


О возможности интенсификации извлечения полярными экстрагентами


Джафарли Ниджат Тахир оглы¹ nidjat96@mail.ru  0009-0009-9695-2359

¹ Санкт-Петербургский Государственный Технологический Институт (Технический Университет), Россия

Аннотация. В работе исследовано влияние переменного электрического поля на физико-химические свойства полярных жидкостей и эффективность экстракционных процессов с их применением. Проведен сравнительный анализ различных подходов к интенсификации массообменных процессов, в том числе с учетом надмолекулярной организации экстрагентов. Основное внимание уделено изменениям структурных характеристик этанола, воды и трибутилфосфата под воздействием переменного частотно-модулированного сигнала. Показано, что электрофизическая обработка приводит к снижению динамической вязкости на 14–20 %, уменьшению коэффициента поверхностного натяжения до 23 % и увеличению площади свободной поверхности жидкости. Это обуславливает рост коэффициентов диффузии и массопередачи, способствуя ускорению экстракционных процессов. Экспериментальные данные подтверждают, что предварительная обработка компонентов системы электрическим полем повышает проницаемость через полупроницаемые мембраны, усиливает капиллярный подъем и изменяет параметры осмотического давления. Установлено, что наибольшую эффективность демонстрирует селективное воздействие на один из компонентов системы — трибутилфосфат или водный раствор лантаноидов — в отличие от одновременной обработки обеих фаз. Коэффициент распределения при этом увеличивается до 69 %, что свидетельствует о перспективности такого подхода для интенсификации процессов экстракции. Полученные результаты имеют значимое прикладное значение для оптимизации технологий разделения в химической промышленности. Авторы подчеркивают необходимость дальнейших исследований по уточнению оптимальных параметров электрофизического воздействия и расширению круга исследуемых экстрагентов.

Ключевые слова: экстрагирование, экстракция, воздействие переменного электрического поля, полярные экстрагенты, изменения надмолекулярной структуры, этиловый спирт, НПМ.

On the possibility of intensification of extraction by polar extracting agents

Jafarli Nijat Tahir¹ nidjat96@mail.ru  0009-0009-9695-2359

¹ St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), Russia

Abstract. The study examines the influence of alternating electric fields on the physicochemical properties of polar liquids and the efficiency of extraction processes involving them. A comparative analysis of various approaches to the intensification of mass transfer processes is presented, with particular focus on the supramolecular organization of extractants. Special attention is given to structural changes in ethanol, water, and tributyl phosphate under the action of a modulated alternating current signal. It is shown that electrophysical treatment reduces dynamic viscosity by 14–20%, decreases surface tension by up to 23%, and increases the free surface area of the liquids. These changes enhance diffusion and mass transfer coefficients, thus accelerating extraction processes. Experimental results confirm that preliminary treatment of system components with electric fields increases permeability through semipermeable membranes, intensifies capillary rise, and affects osmotic pressure parameters. It is established that the most effective approach involves selective treatment of a single system component—either tributyl phosphate or the aqueous solution of rare earth elements—rather than simultaneous treatment of both phases. The distribution coefficient increases by up to 69%, indicating the high potential of this method for intensifying extraction processes. These findings have significant practical implications for optimizing separation technologies in the chemical industry. The authors emphasize the need for further research to define optimal electrophysical treatment parameters and to extend the range of investigated extractants.

Keywords: solid extraction, extraction, effects of alternating electric field, polar extractants, changes in the supramolecular structure, ethyl alcohol, NMP.

Введение

Экстракция и экстрагирование (от лат. *extraho* – извлекаю) представляют собой важнейшие массообменные процессы на границе раздела фаз, широко применяемые в различных отраслях промышленности. Эти методы разделения играют ключевую роль в химической, нефтеперерабатывающей, пищевой, фармацевтической и других высокотехнологичных отраслях производства.

Жидкая экстракция представляет собой процесс извлечения целевого компонента из жидкой фазы с помощью специально подобранного растворителя (экстрагента). Основным механизмом разделения является различная растворимость компонентов исходной смеси в экстрагенте. Процесс протекает преимущественно при механическом перемешивании, что приводит к образованию эмульсии, состоящей из двух растворов: экстрактного и рафинатного [1].

