

УДК 532.5.013.4; 532.73-2
PACS 47.55.D-

Диффузия ПАВ из медленно всплывающей капли (случай малых концентраций)

М. О. Денисова, М. В. Ошмарина

Институт механики сплошных сред УрО РАН
614013, Пермь, ул. Акад. Королёва, 1
email: mod@icmm.ru

Экспериментально изучена начальная стадия процесса экстракции поверхностно-активного вещества (ПАВ) из нерастворимой капли, медленно всплывающей в неподвижной жидкости. Капля зажата в узком вертикальном зазоре, что заставляет ее принимать форму короткого горизонтального цилиндра со свободной боковой поверхностью и плоскими торцами. Последнее обстоятельство позволяет с помощью интерферометра визуализировать структуру возникающих течений и полей концентрации в капле и окружающей среде и проследить их эволюцию. Для выявления специфики наблюдаемых течений и распределений концентрации также исследован случай диффузии ПАВ из неподвижной капли. В результате выполненных измерений определены зависимости характеристик массопереноса в капле от исходной концентрации диффундирующего реагента и времени.

Ключевые слова: диффузия; конвективный массоперенос; всплывающая капля

Поступила в редакцию 06.10.2020; принята к опубликованию 29.10.2020

Diffusion of low-concentration surfactant from the rising drop

M.O. Denisova, M.V. Oshmarina

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS
614013, Acad. Korolev str. 1, Perm, Russia
email: mod@icmm.ru

This paper presents an experimental study of the initial stage of extraction of surfactant from the insoluble drop, which rises slowly in quiescent fluid. The placement of the drop in a narrow vertical gap causes it to take the form of a short horizontal cylinder with a free lateral surface and flat ends. The latter feature makes it possible to use an interferometer for visualizing the structure of the resulting flows and concentration fields inside the drop and surrounding medium and to trace their evolution. The changes in the flow and concentration fields are studied for the case when the low-concentration surfactant is diffused from a quiescent drop. As a result of the performed measurements, the dependences of the characteristics of mass transfer in the droplet on the initial concentration of the diffusing reagent and time were determined.

Keywords: diffusion; convective mass transfer; pop-up droplet

Received 06.10.2020; accepted 29.10.2020

doi: 10.17072/1994-3598-2020-4-29-36

1. Введение

Жидкостная экстракция – это распространенный технологический процесс с участием системы двух взаимно нерастворимых жидкостей, в которой неравновесно распределено искомое вещество. В ходе процесса выбранная фаза (экстрагент) обогащается экстрагируемой компонентой. По сравнению с ректификацией и выпариванием жидкостная экстракция обладает рядом таких преимуществ, как низкая температура технологической операции и малые затраты тепловой энергии, а также возможность выбора высокоселективных экстрагентов. По данным Википедии, на долю экстракции приходится около 20% всех затрат химической промышленности. Наиболее широко экстракция используется в фармацевтической и нефтеперерабатывающей промышленности, а также в атомной энергетике.

Основной технологической установкой для осуществления жидкостной экстракции является экстракционная колонна. Простейшая схема такой колонны включает протяженный по вертикали объем экстрагента, сквозь который всплывает или тонет мелко диспергированная вторая фаза, содержащая искомое вещество. Предполагается, что за время движения капли диффузионным путем отдадут большую часть растворенного вещества, после чего скапливаются около одного из торцов колонны и затем удаляются (периодически или непрерывно). Таким же образом обновляется исходный объем экстрагента.

Ясно, что при использовании подобного подхода основным путем повышения эффективности экстракции является интенсификация массообмена между отдельной каплей и окружающей средой за счет подключения к диффузии дополнительных механизмов, таких как свободно конвективное движение и конвекция Марангони. Целенаправленные действия в этом направлении предпринимаются уже давно и дают неплохие результаты [1].

В основном, выполняемые исследования сводятся к экспериментальному изучению структуры течений, возникающих в капле, причем различными способами – начиная с классического метода светорассеивающих частиц и заканчивая методами ядерно-магнитного резонанса [2]. Эволюция концентрационных полей внутри всплывающей капли изучена существенно хуже, так как этому препятствует ее сферическая форма. Как следствие, исследования носят теоретический характер, основываясь на уравнениях диффузии в неподвижной среде [3] либо на системе уравнений диффузии-конвекции [4]. Отметим, что экспериментально интенсивность массообмена между каплей и окружающей средой независимо от направления диффузии главным образом определяется по изменению концентрации диффундирующего ком-

понента в окружающей среде [5] либо по изменению цвета рН-индикатора [6].

