

ЭКСТРАКЦИОННАЯ ОЧИСТКА БИС(2,4,4-ТРИМЕТИЛПЕНТИЛ)ФОСФИНОВОЙ КИСЛОТЫ (CYANEX 272) ОТ НЕЙТРАЛЬНЫХ ПРИМЕСЕЙ АЛКИЛФОСФИНОКСИДОВ

© В. И. Кузьмин, М. Н. Лескив*, Н. В. Гудкова, Т. Ю. Иваненко, Д. В. Кузьмин

Институт химии и химической технологии ФИЦ КНЦ СО РАН,
660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, д. 50/24
* E-mail: cherry_garden@inbox.ru

Поступила в Редакцию 10 июля 2024 г.

После доработки 5 марта 2025 г.

Принята к публикации 5 марта 2025 г.

Исследован процесс очистки технического катионообменного экстрагента бис(2,4,4-триметилпентил)фосфиновой кислоты (Cyanex 272) через омыление раствором NaOH с целью удаления нейтральных примесей. Показано, что стехиометрическое омыление органической кислоты раствором NaOH позволяет перевести ценный компонент в водную фазу в чистом виде (степень чистоты продукта до 99%). В диапазоне концентраций меньше критической концентрации мицеллообразования (менее $0.01 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$) процесс осложняется образованием стойких эмульсий. В системах с концентрацией натриевой соли Cyanex 272 в воде $0.1\text{--}0.5 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$ достигается эффективная очистка экстрагента от триоктилфосфиноксида при практически полном переходе его в водно-мицеллярный раствор, в то время как нейтральная примесь остается в фазе растворителя (толуола). Введение в водно-мицеллярный раствор высаливателя Na_2SO_4 приводит к образованию в системе еще одной фазы и частичному загрязнению Cyanex 272 в средней фазе.

Ключевые слова: бис(2,4,4-триметилпентил)фосфиновая кислота (Cyanex 272); триоктилфосфиноксид; критическая концентрация мицеллообразования; очистка; омыление; солюбилизация; мицеллообразование; высаливатель; сульфат натрия

DOI: 10.31857/S0044461825010057; EDN: LJQSCG

Бис(2,4,4-триметилпентил)фосфиновую кислоту широко используют в качестве экстрагента для различных металлов уже более 40 лет [1]. Технический продукт содержит ~83–85% основного вещества, 1–5% диформы кислоты $[\text{RP}(\text{OH})_2]$ и около 11–12% нейтральной примеси — триоктилфосфиноксида ($\text{R}_3\text{P}=\text{O}$). Для получения более чистого продукта необходимо использовать дополнительные методы очистки. При этом если двухосновную кислоту — $\text{RP}(\text{OH})_2$ можно отделить, используя существенно более высокую растворимость в воде ее натриевых солей по сравнению с основным продуктом, то от-

деление нейтральных примесей $\text{R}_3\text{P}=\text{O}$ является непростой задачей.

Ранее в литературе был описан метод очистки экстрагента через осаждение и кристаллизацию медной соли [2–4], однако данный способ достаточно трудоемок и требует использования большого количества органических растворителей (ацетон и эфир).

В работе [5] для очистки от нейтральных примесей другого распространенного экстрагента — ди-(2-этилгексил)фосфорной кислоты (Д2ЭГФК) используют наряду с осаждением медной солью отделение экстрагента в виде его натриевой соли в

системах вода–органический растворитель (толуол). Последний процесс основан на различиях распределения нейтральных примесей органических веществ и натриевой соли экстрагента между органической и водно-мицеллярной фазами, образующимися в этих системах. Ассоциация органических экстрагентов и мицеллообразование с их участием в определенных условиях — хорошо известные и весьма распространенные явления, в том числе для систем с серосодержащими экстрагентами [6]. Мицеллообразование сопровождается переходом большого объема водной фазы в органическую или, наоборот, органической в водную за счет солубилизации растворителя [7]. Солубилизация органического растворителя и других нейтральных органических примесей мицеллами натриевой соли Д2ЭГФК (NaA) снижает эффективность разделения компонентов и очистки экстрагента, тем не менее, как было показано ранее в работе [5], процесс достаточно эффективен и коэффициент разделения толуол/NaA составляет более 500, а для систем с нейтральной примесью триоктиламина достигает 2000.