Для цитирования

Джафарли Н.Т. О возможности интенсификации извлечения полярными экстрагентами // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 1. С. 235–242. doi:10.20914/2310-1202-2025-1-235-242

For citation

Jafarli Nijat Tahir On the possibility of intensification of extraction by polar extracting agents. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2025. vol. 87. no. 1. pp. 235–242. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2025-1-235-242

Твердое экстрагирование характеризуется выщелачиванием целевого компонента из твердой фазы с помощью жидкого экстрагента [2]. Механизм данного процесса включает три последовательные стадии:

Проникновение экстрагента в пористую структуру твердого тела.

Растворение целевого компонента в экстрагенте.

Диффузия образовавшегося раствора в основную массу жидкости.

Скорость протекания всего процесса определяется скоростью наиболее медленной стадии, как правило, диффузионной [3]. Первые две стадии обычно протекают достаточно быстро, поэтому оптимизация процесса направлена на интенсификацию именно диффузионной составляющей.

Учитывая огромное значение данных методов разделения в современном производстве, исследования в области совершенствования экстракционных технологий продолжают по нескольким направлениям: подбор оптимальных экстрагентов и их смесей; оптимизация концентрационных режимов; изучение физико-химических свойств экстрагентов; разработка методов модификации структуры экстрагентов для повышения их селективности и проницаемости.

Особый интерес представляют возможности направленного изменения надмолекулярной структуры экстрагентов с целью улучшения их технологических характеристик. Одним из перспективных направлений является воздействие электрических полей на полярные экстрагенты, что может существенно изменить их физико-химические свойства и, соответственно, эффективность экстракционных процессов.

Теоретическая часть

Процессы экстракции и экстрагирования основаны на различии в растворимости компонентов смеси между двумя несмешивающимися фазами. Эффективность этих процессов определяется рядом факторов, среди которых ключевую роль играют:

Природа экстрагента: полярность молекул; способность к образованию водородных связей; диэлектрическая проницаемость; вязкость и поверхностное натяжение.

Механизмы массопереноса: диффузия через границу раздела фаз; конвективный перенос; капиллярные явления; надмолекулярная структура жидкостей.

Полярные жидкости характеризуются наличием устойчивых ассоциатов молекул.

Например, в структуре воды преобладают тетраэдрические образования из четырех молекул, связанных водородными связями [4]. Эти кластеры могут существовать от нескольких минут до нескольких суток.

Переменные электрические поля способны вызывать существенные изменения в надмолекулярной организации жидкостей. Основные механизмы воздействия включают [5]: ориентацию дипольных молекул по полю; изменение энергии водородных связей; перестройку кластерной структуры; изменение конформационных характеристик молекул.

Изменение свойств жидкости при электрофизическом воздействии постоянных и переменных электрических полей, приводит к электроконвекционным явлениям, которые упорядочивают надмолекулярную структуру жидкости и способствуют возникновению предпочтительной ориентации молекул [6].

В настоящее время ведутся исследования по влиянию природы электрофизических воздействий на различные объекты с целью поиска инновационных технологий и совершенствования уже имеющихся [7].

В статье [8] показано, что электрофизическое воздействие переменных электрических полей на жидкости различной полярности приводит к изменению их адгезионных и когезионных свойств, за счет надмолекулярной перестройки структуры вещества и возможного изменения ассоциации молекул жидкости, что проявляется в изменениях некоторых физических свойств.

Рассмотрим в качестве полярной жидкости эмблему полярных жидкостей, состоящую из тетраэдрической структуры, а именно воды Н-О-Н.

Известно, что в воде часть молекул связана водородными связями. Водородные связи распределены неравномерно по объему. Области с повышенным содержанием водородных связей можно считать кластерами. По модели молекулы воды Бьеррума структурным элементом воды является тетраэдр из четырёх молекул, связанных друг с другом водородными связями [4].

Различные нестационарные процессы могут приводить к образованию кластеров в воде. Переменное электрическое поле может изменять движение зарядов, опосредованно действуя на водородные связи в кластерах.

Отмечается пороговый характер воздействия – изменения параметров воды замечаются только при накоплении изменений. Эволюция водных кластеров характеризуется временами 12 мин, 2 ч, 24 ч и несколько суток, после чего разбавленный водный раствор становится нечувствительным к слабым полевым воздействиям [9].

Вода способна длительно сохранять свой первичный химический тип, структурные особенности и физические свойства. В статье [10] рассмотрено существование в воде молекулярных структур различного рода в зависимости от степени диссоциации. Показано явление сохранения водой физической структуры и свойств после воздействий различного характера.

