# = СОРБЦИОННЫЕ И ИОНООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ =

УДК: 541.1

# СПОНТАННАЯ ПОВЕРХНОСТНАЯ КОНВЕКЦИЯ И СКОРОСТЬ ЭКСТРАКЦИИ (РЕЭКСТРАКЦИИ) В СИСТЕМАХ С ТРИБУТИЛФОСФАТОМ И ДИ-(2-ЭТИЛГЕКСИЛ)ФОСФОРНОЙ КИСЛОТОЙ

# © Н. Ф. Кизим, Е. Н. Голубина\*

Новомосковский институт Российского химико-технологического университета им. Д. И. Менделеева, 301665, Тульская обл., г. Новомосковск, ул. Дружбы, д. 8 \* E-mail: Elena-Golubina@mail.ru

> Поступила в Редакцию 17 октября 2019 г. После доработки 27 декабря 2019 г. Принята к публикации 17 февраля 2020 г.

Экстракция редкоземельных элементов растворами ди-(2-этилгексил)фосфорной кислоты или трибутилфосфата в гептане (толуоле или тетрахлорметане) сопровождается возникновением и развитием спонтанной поверхностной конвекции. Спонтанная поверхностная конвекция проявляется в виде осциляции межфазной поверхности, но может приводить и к ее разрыву. Представлены данные по спектральному составу спонтанной поверхностной конвекции в системах с трибутилфосфатом и ди-(2-этилгексил)фосфорной кислотой. Более интенсивное движение элементов жидкости наблюдается в системах с гептаном. Модуль поверхностной скорости движения элементов жидкости в системах с трибутилфосфатом выше, чем в системах с ди-(2-этилгексил)фосфорной кислотой. Показано, что локальное колебательное воздействие в межфазном слое на резонансной частоте приводит к увеличению скорости экстракции.

Ключевые слова: жидкостная экстракция; редкоземельные элементы; спонтанная поверхностная конвекция; межфазный слой; частота колебаний; эмульгирование DOI: 10.31857/S0044461820070117

Жидкостная экстракция сопровождается спонтанной поверхностной конвекцией [1–3], представляющей собой спонтанное движение в области динамического межфазного слоя гетерогенной жидкостной системы, состоящей из двух несмешивающихся или частично смешивающихся жидкостей. Спонтанная поверхностная конвекция в зависимости от перепада концентраций распределяемого вещества в фазах может проявляться в виде сложного колебательного движения межфазной поверхности, если перепад концентраций невысок, или сопровождаться нарушением сплошности межфазной поверхности, если перепад концентраций значителен. Спонтанная поверхностная конвекция приводит к повышению скорости экстракции. Поэтому основное внимание исследователей обращено на изучение межфазного массобмена в режиме спонтанной поверхностной конвекции [4–7]. В этом случае важно знать направление и скорость движения элементов жидкостей в межфазном слое и его окрестностях.

Работ, направленных на изучение закономерностей спонтанной поверхностной конвекции, значительно меньше. Возникновение и развитие спонтанной поверхностной конвекции при экстракции редкоземельных элементов растворами ди-(2-этилгексил)фосфорной кислоты описано в работе [8]. Зависимости интенсивности спонтанной поверхностной конвекции от условий проведения процесса представлены в [9].

В обзоре [10] отмечено, что спонтанная поверхностная конвекция нередко возникает лишь в одном направлении массопереноса, при этом скорость массопередачи значительно увеличивается. Повышение скорости экстракции может произойти в результате увеличения как коэффициента массопередачи, так и величины межфазной поверхности.

Изучение экстракции в режиме спонтанной поверхностной конвекции важно как для понимания механизма межфазного массобмена, так и в плане аппаратурного оформления процесса. Возможность использования спонтанной поверхностной конвекции для снижения энергозатрат на процесс экстракции рассматривается в публикациях [1–3, 10].

Целью настоящей работы являлось изучение спектрального состава спонтанной поверхностной конвекции и ее интенсивности в экстракционных системах с трибутилфосфатом или ди-(2-этилгексил)фосфорной кислотой и подтверждение повышения скорости экстракции (реэкстракции) путем локального колебательного воздействия в межфазном слое на частоте с максимальной интенсивностью спонтанной поверхностной конвекции.