Возможность применения подобного метода очистки экстрагента Суапех 272 оценена в работах [8–10]. По разработанной методике для очистки Суапех 272 его омыляют раствором NaOH на 75–80%. Процесс проводят в трехфазных системах с высаливанием натриевой соли экстрагента из водно-мицеллярного раствора сульфатом натрия. Установлено, что при этом основная часть примесей фосфиноксида остается в органической фазе, а натриевая соль Суапех 272 концентрируется в средней фазе. По этой методике содержание бис(2,4,4-триметилпентил)фосфиновой кислоты повышается с 87 до 98.4% с выходом продукта 87.6%. Повторная очистка позволяет повысить чистоту экстрагента до 99.8%.

Цель работы — оценка возможности очистки катионообменного экстрагента Суапех 272 от нейтральных примесей триоктилфосфиноксида путем межфазного распределения компонентов в системах. В настоящей работе на примере Суапех 272 для сравнения рассмотрен вариант улучшения процесса очистки экстрагента при устранении мицеллообразования путем снижения концентрации очищаемого экстрагента ниже критической концентрации мицеллообразования (ККМ) и соответственно нежелательной солубилизации, а также вариант разделения органических компонентов экстрагента Суапех 272 при изменении типа коллоидного раствора.

Рассмотренный процесс представляет интерес не только для очистки конкретного экстрагента Суапех 272, но и для других многофазных систем, включая мицеллярные, которые также могут быть

использованы для решения различных задач по разделению органических веществ.

Экспериментальная часть

В работе использовали: неорганические реагенты (минеральные кислоты, соли, щелочи) и органический растворитель (толуол) квалификации х.ч. и ч.д.а.; технический экстрагент бис(2,4,4-триметилпентил)фосфиновая кислота, Суапех 272, трибутилфосфат (ТБФ), триоктилфосфиноксид (ТОФО). Все растворы кислот, щелочей и солей готовили с использованием дистиллированной воды.

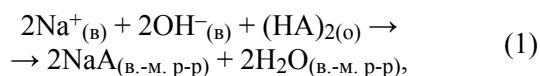
Содержание органической кислоты в фазах оценивали титрованием в этиловом спирте раствором NaOH в присутствии индикатора фенолфталеина (либо потенциометрически), концентрацию нейтральных примесей ($R_3P=O$) — методом ЯМР.

ЯМР-исследования проводили на спектрометре Bruker Avance III 600, 1H (600 МГц), ^{31}P (242 МГц) при температуре 25°C. Программное обеспечение TopSpin.

Кондуктометрические исследования растворов проводили на лабораторном анализаторе жидкости серии Анион 4100. Кондуктометрический метод — один из основных структуро-чувствительных инструментов изучения мицеллярных систем [11]. Для определения ККМ экстрагента готовили серию водно-мицеллярных растворов с различной концентрацией натриевых солей Суапех 272 от ~0.2 до 0.0005 моль·л⁻¹. Для тройных систем натриевая соль экстрагента–вода–толуол каждый раствор натриевой соли после разбавления водой приводили в контакт с небольшим количеством толуола (1 мл) до установления равновесия в мицеллярной системе. Для лучшего разделения фазы подвергали центрифугированию.

Обсуждение результатов

При обработке растворов Суапех 272 в толуоле водными растворами NaOH, так же как в случае с другими катионообменными экстрагентами (Д2ЭГФК [5] и Суапех 301), в системе в результате протекания реакции нейтрализации [уравнение (1)] образуются фазы: органическая, содержащая преимущественно толуол, и мицеллярный водно-органический раствор, содержащий основное количество катионообменного экстрагента в виде его натриевой соли:



где символы (в), (о) и (в.-м. р-р) обозначают принадлежность компонента реакции к водной, орга-

нической или водно-мицеллярной фазе соответственно.

Образующаяся фаза с натриевой солью Суапех 272 представляет собой типичный коллоидный опалесцирующий раствор. Переход натриевой соли в водную фазу с образованием мицелл сопровождается солюбилизацией растворителя и органических примесей в экстрагенте, увеличением концентрации натриевой соли экстрагента в водно-мицеллярной фазе.

