

УДК 542.61

РАВНОВЕСИЕ ЖИДКОСТЬ–ЖИДКОСТЬ И ЭКСТРАКЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ СИСТЕМЫ ППГ 425–NaNO₃–H₂O

© 2022 г. И. В. Зиновьева^а, *, А. В. Кожевникова^а, Н. А. Милевский^а,
Ю. А. Заходяева^а, А. А. Вошкин^а

^аИнститут общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук,
Ленинский просп., 31, Москва, 119991 Россия

*e-mail: yz@igic.ras.ru

Поступила в редакцию 02.04.2022 г.

После доработки 15.04.2022 г.

Принята к публикации 21.04.2022 г.

В настоящей работе изучено фазовое равновесие жидкость–жидкость для новой экстракционной системы с полипропиленгликолем 425 (ППГ 425) и нитратом натрия в зависимости от концентрации HCl при температуре 298.15 К. Представлены экспериментальные и расчетные бинодальные данные. Проведена корреляция экспериментальных равновесных и расчетных данных жидкость–жидкость. Изучено межфазное распределение ионов Fe(III), Zn(II) и Cu(II), содержащихся в большом количестве в электронных отходах, в системе ППГ 425–NaNO₃–H₂O. Установлены зависимости количественных характеристик экстракции Fe(III), Zn(II) и Cu(II) от концентрации NaCl, HCl и исходной концентрации металла. Показана возможность эффективного разделения ионов Fe(III), Zn(II) и Cu(II) в предложенной экстракционной системе.

Ключевые слова: двухфазные водные системы, “зеленая” химия, межфазное распределение, экстракция, ионы металлов, электронные отходы

DOI: 10.31857/S004035712204008X

ВВЕДЕНИЕ

Печатные платы являются неотъемлемым компонентом любого электронного устройства и составляют до 10% от массы этих устройств. Развитие технологий производства электронных компонентов и устаревание ранее произведенной электроники влечет за собой образование большого количества электронных отходов, содержащих печатные платы. Переработка электронных отходов крайне необходима, поскольку происходит быстрое накопление такого сырья на мусорных полигонах. При этом продукты их переработки являются ценными материалами и могут быть использованы повторно при производстве новых компонентов. Состав печатных плат крайне разнообразен, однако, наиболее высокое содержание в них таких элементов, как железо, цинк и медь [1]. Извлечение и разделение данных элементов с дальнейшим их концентрированием является первостепенной задачей при переработке печатных плат. При этом важно не только достигать высокой эффективности процесса, но и использовать методы с низкой нагрузкой на экологию.

Одним из наиболее перспективных методов для решения проблемы разделения и очистки веществ является жидкостная экстракция. Данный метод обладает рядом важных преимуществ: низкие энергозатраты, малый расход экстрагента, ввиду его регенерации, простота используемого технологического оборудования. Однако органические растворители, например, толуол и керосин, используемые в экстракции, ядовиты, легко воспламеняются, обладают канцерогенными свойствами и вредны для окружающей среды. В связи с этим существует задача по разработке и внедрению в промышленность более совершенных экстракционных систем, отвечающих современным требованиям по безопасности. Перспективный класс экстракционных систем – двухфазные водные системы – лишен вышеописанных недостатков. Они успешно используются для разделения, очистки и анализа биологически активных [2–4] и органических [5, 6] веществ, а также ионов металлов [7–9]. Для использования таких систем в процессах переработки металлсодержащих отходов необходимо комплексно исследовать их физико-химические и экстракционные свойства. Как правило, ионы металлов хорошо экстрагиру-

Таблица 1. Значения параметров уравнения (1) для системы ППГ 425–NaNO₃–H₂O при 298.15 К

n_D^B	$a^П$	a^C
1.3325	0.001293	0.001129

ются в полимерную фазу в виде анионных комплексов, по этой причине возникает ряд факторов, от которых зависит эффективность экстракции в данных системах: молекулярная масса полимера [10], природа фазообразующей соли [11], соотношение полимера и соли [12]. Межфазное распределение металлов зависит также от значений pH среды, поскольку кислотность влияет как на состав извлекаемых соединений металлов [12, 13], так и на фазовое равновесие в таких системах [10]. Влияние добавления различных ионов и кислотности среды на фазовые равновесия в двухфазных водных системах изучалось в работах [14–18]: увеличение концентрации неорганических и органических солей [14, 15], как и увеличение pH [16–18], расширяет гетерогенную область. При этом, в связи со значительным влиянием состава двухфазной водной системы на фазовое равновесие, исследование фазовых диаграмм и установление составов фаз является ключевым требованием к предлагаемым системам. К настоящему моменту в литературе описан большой массив данных по фазовым равновесиям двухфазных водных систем. Тем не менее, важным ограничением для применения двухфазных водных систем для переработки растворов выщелачивания остается их малая стабильность при высоких концентрациях кислот, которые возникают в процессе растворения печатных плат. В настоящее время в литературе отсутствуют упоминания двухфазных водных систем с концентрацией минеральных кислот выше 2 моль/л.