#### Экспериментальная часть

Объектами исследования являлись гетерогенные системы: а) органическая жидкость, не смешивающаяся с водой (далее разбавитель), в которую предварительно экстрагировали азотную кислоту из водного раствора известной концентрации; б) водный раствор LnCl<sub>3</sub> [Er(III), Yb(III), Pr(III), Nd(III)]/0.05 М раствор экстракционного реагента в разбавителе (толуол, гептан, тетрахлорметан). Разбавители и хлориды редкоземельных элементов, используемые в работе, имели квалификацию х.ч. В качестве экстракционных реагентов использовали ди-(2-этилгексил)фосфорную кислоту и трибутилфосфат. Ди-(2-этилгексил)фосфорная кислота очищена по обычной методике [11]. Трибутилфосфат имел квалификацию «чистый». Содержание дибутилфосфорной кислоты в трибутилфосфате составляло 25 мг л<sup>-1</sup>. Концентрацию азотной кислоты в экстракте определяли потенциометрически.

Метод определения спектрального состава спонтанной поверхностной конвекции отработан на системах жидкость/жидкость, свободных от межфазных образований [12]. Установка включает звукоизолированную камеру, стеклянную ячейку в виде чашки Петри диаметром 110 мм с исследуемой системой и датчик, изготовленный на основе высокочувствительной пьезокерамической головки, к которой прикреплена стеклянная нить (Ø 0.05 см, длиной 7 см) с загнутым под прямым углом концом длиной 0.5 см. Датчик подключали коаксиальным кабелем к селективному микровольтметру (В6-9), на выходе которого сигнал разделяли: одну часть подавали на запоминающий осциллограф (С8-13), другую — на частотомер. Интенсивность спонтанной поверхностной конвекции оценивали величиной сигнала, регистрируемого осциллографом.

Определение модуля поверхностной скорости движения частиц жидкости проводили по методике, подробно описанной в [9]. Раствор наливали в ячейку в таком объеме, чтобы высота нижнего слоя составляла 8 мм. Далее аккуратно приливали раствор, не смешивающийся с первым в объеме, чтобы образовать слой толщиной 4 мм. В ходе опыта с помощью цифровой фото-видеокамеры регистрировали микроизображения межфазной поверхности, используя для этого микроскоп. Трассерами, позволяющими проследить за перемещениями частиц жидкости, являлись «невесомые» пылинки, размер которых меньше 0.1 мм, частицы фильтровальной бумаги.

При измерении перемещений трассера, а следовательно, и частиц жидкости микроскоп был сфокусирован на межфазную поверхность. При покадровой развертке видеоизображения с помощью специальной компьютерной программы, входящей в программное обеспечение цифровой видеокамеры, следили за перемещением нескольких трассеров, выбранных в разных точках межфазной поверхности. Величину перемещения усредняли и, зная частоту смены кадров (30 кадров/с), рассчитывали скорость движения элемента жидкости. Для проверки воспроизводимости результатов экспериментов наблюдения проводили за трассерами, находящимися в начале наблюдений примерно в тех же точках в межфазном слое [9].

Методика исследования кинетики экстракции редкоземельных элементов в поле колебаний описана в [13].

Статистическая обработка экспериментальных данных показала их воспроизводимость. Ошибка эксперимента не превышала 15%.

### Обсуждения результатов

Анализ фотографических изображений динамического межфазного слоя показывает, что при низких концентрациях азотной кислоты в экстракте наблюдается осцилляторное движение межфазной поверхно-



Рис. 1. Фотографические изображения динамического межфазного слоя при реэкстракции азотной кислоты в системе с толуолом в качестве разбавителя.

сти без нарушения ее сплошности (рис. 1, a), которое может быть представлено суммой гармоник. При более высоких концентрациях азотной кислоты в системе наблюдаются эрупции в виде интенсивных выбросов частиц водной фазы в органическую (рис. 1,  $\delta$ ), приводящие к помутнению органической фазы, свидетельствующему о спонтанном эмульгировании.