Любопытно, что сосредоточение интереса на механизмах массопереноса из капли оставляет вне поля зрения еще два пути повышения интенсивности экстракции. Первый – это увеличение продолжительности пребывания капли в объеме экстрагента за счет снижения скорости ее всплывания благодаря сближению исходной плотности фаз, второй – увеличение площади поверхности капли за счет изменения ее формы при сохранении объема неизменным. Последнее может быть осуществлено, например, если каплю большого объема поместить в узкий плоский зазор, в котором она принимает форму короткого широкого цилиндра с параллельными торцами. Отметим, что такая форма позволяет использовать для изучения структуры полей концентрации в капле и их эволюции оптические методы [7]. Полученные результаты для подобной «двумерной» капли в дальнейшем можно распространить на случай сферической [8].

Изучение массопереноса из капли цилиндрической формы сближает это перспективное направление интенсификации экстракции с исследованиями гидродинамики и тепломассообмена в области микрофлюидики. Как и в экстракции, основные успехи в микрофлюидике достигаются за счет теоретических исследований и численного моделирования. Так, численно изучена задача о влиянии нерастворимого [9] и растворимого ПАВ [10] на интенсивность движения капли в квадратном микроканале. В [11] численно исследовано движение длинной ньютоновской капли в прямоугольном микроканале в пределе капиллярного числа $Ca \rightarrow 0$. Изучению специфики движения капель в ячейках Хеле-Шоу посвящены работы [12–15].

На создание базы экспериментальных данных для верификации подобных теоретических исследований и направлена данная работа.

2. Методика эксперимента

Объектом исследования являлась эволюция поля концентрации в медленно всплывающей «цилиндрической» капле, расположенной в плоской вертикальной ячейке Хеле-Шоу.

Как правило, при экстракции в технологических процессах в качестве одной из фаз используется вода, а в качестве другой – органические жидкости (керосин, бензол, хлороформ и др.) или их смеси, практически нерастворимые в воде и инертные по отношению к извлекаемым компонентам. Соответственно, в нашем эксперименте в качестве жидкости капли выбрана смесь хлорбензола C_6H_5Cl , бензола C_6H_6 и уксусной кислоты CH_3COOH (диффундирующая компонента смешивается с водой и смесью бензолов в любых соотношениях). Среди жидкостей системы она обладает наименьшим поверхностным натяжением

(ПАВ). Изначально кислота сосредоточена в бинарной смеси. Для создания окружающей среды использованы дистиллированная вода H_2O либо водный раствор хлорида натрия $NaCl$. Концентрация раствора бензола в хлорбензоле составляла 21 % (массовая концентрация), плотность смеси определена с помощью тензиометра «Сигма 701» KSV. Исходная концентрация кислоты C_0 в капле варьировалась от 0.5 до 2 моль/л. Ряд физико-химических параметров (плотность ρ , межфазное натяжение на границе с воздухом σ и водой $\Delta\sigma$, предельная растворимость в воде S) используемых жидкостей при 20°C приведен в таблице.

Параметры используемых жидкостей [16, 17]

Жидкость	ρ , г/см ³	$\sigma/\Delta\sigma$, дин/см	S , %
Хлорбензол	1.107	33.2/38.1	0.05
бензол	0.879	28.9/35.0	0.08
Уксусная кислота	1.049	27.6/0	∞
Хлорид натрия, 0.89 моль/л	1.034	74.0/0	26.5
Хлорид натрия, 1.29 моль/л	1.050	74.6/0	26.5

Исходные плотности базовой смеси и раствора хлорида натрия (при $C_{01}=1.29$ моль/л) равны плотности кислоты.

Рассматриваемый случай равных плотностей интересен тем, что все концентрационные изменения плотности в такой системе жидкостей происходят за счет эффекта контракции. Суть данного эффекта состоит в неаддитивном изменении объема смеси в результате поглощения или диффузии одной из ее компонент либо совершения системой фазового перехода. Причиной контракции служат изменение межмолекулярного расстояния и формирование пространственной структуры (при смене состояния системы) либо «переупаковка» молекул базовой компоненты смеси при появлении или исчезновении второй компоненты. В рассматриваемом случае величина контракционного изменения плотности для смеси, выбранной для создания капли, оказывается почти на порядок меньшей, чем у водного раствора, возникающего вокруг капли при диффузии кислоты.

Еще одной специфической чертой проявления контракции в данной системе служит увеличение плотности жидкостей по обе стороны межфазной границы при диффузии кислоты из капли в воду. Наконец, для систем жидкостей равной исходной плотности необходимо указать на характерное возрастание роли тепловыделения при растворении диффундирующей компоненты в экстрагенте. Несмотря на малость вклада этого процесса в изменение плотности жидкостей системы, это изме-

нение может оказаться спусковым крючком для развития многих гидродинамических явлений.

Визуализация полей концентрации кислоты в капле и ее окрестности выполнена с помощью автоколлимационного интерферометра Физо с внешним резонатором (рис. 1, а) [18]. Для регистрации видеосигнала использована цифровая камера, подключенная к компьютеру. Отметим, что использование интерферометрии в реальном времени позволяет не только изучить динамику концентрационных полей, но и визуализировать структуру течений и проследить их эволюцию (благодаря малым значениям коэффициента диффузии изолинии концентрации «вморожены» в движущийся объем жидкости).