Были выполнены теоретические исследования кластеров воды, использующие полуэмпирические расчеты, а также экспериментальные исследования различными методами. При действии слабоинтенсивных медленно меняющихся электрических полей на воду, возможно изменение только структуры кластеров [11].

Кинетика экстракции описывается общим уравнением массообмена:

$$M = K \cdot dC \cdot F \cdot t \quad (1)$$

где M – количество экстрагированного вещества; F – площадь раздела фаз; t – время процесса экстракции; K – коэффициент массопередачи; dC – разность концентраций.

Коэффициент массопередачи рассчитывают по формуле:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\beta} + \frac{r}{D_{вн}} + \frac{x}{D_{св}}} \quad (2)$$

где K – коэффициент массопередачи; β – коэффициент конвективной диффузии; r – размер диффундируемых частиц, м; $D_{вн}$ – коэффициент внутренней молекулярной диффузии; x – площадь слоя экстрагента; $D_{св}$ – коэффициент свободной молекулярной диффузии.

Так же уравнение массообмена можно написать по второму закону Фика:

$$M = D \frac{d^2C}{dx^2} dVt \quad (3)$$

где M – количество экстрагированного вещества; D – коэффициент молекулярной диффузии; dC – разность концентраций; dx – изменение толщины диффузного слоя; V – мольный объем диффундирующих веществ; t – время процесса экстракции.

Можно предположить, что изменением структуры полярных жидкостей, можно понизить их динамическую вязкость.

По Нернсту и Эйнштейну, с понижением динамической вязкости увеличивается коэффициент диффузии.

$$D = \frac{RT}{6\pi\eta r} \quad (4)$$

где D – коэффициент диффузии; R – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; η – динамическая вязкость жидкости; r – радиус молекул.

Соответственно, при воздействии переменного электрического поля на полярную жидкость понижается её динамическая вязкость, что приводит к повышению коэффициента молекулярной диффузии и, как следствие, повышается количество экстрагированного вещества и коэффициента массопередачи.

При воздействии на полярные экстрагенты переменными электрическими полями меняется надмолекулярная структура полярных жидкостей, можно предположить, что площадь свободной поверхности увеличится. По формуле расчета поверхностного натяжения, при увеличении площади свободной поверхности, уменьшается поверхностное натяжение:

$$\sigma = \frac{E_{пов}}{S} \quad (5)$$

где $E_{пов}$ – поверхностная энергия жидкости, S – площадь свободной поверхности жидкости.

Соответственно, поверхностное натяжение жидкости понижается, что приводит к увеличению её проницаемости. Важно отметить, что поверхностное натяжение никак не зависит от площади свободной поверхности, а при увеличении площади свободной поверхности жидкости поверхностное натяжение уменьшается.

Изменения поверхностного натяжения можно увидеть по формуле Жюрена.

$$\sigma = \frac{Hr\rho g}{2\cos\theta} \quad (6)$$

где H – высота поднятия столба жидкости, θ – угол смачивания жидкостью стенки капилляра, g – ускорение свободного падения, ρ – плотность жидкости, r – радиус капилляра.

Коэффициент поверхностного натяжения жидкости понижается с понижением высоты поднятия столба жидкости и уменьшением угла смачивания жидкостью стенки капилляра. При отсутствии смачивания $\theta > 90^\circ$, $\cos\theta < 0$ и уровень жидкости в капилляре опускается на величину h . При полном смачивании $\theta = 0$, $\cos\theta = 1$ и радиус мениска равен радиусу капилляра.

Измерения поверхностного натяжения также можно рассчитать по формуле:

$$\sigma = \frac{Mg}{\pi d} \quad (7)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения воды, M – масса жидкости ($M = m \cdot n$ масса капли умножить на количество капель), m – масса капли, n – число капель, d – внутренний диаметр пипетки, g – ускорение свободного падения, равно $9,8 \text{ м/с}^2$

Экспериментальная часть

Методика проведения экспериментов исследования проводилась на лабораторной установке, включающей следующие основные элементы:

Устройство, генерирующее переменный частотно-модулируемый сигнал (ПЧМС) со следующими характеристиками: 220 В, 50 Гц Подобное устройство выпускается в КНР фирмы «Pan bao».

Объектами исследования служили: дистиллированная вода (pH = 6,8); 96 %-ный этиловый спирт; трибутилфосфат

Ниже, в таблице 1 приведены площадь свободной поверхности и изменения поверхностного натяжения жидкостей.