Система значительно усложняется, если в нее вводится экстракционный реагент и соль редкоземельного элемента.

Экстракция редкоземельных элементов растворами трибутилфосфата протекает по сольватному механизму; образуется сольват вида LnCl<sub>3</sub>·3(C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>O)<sub>3</sub>PO, при этом каких-либо межфазных образований не происходит.

Механизм экстракции редкоземельных элементов растворами ди-(2-этилгексил)фосфорной кислоты состоит в протекании химических реакций между катионом редкоземельного элемента и молекулами экстракционного реагента с образованием средней соли ди-(2-этилгексил)фосфата лантаноида, способной накапливаться в межфазной области. Дальнейшее взаимодействие средней и, возможно, основной соли ди-(2-этилгексил)фосфата лантаноида с ди-(2-этилгексил)фосфорной кислотой приводит к образованию кислых солей, растворимых в органической растворе, содержащем свободную ди-(2-этилгексил)фосфорную кислоту.

Возникновение и развитие спонтанной поверхностной конвекции в системах с экстракционным реагентом и солью редкоземельного элемента связано с наличием локальных градиентов межфазного натяжения, неизбежно возникающих при приведении в контакт водной и органической фаз. Как видно (табл. 1, 2), наиболее интенсивная спонтанная поверхностная конвекция наблюдается в системе с гептаном в качестве разбавителя.

В системах с толуолом спонтанная поверхностная конвекция менее заметна. В этом же ряду разбавителей изменяется и величина межфазного натяжения. Ди-(2-этилгексил)фосфорная кислота и в меньшей степени трибутилфосфат поверхностно-активны [14]. Введение их в систему приводит к уменьшению градиентов межфазного натяжения и, как следствие, интенсивности спонтанной поверхностной конвекции; уменьшается и модуль поверхностной скорости движения частиц жидкости в межфазном слое (табл. 3). Ди-(2-этилгексил)фосфорная кислота, адсорбируясь на межфазной поверхности, формирует слои с определенной вязкоэластичностью, негативно влияющей на периодическое расширение и сжатие поверхности, что приводит к уменьшению интенсивности спонтанной поверхностной конвекции. При введении в систему ди-(2-этилгексил)фосфорной кислоты изменяется структура потока жидкости под межфазной поверхностью, что ведет к увеличению энергии диссипации за счет сил вязкого трения, затуханию колебаний поверхности. Трибутилфосфат имеет высокий дипольный момент (3.07-3.2 Д,\* 3.1 [15]) и обладает меньшей адсорбционной способностью, чем ди-(2-этилгексил)фосфорная кислота (дипольный момент 2.74 Д [15]), поэтому его введение в экстракционную систему приводит к менее заметным изменениям в спектральном составе спектральной поверхностной конвекции (табл. 1, 2). Димер ди-(2-этилгексил)фосфорной кислоты, аналогично фосфиновым кислотам в неполярных растворителях [16], может иметь более высокое значение дипольного момента. Но в переходном слое экстракционной системы доля димера ди-(2-этилгексил)фосфорной кислоты будет пренебре-

<sup>\*</sup> Осипов О. А., Минкин В. И., Гарновский А. Д. Справочник по дипольным моментам. М.: Высш. шк., 1971. 413 с.