Все опыты были выполнены в соответствии со следующей методикой. Экспериментальная кювета (рис. 1, б) первоначально заполнялась водой или водным раствором хлорида натрия. Затем в полость ячейки с помощью медицинского шприца устанавливалась капля с определенной начальной концентрацией C_0 раствора уксусной кислоты.

Вследствие малой толщины кюветы создаваемая капля принимала форму короткого цилиндра с широким основанием. В эксперименте использовались капли диаметром от 3 до 9 мм.

Тарировочные опыты показали, что переход от одной одноцветной интерференционной полосы к другой соответствовал изменению концентрации уксусной кислоты в смеси хлорбензола и бензола на 0.019 моль/л. Кроме того, опыты выявили ряд особенностей выбранной системы жидкостей в использованном диапазоне начальных концентраций кислоты. В частности, оказалось, что диффузия кислоты из капли происходила без развития конвекции Марангони, появление которой можно было бы ожидать, исходя из результатов работы [19]. Причина заключается в том, что поверхностное натяжение бензола на границе с водой заметно ниже, чем у хлорбензола, в результате чего межфазная граница капли их смеси в отсутствие кислоты состоит преимущественно из молекул бензола. В этой ситуации для оценки межфазного натяжения на границе тройной смеси можно воспользоваться данными для равновесной смеси «бензол – уксусная кислота – вода», из которых видно, что даже существенная вариация концентрации кислоты ведет лишь к незначительному изменению межфазного натяжения (порядка 1–2 дин/см) [20]. Как показали опыты, продолжительная конвекция Марангони в такой системе жидкостей наблюдается лишь при $C_0 > 2.6$ моль/л, что выходит за границы выбранного диапазона.

Отсутствие конвекции Марангони и изменение плотности капли только за счет контракции позволяет избежать неприятностей, связанных с процессом формирования капли. Известно [21], что в экспериментах по изучению экстракции создание капли обычно занимает от нескольких секунд и

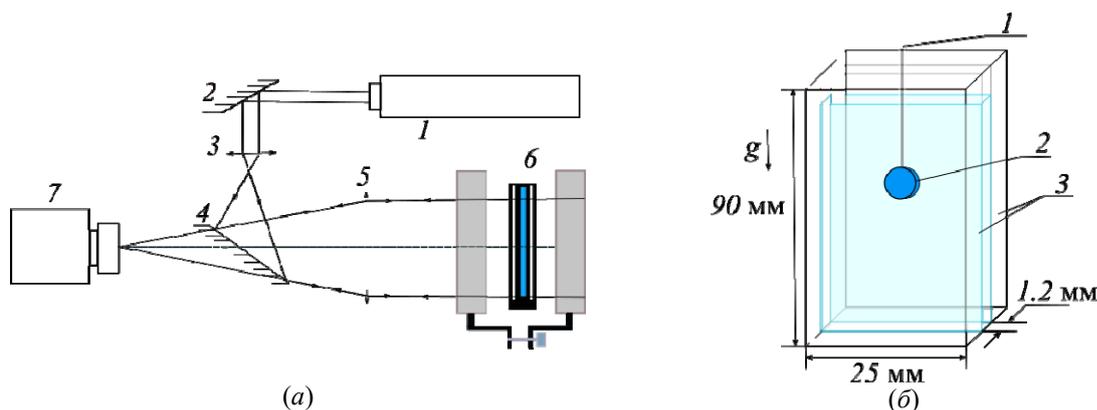


Рис. 1. Экспериментальная установка: а – схема интерферометра: 1 – гелий-неоновый лазер; 2 – поворотное зеркало; 3 – микробиоъектив; 4 – полупрозрачное зеркало, 5 – объектив-коллиматор; 6 – внешний резонатор с кюветой, 7 – цифровая видеокамера; б – схема кюветы: 1 – полая игла (убирается после создания капли); 2 – капля смеси; 3 – плоскопараллельные стекла

больше (в зависимости от ее планируемого объема) и сопровождается активной диффузией растворимой компоненты в окружающую жидкость, в ходе которой капля может потерять до трети начального содержания данной компоненты. Интенсивность массопотока при этом определяется не только величиной коэффициента диффузии, но в значительной степени и скоростью подвода диффундирующей компоненты к границе капли. В свою очередь, скорость обновления смеси вблизи границы определяется совместным действием струи, создающей каплю, конвекции Марангони и свободно конвективного движения за счет перепада плотности, возникающего благодаря диффузии. В нашей ситуации два последних механизма оказываются исключенными из процесса перемешивания капли.

Уменьшив интенсивность струи за счет увеличения времени формирования капли до 15–30 с, можно попытаться максимально сохранить исходное содержание кислоты в центре капли. В таких условиях за начало отсчета времени в опыте был принят момент завершения формирования капли, при этом концентрация в центре капли считалась максимальной и равной исходной концентрации кислоты в смеси.

