

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПУЛЬСАЦИОННОЙ ЭКСТРАКЦИОННОЙ КОЛОННЫ

© 2021 г. С. А. Карпов¹, В. Н. Брендаков^{1,*}, К. А. Иванов¹, А. А. Журавлев²

¹ Северский технологический институт филиал НИЯУ “МИФИ”, Северск, 636070, Россия

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, 634036, Россия

*e-mail: vnbrendakov@mephi.ru

Поступила в редакцию 20.04.2021 г.

После доработки 22.04.2021 г.

Принята к публикации 27.04.2021 г.

В статье представлены результаты математического моделирования процесса противоточной пульсационной экстракции в аппарате колонного типа с насадками. Был проведен анализ рабочих параметров процесса экстракции в системе жидкость—жидкость, и рассмотрен набор факторов, которые оказывают существенное влияние как на отдельные этапы процесса экстракции, так и на структуру процесса в целом. Для описания процесса массообмена в системе жидкость—жидкость использовалась диффузионная модель, содержащая два критических параметра, коэффициент объемной массопередачи и коэффициент продольной диффузии. Ввиду отсутствия достоверных данных о количественном значении этих параметров для рассматриваемой конструкции экстрактора, и невозможности определить их экспериментальным путем, в работе сделана попытка получить необходимые данные путем численных исследований. Используя интегральные характеристики процесса экстракции, осредненные по всему объему колонны, и критериальные зависимости, характеризующие гидродинамические, тепловые и массообменные условия экстракции, были получены регрессионные зависимости для рабочих параметров процесса экстракции в виде функций от входных управляющих факторов. Учитывая полученную информацию, была организована рекурсивная вычислительная схема по определению основных выходных параметров процесса экстракции. Результаты расчетов по созданной математической модели можно использовать в практической работе для оптимизации режимов работы существующих аппаратов такого типа.

Ключевые слова: экстракция, массообмен, концентрация, диффузионная модель, критерии подобия, параметры модели, численный метод, оптимизация

DOI: 10.1134/S2304487X21020061

1. ВВЕДЕНИЕ

Процесс экстракции является самым эффективным методом разделения элементов в жидкой фазе. От других методов извлечения и разделения процесс экстракции отличается такими достоинствами, как избирательность и высокая эффективность, низкие рабочие температуры, извлечение вредных примесей и ценных компонентов из разбавленных растворов, возможность разделения смесей, которые состоят из азеотропных смесей и близко кипящих компонентов, выгодное сочетание с ректификацией, химическим осаждением, а также относительная простота аппаратного оформления, и возможность полной автоматизации ведения процесса [1].

Жидкостная экстракция — это массообменный процесс, который обеспечивает перераспределение компонентов между двумя несмешивающимися жидкими фазами, очень часто это водная и органическая субстанции, для избирательного

извлечения ценных компонентов из раствора, их концентрирования и получения продукта необходимой чистоты. Таким образом, экстракционный процесс можно рассматривать как последовательный ряд определенных операций: непосредственно сама экстракция — извлечение из водного раствора, называемого исходным раствором, ценного компонента; промывка — это извлечение из органического раствора, называемого экстракт, случайно захваченных нецелевых компонентов; реэкстракция — выделение ценного продукта из экстракта и непосредственная подготовка употребленного экстрагента для повторного использования путем удаления продуктов разложения экстрагента и возможного подкисления. Каждая операция экстракционного процесса предусматривает несколько стадий контакта и происходит в одном или нескольких последовательно расположенных аппаратах. С другой стороны, иногда несколько операций — экстракция,

промывка одной из фаз, разделение, могут совмещаться в одном аппарате.

Высокая эффективность работы экстракционной колонны возможна только при обеспечении достаточной турбулентности движения фаз. А также при развитой поверхности массообмена, при возможно высокой задержке дисперсной фазы в колонне, равномерном распределении фаз по сечению колонны и минимальном продольном перемешивании. Для систем жидкость–жидкость создать необходимую степень турбулентности только скоростью потока невозможно, потому что значительное время пребывания реагентов в аппарате потребует высоты реакторов несколько десятков метров. Колебательное движение реагентов со скоростью в несколько раз больше линейной скорости потока формирует в колонне режим развитой свободной турбулентности, при котором скорость массопередачи будет определяться коэффициентом турбулентной диффузии, который на несколько порядков больше коэффициента молекулярной диффузии. Это повышает эффективность колонны независимо от скорости потока. Достижение необходимой степени равномерности распределения реагентов по сечению достигается с помощью тарельчатых насадок, причем наиболее успешно при использовании тарелок типа КРИМЗ.