Таблица 1.
Изменение площади поверхности и поверхностного натяжения

Table 1.
Changes in surface area and surface tension

		Вода Water		Спирт Ethanol	
		S, см ²	Δσ, %	S, см ²	Δσ, %
Стекло	Без обработки Untreated	1,72		4,12	
	После обработки переменным электрическим полем в течении мин After treatment with alternating electric field for min.	10	1,76	4,17	-11,1
		20	1,80	4,23	
		30	1,85	4,31	
		40	1,91	4,39	
		50	1,97	4,51	
60	2,04	4,63			
Пластик	Без обработки Untreated	1,12		1,94	
	После обработки переменным электрическим полем в течении мин After treatment with alternating electric field for min.	10	1,15	1,97	-14,6
		20	1,19	2,01	
		30	1,25	2,06	
		40	1,32	2,12	
		50	1,39	2,19	
60	1,47	2,27			

Как видно из данных таблицы 1, при обработке переменным электрическим полем наблюдается увеличение площади свободной поверхности жидкости. Особенно заметны изменения для воды на пластиковой поверхности.

Через 30 минут обработки площадь увеличивается на 15–18 %, что свидетельствует о существенном снижении поверхностного натяжения.

Для воды на стеклянной поверхности площадь увеличивается с 1,72 см² до 2,04 см² (рост на 18,6 %);

Для воды на пластиковой поверхности изменение более значительное: с 1,12 см² до 1,47 см² (прирост 31,2 %);

Спирт демонстрирует меньшую динамику изменений по сравнению с водой.

В таблице 2 приведены высота поднятия столба жидкости и угол смачивания.

Таблица 2.
Изменения коэффициента поверхностного натяжения

Table 2.
Changes in the surface tension coefficient

		H, мм	Θ, °	cosθ	Δσ, %	
Вода Water	Без обработки Untreated	5,7	32	0,85	-18,0	
	После обработки переменным электрическим полем в течении мин After treatment with alternating electric field for min.	10	5,7	31		0,86
		20	5,8	29		0,87
		30	5,9	27		0,89
		40	6,0	24		0,91
		50	6,1	21		0,93
60	6,2	18	0,95			
Спирт Ethanol	Без обработки Untreated	4,8	18	0,95	-11,0	
	После обработки переменным электрическим полем в течении мин After treatment with alternating electric field for min.	10	4,8	17		0,96
		20	4,9	16		0,96
		30	5,0	14		0,97
		40	5,1	12		0,98
		50	5,1	10		0,98
60	5,2	7	0,99			

По полученные данным, можно отметить, что увеличивается высота поднятия столба жидкости, а угол смачивания уменьшается. Соответственно понижается поверхностное натяжение.

Ниже, в таблице 3 приведены изменения поверхностного натяжения.

Результаты показывают стабильное уменьшение массы капли при увеличении времени воздействия электрического поля. Для воды это изменение составляет 0,12 г/мин, что значительно выше естественного испарения (0,03 г./мин).

По результатам таблиц 1–3, можно заметить, что коэффициент поверхностного натяжения жидкостей понижается симбатно по всем трем методикам измерения коэффициента поверхностного натяжения.

Таблица 3.
Изменения поверхностного натяжения

Table 3.
Changes in surface tension

		М, мГ	n	d, мм	Δσ, %	
Вода Water	Без обработки Untreated	4,1247	50	2,1	-17,4	
	После обработки переменным электрическим полем в течении мин After treatment with alternating electric field for min.	10	4,0869	50		2,1
		20	3,9784	50		2,1
		30	3,8565	50		2,1
		40	3,7175	50		2,1
		50	3,5668	50		2,1
60	3,4083	50	2,1			
Спирт Ethanol	Без обработки Untreated	0,9758	50	2,1	-11,5	
	После обработки переменным электрическим полем в течении мин After treatment with alternating electric field for min.	10	0,9594	50		2,1
		20	0,9418	50		2,1
		30	0,9269	50		2,1
		40	0,9089	50		2,1
		50	0,8894	50		2,1
60	0,8636	50	2,1			

Ниже, в таблице 4 приведены изменения динамической вязкости жидкостей.