Для установления соотношения между размерами реальных объектов и их видеоизображения в качестве масштаба использован внешний диаметр иглы медицинского шприца $d = 0.83$ мм.

Все опыты были выполнены при температуре $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$.

3. Описание результатов

На первом этапе эксперимента был изучен процесс диффузии кислоты из капли в воду. В этом случае плотность окружающей среды оказывается заметно ниже плотности капли, последняя тем не менее остается неподвижной за счет прилипания к стенкам полости.

На рис. 2 приведена серия интерферограмм, которая описывает эволюцию концентрационного поля, сформированного диффузией кислоты с $C_0 = 0.84$ моль/л из капли. Процесс диффузии кислоты можно разделить на три этапа. Первый – начальный – связан с остаточным движением смеси, вызванным процессом создания капли. Длительность этапа 2–6 с. Этап характеризуется хаотическим распределением концентрации по объему капли, но уже достаточно сложившимся погранслоиным течением по обе стороны границы капли (рис. 2, а).

Второй этап начинается с установления в капле устойчивой стратификации по плотности (рис. 2, б). При этом кислота, покинув каплю и будучи плотнее воды, стекает вдоль внешней границы капли и образует нисходящий факел. Смесь внутри капли, потеряв кислоту, вследствие эффекта контракции также оказывается тяжелее смеси исходного состава и, соответственно, устремляется на дно капли вдоль ее границы, вытесняя при этом исходную смесь в центральную часть капли (рис. 2, в).

Это подъемное течение запирает «обедненную» кислотой смесь в верхней части капли, не давая ей стекать. В результате в капле формируется неустойчивая стратификация смеси по плотности, которая может привести либо к развитию неустойчивости Релей-Гейлора в виде падения «пальцев» обедненной смеси сквозь толщу капли (рис. 2, г–д), либо к простому расширению неустойчивой зоны вниз. Последнее явление выражается в возникновении сгущенной группы полос на интерференционной картине в верхней части капли.

Третий этап характеризуется восстановлением устойчивой стратификации по плотности во всем объеме капли за исключением пристеночной области (рис. 2, е).

Отметим, что благодаря выбору состава жидкой смеси процесс экстракции кислоты на всем своем протяжении не сопровождался развитием

ярко выраженной двухвихревой конвекции, характерной для систем с произвольным соотношением плотностей компонент [7].

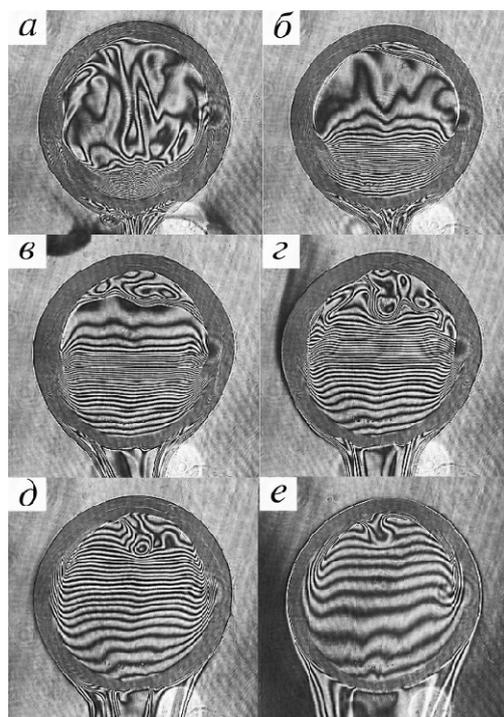


Рис. 2. Эволюция поля концентрации кислоты в капле смеси с $C_0 = 0.84$ моль/л при диффузии в воду. Время с момента формирования капли t , с: а – 6; б – 16; в – 35; г – 60; д – 100; е – 188. Диаметр капли: $D_0 = D_{\text{верт}} = 7$ мм, $D_{\text{гор}} = 6.5$ мм

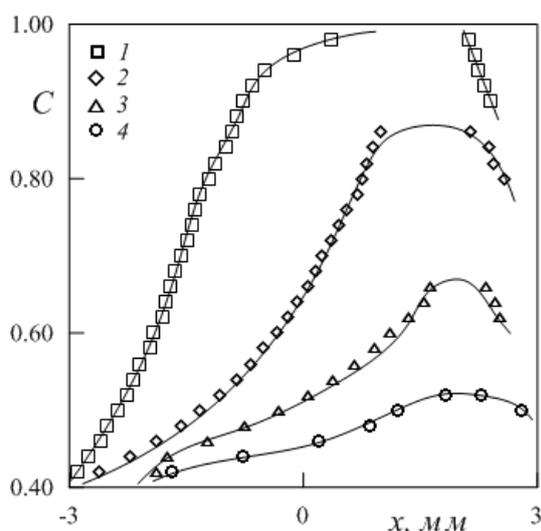


Рис. 3. Распределение концентрации уксусной кислоты вдоль вертикального диаметра капли в разные моменты времени t , с: 1 – 50; 2 – 110; 3 – 170; 4 – 290. $D_0 = 7.0$ мм, $C_0 = 0.84$ моль/л. Окружающая среда – вода