Адекватная математическая модель процесса экстракции дает возможность решать многие задачи при проектировании оборудования, управлении технологическим процессом, прогнозировании оптимальных режимов работы каскада экстракционных колонн, с целью получения выходных потоков с заданными характеристиками в зависимости от расходов и составов входных потоков. Сложность математического моделирования экстракционных процессов в колонных аппаратах требует новых подходов к обоснованию физико-химических процессов и использование современных математических методов.

2. ФИЗИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе рассматривается процесс экстракции системы жидкость–жидкость, реализуемый в экстракционной противоточной пульсационной колонне с насадками типа КРИМЗ.

В современном ядерном топливном цикле (ЯТЦ) существуют различные способы получения оксидов урана из природного урана или отработанного топлива. На Радиохимическом заводе АО “СХК” используется технология экстракционного аффинажа. Суть технологии заключается в процессе растворения концентратов урана и последующей экстракционной очистки [2]. В жидкостной экстракции одной фазой является водный раствор, а второй — органическая жидкость.

Экстракционная переработка растворов основана на свойствах некоторых органических веществ (экстрагентов), которые не смешиваются с водой и могут селективно извлекать ценные составляющие (на урановом цикле — уран (U)). При контакте водных и органических растворов урана и трансурановых примесей, продуктов деления, которые находятся в растворах в разнообразной форме — в виде соли, кислоты, катиона, аниона, распределяются между водной и органической фазами в зависимости от целого ряда условий проведения процесса экстракции. Эти условия можно подобрать таким образом, чтобы количественно извлечь уран, оставив плутоний, примеси и продукты деления в водной фазе.

Аппарат, предназначенный для реализации процесса пульсационной экстракции в системе жидкость–жидкость, представляет собой сложную техническую систему (рис. 1).

К основным технологическим характеристикам экстракционного процесса можно отнести следующие коэффициенты [3]:

- коэффициент распределения (K_p) — отношение концентраций полезного вещества в разных фазах, концентрации вещества в органической фазе и концентрации вещества в водной фазе;

- коэффициент извлечения (M) экстрагируемого вещества — произведение соотношения объемов фаз, органической и водной, и коэффициента распределения;

- коэффициент разделения (β) — количественная характеристика полноты разделения двух веществ, представляет собой отношение коэффициента распределения хорошо экстрагируемого вещества к коэффициенту распределения плохо экстрагируемого вещества в одном экстракционном процессе.

Для экстракционной колонны, когда одна из фаз является сплошной (органическая), а другая распределена внутри нее в виде капель (водная), большое значение имеет внешний подвод энергии через пульсационный режим работы аппарата. Процесс массообмена между фазами имеет различную физическую природу для каждой из них.

В дисперсной фазе процесс массоотдачи в значительной степени зависит от такого параметра как диаметр капли. В работе [4] отмечается, что в случае использования насадки КРИМЗ, диаметр капли не зависит от диаметра колонны и может быть вычислен по формуле, которая определяет диаметр капли как функцию нескольких переменных (частота вынужденных пульсаций, амплитуда вынужденных пульсаций, межфазное поверхностное натяжение, плотность сплошной среды и технических параметров тарелки КРИМЗ). Влияние интенсивности пульсаций на коэффи-

коэффициент массопередачи рассмотрено в работе [5], здесь показано, что при исключении влияния гидродинамических помех коэффициент массопередачи уменьшается с ростом интенсивности пульсаций. Это связано не только с уменьшением диаметра капли и соответственно ее боковой поверхности, но и принципиально разным механизмом подвода ключевого компонента из объема капли к ее поверхности. В крупных каплях наблюдается турбулентное циркуляционное течение внутри капли, которое способствует доставки ключевого компонента к поверхности капли и его участия в массообменном процессе. В более мелких каплях доставка ключевого компонента к поверхности капли, возможно, происходит в основном за счет диффузии, что снижает массообменный процесс на границе раздела фаз. Как отмечается в работе [6], несмотря на все эти явления, наблюдается увеличение эффективности работы пульсационной колонны с ростом интенсивности пульсаций. Это можно объяснить только резким ростом суммарной поверхности межфазного контакта за счет роста числа капель. В конечном итоге уменьшение размера капли дисперсной фазы имеет положительный эффект.