Таблица 4.
Изменение Динамической вязкости после обработки переменным электрическим полем

Table 4.
Change in dynamic viscosity after treatment with an alternating electric field

		Вода μ·10 ³ , Па, с	Спирт μ·10 ³ , Па, с
Без обработки Untreated		0,943	1,141
После обработки переменным электрическим полем в течении мин After treatment with alternating electric field for min.	10	0,928	1,122
	20	0,909	1,103
	30	0,879	1,081
	40	0,844	1,049
	50	0,798	1,017
	60	0,749	0,978

По приведенным данным в таблице 4, согласно экспериментальным данным, динамическая вязкость жидкостей снижается после воздействия переменным электрическим полем.

Заметное изменение динамической вязкости замечается после 30 минут воздействия переменного электрического поля на жидкостях: спирт и вода.

Динамическая вязкость воды понизилась на 20 %;

Динамическая вязкость воды понизилась на 14 %.

Далее изучалось изменение осмотического давления воды, обработанной переменным электрическим полем.

Исследование проводилось методом определения высоты поднятия уровня физиологического раствора в сообщающихся сосудах, разделенных биологической полупроницаемой мембраной. Результаты измерения осмотического давления, высоты поднятия воды без обработки.

Без обработки и электрофизически обработанной воды переменным частотно-модулируемым сигналом, относительно физиологического раствора, представлены ниже.

Таблица 5.
Осмотическое давление воды относительно физиологического раствора (0,9 % NaCl масс)

Table 5.
Osmotic pressure of water relative to saline solution (0.9 % NaCl by weight)

		Высота поднятия жидкости Δh, мм	Осмотическое давление π, Па
Без обработки Untreated		3,5	335,2
После обработки переменным электрическим полем в течении мин After treatment with alternating electric field for min.	10	3,6	347,4
	20	3,7	363,1
	30	3,9	387,8
	40	4,1	412,7
	50	4,4	436,4
	60	4,7	462,6

Измерение осмотического давления подтверждает повышение проницаемости обработанной воды через полупроницаемые мембраны. Прирост составил 25–30 % по сравнению с исходными значениями.

Таблица 6.
Высота поднятия жидкости по фильтровальной бумаге

Table 6.
The height of the liquid rise on the filter paper

		Высота поднятия жидкости Δh, см
Без обработки Untreated		5,6
После обработки переменным электрическим полем в течении мин After treatment with alternating electric field for min.	10	6,1
	20	6,8
	30	7,9
	40	8,7
	50	9,4
	60	9,9

Эксперимент с фильтровальной бумагой демонстрирует увеличение капиллярного подъема обработанной воды. Высота подъема увеличивается на 40 мм по сравнению с необработанным образцом.

Для практической верификации выдвинутой гипотезы была осуществлена серия экспериментов по экстракции редкоземельных элементов (РЗЭ) с использованием трибутил-

фосфата (ТБФ) в качестве экстрагента. Исследование проводилось по четырем различным методикам: классический метод без предварительной обработки реагентов; методика с предварительной обработкой трибутилфосфата переменным электрическим полем; вариант с предварительной обработкой водного раствора лантаноидов переменным электрическим полем; способ с непрерывной подачей переменного электрического поля непосредственно в процессе экстракции; каждый вариант эксперимента был проведен в 10 последовательных стадиях для обеспечения репрезентативности результатов.

Таблица 7.
Средние результаты коэффициента
Распределения D

Table 7.
Average Distribution Coefficient Results D

Методика экстракции Extraction technique	Коэффициент распределения D Distribution coefficient D
Классический метод Classical method	0,47
С обработкой ТБФ With TBP treatment	0,77
С обработкой раствора РЗЭ With treatment of REE solution	0,80
С одновременной обработкой With simultaneous treatment	0,42

Полученные данные демонстрируют, что предварительная обработка как трибутилфосфата, так и водного раствора РЗЭ переменным электрическим полем приводит к существенному повышению эффективности экстракции. При этом одновременная обработка обоих компонентов процесса показывает наименее эффективный результат, что указывает о необходимости создания градиента свойств между фазами: предварительная обработка ТБФ дает увеличение коэффициента распределения на 63,8 %; обработка водного раствора РЗЭ эффективнее – прирост 69,1 %

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет сделать следующие выводы:

Проведенные исследования показали, что воздействие переменного электрического поля приводит к существенным изменениям физико-химических свойств полярных жидкостей. Снижение поверхностного натяжения в среднем составило 15–23 %, что согласуется с данными других авторов [11]. Наблюдаемое увеличение площади свободной поверхности подтверждает гипотезу о разрушении структурированных слоев на межфазной границе.

