

СРАВНЕНИЕ ЭКСТРАКЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ СУЛЬФОНОЛА, ДОДЕЦИЛСУЛЬФАТА НАТРИЯ ИЛИ АЛКИЛБЕНЗОЛСУЛЬФОКИСЛОТЫ

© С. А. Заболотных¹, К. О. Гилева¹, А. Е. Леснов^{1,2}, С. А. Денисова³

¹ Институт технической химии УрО РАН, Пермь

² Пермский государственный аграрно-технологический университет им. акад. Д. Н. Прянишникова

³ Пермский государственный национальный исследовательский университет

E-mail: zabolotsveta@mail.ru

Поступила в Редакцию 13 ноября 2018 г.

После доработки 31 января 2019 г.

Принята к публикации 2 февраля 2019 г.

Исследовано влияние органических комплексообразующих реагентов: диантипирилметана, диантипирилбутана, диантипирилгептана, 1,10-фенантролина и 1,2,3-бензотриазола — на фазовое состояние и экстракционные возможности систем, содержащих в качестве фазообразователя анионные ПАВ: сульфонол, додецилсульфат натрия или алкилбензолсульфокислоту, в качестве высаливателя — неорганическую кислоту (серную или хлороводородную). Найдены оптимальные условия во всех рассмотренных комбинациях ПАВ и реагента для применения в процессах разделения и концентрирования. Выбраны наиболее экстракционно-эффективные комбинации ПАВ-реагент.

Ключевые слова: экстракция; водные расслаивающиеся системы; сульфонол; додецилсульфат натрия; алкилбензолсульфокислота; комплексообразующие реагенты

DOI: 10.1134/S0044461819040121

Водные растворы анионных поверхностно-активных веществ (АПАВ) способны расслаиваться на две жидкие фазы под действием различных факторов: изменения кислотности, нагревания, введения высаливателей, химического взаимодействия в системе [1–3]. Подобный подход позволяет избежать использования высокотоксичных пожароопасных органических растворителей, получать растворимые в воде экстракты, что удобно при осуществлении последующих стадий анализа. Введение в растворы АПАВ неорганических электролитов приводит к уменьшению значения критической концентрации мицеллообразования, увеличению размера мицелл [4], уменьшению гидратной оболочки гидрофильной части мицеллы, понижению температуры точки помутнения. В результате происходит ассоциация мицелл и выделение новой жидкой фазы.

Достоинством АПАВ являются отсутствие в их молекулах хромофоров, поглощающих в УФ- и видимой области спектра, что позволяет сочетать экстракцию со спектрофотометрическими и люминес-

центными методами. Разделение фаз возможно при комнатной температуре, что позволяет извлекать нестабильные при повышенной температуре и легколетучие компоненты. Параметры экстракции не зависят от времени нахождения фаз в равновесии, что определяет высокую экспрессность метода. Экстракция легко совмещается с различными инструментальными методами анализа [5–7]. АПАВ в своем составе имеют сильногидратированную анионную группу, поэтому обладают хорошей растворимостью в воде.

Как правило, неорганические кислоты являются более сильными высаливателями по отношению к АПАВ, чем неорганические соли и органические вещества. В этом случае при малых концентрациях кислоты системы расслаиваются на две жидкие фазы вследствие высаливания образующейся малодиссоциирующей кислоты. С увеличением содержания кислот расслаивание может сопровождаться гидролизом ПАВ в соответствующий спирт [8].

Одним из наиболее распространенных классов АПАВ являются алкилсульфаты и алкилсульфона-

ты. Они широко применяются в различных отраслях промышленности, а в последние годы нашли применение в методиках разделения и концентрирования. В процессах экстракции наиболее часто применяемым АПАВ, содержащим сульфогруппу, является додецилсульфат натрия. Его растворы расслаиваются при изменении температуры и введении неорганических солей [9, 10] или кислот [11]. Системы на основе додецилсульфата натрия применяют для концентрирования гидрофобных органических субстратов катионной природы [12], протеинов [13], для отделения меди от цинка [14] или никеля [15], никеля и меди от палладия и платины [16], экстракции благородных металлов и свинца [17], природных масел [18] а также полиароматических углеводородов [19]. Недостатком данного АПАВ является его относительно высокая стоимость. Вследствие этого изучены фазовые и экстракционные равновесия в системах, содержащих сходные с додецилсульфатом натрия по строению технические АПАВ сульфонол и алкилбензолсульфокислота, производимые в промышленных масштабах и имеющие меньшую стоимость.