Кроме диаметра капли на процесс массообмена в противоточной экстракционной пульсационной колонне с тарелками типа КРИМЗ для системы жидкость–жидкость оказывают влияние такие характеристики гидродинамики потока как:

– Скорость движения капли. Это скорость движения дисперсной фазы в неподвижной сплошной. Для противоточной колонны суммарная производительность всегда должна быть меньше теоретической скорости движения капли. Движение частиц в пульсирующем потоке описывается сложным дифференциальным уравнением. Наиболее точное аналитическое решение такого уравнения приводится в работе [7], по результатам которого можно сказать, что вследствие пульсаций можно ожидать замедления движения капель, но это замедление сравнительно невелико. В аппаратах с насадкой КРИМЗ было получено экспериментальное подтверждение [8], что замедление при различных режимах течения не превышает 2% от скорости капли в аппарате без пульсаций.

– Задержка дисперсной фазы. Это доля объема, занятого дисперсной фазой, определяется как отношение удельной нагрузки по дисперсной фазе к действительной скорости капли. Задержка дисперсной фазы влияет на два важных параметра экстракционной колонны: поверхность контакта фаз и время пребывания реагентов, определяющих эффективность работы аппарата. В пульсационных колоннах увеличение задержки можно получить как при увеличении нагрузки, особенно по дисперсной фазе, так и с ростом ин-

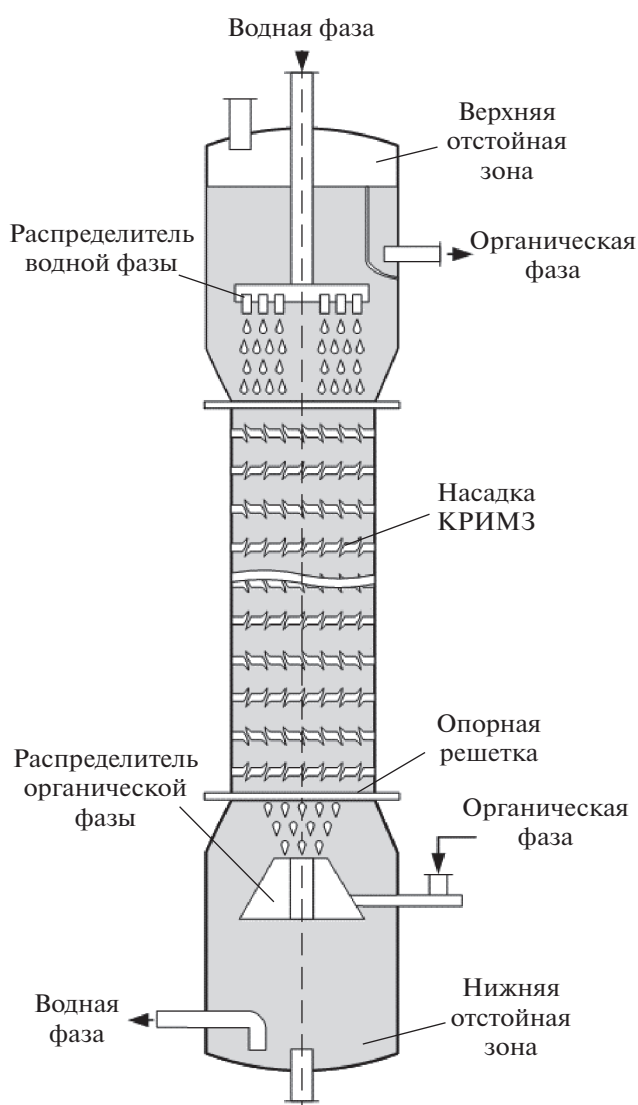


Рис. 1. Экстракционная колонна с внутренними конструктивными элементами.

тенсивности пульсаций. В первом случае по мере накопления капель в колонне они интенсивно коалесцируют и происходит обращение фаз. Во втором случае с ростом интенсивности пульсаций уменьшается размер капли, и соответственно скорость ее движения. Конструктивные элементы насадки КРИМЗ и режимные параметры течения влияют на задержку дисперсной фазы косвенно, вследствие изменения скорости движения капли. Для устойчивого режима работы в реальных условиях задержка дисперсной фазы не должна превышать 30%.

– Предельная производительность. Удельная производительность колонны, при которой задержка дисперсной фазы достигает критического значения и возможна инверсия фаз, называется предельной, или нагрузкой захлебывания. В

пульсационной колонне с насадкой КРИМЗ снижение нагрузки захлебывания при росте интенсивности пульсаций связано только с уменьшением диаметра капель, так как сама насадка не оказывает дополнительного сопротивления на скорость движения капель. По результатам из работы [9] видно, что при одинаковых условиях колонна с насадками КРИМЗ в 1.5–3 раза производительней колонны с другими типами насадок. Рабочая производительность экстракционной пульсационной колонны в реальных условиях обычно принимается равной 60–80% от рассчитанной нагрузки захлебывания.