Очевидно, что разрушение мицеллярных структур должно привести к значительному снижению перехода в водную фазу органического растворителя и примесей. Это возможно при разбавлении водного раствора до величин концентраций натриевой соли Суапех 272 ниже ККМ, что достигается относительным увеличением объема водного раствора (увеличение отношения В:О).

Величину ККМ для натриевой соли Суапех 272 определяли кондуктометрическим методом. На рис. 1 представлена зависимость величины удельной электропроводности растворов натриевой соли бис(2,4,4-триметилпентил)фосфиновой кислоты от ее концентрации в водно-мицеллярном растворе. Из приведенных данных видно, что в области сильно разбавленных растворов зависимость линейна; при концентрации соли около $0.054 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$ наблюдается снижение тангенса угла наклона зависимости, обусловленное мицеллообразованием. Этот уровень по существу является граничным для очистки от нейтральных примесей экстрагента Суапех 272. Однако учитывая, что величина ККМ в присутствии органических разбавителей может меняться в сторону

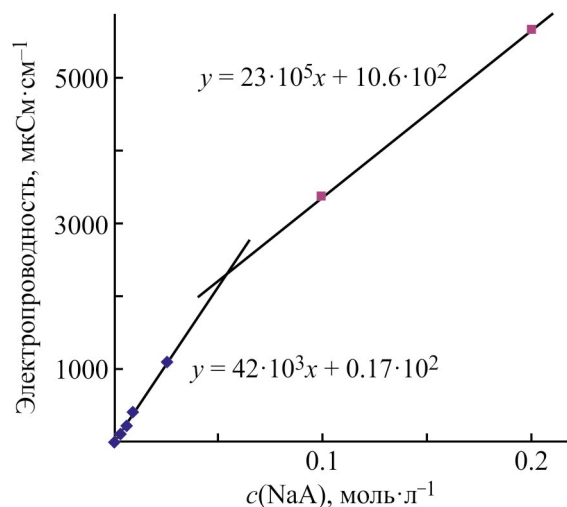


Рис. 1. Оценка ККМ натриевой соли Суапех 272 в воде по данным изменения удельной электропроводности растворов соли.

снижения значений [5], для очистки следует использовать более низкие величины концентраций.

Рассмотрим влияние условий разделения на глубину очистки экстрагента при разбавлении водного раствора до величин, меньших ККМ, т. е. в условиях, когда $V_B/V_O \gg 1$ (V_B и V_O — объемы водной и органической фаз соответственно). В системах с толуолом натриевая соль Суапех 272 практически количественно переходит в водную фазу, поэтому потерями экстрагента с органической фазой можно пренебречь. Соответственно загрязнение экстрагента триоктилфосфиноксидом будет определяться растворимостью его в воде, точнее величиной коэффициентов распределения этой примеси между органическим и водными растворами (D_{R_3PO}) и соотношением объемов водной (V_B) и органической (V_O) фаз:

$$D_{R_3PO} = c_{R_3PO(o)} / c_{R_3PO(b)} = (c_{R_3PO(o)} V_B V_O) / (c_{R_3PO(b)} V_B V_O). \quad (2)$$

Нетрудно показать, что отношение количеств триоктилфосфиноксида в водной и органической фазах ($n_{R_3PO(b)}$ и $n_{R_3PO(o)}$) будет определяться величинами коэффициента распределения примеси и отношения объемов водной и органической фаз:

$$\alpha_{R_3PO(b)} = n_{R_3PO(b)} / n_{R_3PO(o)} = (V_B / V_O) \cdot 1 / D_{R_3PO}. \quad (3)$$

Соответственно при использовании данного метода загрязнение Суапех 272 (его натриевой соли) триоктилфосфиноксидом, так же как и другими нейтральными примесями, будет возрастать с увеличением относительного объема водной фазы.

При экспериментальной проверке возможности очистки Суапех 272 использовали технический экстрагент с содержанием около 7% триоктилфосфиноксида. Процесс разделения органического раствора экстрагента на компоненты проводили при температуре 20°C . Время контакта фаз составляло 3–5 мин. Экстрагент в толуоле, разбавленный до концентрации $1.2 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$, обрабатывали стехиометрическим количеством NaOH по отношению к Суапех 272 при соотношении $V_O:V_B = 1:50$ (содержание NaA в водной фазе составило около $0.024 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$).