Имея видеозапись интерференционной картины в реальном времени, можно проследить эволюцию

концентрационного поля внутри капли. На рис. 3 представлено изменение распределения концентрации кислоты вдоль вертикального диаметра капли со временем, начиная с момента ее создания. Результаты измерений показывают, что в отсутствие конвекции Марангони скорость снижения концентрации кислоты оказывается сравнительно небольшой. Так, за три минуты совместного действия диффузии и гравитационной конвекции концентрация в центре капли упала всего на 0.025, а несколько выше (в зоне максимальной концентрации) и того меньше – на 0.018 (в качестве единицы обезразмеривания выбрана исходная концентрация кислоты в капле).

Отметим растущее смещение зоны максимальной концентрации относительно геометрического центра капли с течением времени. Несмотря на приближение зоны к верхнему полюсу капли, она долгое время остается вне области гравитационного погранслоного течения, что позволяет говорить об относительной слабости последнего и существенной роли диффузии в приграничном массообмене.

Перейдем к рассмотрению поведения капли тройной смеси в растворе хлорида натрия равной исходной плотности (рис. 4). Как и в случае растворения капли в дистиллированной воде, вдоль границы капли быстро формируется двойное погранслоное течение (рис. 4, а). Однако существуют и различия – уменьшение перепада плотности между кислотой и окружающей жидкостью приводит к:

- первоначальному расширению концентрационно-теплого поля вокруг капли, которое по мере нарастания интенсивности погранслоного течения быстро схлопывается;
- увеличению ширины нисходящего факела, образованного продиффундировавшей кислотой;
- приобретению каплей способности перемещаться.

В качестве объяснения последнего можно предположить, что наличие хлорида натрия препятствует смачиванию стенок кюветы смесью бензола и хлорбензола, и между ними и торцами капли остается пленка водного раствора. Отметим, что пленка ввиду малой толщины не визуализируется интерферометром, однако косвенным доказательством ее существования служит значительное увеличение толщины нисходящего факела.

Контракционный рост плотности водного раствора кислоты существенно выше, чем у «обедненной» смеси бензолов. В результате при помещении в среду равной плотности капля оказывается (вследствие диффузии и растворения кислоты) локально окруженной более плотным раствором, что и приводит ее к всплыванию.

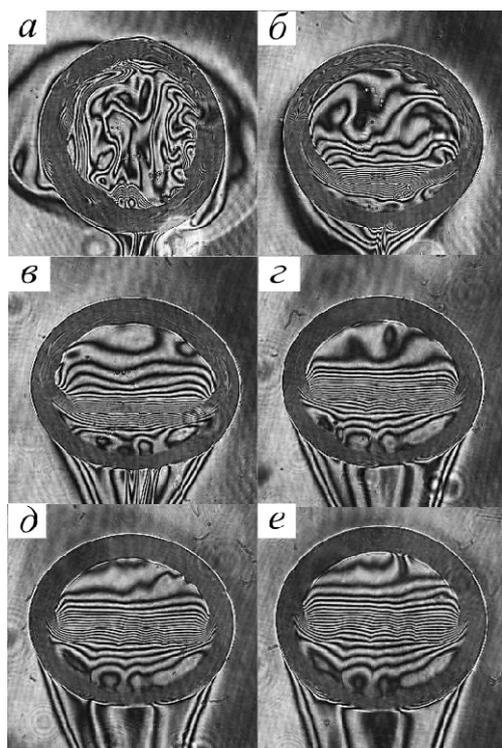


Рис. 4. Эволюция поля концентрации уксусной кислоты при ее диффузии из капли смеси с $C_0 = 0.84$ моль/л в водный раствор NaCl ($C_{01} = 1.29$ моль/л). Время с момента формирования капли t , с: а – 5; б – 16; в – 30; г – 52; д – 60; е – 67. Размеры капли: $D_{\text{верт}} = 7.1$ мм; $D_{\text{гор}} = 7.8$ мм. Скорость всплывания капли $V \sim 0.1$ мм/с