Построены диаграммы растворимости систем на основе додецилсульфата натрия [20], сульфонола [21] или алкилбензолсульфокислоты [22] и неорганических кислот — серной и хлороводородной. Во всех системах установлено наличие областей двухфазного жидкого равновесия в широких интервалах содержания компонентов.

Результаты исследования распределения ионов металлов показали, что системы обладают слабыми экстракционными способностями, а ПАВ выступают преимущественно в качестве фазообразователей. В связи с этим предложено введение в системы дополнительных органических комплексообразователей. Основными критериями выбора реагента являлись его малая растворимость в воде и наличие основных свойств. Данным условиям соответствуют диантипирилметан (ДАМ), диантипирилбутан (ДАБ), диантипирилгептан (ДАГ), 1,10-фенантролин, 1,2,3-бензотриазол.

Для различных комбинаций ПАВ и реагента найдены оптимальные условия для проведения экстракции. В работе рассмотрены наиболее экстракционно-эффективные комбинации ПАВ–реагент.

Экспериментальная часть

В работе использовали анионные ПАВ додецилсульфат натрия (ДДСН, $C_{12}H_{25}OSO_3Na$, ч.д.а.), сульфонол (натрий алкилбензолсульфонаты на основе керосина общей формулы $C_nH_{2n+1}C_6H_4SO_3Na$,

где $n = 12–18$, ТУ 2481-135-07510508–2007) и алкилбензолсульфокислоту (АБСК, общей формулы $C_nH_{2n+1}C_6H_4SO_3H$, где $n = 10–14$, ТУ 2481-026-05766480–2006). В качестве комплексообразующих реагентов изучены диантипирилметан (ДАМ, х.ч.), диантипирилбутан (ДАБ, х.ч.), диантипирилгептан (ДАГ, х.ч.), 1,10-фенантролин (Phen, ч.д.а.), 1,2,3-бензотриазол (БТА, «чистый»). Кислоты H_2SO_4 и HCl , х.ч., соли металлов квалификации х.ч. или ч.д.а.

Для установления влияния реагентов на фазовое состояние систем в смеси при постоянном содержании ПАВ (0.6 г сульфонола или ДДСН или 0.5 г АБСК, $V_{общ} = 10$ мл) вводили различные количества комплексообразователей и определяли интервал концентраций кислоты, в котором наблюдалось расслаивание. Изменение фазового состояния фиксировали визуально. По результатам исследований выбирали оптимальные количества реагента, позволяющие получить расслаивающиеся системы с соотношением двух жидких фаз, наиболее подходящим для экстракции.

Для изучения распределения индивидуальных ионов металлов в градуированные пробирки с притертыми пробками вводили 1 мл 0.1 М раствора соответствующей соли металла, рассчитанные количества ПАВ, комплексообразователя и раствора кислоты, доводили объем системы до 10 мл дистиллированной водой и перемешивали. После расслаивания фазы разделяли и определяли остаточное содержание ионов металлов в рафинате комплексонометрически или на атомно-абсорбционном спектрометре iCE 3500 с пламенной атомизацией.

Исследование совместной экстракции палладия(II) с другими ионами металлов проводили, вводя в градуированные пробирки с притертыми пробками 1 мл $4 \cdot 10^{-4}$ М раствора палладия, различные количества раствора соли металла, 0.35 г БТА, 0.5 г АБСК, рассчитанное количество HCl для создания кислотности $1.5 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1}$ в общем объеме системы 10 мл, доводили объем дистиллированной водой и перемешивали. После расслаивания фазы разделяли и определяли остаточное содержание ионов металлов в рафинате методом атомно-абсорбционной спектроскопии.

Обсуждение результатов

Системы вода–АПАВ–неорганическая кислота–дiantiпирилалкан. Введение диантипирилалканов (ДАА) в системы с АПАВ сохраняет двухфазное жидкое равновесие в системах, а также стабилизирует объем фазы ПАВ. Следует отметить, что в системах с техническими ПАВ (сульфонол и АБСК) интервал

Таблица 1

Концентрационные параметры экстракции ионов металлов с диантипирилалканами ($V_{\text{общ}} = 10.0$ мл)