Таким образом, данная работа посвящена изучению новой двухфазной водной системы на основе полипропиленгликоля 425 и NaNO₃ и изучению ее экстракционной способности на примере ионов Fe(III), Zn(II) и Cu(II) при высокой концентрации минеральной кислоты.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для приготовления двухфазной водной системы использовали полипропиленгликоль со средней молекулярной массой 425 г/моль “Acros Organics” и нитрат натрия квалификации “х. ч.”. Экспериментальное исследование фазовых равновесий в многокомпонентной системе проводили в стеклянном сосуде объемом 50 мл с исполь-

зованием термостатированного шейкера “Enviro-Genie SI-1202, Scientific Industries, Inc.” при скорости вращения 35 об/мин. Определение положения бинодальной кривой осуществлялось известным методом титрования [19]. Раствор полимера известной концентрации титровали раствором соли известной концентрации или наоборот до точки помутнения, указывающей на образование двух несмешивающихся жидких фаз. Эксперименты проводили при температуре 298.15 К и атмосферном давлении 100 ± 1 кПа. Состав смеси был рассчитан на основе масс каждого компонента в системе. Для построения нод жидкость–жидкость были приготовлены системы с известным содержанием полимера, соли и воды. Образцы перемешивали в термостатированном шейкере в течение 30 мин и затем оставляли на 24 ч для достижения термодинамического равновесия.

После разделения фаз концентрацию соли в верхней и нижней фазах определяли методом спектрофотометрии в УФ-области ($\lambda = 301$ нм) относительно воды в кварцевых кюветах $l = 10$ мм. Для этого готовили серию калибровочных растворов NaNO₃ точной концентрации от 0.2 до 1 мас. % и измеряли оптическую плотность приготовленных растворов на приборе “Экротех ПЭ-5400УФ”. По полученным данным строили градуировочный график в виде зависимости оптической плотности от концентрации NaNO₃. В данном диапазоне концентраций наблюдалась линейная зависимость, которая в дальнейшем была использована для определения содержания NaNO₃ в исследуемых фазах. Концентрацию полимера в обеих фазах определяли путем измерения показателя преломления с помощью рефрактометра “Anton Paar Abbemat 3200” с точностью измерения ± 0.0001 .

Связь между показателем преломления смеси n_D^{CM} и массовыми долями полимера $w^П$ и соли w^C определяется в соответствии с правилом аддитивности:

$$n_D^{CM} = n_D^B + a^П w^П + a^C w^C, \quad (1)$$

причем

$$w^П + w^C + w^B = 1, \quad (2)$$

где w^B – массовая доля воды в смеси, n_D^B – показатель преломления воды.

Однако уравнение (1) справедливо только для разбавленных растворов. Поэтому для измерения показателя преломления было выполнено разбавление образцов. Затем были построены калибровочные графики для показателя преломления полимера в диапазоне его концентраций от 0 до

10 мас. % и для соли в диапазоне ее концентраций от 0 до 5 мас. %, по которым были определены значения коэффициентов $a^П$ и $a^С$ для полимера и соли, соответственно. Значения коэффициентов n_D^B , $a^П$ и $a^С$ приведены в табл. 1.

Во всех экспериментах по экстракции ионов Fe(III), Zn(II) и Cu(II) использовали систему состава полипропиленгликоль 425 (30 мас. %)–нитрат натрия (16 мас. %)–вода. Для изучения экстракции исследуемых металлов исходные водные растворы готовили растворением в дистиллированной воде точных навесок $FeCl_3 \cdot 6H_2O$, $ZnCl_2$, $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ квалификации “ч”, взвешенных на аналитических весах “AND HR-100AZ”. В экспериментах по исследованию влияния содержания NaCl и HCl на извлечение ионов металлов были использованы реактивы со степенью чистоты >99% “Химмед”.

Исследование экстракционных равновесий проводили при температуре 298.15 К и атмосферном давлении 100 ± 1 кПа в градуированных центрифужных пробирках с использованием термостабиризованного шейкера со скоростью вращения 35 об/мин в течение 20 мин. Содержание ионов Zn(II) и Cu(II) в исходном растворе, в солевой и полимерной фазах после экстракции определяли спектрофотометрическим методом с использованием 4-(2-пиридилазо)резорцина [20], образующего комплексы с металлами, которые поглощают в видимой области спектра ($\lambda = 493$ и 508 нм, соответственно). Концентрацию ионов Fe(III) определяли методом спектрофотометрии в видимой области ($\lambda = 427$ нм) с использованием в качестве индикатора сульфосалициловой кислоты относительно воды.

