При расчете и проектировании центробежных экстракторов, обладающих высокими технико-экономическими показателями по сравнению с гравитационными экстракторами [1, 2], необходимо иметь надежные методы расчета коэффициентов массопередачи в дисперсной и сплошной фазах, полученных при движении одиночных капель во вращающейся жидкости. В связи со сложностью аналитического решения уравнений движения и массопередачи внутри и вокруг движущейся капли, расчетные уравнения для коэффициентов массопередачи получены на основе экспериментальных исследований процесса массопередачи при движении одиночных капель в равномерно вращающейся жидкой среде. Теоретические решения внутренней и внешней задачи массообмена в дисперсных системах в настоящее время получены для твердых частиц, капель и пузырей, только для частных случаев их движения в поле тяжести, в модельных приближениях. Экспериментальные исследования процесса массопередачи внутри и вокруг одиночных капель, движущихся во вращающейся невязкой жидкой среде, были проведены ранее в работе [3], для различных жидких систем с лимитирующим сопротивлением массопередаче в дисперсной и сплошной фазах. На основе теоретического анализа дифференциального уравнения движения жидкости в поле действия центробежных сил, уравнений конвективной диффузии и массопередачи при движении одиночных капель в сплошной невязкой жидкой среде авторами [3] впервые получена обобщенная критериальная зависимость для коэффициентов массопередачи в одиночные капли (из капель) в виде: (1) Здесь - критерий Шервуда (Нуссельта - Nu); - критерий Рейнольдса; - центробежный критерий Фруда; - критерий Шмидта (Прандтля - Pr). Математической обработкой экспериментальных данных в жидких системах в работе [3] получены два критериальных уравнения для частных случаев лимитирующего сопротивления в дисперсной и сплошной фазах в условиях невязкого обтекания капель: - для коэффициентов массопередачи внутри капель на шести невязких системах с лимитирующим сопротивлением в дисперсной фазе: (2) - для коэффициентов массопередачи в сплошной фазе на четырех невязких системах с лимитирующим сопротивлением в сплошной фазе: (3) Как видно, полученные формулы для дисперсной (2) и сплошной фаз (3) имеют одинаковые показатели степеней при всех критериях подобия, отличие только в свободных коэффициентах A_1 , что свидетельствует об аналогичном характере влияния гидродинамических и массообменных критериев подобия на процесс массопередачи внутри и вокруг капли в исследованных системах. Для практического использования формулы (2) в инженерных расчетах, в частности, при определении радиальных геометрических размеров зон контакта и сепарации фаз центробежных экстракторов, в работе [4] была предпринята попытка обобщения экспериментальных данных [3] для коэффициентов массопередачи в каплях в критериальной форме, полученной ранее [5] на основе подобных

преобразований уравнений движения Навье-Стокса, уравнений неразрывности и уравнения массопередачи через подвижную поверхность раздела капля - жидкая среда: . (4) Кроме традиционных определяющих критериев Re_d , Sc_d и симплекса вязкостей $\mu d/\mu_c$, содержащихся в известных теоретических решениях и моделях массопередачи внутри и вокруг капель для поля тяжести, предложенное в [5] критериальное уравнение (4) содержит дополнительный критерий Экмана Ek , учитывающий специфические особенности вращающейся жидкости, в частности, возможность двумерного (столбчатого) обтекания капель или твердых частиц под действием центробежных сил в невязких жидких средах [6, 7]. Обработкой экспериментальных данных [3] в системах с лимитирующим сопротивлением в дисперсной фазе, в работе [4] получено обобщенное критериальное уравнение для коэффициентов массопередачи внутри капель, движущихся в равномерно вращающейся жидкости: . (5) Уравнение (5) удовлетворительно описывает опытные данные [3] для шести невязких систем с лимитирующим сопротивлением в дисперсной фазе, в диапазоне критериев Re_c от 200 до 1000 и Sc_d от 308 до 1042, соответствующих области движения и массопередачи крупных сплюснутых капель. Из анализа структуры уравнений (4) и (5) видно, что критерий Ek не входит в число значимых определяющих критериев полученного критериального уравнения (5), что свидетельствует об отсутствии заметного влияния эффектов двумерности на процесс массопередачи внутри крупных сплюснутых капель в исследованных системах. Этот вывод согласуется также с данными [8], в которой, на основе экспериментального исследования скорости движения крупных сплюснутых капель во вращающихся невязких жидкостях, не было обнаружено влияния специфического критерия Ek на коэффициенты лобового сопротивления капель, что подтверждает вывод о возможности пренебрежения влиянием двумерных эффектов обтекания капель на скорость движения и, соответственно, на коэффициенты массопередачи в каплях в исследованной области критериев Re_c и Ek . Как видно, предложенное в работе [4] критериальное уравнение (5), в отличие от уравнения (2), включает классические гидродинамические и массообменные критерии подобия Re_d , Sc_d и симплекс вязкостей $\mu d/\mu_c$, содержащиеся также в известных модельных решениях внутренней задачи массообмена внутри капель и пузырей, а также в эмпирических уравнениях, рекомендованных большинством авторов для обобщения экспериментальных данных по массопередаче в каплях, движущихся в условиях поля тяжести. В частности, структура уравнения (5) и входящие в него критерии подобия идентичны со структурой и определяющими критериями, входящими в циркуляционную модель Левича [9, 10], полученную теоретическим путем для описания коэффициентов массопередачи внутри сферических капель, обтекаемых ламинарными безотрывными (Стоксовыми) линиями тока при $Re_c \ll 1$, а также с турбулентной моделью Хандлоса и Барона [11], полученной в