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной работе приводятся результаты математического моделирования пульсационной экстракционной колонны. Выполнено численное решение задачи моделирования с помощью двух подходов. В первой части решение задачи проводить на основе осредненных по объему аппарата параметров и критериальных зависимостей с учетом кинетики процесса. Во втором подходе проводилось численное решение дифференциальных уравнений второго порядка с частными производными в физических переменных скорость, концентрация.

Сначала модель процесса экстракции в системе жидкость–жидкость строится на основе установления простых эмпирических соотношений между составами равновесных фаз. Для экстракционной колонны, когда одна из фаз является сплошной, а другая распределена внутри нее в виде капель, большое значение имеет внешний подвод энергии через пульсационный режим работы аппарата. Это влияние можно оценить через интенсивность пульсаций:

$$I = fa, \quad (1)$$

где f – частота пульсаций, a – амплитуда пульсаций.

Процесс массообмена между фазами имеет различную физическую природу для каждой из них. Сделаем оценку коэффициентов массоотдачи для дисперсной и сплошной фаз.

В дисперсной фазе процесс массоотдачи в значительной степени зависит от такого параметра как диаметр капли d_k . В работе [4] отмечается, что в случае использования насадки КРИМЗ, диаметр капли не зависит от диаметра колонны и может быть вычислен по формуле для среднего объемно-поверхностного диаметра капли:

$$d_k = 0.135F \left(\frac{\sigma}{\rho_c} \right)^{0.6} I^{-1.0}, \quad (2)$$

где σ – поверхностное натяжение на границе раздела фаз, ρ_c – плотность сплошной среды, F – доля свободного сечения насадки, для которой можно записать:

$$F = 4a_{otb}^2 \sin(\alpha)(2 + \cos(\alpha))(N_{otb}/\pi D_T^2), \quad (3)$$

где a_{otb} – меньшая сторона отверстия в насадке КРИМЗ, α – угол наклона направляющих лопаток, N_{otb} – число отверстий на насадке КРИМЗ, D_T – диаметр тарелки.

В зависимости от получаемого диаметра капли можно использовать несколько формул для вычисления коэффициента массоотдачи по дисперсной фазе.

Для $d_k < 10^{-4}$ м можно записать:

$$\beta_d = \frac{2\pi^2 D_d}{3d_k}, \quad (4)$$

где D_d – коэффициент молекулярной диффузии в дисперсной фазе.

Для размера капли $5 \cdot 10^{-4}$ м $< d_k < 3 \cdot 10^{-3}$ м формула для расчета коэффициента массоотдачи по дисперсной фазе имеет вид:

$$\beta_d = \frac{17.9 D_d}{d_k}. \quad (5)$$

В случае, если $8 \cdot 10^{-3}$ м $< d_k < 1.5 \cdot 10^{-2}$ м можно записать:

$$\beta_d = \frac{0.00375 U_0}{1 + \frac{\mu_d}{\mu_c}}, \quad (6)$$

где U_0 – скорость подъема капли, μ_d , μ_c – вязкость дисперсной и сплошной фаз.

Для капель с размером в диапазоне $3 \cdot 10^{-3}$ м $< d_k < 8 \cdot 10^{-3}$ м движение жидкости внутри капли не является полностью турбулентным, что имеет место для более крупных капель. Но вместе с тем, в отличие от более мелких капель, наблюдаются отклонения от сферической формы и проявляются эффекты осцилляции капель. В этом случае некоторые авторы предлагают заменить в расчетной формуле коэффициент молекулярной диффузии на коэффициент турбулентной диффузии:

$$\beta_d = \frac{17.9 D_t}{d_k}, \quad (7)$$

где $D_t = 0.00057 Re_d D_d$ – коэффициент турбулентной диффузии, Re_d – модифицированное число Пекле, для которого имеет место:

$$Pe_d = \frac{d_k U_0}{D_d \left(1 + \frac{\mu_d}{\mu_c} \right)}. \quad (8)$$

Для оценки коэффициента массоотдачи в сплошной фазе можно воспользоваться корреляцией Штайнбергера и Трейбала [10]:

$$Sh_c = \frac{\beta_c d_k}{D_c} = Sh' + 0.347(Re \cdot Sc_c^{0.5})^{0.62}, \quad (9)$$