Все представленные экспериментальные данные являются результатом серии экспериментов и обработаны методами математической статистики.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Данные о равновесии жидкость–жидкость являются важными для разработки новой двухфазной водной системы, поскольку на их основании подбирается дальнейший состав экстракционной системы. Полученные бинальные данные для системы ППГ 425– $NaNO_3$ – H_2O в зависимости от концентрации HCl, а также данные о составах равновесных жидких фаз системы без HCl при 298.15 К (рис. 1). Из рисунка видно, что с увеличением содержания соляной кислоты биналь смещается в сторону меньших концентраций $NaNO_3$.

Таблица 2. Значения параметров уравнения (3) и стандартное отклонение для системы ППГ 425– $NaNO_3$ – H_2O в зависимости от концентрации HCl

Биналь	a	b	c	sd_1
1	189.077	–60.26	4.833	0.03
2	114.163	–37.592	3.004	0.61
3	121.629	–44.851	4.089	0.42
4	130.389	–49.954	4.743	0.27
5	115.115	–39.616	3.066	0.47

$sd_1 = [\sum_i (100w_{расч}^П - 100w_{эксп}^П)^2 / N]^{0.5}$, где N – количество бинальных данных.

Таблица 3. Параметры уравнения Отмера–Тобиаса и коэффициент детерминации

A	B	R^2
2.6194	1.0873	0.998

Для корреляции экспериментальных бинальных данных с расчетными было использовано следующее эмпирическое уравнение:

$$100w^П = a + b100w^{С0.5} + c100w^С. \quad (3)$$

Коэффициенты a , b и c уравнения (3) и рассчитанное стандартное отклонение sd_1 для исследованной системы приведены в табл. 2.

С помощью уравнения (3) были определены расчетные значения бинальных кривых. На основании полученного стандартного отклонения был сделан вывод, что данное уравнение может быть использовано для корреляции бинальных данных исследуемой системы. Расчетные бинальные данные приведены в табл. 2.

Исследуемая область фазового равновесия жидкость–жидкость в данной системе имеет достаточно широкие границы, в которых одновременно существует только двухфазная область жидкость–жидкость, при выходе за пределы которой либо образуется твердая фаза, либо формируется единственная жидкая фаза.

Согласованность полученных экспериментальных данных может быть проверена с помощью методики Отмера–Тобиаса [21], основанной на эмпирическом уравнении:

$$\ln[(1 - w_H^C) / w_H^C] = A + B \ln[(1 - w_B^П) / w_B^П], \quad (4)$$

где w_H^C и $w_B^П$ – массовые концентрации соли в нижней фазе и полимера в верхней фазе, соответ-