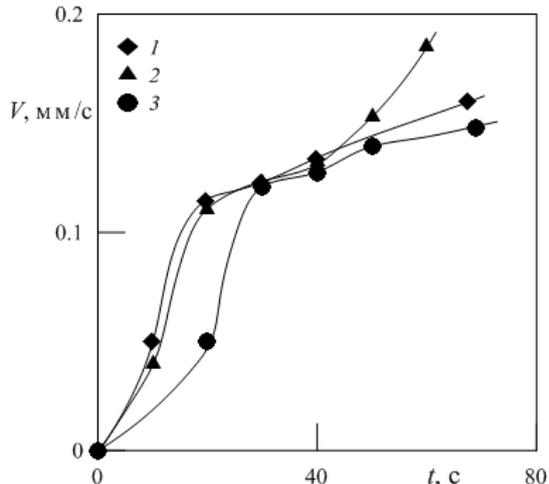


Рис. 5. Зависимость скорости всплывания капли от времени для капель с $C_0 = 0.84$ моль/л в водном растворе NaCl с C_{01} , моль/л: 1 – 1.29; 2 – 0.89; 3 – 0.89

Несмотря на малую скорость, движение капли существенно влияет на структуру концентрационного поля. В частности, всплывание капли дополнительно ускоряет нисходящее течение вдоль ее границ. Благодаря этому обедненная смесь бензолов быстрее «проскакивает» диффузионную зону между исходной и пониженной концентрацией

кислоты и не успевает принять участие в ее формировании, частично перемешавшись. В результате скорость подъема центральной части капли за счет вытеснения возрастает, а в нижней части капли возникает характерная область с малым градиентом концентрации (рис. 4, в-е). Этот рост скорости повышает устойчивость формирующейся стратификации концентрации (рис. 4, б) и заметно сокращает время ее неустойчивого существования. Отметим, что, как видно из рис. 5, за время наблюдения ($t \sim 100 \div 200$ с) движение капли остается нестационарным.

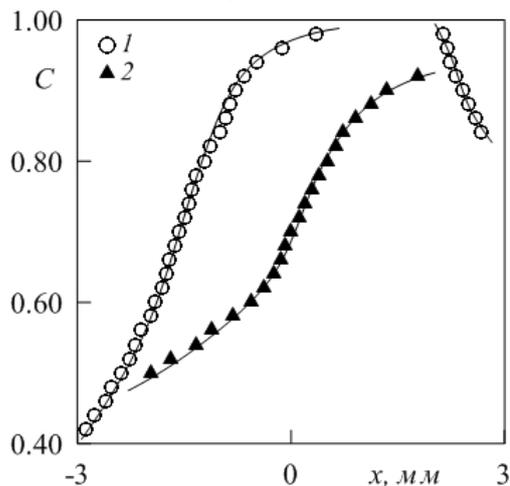


Рис. 6. Распределение концентрации уксусной кислоты вдоль вертикального диаметра неподвижной (кривая 1) и всплывающей (кривая 2) капель с $C_0 = 0.84$ моль/л и $D_0 = 7$ мм в момент времени $t = 55$ с

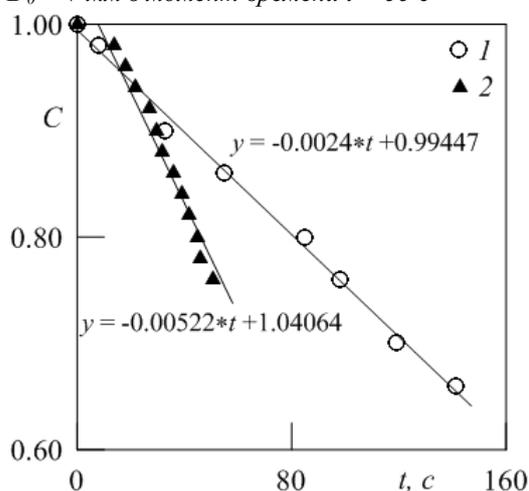


Рис. 7. Изменение со временем концентрации уксусной кислоты в центре двух равных по размеру и начальной концентрации капель ($D_0 = 7$ мм и $C_0 = 0.84$ моль/л), одна из которых покоится в воде (кривая 1), а другая (кривая 2) находится в движении в водном растворе хлорида натрия

На рис. 6 приведено вертикальное распределение концентрации кислоты для неподвижной

(кривая 1) и всплывающей (кривая 2) каплей в один и тот же момент времени. Видно, что для всплывающей капли область максимальной концентрации быстро смещается в ее верхнюю часть, практически сразу оказываясь в зоне пограничного течения. При этом концентрация кислоты вблизи верхнего полюса капли заметно уменьшается по величине. Отслеживание изменения концентрации в центре капли показывает, что в начальный момент времени в обоих случаях эта зависимость имеет вид, близкий к линейному (рис. 7).

Из сравнения кривых следует, что движение капли даже с очень малыми скоростями более чем в два раза увеличивает интенсивность массообмена с окружающей средой за счет резкого увеличения площади контакта сред при появлении прослойки жидкости между каплей и стенками ячейки Хеле Шоу. Ускорению массообмена способствует и вытеснение зоны максимальной концентрации в область пограничного слоя, что ведет к увеличению межфазного градиента концентрации.