$$Sh' = 2 + 0.569(Gr_c Sc_c)^{0.25} \text{ при } Gr_c Sc_c < 10^8, \quad (10)$$

$$Sh' = 2 + 0.0254(Gr_c Sc_c)^{\frac{1}{3}} Sc_c^{0.244} \text{ при } Gr_c Sc_c > 10^8, \quad (11)$$

$$Re = \frac{U_0 d_k \rho_c}{\mu_c}, \quad Sc_c = \frac{\mu_c}{\rho_c D_c}, \quad Gr_c = \frac{g d_k \rho}{\rho_c (\rho_c / \mu_c)^2}, \quad (12)$$

где D_c — коэффициент молекулярной диффузии в сплошной фазе, $\Delta \rho = \rho_c - \rho_d$.

После расчета коэффициентов массоотдачи в дисперсной и сплошной фазах можно оценить коэффициент массопередачи из формулы:

$$\frac{1}{K_m} = \frac{1}{\beta_c} + \frac{m}{\beta_d}, \quad (13)$$

где m — тангенс угла наклона равновесной зависимости.

Для оценки процесса перехода вещества из сплошной фазы в дисперсную можно записать уравнение массопередачи:

$$W = K_m F (y_c - y_c^*), \quad (14)$$

где W — количество вещества, переносимого в единицу времени, F — поверхность соприкосновения фаз, y_c — концентрация вещества в сплошной фазе, y_c^* — равновесная концентрация у поверхности раздела фаз.

Такой подход к моделированию процесса экстракции можно использовать для получения качественной приближенной оценки параметров и режимов работы аппарата. Но даже такая информация имеет важное значение при создании более сложной и полной математической модели экстракционной колонны. Получение априорной информации экспериментальным путем связано с большими трудностями, как измерить размер и скорость витания капель дисперсной фазы, оценить режим течения сплошной фазы, степень ее турбулизации в присутствии дисперсной фазы и многое другое. Расчеты такого порядка позволяют подготовить исходные данные для построения диффузионной модели. Например, расчетное значение коэффициента массопередачи.

Процесс экстракции в системе жидкость—жидкость во многом определяется структурой потока. В работе, для описания реальной структуры потока, выбрана, широко применяемая в аппаратах такого типа, диффузионная модель с коэффициентом продольного перемешивания. Для описания массообменного процесса в аппарате противоточного типа в системе жидкость—жидкость,

при условии ограниченной растворимости фаз, и допущением о высокой степени поперечного диффузионного перемешивания, можно записать систему дифференциальных уравнений второго порядка в виде:

$$\frac{\partial(C_d)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(U_d C_d) = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_d \frac{\partial(C_d)}{\partial x} \right) + J, \quad (15)$$

$$\frac{\partial(C_c)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(U_c C_c) = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_c \frac{\partial(C_c)}{\partial x} \right) - J, \quad (16)$$

где C_d , C_c — удельная массовая концентрация ключевого компонента в дисперсной и сплошной фазе соответственно, U_d , U_c — средние по сечению значения скорости дисперсной и сплошной фазы соответственно, D_d , D_c — коэффициенты продольного перемешивания для дисперсной и сплошной фазы соответственно, J — удельный поток массообмена.

Для расчета удельного потока массообмена используем уравнение массопередачи:

$$J = K_m (C_d^* - C_d), \quad (17)$$

где K_m — объемный коэффициент массопередачи, C_d^* — концентрация насыщения в дисперсной фазе.

Дополним эту систему дифференциальных уравнений соответствующими граничными условиями:

$$\text{На нижней границе } C_d = 0; \frac{\partial C_c}{\partial x} = 0; \quad (18)$$

$$\text{На верхней границе } C_c = C_{bx}, \frac{\partial C_d}{\partial x} = 0. \quad (19)$$

Для определений коэффициентов продольной диффузии решаются рекурсивно уравнения, взятые из работы В.В. Кафарова [10].

$$C(x) = C_0 \exp \left[-\frac{U}{D} (H - x) \right]. \quad (20)$$

На основании найденного распределения концентраций находим значения коэффициентов продольной диффузии, и таким образом замыкаем систему уравнений.

4. МЕТОД РЕШЕНИЯ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕШЕНИЙ

Полученная замкнутая система дифференциальных уравнений решалась численно методом установления для получения стационарного решения. В работе использовался метод конечных разностей, записанный в дельта-форме, решаемый численно с помощью прогонки.