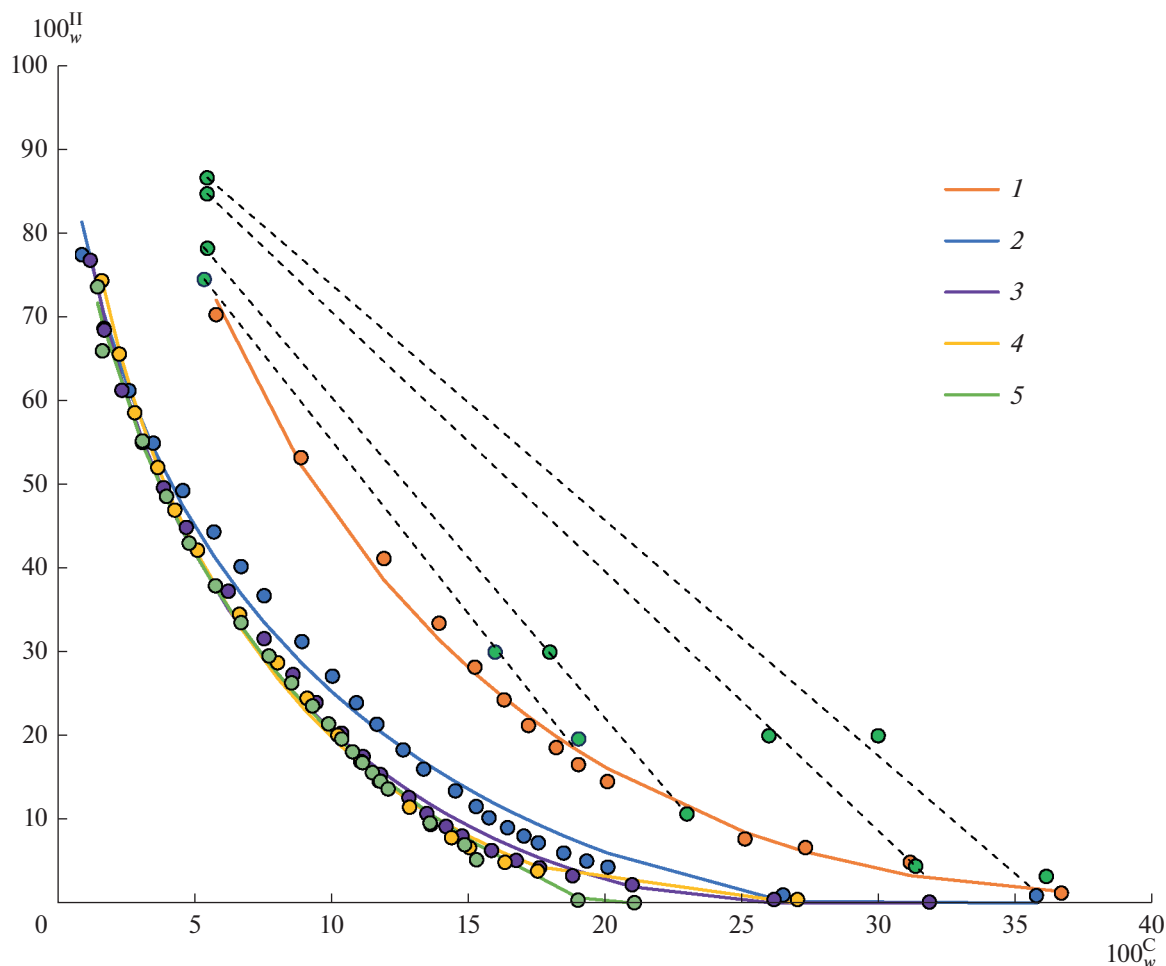


Рис. 1. Влияние концентрации HCl на положение бинодали двухфазной водной системы ППГ 425–NaNO₃–H₂O при 298.15 К (точки – эксперимент, линии – расчетные данные) и равновесные данные для системы ППГ 425–NaNO₃–H₂O при 298.15 К (точки – эксперимент, пунктирная линия – расчетные данные). C_(HCl): 1 – 0 моль/л, 2 – 1 моль/л, 3 – 2 моль/л, 4 – 3 моль/л, 5 – 4 моль/л.

ственно. Значения параметров *A* и *B* зависят от индивидуальных свойств системы, для определения которых строится график в координатах $\ln[(1 - w_H^C)/w_H^C]$ от $\ln[(1 - w_B^II)/w_B^II]$, а также определяется коэффициент детерминации *R*². Полученные параметры приведены в табл. 3.

Таблица 4. Равновесные составы фаз и значения параметров TLL для системы ППГ 425–NaNO₃–H₂O при 298.15 К

Нода жидкость–жидкость	Нижняя фаза		Верхняя фаза		TLL
	w ^{II}	w ^C	w ^{II}	w ^C	
1	19.63	19.05	74.47	5.37	56.52
2	10.66	23.01	78.18	5.49	69.76
3	4.42	31.36	84.67	5.48	84.32
4	3.22	36.14	86.62	5.48	88.85

На основании полученного коэффициента детерминации *R*² можно сделать вывод, что уравнение (4) может быть использовано для корреляции данных равновесия исследуемой системы.

Одним из параметров, который необходим для описания данных систем, является длина нод жидкость–жидкость (tie-line length, TLL). TLL выражается как разница между концентрациями компонентов системы, присутствующих в фазах и рассчитывается по уравнению 5:

$$TLL = [(w_B^{II} - w_H^{II})^2 + (w_B^C - w_H^C)^2]^{0.5} \tag{5}$$

Рассчитанные значения представлены в табл. 4. Из полученных данных видно, что с увеличением исходного состава системы значения TLL возрастают, что указывает на разделение компонентов системы. Стоит отметить, что для образования данной системы необходимо меньшее количество реа-

гентов по сравнению с ранее описанными двухфазными водными системами на основе полиэтиленгликоля [22].

В качестве альтернативной экологически безопасной экстракционной системы для извлечения ионов Fe(III), Zn(II) и Cu(II) из солянокислых водных растворов нами была предложена изученная система на основе полипропиленгликоля 425 и нитрата натрия. В процессах гидрометаллургии исследуемые металлы зачастую содержатся в солянокислых растворах выщелачивания, где содержание HCl может варьироваться в широком диапазоне в зависимости от условий проведения процесса. Принципиальным отличием предложенной экстракционной системы на основе ППГ 425 и NaNO₃ от существующих является возможность ее образования при введении в систему высоких концентраций HCl (до 4 моль/л).

Были получены зависимости степени извлечения металлов от времени контакта фаз в диапазоне от 5 до 60 мин для определения времени установления экстракционного равновесия при извлечении ионов Fe(III), Zn(II) и Cu(II) в системе ППГ 425–NaNO₃–H₂O. Исходя из полученных результатов установлено, что постоянное значение степени извлечения достигается в промежутке от 15 до 20 мин. Таким образом, время перемешивания в течении 20 мин было выбрано для изучения межфазного распределения исследуемых ионов металлов в системе ППГ 425–NaNO₃–H₂O.

Содержание металлов в растворе выщелачивания компонентов электронных устройств может варьироваться в широком диапазоне. Изучено влияние исходной концентрации Fe(III), Zn(II) и Cu(II) в диапазоне концентраций от 0.01 до 0.5 моль/л (рис. 2).