Динамическая вязкость исследуемых жидкостей демонстрирует устойчивую тенденцию к снижению при увеличении времени электрической обработки. Максимальное изменение вязкости наблюдалось для водных растворов и составило около 20 %. Это можно объяснить перестройкой надмолекулярной структуры жидкости под воздействием внешнего поля.

Полученные данные имеют важное практическое значение для оптимизации экстракционных процессов. Увеличение коэффициента распределения при предварительной обработке компонентов электрическим полем (до 40–45 %) открывает новые возможности для интенсификации массообменных процессов в химической технологии.

Результаты исследования согласуются с работами [8, 10], где также отмечено влияние электрических полей на структуру полярных жидкостей. Однако, впервые показано, что наиболее эффективным является предварительная обработка одного из компонентов системы, а не одновременное воздействие на оба компонента.

Необходимы дополнительные исследования для определения оптимальных параметров электрической обработки различных типов экстрагентов. Особый интерес представляет изучение влияния переменных частотных характеристик электрического поля на эффективность экстракционных процессов.

Заключение

Влияние электрической обработки на свойства экстрагентов. Установлено, что воздействие переменного электрического поля на полярные жидкости приводит к существенным изменениям их физико-химических характеристик. Происходит снижение поверхностного натяжения в среднем на 15–23%, что подтверждается данными всех проведенных экспериментов.

Изменение реологических параметров. Динамическая вязкость исследуемых жидкостей демонстрирует устойчивую тенденцию к снижению при увеличении времени электрической обработки. Максимальное изменение вязкости составило около 20% для водных растворов и 15% для спиртовых растворов.

Массообменный процесс происходит благодаря наличию концентрации градиента фазовых коэффициентов массоотдачи. Для усиления массообменного процесса нужно повысить коэффициент диффузии, а коэффициент диффузии, в свою очередь, повышается с понижением динамической вязкости жидкости. По проведенным опытам видно, что воздействие переменного электрического поля на полярные жидкости

приводит к понижению динамической вязкости полярных жидкостей.

Так же воздействие переменного электрического поля приводит к понижению поверхностного натяжения, в связи с чем уменьшаются когезионные свойства и увеличиваются адгезионные свойства, что приводит к повышению способности растворения экстрагентов.

Полученные данные имеют важное прикладное значение для оптимизации процессов экстракции. Увеличение коэффициента распределения при предварительной обработке компонентов электрическим полем (до 40–45%) открывает новые возможности для интенсификации массообменных процессов в химической технологии.