На рис. 2 показано типичное распределение концентрации экстрагента по высоте колонны в различных фазах и значении объемного коэффициента массопередачи $K_m = 1.5$.

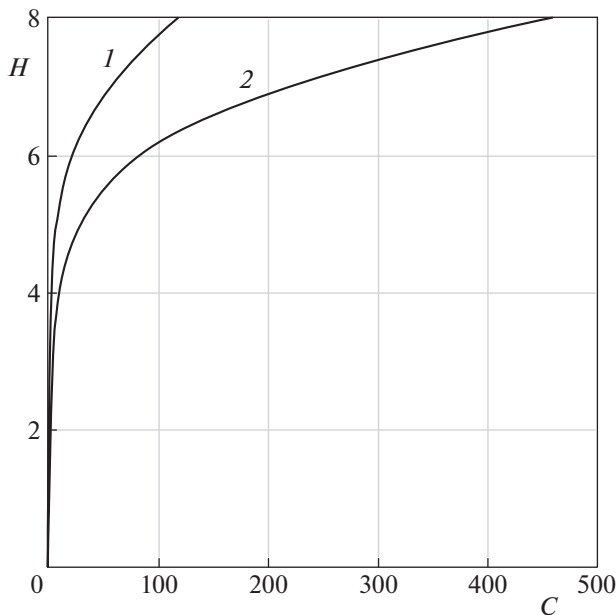


Рис. 2. Зависимость концентрации ключевого компонента (гр./л) по высоте колонны (м): 1 – в дисперсной фазе, 2 – в сплошной фазе.

Из рисунка видно, что для данного режима работы экстракционной колонны достаточно высоты аппарата 6 метров, чтобы обеспечить высокую эффективность процесса экстракции. При заданном соотношении расходов фаз $Q_d/Q_c = 4$ расчеты показали сохранение баланса по массе ключевого компонента.

На рис. 3 показано изменение высоты экстракционной колонны, при условии, что процесс экстракции обеспечен не менее чем на 95%, для различного значения объемного коэффициента массопередачи K_m .

Как видно из рисунка, получается нелинейная зависимость эффективности работы экстракционной колонны от величины объемного коэффициента массопередачи. Можно сделать вывод, что удельные затраты на повышение значения объемного коэффициента массопередачи, для уменьшения размеров экстракционной колонны при сохранении качества ее работы, будут возрастать по мере увеличения K_m .

Необходимо рассматривать другие пути повышения эффективности работ экстракционной колонны, например влияние температуры фаз. Как было показано в работе [11] это направление исследования имеет определенные перспективы.

Хорошо известно, что одним из определяющих факторов процесса жидкостной экстракции, является размер капель дисперсной фазы. В работе [12] рассматривается возможность влияния интенсивности пульсаций на размер формирования капель и на эффективность процесса экстракции

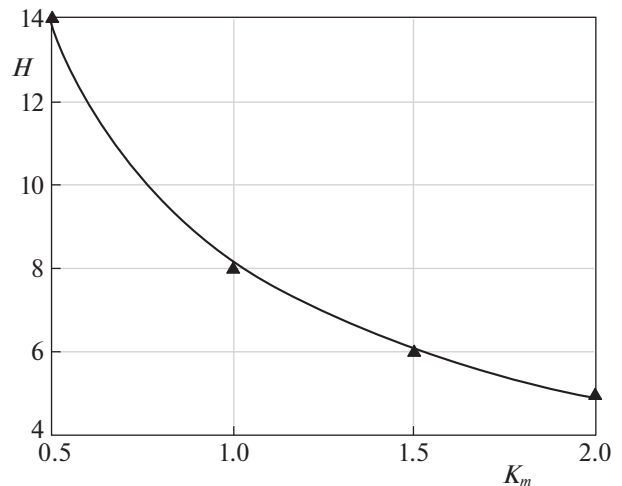


Рис. 3. Зависимость высоты колонны от значения коэффициента K_m , при условии степени экстракции 95%.

в целом. Считаем, что это тоже перспективное направление научных исследований с целью повышения качества, созданное математической моделью пульсационной экстракционной колонны.

Несмотря на все выше сказанное, численные расчеты, выполненные по созданной математической модели пульсационной экстракционной колонны, позволяют проводить параметрическое исследование процесса экстракции, получать новые интересные данные по организации и протеканию экстракции в системе жидкость–жидкость, давать оценку по распределению основных показателей процесса экстракции по высоте колонны.