Частота, кГц	Интенсивность спонтанной по- верхностной конвекции, усл. ед.	Частота, кГц	Интенсивность спонтанной по- верхностной конвекции, усл. ед.	Частота, кГц	Интенсивность спонтанной по- верхностной конвекции, усл. ед.	Частота, кГц	Интенсивность спонтанной по- верхностной конвекции, усл. ед.	
разбавитель/вода [9]		H <sub>2</sub> O–0.5 М раствор трибутилфосфата в разбавителе		0.01 M LnCl <sub>3</sub> –H <sub>2</sub> O–0.5 M paс- твор трибутилфосфата в разбавителе		0.1 M LnCl <sub>3</sub> –H <sub>2</sub> O–0.5 M рас- твор трибутилфосфата в разбавителе		
Разбавитель — толуол								
4.97	~3.0	4.90	~2.7	4.90	~2.3	4.85	~0.8	
5.95	~5.0	5.80	~4.8	5.80	~4.5	5.70	~1.3	
7.55	~3.0	7.30	~2.5	7.20	~1.6	7.05	~0.7	
8.70	~3.0	8.60	~2.5	8.50	~2.2	8.30	~0.7	
10.50	~2.0	10.50	~2.0	10.50	~1.5	10.50	~0.6	
Разбавитель — гептан								
6.15	~6.0	5.95	~4.0	5.90	~5.7	5.70	~1.8	
7.40	~15.0	6.80	~8.0	6.70	~8.0	6.60	~3.2	
8.80	~6.0	8.50	~4.0	8.10	~5.0	7.80	~1.7	
9.00	~6.0	8.70	~4.0	8.50	~5.0	8.20	~2.2	
11.90	~6.0	11.0	~4.0	11.40	~5.0	11.30	~2.2	
Разбавитель — тетрахлорметан								
5.60	~6.0	5.50	~5.0	5.50	~3.5	5.45	~1.5	
6.70	~6.0	6.30	~5.5	6.10	~4.3	5.90	~2.7	
7.80	~6.0	7.70	~4.5	7.70	~3.3	7.60	~3.3	
8.60	~3.0	8.50	~2.0	8.80	~0.9	8.50	~0.5	
10.95	~3.0	10.85	~2.0	10.80	~0.9	10.75	~0.5	

Таблица 1 Спектральный состав спонтанной поверхностной конвекции

жимо малой. Связь между поверхностными свойствами и затуханием волн рассмотрена В. Г. Левичем.\*

В процессе экстракции редкоземельных элементов растворами ди-(2-этилгексил)фосфорной кислоты образуется ди-(2-этигексил)фосфат лантаноида, также обладающий некоторой поверхностной активностью. В спектральном составе спонтанной поверхностной конвекции преобладают более низкие частоты колебаний, что свидетельствует об изменении межфазного натяжения вследствие конкурентной адсорбции экстракционного реагента и ди-(2-этилгексил)фосфата лантаноида. При низкой концентрации извлекаемого элемента интенсивность спонтанной поверхностной конвекции велика. Это связано с отсутствием накопления межфазных образований ввиду седиментации частиц, образуемых ди-(2-этилгексил)фосфатом лантаноида. При высоких концентрациях редкоземельных элементов интенсивность спонтанной поверхностной конвекции резко снижается вследствие формирования конденсационной структуры в межфазном слое [17]. Уменьшается также и модуль поверхностной скорости движения частиц жидкости в межфазном слое (табл. 3).

Интенсивность спонтанной поверхностной конвекции зависит от природы экстрагируемого элемента. В случае экстракции редкоземельных элементов иттриевой подгруппы интенсивность спонтанной поверхностной конвекции ниже, чем при экстракции редкоземельных элементов цериевой подгруппы (табл. 3), что подтверждает различие структур, формирующихся в межфазном слое.

Как и следовало ожидать, при высокой концентрации кислоты в экстракте модуль поверхностной скорости больше, однако зависимость нелинейная. Это связано с тем, что при высокой концентрации кислоты в экстракте наряду со спонтанной поверхностной

<sup>\*</sup> *Левич В. Г.* Физико-химическая гидродинамика. М.: Гос. изд-во физ.-хим. лит., 1959. С. 595.