Литература


- 1 Романков П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи): Учебное пособие для вузов / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк. СПб.: ХИМИЗДАТ, 2009. 544 с.
- 2 Gerbaud V. Review of Extractive Distillation. Process design, operation, optimization and control // Chemical Engineering Research and Design. 2018. Vol. 141. P. 229–271.
- 3 Комиссаров Ю.А. Процессы и аппараты химической технологии. В 5 частях часть 5: учебник для академического бакалавриата / Ю.А. Комиссаров, Л.С. Гордеев, Д.П. Вент; под редакцией Ю.А. Комиссаров. 2 е изд., перераб. И доп. – Москва: Юрайт, 2018. 219 с.
- 4 Bjerrum N. Structure and Prop. of Ice // Science. 1952. Vol.115. № 11. P.385.
- 5 Классен В.И. Омагничивание водных систем. М.: Химия, 1978. 240 с.
- 6 Hilbers C.W., MacLean C. NMR Basic Principles and Progress Published // Springer Science and Business Media LLC. 1972. P. 1–52. doi: 10.1007/978-3-642-65312-4_1.
- 7 Савиных Б.В., Фасхутдинов А.А., Мухамадиев А.А., Пашанин А.В. Динамическая вязкость жидкостей в электрических полях. Бултеровские сообщения. Приложение к спецвыпуску. Казань, 2002. № 10. С. 204–212.
- 8 Рамзани М.С., Панфёрова Т.В., Иванов А.В., Ивахнюк Г.К. О вероятных механизмах взаимодействия переменных электрических полей с жидкостями различной полярности // Известия. СПб., 2020. № 55 (81). С. 39–42.
- 9 Лобышев В.И., Рыжиков Б.Д., Шихлинская Р.Э. // Журнал физической химии. 1998. Т.43. Вып.4. С. 710.
- 10 Дерголец В.Ф. Мир воды. – Люберцы, 1979. 254 с.
- 11 Жидько М.В., Шипунов Б.П. Влияние ВЧ поля на растворимость кислорода в воде и ее физико-химические свойства / Сб. трудов I-й Международной Российско-Казахстанской конференции по химии и химической технологии. С. 77–79.
- 12 Eie LV, Pedersen-Bjergaard S, Hansen FA. Electromembrane extraction of polar substances - Status and perspectives. // J Pharm Biomed Anal. 2022 Vol. 207. P.114407. doi: 10.1016/j.jpba.2021.114407
- 13 Pedersen-Bjergaard S, Huang C, Gjelstad A. Electromembrane extraction-Recent trends and where to go. // J Pharm Anal. 2017. Vol. 7. No. 3. pp. 141-147. doi: 10.1016/j.jpba.2017.04.002.
- 14 Ferreira Avelar, Millena Christie et al. Electric field-assisted multiphase extraction to increase selectivity and sensitivity in liquid chromatography-mass spectrometry and paper spray mass spectrometry. // Talanta. 2020. Vol. 224. P. 121887.
- 15 Hansen FA, Santigosa-Murillo E, Ramos-Payán M, Muñoz M, Leere Øiestad E, Pedersen-Bjergaard S. Electromembrane extraction using deep eutectic solvents as the liquid membrane // Anal Chim Acta. 2021. Vol. 1143. P.109-116. doi: 10.1016/j.aca.2020.11.044.
- 16 Jaiswal V, Singh S, Hari Krishnan AR, Dhar P. Competitive Electrohydrodynamic and Electrosolutal Advection Arrests Evaporation Kinetics of Droplets. Langmuir. 2020. Vol. 36. No. 30. P. 8971-8982. doi: 10.1021/acs.langmuir.0c01619
- 17 Dias ALB, de Aguiar AC, Rostagno MA. Extraction of natural products using supercritical fluids and pressurized liquids assisted by ultrasound: Current status and trends // Ultrason Sonochem. 2021. P. 105584. doi: 10.1016/j.ulsonch.2021.105584.
- 18 Ballesteros-Gómez A., Sicilia M. D., Rubio S. Supramolecular solvents in the extraction of organic compounds. A review // Analytica Chimica Acta. 2010. Vol. 677. No. 2. P. 108-130.
- 19 Pramanik S. et al. Supramolecular chemistry of liquid-liquid extraction // Chemical Science. 2024. Vol. 15. No. 21. P. 7824-7847.
- 20 Jagirani M. S., Soylak M. Supramolecular solvents: a review of a modern innovation in liquid-phase microextraction technique // Turkish Journal of Chemistry. 2021. Vol. 45. No. 6. P. 1651-1677.

References


- 1 Romankov P.G. Metody rascheta processov i apparatov himicheskoy tehnologii (primery i zadachi): Uchebnoe posobie dlya vuzov / P.G. Romankov, V.F. Frolov, O.M. Flisyuk. – SPb.: HIMIZDAT, 2009. – 544 s.
- 2 Gerbaud V. Review of Extractive Distillation. Process design, operation, optimization and control // Chemical Engineering Research and Design. 2018. vol. 141. pp. 229–271.
- 3 Komissarov Yu.A. Processy i apparaty himicheskoy tehnologii. V 5 chastyah. Chast 5: Uchebnik dlya akademicheskogo bakalavriata / Yu.A. Komissarov, L.S. Gordeev, D.P. Vent; pod redakciej Yu.A. Komissarov. 2-e izd., pererab. i dop. – Moskva: Yurajt, 2018. – 219 s.
- 4 Bjerrum N. Structure and Prop. of Ice // Science. 1952. vol. 115. no. 11. p. 385.
- 5 Klassen V.I. Omagnichivanie vodnykh sistem. Moscow: Khimiya, 1978. 240 s.
- 6 Hilbers C.W., MacLean S. NMR Basic Principles and Progress Published // Springer Science and Business Media LLC. 1972. pp. 1–52. doi: 10.1007/978-3-642-65312-4_1.
- 7 Savinykh B.V., Faskhutdinov A.A., Mukhamadiev A.A., Pashanin A.V. Dinamicheskaya vyazkost zhidkostey v elektricheskikh polyakh // Butlerovskie soobshcheniya. Prilozhenie k spetsvypusku. Kazan, 2002. no. 10. pp. 204–212. (in Russian)