На рис. 1 представлены изотермы экстракции металлов в системе ППГ 425 (30 мас. %)–NaNO₃ (16 мас. %)–H₂O. Прямолинейный характер полученных зависимостей свидетельствует о том, что коэффициент распределения постоянен и не зависит от исходной концентрации металлов в растворе, что важно для моделирования и реализации технологического процесса. Угол наклона изотермы экстракции, при этом, соответствует коэффициенту распределения металла.

Как было упомянуто выше, растворы выщелачивания – это, в основном, водные растворы с высокой концентрацией соляной кислоты (более 1 моль/л). К тому же концентрация Cl⁻ является не только определяющим фактором в образовании преобладающих анионных комплексов металлов в растворе, но и влияет на распределение фазообразующей соли и полимера в двухфазной

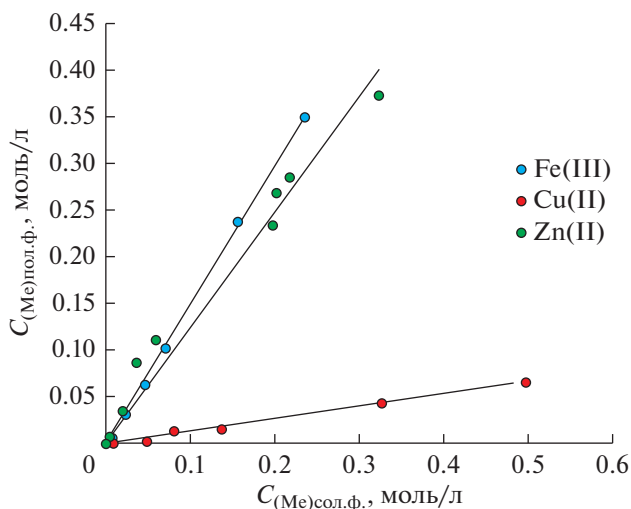


Рис. 2. Изотермы экстракции Fe(III), Zn(II) и Cu(II) в системе ППГ 425 (30 мас. %)–NaNO₃ (16 мас. %)–H₂O; C_{HCl} = 2 моль/л.

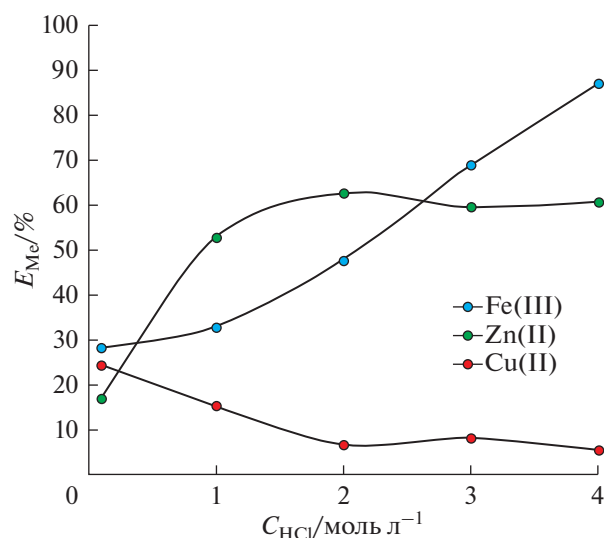


Рис. 3. Зависимость степени извлечения Fe(III), Zn(II) и Cu(II) от содержания соляной кислоты в системе ППГ 425 (30 мас. %)–NaNO₃ (16 мас. %)–H₂O; C_{Me(исх.)} = 0.01 моль/л.

водной системе. На рис. 3 представлена зависимость степени извлечения Fe(III), Zn(II), Cu(II) от исходной концентрации HCl в диапазоне от 0.1 до 4 моль/л.

Из полученных результатов видно, что увеличение содержания HCl в системе приводит к возрастанию степени извлечения Fe(III) и Zn(II). При этом в случае Zn(II) максимальная степень извлечения 62.5% достигается при концентрации HCl 2 моль/л. Похожий эффект наблюдался при экстракции Zn(II) аминами и солями четвертич-

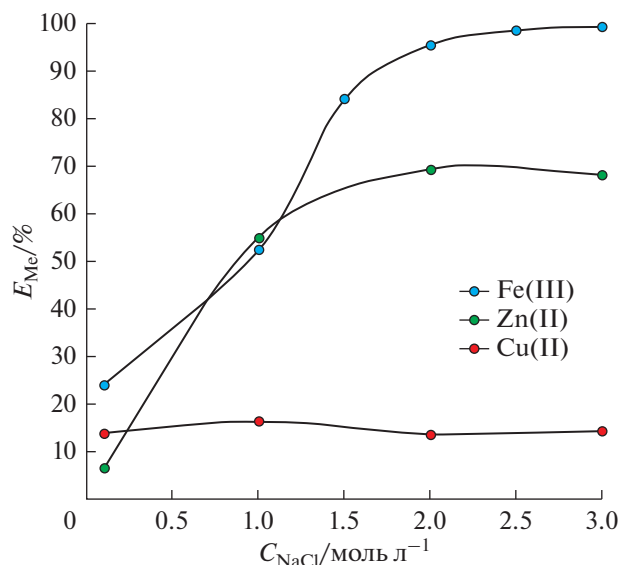


Рис. 4. Зависимость степени извлечения Fe(III), Zn(II) и Cu(II) от содержания хлорида натрия в системе ППГ 425 (30 мас. %)–NaNO₃ (16 мас. %)–H₂O; $C_{(\text{Me})\text{исх.}} = 0.01$ моль/л.