Система	$m_{\text{ПАВ}}$, г	Реагент	$m_{\text{реагента}}$, г	$c_{\text{кислоты}}$, моль·л ⁻¹	$V_{\text{ф. ПАВ}}$, мл
Вода-сульфонол-HCl	0.6	ДАМ	0.4	0.3–7.0	1.0–1.2
		ДАБ	0.3	0.3–7.0	1.0–1.2
		ДАГ	0.3	0.3–7.0	1.0–1.2
Вода-сульфонол-H ₂ SO ₄	0.6	ДАМ	0.4	0.2–5.0	1.0–1.2
		ДАБ	0.3	0.2–5.0	1.0–1.2
		ДАГ	0.3	0.2–5.0	1.0–1.2
Вода-ДДСН-HCl	0.75	ДАМ	0.4	0.3–6.0	1.0–1.2
		ДАБ	0.3	0.25–6.0	1.0–1.2
		ДАГ	0.3	0.25–6.0	1.0–1.2
Вода-ДДСН-H ₂ SO ₄	0.75	ДАМ	0.4	0.2–5.0	1.0–1.2
		ДАБ	0.3	0.2–5.0	1.0–1.2
		ДАГ	0.3	0.2–5.0	1.0–1.2
Вода-АБСК-HCl	0.5	ДАМ	0.4	0.1–2.0	1.0–1.3
		ДАБ	0.35	0.2–8.0	1.0–1.3
		ДАГ	0.35	0.2–8.0	1.0–1.3
Вода-АБСК-H ₂ SO ₄	0.5	ДАМ	0.4	0.1–2.0	1.0–1.3

кислотности немного шире, чем в системах с ДДСН, и расслаивание более устойчивое.

ДАА способны образовывать с ионами металлов комплексы различного типа. При малых концентрациях кислоты преобладает координационный механизм извлечения. С ростом содержания кислоты реагент протонируется и ионы металлов экстрагируются в виде ацидокомплексов по анионообменному механизму [23]. Концентрационные параметры проведения экстракции в присутствии ДАА представлены в табл. 1.

Введение реагентов требует нагревания систем до 75°C для ускорения взаимодействия компонентов. Фаза ПАВ прозрачная, вязкая, окрашена в желтый цвет; водная фаза прозрачная, бесцветная; между фазами наблюдается четкая граница раздела.

Узкий интервал концентраций кислот в системах с АБСК и ДАМ связан с тем, что при высоких концентрациях кислоты ДАМ образует труднорастворимое соединение с соотношением ДАМ:кислота, равным 1:2, а диссоциация АБСК при этом подавляется [24]. ДАБ и ДАГ не образуют солей с кислотами с соотношением 1:2, поэтому интервал содержаний кислот в системах с ними значительно шире.

Найдены условия количественного извлечения ионов скандия(III), циркония(IV), галлия, железа(III), таллия(III) и олова(II) с ДАА из растворов различных

кислот [25]. Для экстракции Sc(III) наиболее пригодны системы на основе АБСК (рис. 1). Система на основе сульфонола и серной кислоты показала лучшие результаты по извлечению Zr(IV) с ДАМ. При этом в системе вода-АБСК-HCl возможна количественная

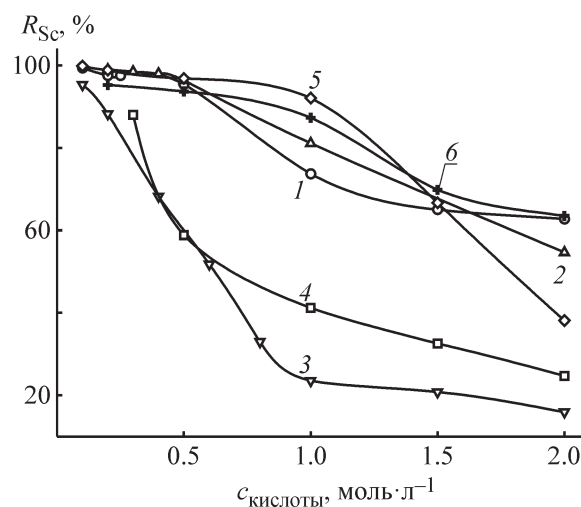


Рис. 1. Распределение 0.01 моль·л⁻¹ ионов Sc(III) с диантипирилметаном в системах вода-сульфонол-H₂SO₄ (1), вода-сульфонол-HCl (2), вода-ДДСН-H₂SO₄ (3), вода-ДДСН-HCl (4), вода-АБСК-H₂SO₄ (5), вода-АБСК-HCl (6) ($m_{\text{ДАМ}} = 0.4$ г, $V_{\text{общ}} = 10.0$ мл).