Частота, кГц	Интенсивность спонтанной поверхностной конвекции, усл. ед.	Частота, кГц	Интенсивность спонтанной поверхностной конвекции, усл. ед.	Частота, кГц	Интенсивность спонтанной поверхностной конвекции, усл. ед.			
H2O-0.0	5 М раствор ди-(2-этилгексил)- рной кислоты в разбавителе	0.01 M LnCl <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O-0.05 M раствор ди-(2-этилгексил)фосфорной кислоты в разбавителе		0.1 M LnCl <sub>3</sub> –H <sub>2</sub> O–0.05 M раствор ди-(2-этилгексил)фосфорной кислоты в разбавителе				
Разбавитель — толуол								
4.80	~2.0	4.80	~2.5	4.60	~1.0			
5.40	~4.0	4.90	~5.0	4.80	~1.5			
7.12	~1.5	7.00	~1.8	6.80	~0.8			
8.20	~2.0	8.10	~2.5	7.80	~0.8			
10.1	~1.5	10.0	~1.7	9.70	~0.7			
Разбавитель — гептан								
5.95	~4.0	5.90	~6.0	5.70	~2.0			
6.80	~8.0	6.70	~10.0	6.60	~4.0			
8.50	~4.0	8.10	~7.0	7.80	~2.0			
8.70	~4.0	8.50	~7.0	8.20	~2.5			
11.0	~4.0	11.40	~7.0	11.30	~2.5			
Разбавитель — тетрахлорметан								
5.40	~4.0	5.40	~4.0	5.30	~1.5			
6.40	~5.0	6.20	~5.0	5.80	~3.0			
7.60	~4.0	7.50	~4.0	7.40	~4.0			
8.40	~1.0	8.40	~1.0	8.40	~0.8			
10.70	~1.0	10.70	~1.0	10.70	~0.8			

Таблица 2 Спектральный состав спонтанной поверхностной конвекции

конвекцией наблюдается и частичное спонтанное эмульгирование, обусловливающее помутнение органической фазы.

Временная зависимость модуля поверхностной скорости течения жидкости при реэкстракции азотной кислоты представлена на рис. 2.

Определение спектрального состава спонтанной поверхностной конвекции позволило выявить часто-

ты, на которых интенсивность осцилляций максимальна. Если в систему на данной частоте подводить извне дополнительную энергию, то энергия, поглощаемая системой, вызывая изменения гидродинамической обстановки в динамическом межфазном слое и прилегающих слоях, приводит к интенсификации процесса экстракции редкоземельных элементов. Представленные на рис. 3 зависимости подтверждают

Таблица З

Влияние природы экстрагента и редкоземельного элемента на модуль поверхностной скорости движения частиц жидкостей

	Модуль поверхностной скорости $v \cdot 10^2$ , м $\cdot c^{-1}$							
<i>t</i> , c	H <sub>2</sub> O–0.1 М трибутилфосфат в гептане	0.1 M LnCl <sub>3</sub> /0.1 M трибутилфосфат в гептане	H <sub>2</sub> O-0.05 M ди-(2-этилгексил)- фосфорная кислота в гептане	0.1 M PrCl <sub>3</sub> –H <sub>2</sub> O/0.05 M ди-(2-этилгексил)фосфорная кислота в гептане	0.1 М ErCl <sub>3</sub> –H <sub>2</sub> O/0.05 М ди-(2-этилгексил)фосфорная кислота в гептане			
50	$1.83 \pm 0.05$	$1.61 \pm 0.05$	$0.93\pm0.05$	$0.52 \pm 0.03$	$0.08\pm0.006$			
100	$1.54 \pm 0.05$	$1.22 \pm 0.06$	$0.62 \pm 0.03$	$0.12 \pm 0.02$	$0.05\pm0.005$			
600	$1.27 \pm 0.03$	$0.91 \pm 0.04$	$0.45 \pm 0.02$	$0.08 \pm 0.01$	$0.02 \pm 0.003$			



Рис. 2. Зависимость модуля поверхностной скорости движения частиц жидкости в межфазном слое системы толуол, HNO<sub>3</sub>–вода от концентрации азотной кислоты в экстракте при времени: 100 (1), 200 (2) и 300 с (3).



Рис. 3. Зависимость коэффициента ускорения экстракции от частоты колебаний в системах 6·10<sup>-3</sup> М HNO<sub>3</sub> в гептане–вода (1), 0.05 М водный раствор Er(III), pH 2.4–0.5 М раствор трибутилфосфата в гептане (2), 0.01 М водный раствор Er(III), pH 5.3–0.05 М раствор ди-(2-этилгексил)фосфорной кислоты в гептане (3).

сделанное предположение о повышении скорости процесса экстракции (реэкстракции) и полностью согласуются с данными по спектральному составу механических (звуковых) колебаний на границе раздела фаз.

Величина коэффициента ускорения экстракции (*E*) при колебательном воздействии экстремально зависит от частоты колебаний, подтверждая «резонансный» механизм наблюдаемого изменения.