ных аммониевых оснований [23]. При этом извлечение Cu(II) снижается с увеличением концентрации HCl, что позволяет селективно извлекать Fe(III) и Zn(II) из солянокислых растворов в системе ППГ 425–NaNO₃–H₂O без введения дополнительных экстрагентов.

Проведены исследования экстракции Fe(III), Zn(II) и Cu(II) в системе ППГ 425 (30 мас. %)–NaNO₃ (16 мас. %)–H₂O с добавлением хлорида натрия в диапазоне его концентраций от 0.1 до 3 моль/л (рис. 4).

Из полученных данных установлено, что увеличение содержания NaCl приводит к увеличению степени извлечения ионов Fe(III) и Zn(II), а в случае Cu(II) показатели экстракции практиче-

ски не изменяются. По результатам табл. 5 видно, что при извлечении ионов металлов из 3 М раствора хлорида натрия с использованием системы на основе ППГ 425 и нитрата натрия, коэффициенты разделения для Fe(III) и Zn(II) от Cu(II) составляют 956.65 и 14.60, соответственно. Такая экстракционная система потенциально может быть использована для задач разделения ионов Fe(III) и Zn(II) от Cu(II) из хлоридного раствора при совместном их присутствии.

На основании вышеприведенных данных предложена схема разделения смеси ионов металлов Fe(III), Cu(II) и Zn(II) в качестве модельного состава раствора выщелачивания печатных плат с использованием системы ППГ 425–NaNO₃–H₂O (рис. 5). Схема включает в себя последовательные стадии экстракции и реэкстракции ионов металлов при изменении концентрации соляной кислоты, которые могут быть успешно осуществлены с помощью каскада смесителей–отстойников. Солянокислый раствор выщелачивания подается на первую ступень каскада, состоящую из 9 экстракторов, работающих в режиме противоточной экстракции. Условия проведения экстракции соответствуют 1 М HCl, 16 мас. % NaNO₃, 30 мас. % ППГ 425. Полимерная фаза после экстракции содержит Zn(II) с чистотой 99.5%, солевая фаза – ионы Fe(III) и Cu(II). Далее концентрацию HCl в солевой фазе увеличивают до 4 М для повышения $\beta_{\text{Fe/Cu}}$ в предложенной двухфазной водной системе. Раствор подается на разделение во вторую часть каскада, состоящую из 5 ступеней, что приводит к выделению меди с чистотой 99.999%. При этом полимерная фаза насыщена Fe(III) с чистотой 98.5%. Все фазы, содержащие очищенные металлы, являются водными, соответственно, не требуется стадия реэкстракции. В дальнейшем металлы могут быть выделены простым осаждением, а регенерированные фазы повторно направлены в экстракционный каскад.

Таблица 5. Количественные характеристики экстракции Fe(III), Zn(II) и Cu(II) в системе ППГ 425 (30 мас. %)–NaNO₃ (16 мас. %)–H₂O при разных содержаниях NaCl

Концентрация NaCl, моль/л	Коэффициент распределения			Коэффициент разделения	
	Fe	Zn	Cu	Fe/Cu	Zn/Cu
0.1	0.97	0.60	0.37	2.60	1.60
1.0	7.95	2.39	0.32	25.02	7.52
2.0	32.65	4.30	0.24	133.62	17.60
3.0	262.50	4.01	0.27	956.65	14.60