5. ВЫВОДЫ

Созданная математическая модель пульсационной экстракционной колонны имеет определенные упрощения и ограниченную область применения. Однако, вместе с тем, с ее помощью можно не только сделать качественную оценку основным параметрам процесса экстракции в системе жидкость–жидкость, но и выполнить численное исследование на основе диффузионной модели структуры потока. Дальнейшее совершенствование созданной модели авторы видят в возможности учесть радиальную диффузию потока и влияние температуры на рабочие характеристики процесса экстракции, такие как вязкости и плотности фаз, поверхностное натяжение на границе раздела фаз, скорость массообмена и т.д.

Полученная новая информация может быть использована при проектировании новых перспективных конструкций аппаратов такого типа. Эти данные можно учитывать при оценке стабильности и безопасности работы существующих

конструкций пульсационных экстракционных колонн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ягодин Г.А., Каган С.З., Тарасов В.В. Основы жидкостной экстракции. М.: Химия, 1981. 400 с.
2. Копырин А.А., Карелин А.И., Карелин В.А. Технология производства и радиохимической переработки ядерного топлива: учеб. пособие для вузов. М.: ЗАО "Издательство Атомэнергоиздат", 2006. 576 с.
3. Ягодин Г.А., Синегрибова О.А., Чекмарев А.М. Технология редких металлов в атомной технике: учеб. пособие для вузов / Под ред. Громова Б.В. М.: Атомиздат, 1974. 344 с.
4. Захаров Е.И., Карпачева С.М. Разработка методик расчета и моделирования пульсационных экстракционных колонн // Атомная энергия. 1978. Т. 45. № 5. С. 343–350.
5. Карпачева С.М., Захаров Е.И., Рагинский Л.С., Муратов В.М. Пульсирующие экстракторы. М.: Атомиздат, 1964. 299 с.
6. Карпачева С.М., Захаров Е.И. Основы теории и расчета пульсационных колонных реакторов. М.: Атомиздат, 1980. 256 с.
7. Бояджиев Л., Сапунджиев И. О движении недеформируемой сферической частицы в вертикально осциллирующей жидкости // Теоретические основы хим. технологий, 1970. Т. 4. № 4. С. 597–602.
8. Карпачева С.М., Захаров Е.И. Влияние частоты пульсации на гидродинамические и технологические характеристики пульсационных экстракционных колонн с насадкой КРИМЗ // Журн. прикл. химии, 1975. Т. 48. № 4. С. 806–809.
9. Карпачева С.М., Захаров Е.И. Гидродинамические характеристики экстракционных пульсационных колонн с насадкой КРИМЗ на различных системах // Журн. прикл. химии. 1974. Т. 47. № 2. С. 339–343.
10. Кафаров В.В., Глебов М.Б. Математическое моделирование основных процессов химических производств: учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1991. 400 с.
11. Карпачева С.М., Маймур О.К. Влияние температуры растворов на гидродинамику экстракционной колонны // Атомная энергия, 1985. Т. 58. № 4. С. 246–249.
12. Захаров Е.И., Карпачева С.М. О некоторых вопросах механизма дробления и массопередачи в пульсационных экстракционных колоннах // Атомная энергия. 1977. Т. 42. № 6. С. 473–477.

Vestnik Nacional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta "MIFI", 2021, vol. 10, no. 2, pp. 168–175

Mathematical Model of the Pulsating Extraction Column

S. A. Karpov^a, V. N. Brendakov^{a, #}, K. A. Ivanov^a, and A. A. Zhuravlev^b

^a *Seversk Technological Institute, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Seversk, Tomskaya oblast, 636070 Russia*

^b *National Research Tomsk State University, Tomsk, 634036 Russia*

[#]*e-mail: vnbrendakov@mephi.ru*

Received April 20, 2021; revised April 22, 2021; accepted April 27, 2021

Abstract—The process of countercurrent pulsation extraction in a column-type apparatus with nozzles has been mathematically simulated. The operating parameters of the extraction process in the liquid-liquid system have been analyzed. A set of factors that have a significant impact on both individual stages of the extraction process and the structure of the process as a whole have been considered. A diffusion model, which contains two critical parameters, the coefficient of volumetric mass transfer and the coefficient of longitudinal diffusion, has been used to describe the process of mass transfer in the liquid-liquid system. Because of the lack of reliable data on the quantitative values of these parameters for the considered design of the extractor, and the impossibility of determining them experimentally, an attempt has been made to obtain the necessary data by means of numerical studies. Using the integral characteristics of the extraction process, averaged over the entire volume of the column, and criterion dependences characterizing the hydrodynamic, thermal, and mass transfer conditions of extraction, regression dependences have been obtained for the operating parameters of the extraction process in the form of functions of the input control factors. Taking into account the information received, a recursive computational scheme has been organized to determine the main output parameters of the extraction process. The results of calculations based on the created mathematical model can be used in practical work to optimize the operating modes of existing devices of this type.