### Выводы

Как при реэкстракции азотной кислоты, так и при экстракции редкоземельных элементов растворами ди-(2-этилгексил)фосфорной кислоты или трибутилфосфатом возникает и развивается спонтанная поверхностная конвекция. В системах с редкоземельными элементами спонтанная поверхностная конвекция наблюдается при более низких частотах и меньшей интенсивности ввиду поверхностной активности экстракционных реагентов и формирования межфазных образований, чем при реэкстракции азотной кислоты. В системах с редкоземельными элементами и гептаном в качестве разбавителя экстракционного реагента интенсивность спонтанной поверхностной конвекции выше, чем в системах с толуолом и тетрахлорметаном, так как выше градиент межфазного натяжения. Для одного и того же растворителя экстракционного реагента интенсивность спонтанной поверхностной конвекции более выражена в системах с элементами цериевой подгруппы, чем иттриевой, что обусловлено различием структур, формирующихся в межфазном слое. Механическое воздействие на систему на частотах проявления спонтанной поверхностной конвекции приводит к повышению скорости процесса экстракции (реэкстракции) на частотах проявления спонтанной поверхностной конвекции максимальной интенсивности.

#### Благодарности

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований № 19-03-00194 и грантом Правительства Тульской области ДС/160 от 27.11.2019 г.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

### Сведения об авторах

Кизим Николай Федорович, д.х.н., проф., ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2109-2672 Голубина Елена Николаевна, д.х.н., доцент, ORCID:

https://orcid.org/0000-0003-1024-1687

# Список литературы

[1] Shevchenko E. A., Mitra S., Ermakov S. A., Titov A. G., Ermakov A. A., Pattader P. Joint mass transfer of two components associated with the spontaneous interfacial convection in the liquid-liquid extraction system // Chem. Eng. Sci. 2019. V. 195. P. 301–311. https:// doi.org/10.1016/j.ces.2018.09.018

[2] Golubina E., Kizim N., Alekseeva N. Intensification of the extraction of rare earth elements at the local mechanical vibration in the interfacial layer. // Chem. Eng. & Processing: Process Intensification. 2018. V. 132. N 10. P. 98–104.

https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.08.019

[3] Мостов Л. А., Ермаков С. А., Ермаков А. А., Артамонова Н. А. Кинетика массопереноса иода в условиях самопроизвольной межфазной конвекции через плоскую границу раздела фаз // ЖПХ. 2011. Т. 87. № 12. С. 1968–1971 [Mostov L. A., Ermakov S. A., Ermakov A. A., Artamonova N. A. Kinetics of iodine mass transfer under the conditions of spontaneous interfacial convection through a planar phase boundary // Russ. J. Appl. Chem. 2011. V. 84. N 12. P. 2051–2054.

https://doi.org/10.1134/S1070427211120068].

- [4] Каминский В. А., Дильман В. В. Неустойчивость Рэлея в процессах испарения // ЖФХ. 2004. Т. 78. № 3. С. 558–562 [Kaminskiî V. A., Dilman V. V. Rayleigh instability in evaporation process // Russ. J. Phys. Chem. A. 2004. V. 78. N 3. P. 467–471].
- [5] Тарасов В. В., Коваленко Н. Ф., Щербакова Г. С., Дунсян Ч. Линейное и радиальное течения Марангони поверхностно-активных веществ // Теорет. основы хим. технологии. 2006. Т. 40. № 2. С. 124–129 [Tarasov V. V., Kovalenko N. F., Shcherbakova G. S., Zhang D. Linear radial Marangoni flows of sufactants // Theoret. Foundations Chem. Eng. 2006. V. 40. N 2. P. 111–115.

https://doi.org/10.1134/S0040579506020023].