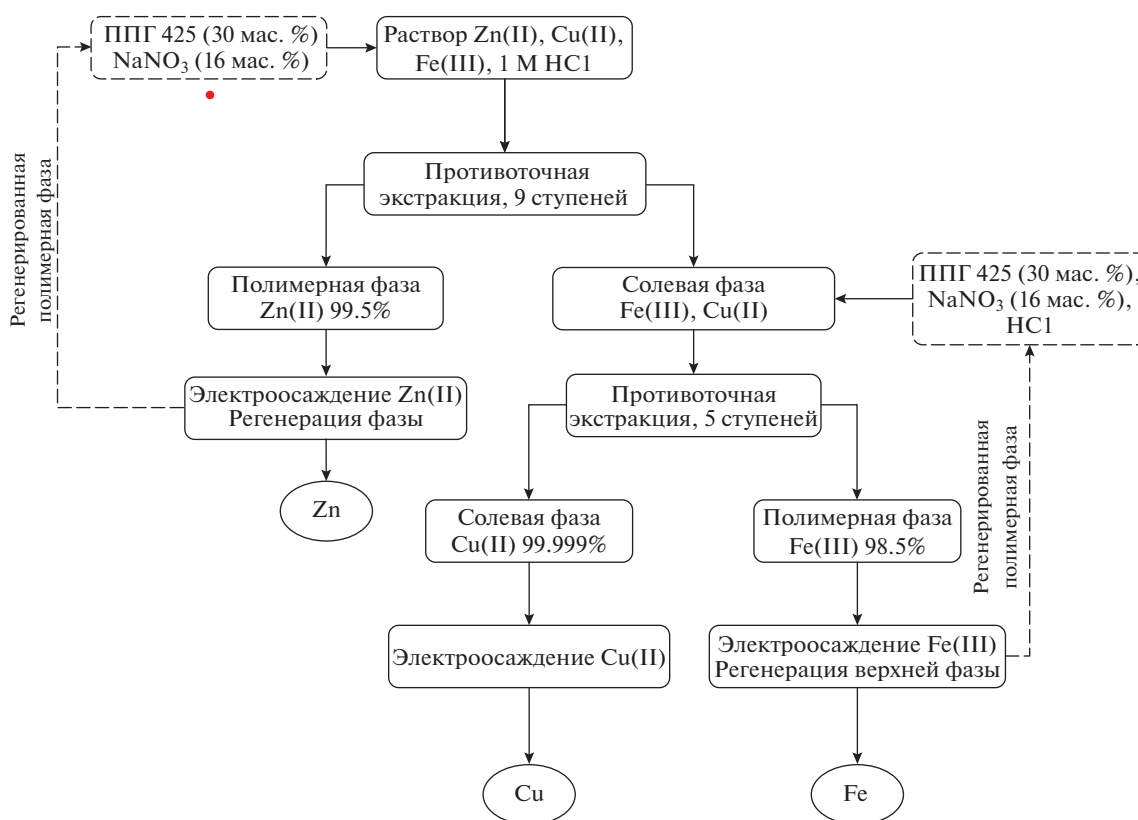


Рис. 5. Схема экстракционного разделения ионов Fe(III), Zn(II) и Cu(II) из солянокислого раствора с использованием системы ППГ 425 (30 мас. %)–NaNO₃ (16 мас. %)–H₂O.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена и охарактеризована новая экстракционная система на основе полипропиленгликоля 425 и нитрата натрия. Изучено фазовое равновесие жидкость–жидкость в зависимости от концентрации HCl при температуре 298.15 К. На основании полученных данных была предложена система с составом ППГ 425 (30 мас. %)–NaNO₃ (16 мас. %) для изучения экстракционных свойств. Были изучены количественные характеристики экстракции ионов Fe(III), Zn(II) и Cu(II) в зависимости от концентраций HCl и NaCl с данным составом. На основании полученных данных была предложена технологическая схема разделения ионов Fe(III), Zn(II) и Cu(II) из солянокислых растворов. Разработанная схема позволяет выделить все металлы с высокой чистотой на каскаде смесителей-отстойников, состоящем из 14 ступеней, работающих в режиме противоточной экстракции.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-24170.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li H., Eksteen J., Oraby E. Hydrometallurgical recovery of metals from waste printed circuit boards (WPCBs): Current status and perspectives – A review. *Resources, Conservation and Recycling* 2018, 139, 122–139. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.08.007>
2. da Silva N.R., Ferreira L.A., Teixeira J.A., Uversky V.N., Zaslavsky B.Y. Effects of sodium chloride and sodium perchlorate on properties and partition behavior of solutes in aqueous dextranpolyethylene glycol and polyethylene glycol-sodium sulfate two-phase systems // *J. Chromatography A* 2019, 1583, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2018.11.015>
3. Zinov'eva I.V., Zakhodyaeva Y.A., Voshkin A.A. Interphase Distribution of Caffeine and Coumarin in Extraction Systems with Polyethylene Glycol and Sodium Sulfate. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering* 2019, 53, 996–100. <https://doi.org/10.1134/S0040579519060174>
4. Teixeira A.G., Agarwal R., Ko K.R., Grant-Burt J., Leung B.M., Frampton J.P. Emerging biotechnology applications of aqueous two-phase systems. *Advanced Healthcare Materials* 2018, 7, 1701036. <https://doi.org/10.1002/adhm.201701036>
5. Zinov'eva I.V., Zakhodyaeva Y.A., Voshkin A.A. Extraction of Monocarboxylic Acids from Diluted Solutions with Polyethylene Glycol. *Theoretical Founda-*