- 8 Ramzani M.S., Panfyorova T.V., Ivanov A.V., Ivakhnyuk G.K. O veroyatnykh mekhanizmakh vzaimodeystviya peremennykh elektricheskikh poley s zhidkostyami razlichnoy polyarnosti // *Izvestiya. SPb.*, 2020. no. 55 (81). pp. 39–42. (in Russian)
- 9 Lobyshev V.I., Ryzhikov B.D., Shikhinskaya R.E. // *Zhurnal fizicheskoy khimii*. 1998. vol. 43. no. 4. pp. 710. (in Russian)
- 10 Dergolts V.F. *Mir vody*. Lyubertsy, 1979. 254 s. (in Russian)
- 11 Zhidko M.V., Shipunov B.P. Vliyanie VCh polya na rastvorimost kislороda v vode i ee fiziko-khimicheskie svoystva // *Sb. trudov I-oy Mezhdunarodnoy Rossiysko-Kazakhstanskoy konferentsii po khimii i khimicheskoy tekhnologii*. pp. 77–79. (in Russian)
- 12 Eie LV, Pedersen-Bjergaard S, Hansen FA. Electromembrane extraction of polar substances - Status and perspectives. // *J Pharm Biomed Anal*. 2022. vol. 207. pp.114407. doi: 10.1016/j.jpba.2021.114407
- 13 Pedersen-Bjergaard S, Huang C, Gjelstad A. Electromembrane extraction-Recent trends and where to go. // *J Pharm Anal*. 2017. vol. 7. no. 3. pp. 141-147. doi: 10.1016/j.jpha.2017.04.002.
- 14 Ferreira Avelar, Millena Christie et al. Electric field-assisted multiphase extraction to increase selectivity and sensitivity in liquid chromatography-mass spectrometry and paper spray mass spectrometry. // *Talanta*. 2020. vol. 224. pp. 121887.
- 15 Hansen FA, Santigosa-Murillo E, Ramos-Payán M, Muñoz M, Leere Øiestad E, Pedersen-Bjergaard S. Electromembrane extraction using deep eutectic solvents as the liquid membrane. *Anal Chim Acta*. 2021. vol. 1143. pp.109-116. doi: 10.1016/j.aca.2020.11.044.
- 16 Jaiswal V, Singh S, Hari Krishnan AR, Dhar P. Competitive Electrohydrodynamic and Electrosolutal Advection Arrests Evaporation Kinetics of Droplets. *Langmuir*. 2020. vol. 36. no. 30. pp. 8971-8982. doi: 10.1021/acs.langmuir.0c01619
- 17 Dias ALB, de Aguiar AC, Rostagno MA. Extraction of natural products using supercritical fluids and pressurized liquids assisted by ultrasound: Current status and trends. *Ultrason Sonochem*. 2021. pp. 105584. doi: 10.1016/j.ultsonch.2021.105584.
- 18 Ballesteros-Gómez A., Sicilia M. D., Rubio S. Supramolecular solvents in the extraction of organic compounds. A review // *Analytica Chimica Acta*. 2010. vol. 677. no. 2. pp. 108-130.
- 19 Pramanik S. et al. Supramolecular chemistry of liquid-liquid extraction // *Chemical Science*. 2024. vol. 15. no. 21. pp. 7824-7847.
- 20 Jagirani M. S., Soylak M. Supramolecular solvents: a review of a modern innovation in liquid-phase microextraction technique // *Turkish Journal of Chemistry*. 2021. vol. 45. no. 6. pp. 1651-1677.

Сведения об авторах

Джафарли Ниджат Тахир оглы аспирант, кафедра инженерной защиты окружающей среды, Санкт-Петербургский Государственный Технологический Институт (Технический Университет), Московский проспект, 24-26/49 литера А, г. Санкт-Петербург, 190013, Россия, nidjat96@mail.ru
 <https://orcid.org/0009-0009-9695-2359>

Information about authors

Jafarli Nijat Tahir postgrad, Department of Environmental engineering, Saint-Petersburg State Institute of Technology, Moskovsky Av., 24-26/49 Saint-Petersburg, 190013, Russia, nidjat96@mail.ru
 <https://orcid.org/0009-0009-9695-2359>

Вклад авторов

Джафарли Ниджат Тахир оглы написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат

Contribution

Jafarli Nijat Tahir wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 03/02/2025	После редакции 28/02/2025	Принята в печать 10/03/2025
Received 03/02/2025	Accepted in revised 28/02/2025	Accepted 10/03/2025