- [6] Kovalchuk N. M., Vollhardt D. Spontaneous nonlinear oscillation produced by alcohol transfer through water / alkane interface: An experimental study // Colloids and Surfaces. A: Physicochem. Eng. Asp. 2006. V. 291. N 1–3. P. 101–109. https://doi.org/10.1021/jp054452f
- [7] Li D., Chen M., Zhao S., Zeng A. Entropy generation analysis of Rayleigh convection in gas–liquid mass transfer process // Chem. Eng. Res. Design. 2018.
  V. 134. P. 359–369. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.04.011
- [8] Дупал А. Я., Тарасов В. В., Ягодин Г. А., Арутюнян В. А. Самопроизвольная поверхностная конвекция при экстракции лантаноидов ди-(2-этилгексил)фосфорной кислотой // Коллоид. журн. 1988. Т. 50. № 2. С. 355–358.
- [9] Кизим Н. Ф., Голубина Е. Н. Интенсивность спонтанной поверхностной конвекции в системах с ди-(2-этилгексил)фосфорной кислотой // ЖФХ. 2009. Т. 83. № 7. С. 1384–1390 [Kizim N. F., Golubina E. N. The intensity of spontaneous surface convection in di-(2-ethylhexyl)phosphoric acid

systems // Russ. J. Phys. Chem. A. 2009. V. 83. N 7. P. 1230–1235.

https://doi.org/10.1134/S0036024409070334].

[10] You Xue-Yi, Zhang Le-Dao, Zheng Jing-Ru. Marangoni instability of immiscible liquid–liquid stratified flow with a planar interface in the presence of interfacial mass transfer. // J. Taiwan Inst. Chem. Eng. 2014. V. 45. P. 772–779.

https://doi.org/10.1016/j.jtice.2013.08.007 [11] *McDowell W. J., Perdue P. T., Case G. N.* Purification

- [11] McDowell W. J., Peraue P. I., Case G. N. Purification of di(2-ethylhexyl)phosphoric acid // J. Inorg. Nucl. Chem. 1976. V. 38. P. 2127–2129. https://doi.org/10.1016/0022-1902(76)80486-1
- [12] Кизим Н. Ф., Голубина Е. Н. Среднечастотное волновое движение жидкостей при спонтанной поверхностной конвекции // ЖФХ. 2003. Т. 77. № 12. С. 2286–2290 [Kizim N. F., Golubina E. N. Medium-frequency wave motion of liquids during spontaneous surface convection // Russ. J. Phys. Chem. A. 2003. V. 77. N 12. P. 2064-2067].
- [13] Кизим Н. Ф., Голубина Е. Н. Влияние внешних факторов на повышение скорости экстракции при колебательном воздействии на динамический межфазный слой // ЖПХ. 2013. Т. 86. № 5. С. 734–739 [Kizim N. F, Golubina E. N. Effect of external factors on the increase in the extraction rate in a vibration treatment on the dynamic interfacial layer // Russ. J. Appl. Chem. 2013. V. 86. N 5. P. 680–686. https://doi.org/10.1134/S1070427213050121].
- [14] Vandegrift G. F., Horwitz E. P. The mechanism of interfacial mass transfer of calcium in the system: di(2-ethylhexyl)phosphoric acid in dodecane-dilute nitric acid // J. Inorg. Nucl. Chem. 1977. V. 39. N 8. P. 1425–1428.

https://doi.org/10.1016/0022-1902(77)80310-2

- [15] Gajda B., Bogacki M. B. The effect of tributyl phosphate on the extraction of nickel(II) and cobalt(II) ions with di(2-ethylhexyl)phosphoric acid // Physicochem. Problems Mineral Processing. 2007. V. 41. N 1. P. 145–152.
- [16] Walmsley J. A. Self-association of phosphinic acids in nonpolar solvents. The origin of the apparent dipole moment in symmetric dimers // J. Phys. Chem. 1984.
  V. 88. P. 1226–1231.

https://doi.org/10.1021/j150650a042

[17] Голубина Е. Н., Кизим Н. Ф., Чекмарев А. М. Состояние динамического межфазного слоя экстракционной системы и коэффициент затухания поверхностных волн // ДАН. 2013. Т. 449. № 5. С. 539–542 [Golubina E. N., Kizim N. F., Chekmarev A. M. State of the dynamic interfacial layer of an extraction system and the attenuation coefficient of surface waves // Doklady Phys. Chem. 2013. V. 449. Part 2. P. 71–74.

https://doi.org/10.1134/S0012501613040052].