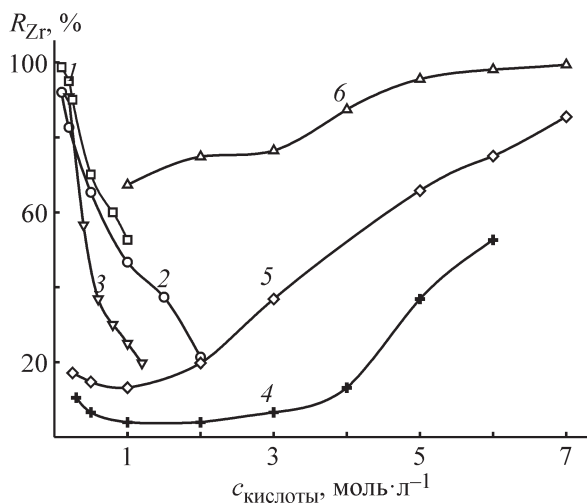


Рис. 2. Распределение 0.01 моль·л⁻¹ ионов Zr(IV) с диантипирилметаном в системах вода-сульфонол- H_2SO_4 (1), вода-АБСК- H_2SO_4 (2), вода-ДДСН- H_2SO_4 (3) и с ДАГ в системах вода-ДДСН- HCl (4), вода-сульфонол- HCl (5), вода-АБСК- HCl (6) ($m_{\text{ДАМ}} = 0.4$ г, $m_{\text{ДАГ}} = 0.3$ г, $V_{\text{общ}} = 10.0$ мл).

экстракция Zr(IV) с ДАГ при высоких концентрациях кислоты (рис. 2). Галлий экстрагируется количественно практически во всех системах при содержании HCl выше 3 моль·л⁻¹ (рис. 3). Интерес вызывает тот факт, что кривые извлечения рассмотренных ионов с ДАА в хлороформ и в изученных системах без органического растворителя имеют подобный характер, что может свидетельствовать о схожем механизме экстракции.

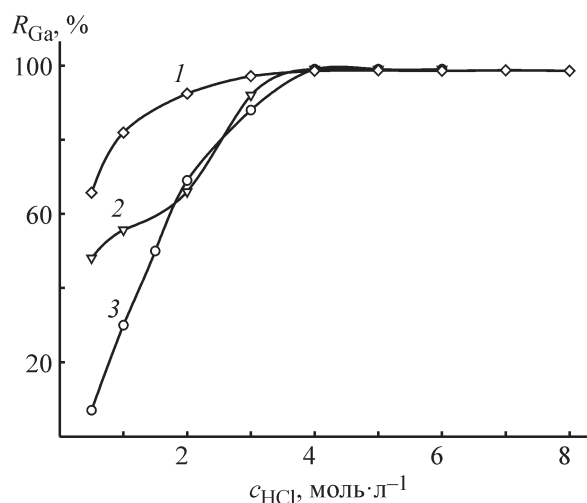


Рис. 3. Распределение 0.01 моль·л⁻¹ ионов Ga(III) с диантипирибутаном в системах вода-АБСК- HCl (1), вода-сульфонол- HCl (2), вода-ДДСН- HCl (3) ($m_{\text{ДАБ}} = 0.3$ г, $m_{\text{ДАГ}} = 0.3$ г, $V_{\text{общ}} = 10.0$ мл).

По результатам исследований можно заключить, что системы на основе АБСК и сульфанола более пригодны для экстракции как из разбавленных, так и из концентрированных растворов кислот. В системах с додецилсульфатом натрия количественное извлечение веществ наблюдается преимущественно из сильноокислых сред. При этом ДАМ более эффективен при экстракции в виде хелатных комплексов с металлами, а ДАБ и ДАГ – в виде ионных ассоциатов с ацидокомплексами металлов.

Системы вода-АПAB-неорганическая кислота-1,10-фенантролин. Производные пиразолона показали удовлетворительные результаты при экстракции ионов металлов, относящихся к «жестким» по классификации Пирсона [26]. Ионы Co(II), Cu(II), Ni(II) относятся к «мягким», поэтому их экстракция с ДАА из сернокислых растворов практически не наблюдается, а извлечение из солянокислых растворов в виде хлоридных ацидокомплексов незначительно. В связи с этим рассмотрена возможность замены ДАА на «мягкий» органический комплексообразующий реагент, проявляющий основные свойства, — 1,10-фенантролин. Являясь бидентатным лигандом, Phen образует с ионами Fe(III), Fe(II), Co(II), Ni(II), Cu(II) устойчивые окрашенные хелаты с пятичленными циклами в соотношении M:L = 1:2 или 1:3 [27].