При контакте растворов при данном соотношении объемов органического и водного растворов образуется эмульсия типа «масло в воде». Процесс сопровождается образованием стабильной эмульсии органической фазы за счет поверхностно-активного продукта — натриевой соли Суапех 272, что соответственно влечет за собой необходимость длительного отстаивания фаз для их разделения, по полученным

оценкам — около 1 сут. При промышленном использовании процесса возможно изменить тип эмульсии на «воду в масле», если использовать экстракционные аппараты с рециркуляцией органического раствора для повышения соотношения объемов фаз (органическая фаза:водная). Однако, как было установлено, в этих условиях расслаивание фаз также затруднено.

После разделения водную фазу промывают однократно толуолом, подкисляют раствором хлористоводородной кислоты до $\text{pH}_{\text{вод}} 2-3$ и отделяют экстрагент в протонированной форме. По данным потенциометрического титрования содержание основного вещества в продукте составляет около 99% при выходе продукта 85%.

Эффективность очистки экстрагента данным методом от нейтральной примеси триоктилфосфиноксида подтверждена ЯМР-методом. На рис. 2, а, б представлены ^{31}P ЯМР-спектры технического и очищенного экстрагентов. На спектрах пики с величиной химического сдвига 59 м. д. соответствуют экстрагенту $\text{R}_2\text{PO}_2\text{H}$, пики 46–47 м. д. — триоктилфосфиноксиду R_3PO . По этим данным содержание фосфиноксида в исходном продукте составляет около 7–8%; после очистки содержание примеси находится в пределах ошибки метода и не превышает 0.05%.

Оценивая возможность применения данного процесса для очистки экстрагента на практике, необходимо отметить, что при идеальном расслаивании фаз и низкой растворимости триоктилфосфиноксида в воде содержание этой примеси в экстрагенте можно снизить до величин ниже 0.001%. Проблемы практического использования процесса обусловлены в первую очередь образованием устойчивых эмульсий в этой системе. Применение для улучшения расслаивания фаз добавок электролитов снижает величину ККМ и приводит к необходимости еще большего увеличения отношения $V_{\text{в}}/V_{\text{о}}$.

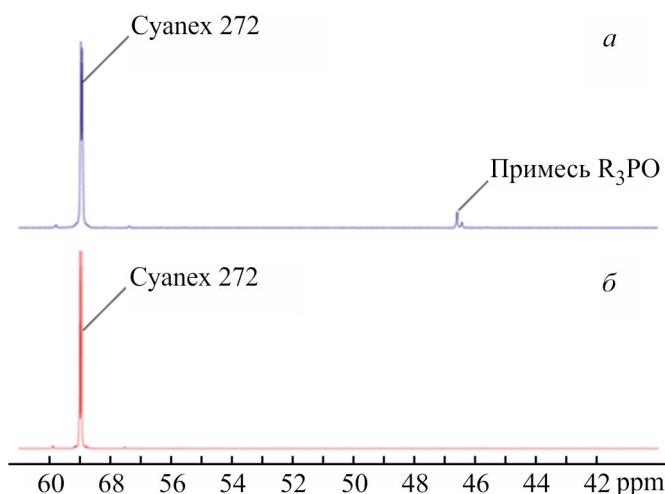


Рис. 2. ^{31}P ЯМР-спектр Cyanex 272 до очистки (а), после очистки от нейтральных примесей (б).

Далее рассмотрим вариант очистки экстрагента в двухфазной системе органическая фаза–водно-мицеллярный раствор (концентрация натриевой соли Cyanex 272 в воде выше ККМ — $0.1-0.5$ моль·л $^{-1}$). Процесс также осуществляют переводом экстрагента в натриевую форму, обрабатывая его стехиометрическим количеством NaOH. При использовании толуола в качестве растворителя при обработке в широком диапазоне концентраций натриевой соли Cyanex 272 образуется две быстро расслаиваемые фазы: органическая и водно-мицеллярная. В этих условиях экстрагент практически полностью переходит из фазы толуола в водно-мицеллярный раствор. Преимущество данного процесса при практическом использовании состоит в возможности его реализации в режиме противотока фаз в экстракционных аппаратах, что обычно затруднительно при образовании стойких эмульсий (когда концентрация NaA ниже ККМ) или