Keywords: extraction, mass transfer, concentration, diffusion model, similarity criteria, model parameters, numerical method, optimization

DOI: 10.1134/S2304487X21020061

REFERENCES

1. Yagodin G.A., Kagan S.Z., Tarasov V.V. *Osnovy zhidkostnoy ekstrakcii* [Fundamentals of liquid extraction], Moscow, Himiya Publ., 1981. 400 p.
2. Kopyrin A.A., Karelin A.I., Karelin V.A., *Tekhnologiya proizvodstva i radiokhimicheskoy pererabotki yadernogo topliva: ucheb. posobiye dlya vuzov* [Technology of production and radiochemical processing of nuclear fuel], Moscow, Atomenergoizdat Publishing House, 2006, 576 p.
3. Yagodin G.A., Sinegribova O.A., Chekmarev A.M., *Tekhnologiya redkikh metallov v atomnoy tekhnike: ucheb. posobiye dlya vuzov / pod red. Gromova B.V.* [Technology of rare metals in nuclear technology], Moscow, Atomizdat Publ., 1974, 344 p.
4. Zakharov E.I., Karpacheva S.M., Razrabotka metodik rascheta i modelirovaniya pul'satsionnykh ekstraksionnykh kolonn [Development of methods for calculating and modeling pulsation extraction columns], *Atomnaya Energiya*, 1978. vol. 45, no. 5, pp. 343–350.
5. Karpacheva S.M., Zakharov Ye.I., Raginskiy L.S., Muratov V.M., *Pul'siruyushchiye ekstraktory* [Pulse extractors], Moscow, Atomizdat Publ., 1964, 299 p.
6. Karpacheva S.M., Zakharov Ye.I., *Osnovy teorii i rascheta pul'satsionnykh kolonnykh reaktorov* [Fundamentals of the theory and calculation of pulsating column reactors], Moscow, Atomizdat, 1980, 256 p.
7. Boyadzhiev L., Sapundzhiev I., O dvizhenii nedeformiruyemoy sfericheskoy chastitsy v vertikal'no ostsilliruyushchey zhidkosti [On the motion of a non-deformable spherical particle in a vertically oscillating fluid], *Teoret. osnovy khim. tekhnologiy*, 1970, vol. 4, no. 4, pp. 597–602. (in Russian)
8. Karpacheva S.M., Zakharov E.I., Vliyaniye chastoty pul'satsii na gidrodinamicheskiye i tekhnologicheskiye kharakteristiki pul'satsionnykh ekstraksionnykh kolonn s nasadkoy KRIMZ [Influence of the pulsation frequency on the hydrodynamic and technological characteristics of pulsating extraction columns with KRIMZ packing], *Zhurn. prikl. Khimii*, 1975, vol. 48, no. 4, pp. 806–809. (in Russian)
9. Karpacheva S.M., Zakharov E.I., Gidrodinamicheskiye kharakteristiki ekstraksionnykh pul'satsionnykh kolonn s nasadkoy KRIMZ na razlichnykh sistemakh [Hydrodynamic characteristics of extraction pulsation columns with KRIMZ packing on various systems], *Zhurn. prikl. Khimii*, 1974, vol. 47, no. 2, pp. 339–343. (in Russian)
10. Kafarov V.V., Glebov M.B., *Matematicheskoye modelirovaniye osnovnykh protsessov khimicheskikh proizvodstv: ucheb. posobiye dlya vuzov* [Mathematical modeling of the main processes of chemical production: textbook. manual for universities], Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1991, 400 p.
11. Karpacheva S.M., Maimur O.K., Vliyaniye temperatury rastvorov na gidrodinamiku ekstraksionnoy kolonny [Influence of the temperature of solutions on the hydrodynamics of the extraction column], *Atomnaya energiya*, 1985, vol. 58, no. 4, pp. 246–249. (in Russian)
12. Zakharov E.I., Karpacheva S.M., O nekotorykh voprosakh mekhanizma drobleniya i massoperedachi v pul'satsionnykh ekstraksionnykh kolonnakh [On some questions of the mechanism of crushing and mass transfer in pulsation extraction columns], *Atomnaya energiya*, 1977, vol. 42, no. 6, pp. 473–477. (in Russian)