В системах с АБСК интервал концентраций кислот, в котором смеси расслаивались, очень узкий, и для целей экстракции они непригодны. Оптимальные количества компонентов для извлечения ионов металлов с Phen представлены в табл. 2. В присутствии Phen фаза ПАВ мутная, вязкая, в отсутствие ионов металлов окрашена в бледно-розовый цвет; водная фаза прозрачная, бесцветная; между фазами наблюдается четкая граница раздела. Расслаивание наблюдается при комнатной температуре. Как и в случае с ДАА, в системах с сульфанолам интервал концентраций кислот шире, чем в системах с ДДСН. При этом двухфазное жидкостное равновесие более устойчивое и устанавливается быстрее.

Во всех системах найдены условия количественного извлечения ионов Ni(II), Cu(II), Co(II), Fe(II) и Fe(III) [28]. При экстракции ионов металлов органическая фаза приобретает окраску: в присутствии никеля — ярко-розовую, кобальта — оранжевую, меди — бирюзовую, железа(II, III) — ярко-красную. С увеличением концентраций кислот извлечение практически всех ионов падает в связи с ростом конкуренции с ионами водорода за реагент, экстракция ионов металлов протекает по координационному механизму. Наибольший интервал кислотности количественного извлечения имеет никель, так как его

Таблица 2

Концентрационные параметры экстракции ионов металлов с 1,10-фенантролином
($m_{\text{Phen}} = 0.15$ г, $V_{\text{общ}} = 10.0$ мл)

Система	$m_{\text{ПАВ}}$, г	$c_{\text{кислоты}}$, моль·л ⁻¹	$V_{\text{ф. ПАВ}}$, мл
Вода–сульфонол–HCl	0.6	0.25–5.0	1.0–1.2
Вода–сульфонол–H ₂ SO ₄	0.6	0.1–5.0	1.0–1.2
Вода–ДДСН–HCl	0.75	0.5–5.0	1.5–2.0
Вода–ДДСН–H ₂ SO ₄	0.75	0.5–4.0	1.5–2.0

комплекс с Phen имеет самую высокую константу устойчивости. Сравнение кривых извлечения ионов никеля в различных системах показало, что для его экстракции наиболее пригодны системы на основе додецилсульфата натрия (рис. 4).

Образование окрашенных комплексов металлов с реагентом, количественно извлекающихся в фазу ПАВ, позволяет в дальнейшем рассмотреть возможность разработки методики их экстракционно-фотометрического определения после растворения экстракта в водно-спиртовом растворе.

Системы вода–АПAB–неорганическая кислота–1,2,3-бензотриазол. В качестве «мягкого» лиганда также изучен 1,2,3-бензотриазол (БТА), который применяют для гравиметрического определения Ag(I), Cu(II), Zn(II), Os(VIII), Cd(II) и Ni(II) и титриметрического определения Ag(I). Палладий(II) реагирует с БТА в широком интервале кислотности:

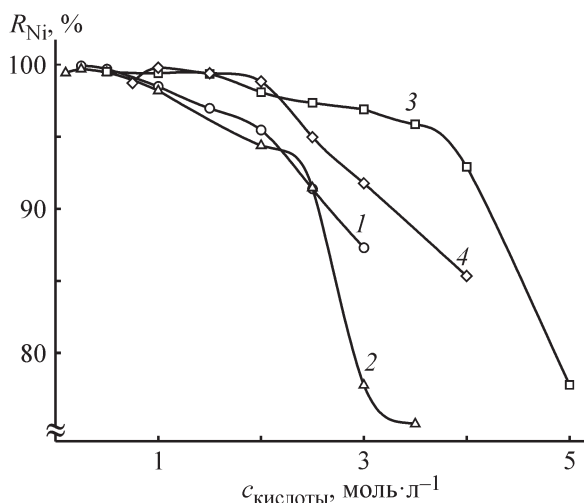


Рис. 4. Распределение 0.01 моль·л⁻¹ ионов Ni(II) с 1,10-фенантролином в системах вода–сульфонол–HCl (1), вода–сульфонол–H₂SO₄ (2), вода–ДДСН–HCl (3), вода–ДДСН–H₂SO₄ (4) ($m_{\text{Phen}} = 0.15$ г, $V_{\text{общ}} = 10.0$ мл).

в уксуснокислой среде (pH 2–5.3) и солянокислых растворах [29].

Введение в системы БТА сохраняет двухфазное жидкое равновесие. В системах с индивидуальным ДДСН интервал кислотности, в котором наблюдалось расслаивание, был уже, чем в системах с техническими АПАВ, а экстракция катионов металлов неколичественная. Вследствие этого системы на основе ДДСН и БТА оказались малоэффективными для целей экстракции.

