sc_{\text{д}}, Ek, \mu/\mu_{\text{д}})$. (6) Данное уравнение включает традиционные гидродинамические критерии подобия $Re_{\text{д}}$, $Sc_{\text{д}}$ и симплекс вязкостей $\mu/\mu_{\text{д}}$, 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 капель с ламинарным режимом обтекания при $Re_{\text{с}} < 1$, в турбулентную модель Хэндлоса и Барона [7], полученную для крупных сплюснутых капель с вихревым режимом обтекания при $Re_{\text{с}} > 100$, а также в эмпирические уравнения Розена с сотр. [8, 9]. В отличие от перечисленных моделей для поля тяжести, последнее уравнение (6) содержит дополнительный критерий Экмана $Ek = \mu/(\omega d^2)$, 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 капль, следует ввести дополнительный множитель в виде синуса угла φ , т.е. уравнение (6) можно записать в виде: $Sh_{дкон} = f(Re_{д}, Sc_{д}, Ek, \mu c/\mu_{д}, \sin \varphi)$. (7) Для количественной оценки степени влияния на определяемый массообменный критерий Шервуда $Sh_{дкон}$ входящих в последнее уравнение (7) определяющих критериев подобия, на рис. 1 представлены экспериментальные данные [3, 4] для исследованной системы в безразмерных координатах $Sh_{д} - Re_{д}$: Рис. 1 - Зависимость $Sh_{дкон} - Re_{д}$ 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 капль на коэффициенты массопередачи в каплях при их свободном полете и по поверхности вращающегося конуса в безразмерной форме можно записать одной частной степенной критериальной зависимостью $Sh_{дкон} = A_1 \cdot Re_{д}^{1,72}$. (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 $Sh_{дкон}$ [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 капль [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 $Sh_{дкон} = A_2 \cdot \sin \varphi^{1,00}$. (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 $Sh_{дкон} = 0,0454 \cdot Re_{д}^{1,72} \cdot \sin \varphi^{1,00}$,

(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 $\pm 15\%$. В развернутой форме критериальное уравнение (10) преобразуется к виду: $k_{\text{дкон}} = 0,0454 \cdot U^{1,72} \cdot d^{0,72} (\rho_d / \mu_d)^{1,72} D^{1,00} (\sin \varphi)^{1,00}$. (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.