предположении о полной циркуляции жидкости внутри крупных сплюснутых капель при $Re_c > 100$. В связи с вышеизложенным и с целью получения критериального уравнения массопередачи, удобного в практических расчетах для определения геометрических размеров центробежных экстракторов, в данной работе предпринята попытка обобщения имеющихся экспериментальных данных о коэффициентах массопередачи в сплошной фазе [3], полученных при движении одиночных капель во вращающейся жидкости на 4 невязких системах с лимитирующим сопротивлением в сплошной фазе, с использованием предложенного ранее [4] обобщенного критериального уравнения (4). Физико-механические свойства жидких систем, исследованных в [3], представлены в таблице 1. Таблица 1 - Физико-механические свойства исследованных систем [3] с лимитирующим сопротивлением в сплошной фазе №№ систем Система: (дисперсная фаза - распределяемый компонент - сплошная фаза) Плотность фаз, кг/м³ ρ_c рд 1 Вода - уксусная кислота - бензол 882 997 2 Вода - уксусная кислота - толуол 870 997 3 Вода - уксусная кислота - диизопропиловый эфир 730 997 4 Четыреххлористый углерод - пропионовая кислота - вода 1000 1594 Окончание таблицы 1 №№ систем Вязкость фаз, Па.с Коэф-т диффузии, м²/с D_c .10⁹ Критерий Sc_c Пов. натяжение, Дж/м² σ .10³ μ .10³ μ .10³ 1 0,634 1,00 1,92 374 30,0 2 0,578 1,00 2,44 272 31,43 3 0,348 1,00 2,45 195 16,99 4 1,148 0,962 0,944 1216 20,24 С целью оценки возможности использования критериального уравнения (4) для обобщения экспериментальных данных [3], а также для сравнения их с известными модельными решениями для поля тяжести [12, 13], на рис. 1 и 2 представлены опытные данные для коэффициентов массопередачи в сплошной фазе k_c в исследованных системах в безразмерных координатах $Sh_c - Re_c$. Штриховыми линиями (X_1, X_2, X_3, X_4) на рис. 1, 2 приведены также значения критерия Sh_c , рассчитанные по уравнению Хигби [12] для исследованных систем: . (6) Данное уравнение, основанное на пенетрационной модели массопередачи (проницания), получено в предположении наличия полной циркуляции частиц жидкости или газа внутри и вокруг движущихся в поле тяжести капель и пузырей. Модель Хигби ограничивает скорость массопередачи в сплошной фазе сверху. Рис. 1 - Зависимость Sh_c от Re_c для систем № 1 и 3 [3]: Л1 и Л3 - расчет по уравнению Левича (7); X_1, X_3 - расчет по уравнению Хигби (6) для соответствующих систем Рис. 2 - Зависимость Sh_c от Re_c для систем № 2 и 4 [3]: Л2 и Л4 - расчет по уравнению Левича (7); X_2, X_4 - расчет по уравнению Хигби (6) для соответствующих систем Штрихпунктирными линиями (Л1, Л2, Л3, Л4) на рис. 1 и 2 изображены результаты расчета критерия Sh_c по теоретическому решению Левича [13] для указанных систем: . (7) Уравнение (7), известное как диффузионная модель Левича [8], получено на основе теоретического решения уравнения массопередачи в сплошной фазе за счет молекулярной диффузии между ламинарными замкнутыми линиями тока в пределах диффузионных пограничных слоев, образующихся внутри и вокруг