Соотношения компонентов, выбранные для изучения экстракции катионов металлов с БТА в системах, представлены в табл. 3. Во всех системах фаза ПАВ мутная, вязкая, в отсутствие ионов металлов окрашена в светло-коричневый цвет; водная фаза прозрачная, бесцветная; между фазами наблюдается четкая граница раздела. Смеси расслаиваются при комнатной температуре. В системах с АБСК при концентрации кислоты более 2.0 моль·л⁻¹ HCl или 1.0 моль·л⁻¹ H₂SO₄ требовалось кратковременное (15 мин) нагревание до 75°C.

При введении БТА в растворы АБСК расслаивание наблюдалось даже в отсутствие кислоты в смесях, что позволяет рассматривать систему вода–БТА–АБСК в экстракции как систему с протолитическим взаимодействием по аналогии с системами вода–антипирин–АБСК [30] или вода–антипирин–нафталин-2–сульфокислота [31]. В этом случае расслаивание на две жидкие фазы происходит в результате химического взаимодействия БТА и АБСК.

Количественная экстракция ионов меди(II), никеля(II), кобальта(II), железа(III) и цинка(II) наблюдается при концентрациях кислот менее 0.2 моль·л⁻¹ H₂SO₄ или 0.3 моль·л⁻¹ HCl. С увеличением содержания кислоты происходит протонирование БТА и разрушение его комплексов с металлами, и извлечение катионов падает, что показано на примере извлечения Cu(II) (рис. 5). С ионами меди(II) БТА образует окрашенное соединение, количественно извлекающееся в

Таблица 3

Концентрационные параметры экстракции ионов металлов с 1,2,3-бензотриазолом
($m_{\text{БТА}} = 0.35$ г, $V_{\text{общ}} = 10.0$ мл)

Система	$m_{\text{ПАВ}}$, г	$c_{\text{кислоты}}$, моль·л ⁻¹	$V_{\text{ф. ПАВ}}$, мл
Вода-сульфонол-HCl	0.6	0.1–2.0	1.0–1.2
Вода-сульфонол-H ₂ SO ₄	0.6	0.05–2.0	1.0–1.2
Вода-АБСК-HCl	0.5	0.0–4.0	1.0–1.2
Вода-АБСК-H ₂ SO ₄	0.5	0.0–3.0	1.0–1.2

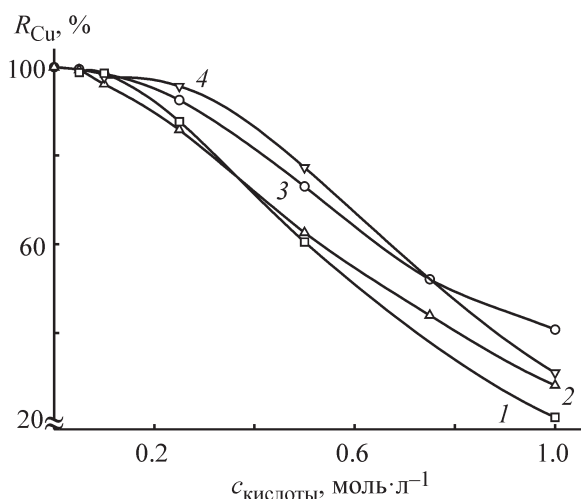


Рис. 5. Распределение 0.01 моль·л⁻¹ ионов Cu(II) с 1,2,3-бензотриазолом в системах вода-сульфонол- H_2SO_4 (1), вода-АБСК- H_2SO_4 (2), вода-АБСК-HCl (3), вода-сульфонол-HCl (4) ($m_{\text{БТА}} = 0.35$ г, $V_{\text{общ}} = 10.0$ мл).

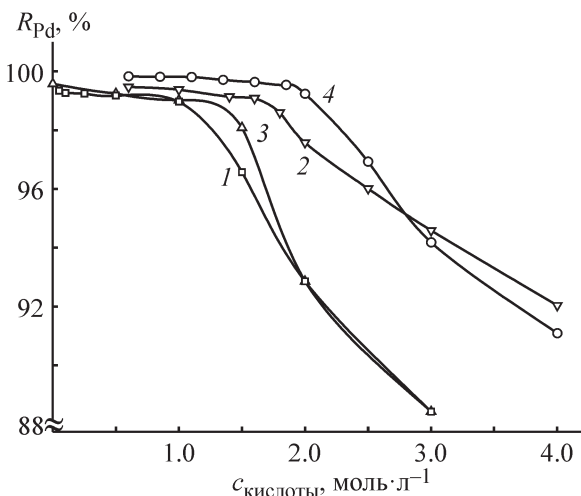


Рис. 6. Распределение 0.002 моль·л⁻¹ ионов Pd(II) с 1,2,3-бензотриазолом в системах вода-сульфонол- H_2SO_4 (1), вода-сульфонол-HCl (2), вода-АБСК- H_2SO_4 (3), вода-АБСК-HCl (4) ($m_{\text{БТА}} = 0.35$ г, $V_{\text{общ}} = 10.0$ мл).