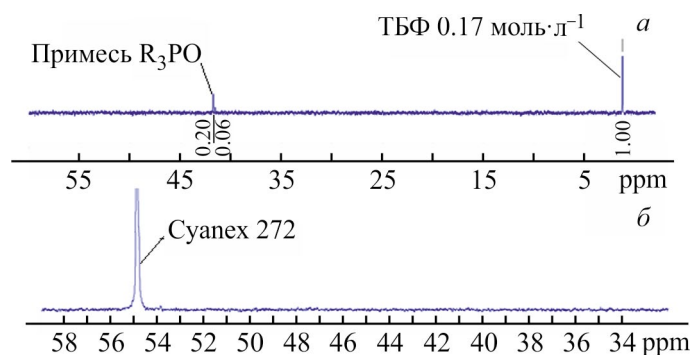


Рис. 3. ^{31}P ЯМР-спектры растворов разделения экстрагента в двухфазной системе с мицеллярными растворами. а — органическая фаза после обработки 0.5 моль·л $^{-1}$ Cyanex 272 раствором NaOH (добавка 0.17 моль·л $^{-1}$ ТБФ), б — выделенный экстрагент после подкисления водно-мицеллярного раствора.

при образовании трех фаз по методу, предложенному в работе [8].

Методом ^{31}P ЯМР-спектроскопии проведена оценка распределения натриевой соли Суапекс 272 и триоктилфосфиноксида между толуолом и водно-мицеллярным раствором. На рис. 3, а приведен ^{31}P ЯМР-спектр раствора толуола после отделения Суапекс 272 в виде натриевой соли с водно-мицеллярным раствором. Для оценки концентрации оставшихся примесей к аликвоте органической фазы добавляли трибутилфосфат (ТБФ) в количестве до $0.17 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$. На рис. 3, б приведен ^{31}P ЯМР-спектр экстрагента, выделенного подкислением водно-мицеллярной фазы. Как можно видеть из приведенных данных, в полученном продукте примесь триоктилфосфиноксида не обнаруживается. Предел обнаружения примеси в данном случае составляет приблизительно $2 \cdot 10^{-4} \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$. В толуольной фазе содержание примеси составляет около $0.0095 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$.

Таким образом, эффективность очистки экстрагента Суапекс 272 данным методом весьма высока, а загрязнение мицеллярного раствора примесями триоктилфосфиноксида незначительно. Коэффициент распределения примесей триоктилфосфиноксида между толуолом и мицеллярным раствором составляет более 50. Для повышения надежности эксперимента проведено также разделение экстрагента с добавками примесей триоктилфосфиноксида до $0.1 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$. В этом эксперименте также уровень концентрации

примеси в водно-мицеллярном растворе натриевой соли Суапекс 272 оказался ниже предела обнаружения используемым методом ЯМР-спектроскопии.

Сравнительные данные по межфазному распределению компонентов технического экстрагента в трехфазной мицеллярной системе, образующейся при добавлении в водный раствор высаливателя — Na_2SO_4 , аналогичны работе [8]. Экстрагент из водно-мицеллярной фазы выделяли, как и ранее, подкислением раствором соляной кислоты.

На рис. 4 приведены ^{31}P ЯМР-спектры аналогичных продуктов при очистке экстрагента в трехфазной мицеллярной системе (с добавкой электролита Na_2SO_4). По этим данным видно, что в системе происходит заметное распределение в водно-мицеллярный раствор нейтральной примеси R_3PO . По оценочным данным, величина коэффициентов распределения триоктилфосфиноксида между фазой толуола и водно-мицеллярным раствором натриевой соли Суапекс 272 составляет около 5. Очевидно, что причиной таких различий в распределении примеси между двумя рассмотренными мицеллярными системами являются различия в их структурах и солюбилизационных свойствах. Первая из них, представленная прямыми мицеллами натриевой соли Суапекс 272, менее склонна к солюбилизации крупных молекул органических веществ. Вторая система, возможно, относится к мицеллам пластинчатого типа, и растворение в них примесей R_3PO более существенно.