сферических капель и пузырей при $Re_c = 1$. Модель Левича (7) ограничивает скорость массопередачи в сплошной фазе снизу. Как видно из рис. 1 и 2, во всех исследованных системах коэффициенты массопередачи при движении капель во вращающейся жидкой среде имеют качественное и количественное отличие от известных для поля тяжести моделей Хигби и Левича. Как и следовало ожидать, диффузионная модель Левича (7) дает заниженные значения коэффициентов массопередачи, а пенетрационная модель Хигби (6) - завышенные. Подобные результаты о качественном и количественном расхождении экспериментальных значений коэффициентов массопередачи в каплях, движущихся во вращающейся жидкости в системах с лимитирующим сопротивлением в дисперсной фазе, от соответствующих коэффициентов массопередачи, рассчитанных по известным теоретическим моделям массопередачи внутри капель, полученным в условиях поля тяжести, были отмечены в работе [4]. Эти данные подтверждают сделанные ранее [3, 4] заключения о некорректности использования полученных в условиях поля тяжести моделей и уравнений для коэффициентов массопередачи при движении одиночных капель и пузырей во вращающейся жидкой среде в условиях действия центробежных сил. Как следует из данных на рис. 1 и 2, в пределах каждой из исследованных систем экспериментальные данные для коэффициентов массопередачи в сплошной фазе можно описать частной критериальной зависимостью вида $Sh_c = A_2 \cdot Re_c^{1,72}$. (8) Такая же частная степенная зависимость с тем же показателем степени при критерии Рейнольдса (Re_d) была получена в работе [4] в результате обработки опытных данных [3] для коэффициентов массопередачи внутри капель k_d , движущихся во вращающейся невязкой жидкости при лимитирующем сопротивлении в дисперсной фазе. Это свидетельствует об аналогичном превалирующем характере влияния на процесс массопередачи гидродинамической картины движения частиц жидкости вблизи поверхности раздела фаз как внутри, так и вокруг капель, движущихся во вращающейся жидкой среде под действием центробежных сил. Возможность обобщения экспериментальных данных [3] в пределах каждой из исследованных систем одной частной обобщенной критериальной зависимостью (8), включающей только гидродинамический критерий подобия Re_c означает, что влиянием критерия Ek на коэффициенты массопередачи в сплошной фазе в исследованных системах можно пренебречь. Этот вывод согласуется с данными [4], в которой также не было обнаружено влияния специфического критерия Ek на определяемый критерии Sh_d внутри капель в невязких системах с лимитирующим сопротивлением в дисперсной фазе в области промежуточных и высоких критериев Re_c , что подтверждает о возможности пренебрежения влиянием двумерных эффектов обтекания капель на процесс движения и массопередачи в центробежных аппаратах в исследованных режимах движения капель [3]. Математической обработкой опытных данных для указанных систем

получено, что влияние массообменного критерия Sc_c на критерий Sh_c можно выразить частной линейной зависимостью: $Sh_c = A_3 \cdot Sc_c^{1,00}$, (9) из которого следует, что коэффициент массопередачи в сплошной фазе k_c не зависит от коэффициента молекулярной диффузии D_c , т.е. $k_c \sim D_c^0$. Эта частная зависимость качественно совпадает с турбулентной моделью массопередачи в каплях Хандлоса и Барона [11], что, на наш взгляд, свидетельствует о преобладающей роли конвективного переноса на процесс массопередачи в сплошной фазе, а не молекулярной диффузии в пределах турбулентного пограничного слоя вокруг крупных сплюснутых капель при их движении во вращающейся невязкой жидкости, в исследованной области критериев Re_c и Sc_c . С учетом полученных частных зависимостей (8) и (9), и с целью оценки точности аппроксимирующего уравнения (4) для описания коэффициентов массопередачи в сплошной фазе, на рис. 3 представлена корреляционная зависимость экспериментальных значений критерия Sh_c от соответствующих значений безразмерного комплекса $Re_c^{1,72} Sc_c^{1,00}$ в исследованных системах [3]. Рис. 3 - Сравнение экспериментальных данных [3] по массопередаче в сплошной фазе в системах № 1, 2, 3, 4 с обобщающим уравнением (10)

Обработкой полученных экспериментальных данных методом наименьших квадратов получено, что опытные данные для коэффициентов массопередачи вокруг капель, движущихся в равномерно вращающейся невязкой жидкости в четырех системах [3] с лимитирующим сопротивлением в сплошной фазе можно описать обобщенным критериальным уравнением: (10) В отличие полученного в работе [4] критериального уравнения (5) для коэффициентов массопередачи внутри капель, уравнение (10) для коэффициентов массопередачи в сплошной фазе не включает в числе определяющих критериев безразмерный симплекс вязкостей μ_d/μ_c , входящий в исходное уравнение (4). На наш взгляд, этот факт обусловлен тем, что влияние гидродинамической картины обтекания на скорость массопередачи в сплошной фазе в данном случае учитывается входящим в данное уравнение (10) критерием Рейнольдса Re_c . Последний зависит от вязкости жидкости сплошной фазы μ_c и, как определяющий критерий, практически полностью учитывает реальную картину движения частиц жидкости и соответствующее поле распределения концентраций в сплошной жидкости вблизи подвижной границы раздела фаз для процесса движения и массопередачи в центробежном экстракторе. Полученное критериальное уравнение (10) удовлетворительно описывает опытные данные всех исследованных систем [3] в области изменения определяющих критериев Re_c от 250 до 1400 и Sc_c от 195 до 1216. Как следует из рис. 3, разброс экспериментальных данных от уравнения (10) не превышает $\pm 12,5\%$. При раскрытии входящих в уравнение (10) критериев подобия можно получить зависимость, позволяющую непосредственно определить значения коэффициентов массопередачи в сплошной фазе через физико-механические и

геометрические параметры исследуемых рабочих систем: $k_c = 1,21 \cdot 10^{-5} \cdot w^{1,72} d^{0,72} \rho^{0,72} \mu^{-0,72}$. (11) Из последнего уравнения следует, что коэффициенты массопередачи в сплошной фазе при движении одиночных капель в равномерно вращающейся невязкой жидкости в исследованных жидких системах с лимитирующим сопротивлением в сплошной фазе, зависят от диаметра и скорости движения капель, а также от вязкости и плотности жидкости сплошной фазы.