фазу ПАВ, что дает возможность разработки методики ее экстракционно-фотометрического определения [32].

Особый интерес вызывает экстракция ионов палладия(II) с БТА. Во всех системах в широком интервале концентраций его извлечение превышало 98% (рис. 6). Лучшие результаты получены для системы вода-АБСК-HCl, поэтому в ней изучена экстракция палладия в присутствии меди(II), никеля(II), кобальта(II) и железа(III). Результаты совместной экстракции ионов показали, что количественному извлечению палладия не мешают 500-кратный мольный избыток меди, 300-кратный — кобальта, 70-кратный — никеля. Присутствие более чем двухкратного избытка ионов железа(III) снижает экстракцию палладия до 93%. Экстракция самих мешающих ионов при этом не превышает 2%. Максимальные коэффициенты разделения составили: $S_{\text{Pd/Ni}} = 4060$, $S_{\text{Pd/Fe}} = 1973$, $S_{\text{Pd/Cu}} = 1480$, $S_{\text{Pd/Co}} = 1390$.

Выводы

Экстракционные системы на основе технических анионных ПАВ сульфанола и алкилбензолсульфокислоты оказались более эффективными в процессах экстракции, чем системы с индивидуальным додецилсульфатом натрия. Расслаивание сохраняется в более широком интервале кислотности, равновесие двух фаз устанавливается быстрее, а извлечение ионов металлов выше. Достоинствами алкилбензолсульфокислоты и сульфанола также являются их невысокая стоимость и доступность.

Рассмотренные системы могут являться приемлемой альтернативой как традиционным экстракционным системам, содержащим токсичные и пожароопасные органические растворители, так и изученным ранее системам на основе индивидуальных анионных ПАВ. Кроме того, они применимы для решения задач по разделению, концентрированию и определению элементов.

Финансирование работы

Работа выполнена по теме государственного задания № АААА-А18-118032790022-7.

Конфликт интересов

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

Информация об авторах

Заболотных Светлана Александровна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8307-0386>

Гилева Ксения Олеговна, к.х.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6898-3646>

Денисова Светлана Александровна, к.х.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5229-6144>

Леснов Андрей Евгеньевич, д.х.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8054-0709>