Выводы

Проведена оценка возможности очистки катионообменного экстрагента Суапекс 272 от нейтральных примесей триоктилфосфиноксида при межфазном распределении компонентов в системах: органический раствор (толуол)–водный раствор натриевой соли Суапекс 272 (концентрация ниже ККМ), двухфазная система органический раствор (толуол)–водно-мицеллярная фаза натриевой соли Суапекс 272, трехфазная система органический раствор (толуол)–водно-мицеллярная фаза натриевой соли Суапекс 272–водный раствор Na_2SO_4 .

Показано, что при переводе Суапекс 272 в натриевую форму при высоких отношениях водная фаза:органическая фаза > 50 в условиях образования истинного раствора натриевой соли Суапекс 272 в воде достигается эффективное отделение экстрагента от нейтральной примеси триоктилфосфиноксида. В системе наблюдается образование достаточно устойчивых эмульсий, что затрудняет практическое использование процесса.

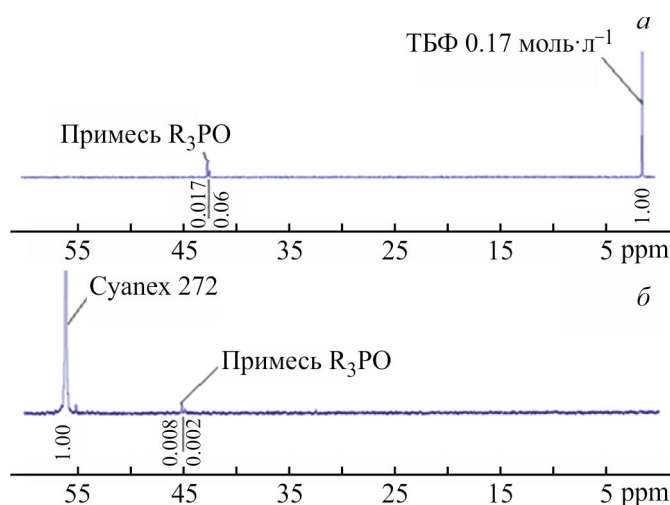


Рис. 4. ^{31}P ЯМР-спектры растворов разделения экстрагента в трехфазной системе с мицеллярными растворами.

а — органическая фаза после обработки $0.5 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$ Суапекс 272 раствором NaOH и Na_2SO_4 (добавка $0.17 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$ ТБФ), б — выделенный экстрагент после подкисления водно-мицеллярного раствора.

При повышении концентрации Na_2SO_4 Cyanex 272 в воде выше ККМ до $0.1\text{--}0.5$ моль·л⁻¹ наблюдается образование водно-мицеллярной фазы, которая хорошо отделяется от органической. В этой системе достигается эффективная очистка экстрагента от триоктилфосфинооксида при практически полном переходе его в водно-мицеллярный раствор, в то время как нейтральная примесь остается в фазе толуола.

При переходе к трехфазной системе за счет введения в водно-мицеллярный раствор Na_2SO_4 наблюдается заметное перераспределение нейтральной примеси триоктилфосфинооксида в среднюю фазу, содержащую натриевую соль Cyanex 272.

Таким образом, для практического применения наиболее подходящим вариантом является экстракционная очистка в двухфазной системе с водно-мицеллярной фазой, образованной натриевой солью Cyanex 272. Обращает на себя внимание заметное различие в величинах коэффициентов распределения примесей для двух- и трехфазных систем, содержащих водно-мицеллярные фазы. Вероятно, это связано с изменением типа мицеллярных систем, что может представлять интерес при разработке новых методов экстракционного разделения органических веществ.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Института химии и химической технологии СО РАН (проект FWES-2021-0014) с использованием оборудования Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

Конфликт интересов

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

Информация о вкладе авторов

В. И. Кузьмин – планирование эксперимента и обсуждение результатов; М. Н. Лескив – литературный обзор и проведение экспериментов, обработка и обсуждение результатов, подготовка материалов к публикации; Н. В. Гудкова – планирование эксперимента и обсуждение результатов, редактирование рукописи; Т. Ю. Иваненко – проведение ЯМР-исследований, обсуждение результатов; Д. В. Кузьмин – планирование эксперимента и обсуждение результатов.