4. Выводы

Результаты эксперимента подтвердили предположение о перспективности применения узких вертикальных зазоров в качестве элементов экстракционных колонн с целью интенсификации массообмена. Полученные с их помощью капли цилиндрической формы обладают повышенной массоотдачей за счет увеличения площади межфазной поверхности. Положительную роль должно сыграть и изначальное выравнивание плотностей контактирующих фаз, благодаря чему увеличивается время пребывания капель в объеме экстрагента.

Переход к изучению массообмена с участием капель цилиндрической формы также открывает возможность визуализации полей концентрации, создавая условия для верификации теоретических моделей экстракционного процесса и массообменных процессов в микрофлюидике.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 19-41-590009 и Программы поддержки научных школ Пермского края, грант № С-26/788.

Список литературы

1. *Ermakov S. A., Ermakov A. A., Chupakhin O. N., Vaissov D. V.* Mass transfer with chemical reaction in conditions of spontaneous interfacial convection in processes of liquid extraction // *Chemical Engineering Journal*. 2001. Vol. 84. N. 3 P. 321–324.
2. *Amar A., Groß-Hardt E., Khrapitchev A. A., Stapf S., Pfennig A., Blumich B.* Visualizing flow vortices inside a single levitated drop // *Journal of Magnetic Resonance*. 2005. Vol. 177. P. 74–85.
3. *Brounshtein B. I., Rivkind V. Ya., Fishbein G. A., Shuster A. R.* Mass transfer accompanied by a chemical reaction taking place rapidly inside a moving spherical drop // *Journal of Engineering Physics*. 1974. Vol. 26. P. 699–703.
4. *Watada H., Hamielec A. E., Johnson A. I. A.* Theoretical study of mass transfer with chemical reaction in drops // *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 1970. Vol. 48. N. 3. P. 255–261.
5. *Mendes-Tatsis M. A., Agble D.* The effect of surfactants on Marangoni Convection in the isobutanol/water system // *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*. 2001. Vol. 25. N. 3. P. 239–249.
6. *Tsuji K., Müller S. C.* Chemical reaction evolving on a droplet // *The Journal of Physical Chemistry Letters*. 2012. Vol. 3. N. 8. P. 977–980.
7. *Kostarev K. G.* The study of the extraction of surface-active component of a binary liquid from model (“cylindrical”) droplets // *Colloid Journal*. 2005. Vol. 67, Is. 3. P. 318–323.
8. *Kostarev K. G., Briskman V. A.* Dissolution of a drop with a high content of a surface-active substance // *Doklady Physics*. 2001. Vol. 46. N. 5. P. 349–351.
9. *Luo Z. Y., Shang X. L., Bai B. F.* Marangoni effect on the motion of a droplet covered with insoluble surfactant in a square microchannel // *Physics of Fluids*. 2018. Vol. 30, 077101.
10. *Luo Z. Y., Shang X. L., Bai B. F.* Effect of soluble surfactant on the motion of a confined droplet in a square microchannel // *Physics of Fluids*. 2019. Vol. 31, 117104.
11. *Rao S. S., Wong H.* The motion of long drops in rectangular microchannels at low capillary numbers // *Journal of Fluid Mechanics*. 2018. Vol. 852. P. 60–104.
12. *Bonn D., Kellay H., Amar M. B., Meunier J.* Viscous finger widening with surfactants and polymers // *Physical Review Letters*. 1995. Vol. 75. N. 11. P. 2132–2135.
13. *Bonn D., Kellay H., Amar M. B., Meunier J.* Viscous fingering in complex fluids // *Physica A*. 1995. Vol. 220. P. 60–73.
14. *Janssen P., Anderson P.* Surfactant-covered drops between parallel plates // *Chemical Engineering Research and Design*. 2008. Vol. 86. N.12. P. 1388–1396.
15. *Gallaire F., Meliga P., Laure P., Baroud C. N.* Marangoni induced force on a drop in a Hele-Shaw cell // *Physics of Fluids*. 2014. Vol. 26, 062105.
16. *Никольский Б. П.* Справочник химика. Т. 3. Л.: Химия, 1965. 1008 с.
17. *Абрамсон А. А., Щукин Е. Д.* (ред.) Поверхностные явления и поверхностно-активные вещества. Л.: Химия, 1984. 392 с.
18. *Kostarev K. G., Torokhova S. V.* Instability of the interface due to surfactant diffusion in the system