Список литературы

- [1] *Pena-Pereira F., Tobiszewski M.* The Application of Green Solvents in Separation Processes. Elsevier, 2017. 560 p.
- [2] *Елохов А. М., Кудряшова О. С., Леснов А. Е.* // Вестн. Перм. ун-та. Сер. Химия. 2015. Вып. 1 (17). С. 30–43.
- [3] *Леснов А. Е., Денисова С. А., Кудряшова О. С., Чепкасова А. В., Катаева Е. Ю., Мохнаткина Н. Н.* // ЖПХ. 2010. Т. 83. № 8. С. 1379–1382 [*Lesnov A. E., Denisova S. A., Kudryashova O. S., Chepkasova A. V., Kataeva E. Yu., Mokhnatkina N. N.* // Russ. J. Appl. Chem. 2010. V. 83. N 8. P. 1485–1488].
- [4] *Os N. M., Haak J. R., Rupert L. A. M.* Physico-Chemical Properties of Selected Anionic, Cationic and Nonionic Surfactants. Amsterdam: Elsevier, 1993. 608 p.
- [5] *Куличенко С. А., Дорошук В. А., Старова В. С.* // ЖПХ. 2008. Т. 81. № 8. С. 1263–1268 [*Kulichenko S. A., Doroshchuk V. A., Starova V. S.* // Russ. J. Appl. Chem. 2008. V. 81. N 8. P. 1342–1347].
- [6] *Moradi M., Yamini Y., Ebrahimpour B.* // J. Iran. Chem. Soc. 2014. V. 11. N 4. P. 1087–1101.
- [7] *Ruiz F. J., Rubio S., Perez-Bendito D.* // J. Chromatogr. A. 2004. V. 1030. P. 109–115.
- [8] *Charboneau J., Wandruszka R.* // J. Surfactant Detergents. 2010. V. 13. P. 281–286.
- [9] *Hryniewicka M., Starczewska B., Syperek I.* // J. Molecular Liquids. 2013. V. 187. P. 320–325.
- [10] *Tagashira Sh., Ichimaru T., Nozaki K., Murakami Y.* // Solvent Extraction Res. Develop. Japan. 2013. V. 20. P. 39–52.
- [11] *Горячева И. Ю., Логинов А. С., Лаврова Т. Н., Попов М. А.* // ЖАХ. 2007. Т. 62. № 5. С. 459–464 [*Goryacheva I. Yu., Loginov A. S., Lavrova T. N., Popov M. A.* // J. Analyt. Chem. 2007. V. 62. N 5. P. 411–415].
- [12] *Старова В. С., Куличенко С. А.* // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2009. Т. 52. № 11. С. 74–78.
- [13] *Старова В. С., Куличенко С. А.* // ЖАХ. 2010. Т. 65. № 12. С. 1244–1249 [*Starova V. S., Kulichenko S. A.* // J. Analyt. Chem. 2010. V. 65. N 12. P. 1215–1220].
- [14] *Nakai T., Murakami Y., Sasaki Y., Fujiwara Is., Tagashira Sh.* // Analyt. Sci. 2004. V. 20. P. 235–237.
- [15] *Murakami Y., Kajii A., Sasaki Y., Nozaki K., Fujiwara Is., Tagashira Sh.* // Solvent Extraction Res. Develop. Japan. 2010. V. 17. P. 237–242.
- [16] *Nakai T., Murakami Y., Sasaki Y., Tagashira Sh.* // Talanta. 2005. V. 66. N 1. P. 45–50.
- [17] *Tagashira Sh., Kimoto S., Nozaki K., Murakami Y.* // Analyt. Sci. 2009. V. 25. N 5. P. 723–726.
- [18] *Tuntiwiwattanapun N., Tongcumpou Ch., Haagen-son D., Wiesenborn D.* // J. Am. Oil Chem. Soc. 2013. V. 90. N 7. P. 1089–1099.
- [19] *Доронин С. Ю., Чернова Р. К.* // Бутлеровские сообщ. 2014. Т. 40. № 12. С. 94–102.
- [20] *Заболотных С. А., Леснов А. Е., Денисова С. А.* // ЖФХ. 2016. Т. 90. № 10. С. 1458–1464 [*Zabolotnykh S. A., Lesnov A. E., Denisova S. A.* // Russ. J. Phys. Chem. A. 2016. V. 90. N 1. P. 1942–1947].
- [21] *Заболотных С. А., Денисова С. А.* // Вестн. Перм. ун-та. Сер. Химия. 2014. Вып. 1 (13). С. 50–57.
- [22] *Заболотных С. А., Леснов А. Е., Денисова С. А.* // Вода. Химия и экология. 2017. № 1. С. 73–79.
- [23] *Петров Б. И.* // ЖАХ. 1983. Т. 38. № 11. С. 2051–2076.
- [24] *Шевелёва А. Д.* // Учен. зап. Молотовского ун-та. 1955. Т. 9. № 4. С. 133–141.
- [25] *Заболотных С. А., Денисова С. А.* // Вестн. Перм. ун-та. Сер. Химия. 2016. Вып. 1 (21). С. 7–15.
- [26] *Алимарин И. П., Петрухин О. М., Багреев В. В.* // Теория и практика экстракционных методов. М.: Наука, 1985. С. 5–40.
- [27] *Гурбанов А. Н., Салахова Ф. И.* // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2009. Т. 52. № 12. С. 33–35.
- [28] *Заболотных С. А., Леснов А. Е., Денисова С. А.* // Вестн. Перм. ун-та. Сер. Химия. 2018. Т. 8. № 1. С. 29–38.
- [29] *Гинзбург С. И., Езерская Н. А., Прокофьева И. В., Федоренко Н. В., Шленская В. И., Бельский Н. К.* Аналитическая химия платиновых металлов. М.: Наука, 1972. 616 с.
- [30] *Заболотных С. А., Желнина В. О., Денисова С. А., Елохов А. М., Леснов А. Е.* // Журн. Сиб. федерал. ун-та. Химия. 2017. Т. 10. № 4. С. 536–544.
- [31] *Петров Б. И., Денисова С. А., Леснов А. Е., Шестакова Г. Е.* // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 1999. Т. 42. № 1. С. 21–23.
- [32] *Заболотных С. А., Денисова С. А., Маньлова К. О.* // Вестн. Перм. ун-та. Сер. Химия. 2018. Т. 8. № 3. С. 292–299.