Информация об авторах

Кузьмин Владимир Иванович, д.х.н.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6473-3615>

Лескив Марина Николаевна, к.х.н.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0782-2317>

Гудкова Наталья Владимировна, к.х.н.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4423-7774>

Иваненко Тимур Юрьевич

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1931-3205>

Кузьмин Дмитрий Владимирович, к.х.н.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2195-384X>

Список литературы

- [1] Biswas R. K., Singha H. P. Densities, viscosities and excess properties of bis-2,4,4-trimethylpentylphosphinic acid (Cyanex 272) diluent binary mixtures at 298.15 K and atmospheric pressure // J. Mol. Liq. 2007. V. 135. P. 179–187. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2006.12.031>
- [2] Jensen R. C., Partige J. A. Purification of di-(2-ethylhexyl)phosphoric acid by precipitation of copper(II) di-(2-ethylhexyl)phosphate // J. Inorg. Nucl. Chem. 1969. V. 31. P. 2587–2589. [https://doi.org/10.1016/0022-1902\(69\)80591-9](https://doi.org/10.1016/0022-1902(69)80591-9)
- [3] Xun Fu, Zhengshui Hu, Yide Liu, Golding J. A. Extraction of sodium in bis(2,4,4-trimethylpentyl) phosphinic acid «Cyanex 272» tm basic constants and extraction equilibria // Solv. Extr. Ion Exch. 1990. V. 8. N 4–5. P. 573–595. <https://doi.org/10.1080/07366299008918018>
- [4] Inaba K., Muralidharan S., Freiser H. Simultaneous characterization of extraction equilibria and back-extraction kinetics: Use of arsenazo(III) to characterize lanthanide-bis(2,4,4-trimethylpentyl)phosphinic acid complexes in surfactant micelles // Anal. Chem. 1993. V. 65. P. 1510–1516. <https://doi.org/10.1021/ac00059a005>
- [5] Kuzmin V. I., Leskiv M. N., Peterson I. V., Kuzmin D. V., Gudkova N. V., Bulavchenko A. I. Interfacial separation of organic phase components in systems containing aqueous colloidal solutions of sodium di-(2-ethylhexyl) phosphate // Colloid J. 2021. V. 83. N 1. P. 88–96. <https://doi.org/10.1134/S1061933X21010075>
- [6] van Dalen A., Wijksta J., Gerritsma K. W. Liquid–liquid extraction of complexed metal ions by infusion in dinonyl naphthalene sulphonacid micelles // J. Inorg. Nucl. Chem. 1978. V. 40. P. 875–881. [https://doi.org/10.1016/0022-1902\(78\)80167-5](https://doi.org/10.1016/0022-1902(78)80167-5)
- [7] Naifu Zhou, Jinguang Wu, Zhijian Yu, Neuman R. D., Wang Dujin, Xu Guangxian. Investigation of aggregation in solvent extraction of lanthanides by acidic extractants (organophosphorus and naphthenic acid) // Science in China. Ser. B. 1997. V. 40. N 1. P. 61–71. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02882189>

- [8] *Hu Zhengshui, Pan Ying, Ma Wanwu, Fu Xun.* Purification of organophosphorus acid extractants // *Solv. Extr. Ion Exch.* 1995. V. 13. N 5. P. 965–976.
<https://doi.org/10.1080/07366299508918312>
- [9] *Biswas R. K., Singha H. P.* Solvent extraction of Cu(II) by purified Cyanex 272 // *Indian J. Chem. Technol.* 2007. V. 14. P. 269–275.
<https://www.researchgate.net/publication/242390660>
IPC Code(s): B01D11/00, C22B3/26, IPC Code(s): B01D11/00, C22B3/26
- [10] *Biswas R. K., Habib M. A., Singha H. P.* Colorimetric estimation and some physicochemical properties of purified Cyanex 272 // *Hydrometallurgy.* 2005. V. 76. N 1–2. P. 97–104.
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2004.09.005>
- [11] *Алейнер Г. С., Усъяров О. Г.* Электропроводность мицеллярных растворов ионных ПАВ и поверхностная проводимость мицелл // *Коллоид. журн.* 2010. Т. 72. № 5. С. 580–586.
-