- of immiscible liquids // *Microgravity Science and Technology*. 2020. Vol. 32. N. 3. P. 507–512.
19. Birikh R. V., Denisova M. O., Kostarev K. G., Development of concentration-capillary convection on an interfacial surface // *Fluid Dynamics*. 2015. Vol. 50. N. 3. P. 361–370.
 20. Абрамзон А. А., Гаевой Г. М. Поверхностно-активные вещества: справочник. Л.: Химия, 1979. 376 с.
 21. Heine J. S., Bart H.-J. Visualization of mass transfer during droplet formation // *Chemical Engineering and Technology*. 2019. Vol. 42. N. 7. P. 1388–1394.
- References**
1. Ermakov S. A., Ermakov A. A., Chupakhin O. N., Vaissov D. V. Mass transfer with chemical reaction in conditions of spontaneous interfacial convection in processes of liquid extraction. *Chemical Engineering Journal*. 2001, vol. 84, no. 3, pp. 321–324.
 2. Amar A., Groß-Hardt E., Khrapitchev A. A., Stapf S., Pfennig A., Blumich B. Visualizing flow vortices inside a single levitated drop. *Journal of Magnetic Resonance*, 2005, vol. 177, pp. 74–85.
 3. Brounshtein B. I., Rivkind V. Ya., Fishbein G. A., Shuster A. R. Mass transfer accompanied by a chemical reaction taking place rapidly inside a moving spherical drop. *Journal of Engineering Physics*, 1974, vol. 26, pp. 699–703.
 4. Watada H., Hamielec A. E., Johnson A. I. A. Theoretical study of mass transfer with chemical reaction in drops. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1970, vol. 48, no. 3, pp. 255–261.
 5. Mendes-Tatsis M. A., Agble D. The effect of surfactants on Marangoni convection in the isobutanol/water system. *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, 2001, vol. 25, no. 3, pp. 239–249.
 6. Tsuji K., Müller S. C. Chemical reaction evolving on a droplet. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2012, vol. 3, no. 8, pp. 977–980.
 7. Kostarev K. G. The study of the extraction of surface-active component of a binary liquid from model (“cylindrical”) droplets. *Colloid Journal*, 2005, vol. 67, no. 3, pp. 318–323.
 8. Kostarev K. G., Briskman V. A. Dissolution of a drop with a high content of a surface-active substance. *Doklady Physics*, 2001, vol. 46, no. 5, pp. 349–351.
 9. Luo Z. Y., Shang X. L., Bai B. F. Marangoni effect on the motion of a droplet covered with insoluble surfactant in a square microchannel. *Physics of Fluids*, 2018, vol. 30, 077101.
 10. Luo Z. Y., Shang X. L., Bai B. F. Effect of soluble surfactant on the motion of a confined droplet in a square microchannel. *Physics of Fluids*, 2019, vol. 31, 117104.
 11. Rao S. S., Wong H. The motion of long drops in rectangular microchannels at low capillary numbers *Journal of Fluid Mechanics*. 2018, vol. 852, pp. 60–104.
 12. Bonn D., Kellay H., Amar M. B., Meunier J. Viscous finger widening with surfactants and polymers *Physical Review Letters* 1995, vol. 75, no. 11, 2132.
 13. Bonn D., Kellay H., Amar M. B., Meunier J. Viscous fingering in complex fluids. *Physica A*, 1995, vol. 220, pp. 60–73.
 14. Janssen P., Anderson P. Surfactant-covered drops between parallel plates. *Chemical Engineering Research and Design*, 2008, vol. 86, no. 12, pp. 1388–1396.
 15. Gallaire F., Meliga P., Laure P., Baroud C. N. Marangoni induced force on a drop in a Hele–Shaw cell. *Physics of Fluids*, 2014, vol. 26, 062105.
 16. Nikolsky B. P. *Handbook on chemistry*, vol.3. Leningrad: Chemistry, 1965, 1008 pp. (In Russian).
 17. Abramson A. A., Shchukin E. D. (Eds.) *Handbook of Chemist*. Leningrad: Chemistry, 1984, pp.392 (In Russian).
 18. Kostarev K. G., Torokhova S. V. Instability of the interface due to surfactant diffusion in the system of immiscible liquids. *Microgravity Science and Technology*, 2020, vol. 32, No. 3, pp. 507–512.
 19. Birikh R. V., Denisova M. O., Kostarev K. G., Development of concentration-capillary convection on an interfacial surface. *Fluid Dynamics*, 2015, vol. 50, no. 3, pp. 361–370.
 20. Abramzon A.A., Gaevoj G. M. (Eds.) *Surface-active substances. Handbook*. Leningrad: Chemistry, 1979, 376 pp. (In Russian).
 21. Heine J. S., Bart H.-J. Visualization of mass transfer during droplet formation. *Chemical Engineering and Technology*, 2019, vol. 42, no. 7, pp. 1388–1394.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Денисова М. О., Ошмарина М.В. Диффузия ПАВ из медленно всплывающей капли (случай малых концентраций) // Вестник Пермского университета. Физика. 2020. № 4. С. 29–36. doi: 10.17072/1994-3598-2020-4-29-36

Please cite this article in English as:

Denisova M. O., Oshmarina M. V. Diffusion of low-concentration surfactant from the rising drop. Bulletin of Perm University. Physics, 2020, no. 4, pp. 29–36. doi: 10.17072/1994-3598-2020-4-29-36