- tions of Chemical Engineering 2019, 53, 871–874.
<https://doi.org/10.31044/1684-5811-2018-19-7-303-307>
6. *Zinov'eva I.V., Zakhodyaeva Y.A., Voshkin A.A.* Data on the extraction of benzoic, salicylic and sulfosalicylic acids from dilute solutions using PEG-based aqueous two-phase systems. *Data in Brief* 2020, 28, 105033.
<https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.105033>
 7. *Patrício P.R., Mesquita M.C., Mendes da Silva L.H., Hespanhol da Silva M.C.* Application of aqueous two-phase systems for the development of a new method of cobalt(II), iron(III) and nickel(II) extraction: A green chemistry approach. *Journal of Hazardous Materials* 2011, 193, 311–318.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.07.062>
 8. *Milevskiy N.A., Boryagina I.V., Karpukhina E.A., Kuznetsov V.N., Kabanova E.G.*, Effect of sodium chloride and pH on the composition of the equilibrium phases and the partition of palladium(II) in the aqueous two-phase system PEG1500–Na₂SO₄–water // *J. Chemical & Engineering Data*, 2021, 66, 1021–1031.
<https://doi.org/10.1021/acs.jced.0c00832>
 9. *Bulgariu L., Bulgariu D.* Extraction of gold(III) from chloride media in aqueous polyethyleneglycol-based two-phase system. *Separation and Purification Technology* 2011, 80, 620–625.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.06.018>
 10. *Bulgariu L., Bulgariu D.* Extraction of metal ions in aqueous polyethylene glycol-inorganic salt two-phase systems in the presence of inorganic extractants: correlation between extraction behavior and stability constants of extracted species. *Journal Chromatography A* 2008, 1196–1197, 117–124.
<https://doi.org/10.1016/j.chroma.2008.03.054>
 11. *Yu P., Huang K., Zhang C., Xie K., He X., Liu H.* One-Step Separation of Platinum, Palladium, and Rhodium: A Three-Liquid-Phase Extraction Approach. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2011, 50, 9368–9376.
<https://doi.org/10.1021/ie200883u>
 12. *Zakhodyaeva Y.A., Zinov'eva I.V., Voshkin A.A.* Extraction of Iron(III) Chloride Complexes Using the Polypropylene Glycol 425–NaCl–H₂O System. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering* 2019, 53, 735–740.
<https://doi.org/10.1134/S0040579519050373>
 13. *Zakhodyaeva Y.A., Zinov'eva I.V., Tokar E.S., Voshkin A.A.* Complex extraction of metals in an aqueous two-phase system based on poly(ethylene oxide) 1500 and sodium nitrate. *Molecules* 2019, 24, 4078.
<https://doi.org/10.3390/molecules24224078>
 14. *Ferreira L.A., Teixeira J.A., Mikheeva L.M., Chait A., Zaslavsky B.Y.* Effect of salt additives on partition of non-ionic solutes in aqueous PEG–sodium sulfate two-phase system // *J. Chromatography A* 2011, 1218, 5031–5039.
<https://doi.org/10.1016/j.chroma.2011.05.068>
 15. *Pirdashti M., Movagharnejad K., Rostami A.A., Bakhshi H., Mobalegholeslam P.* Liquid–liquid equilibria, electrical conductivity, and refractive indices of Poly(ethylene glycol) + sodium sulfate + guanidine hydrochloride aqueous two-phase system: Correlation and thermodynamic modeling. *Fluid Phase Equilibria* 2016, 417, 29–40.
<https://doi.org/10.1016/J.FLUID.2016.02.019>
 16. *Shahbazinasab M.-K., Rahimpour F.* Liquid–Liquid Equilibrium Data for Aqueous Two-Phase Systems Containing PPG725 and Salts at Various pH Values // *J. Chemical & Engineering Data* 2012, 57, 1867–1874.
<https://doi.org/10.1021/je300266r>
 17. *Nascimento R.G., Fontan R.d.C.I., Ferreira Bonomo R.C., Veloso C.M., Castro S.d.S., Santos L.S.* Liquid–Liquid Equilibrium of Two-Phase Aqueous Systems Composed of PEG 400, Na₂SO₄, and Water at Different Temperatures and pH Values: Correlation and Thermodynamic Modeling // *J. Chemical & Engineering Data* 2018, 63, 1352–1362.
<https://doi.org/10.1021/ACS.JCED.7B00947>
 18. *Barbosa A.A., Bonomo R.C.F., Martins C.V., Fontan R.C.I., Junior E.C.S., Minim L.A., Pignata M.C.* Equilibrium Data and Physical Properties of Aqueous Two Phase Systems Formed by PEG (1500 and 4000) g mol⁻¹ + Sodium Sulfate + Water at Different Temperatures and pH 2. *Journal of Chemical & Engineering Data* 2016, 61, 3–11.
<https://doi.org/10.1021/JE5008586>
 19. *Liu Y., Feng Y., Zhao Y.* Liquid-Liquid Equilibrium of various Aqueous Two-Phase Systems: Experiment and correlation // *J. Chemical & Engineering Data* 2013, 58, 400–453.
<https://doi.org/10.1021/je400453b>
 20. *Ivanov A.V., Figurovskaya V.N., Ivanov V.M.* Molecular absorption spectroscopy of 4-(2-pyridilazo)resorcinol complexes as alternative for the atomic absorption spectroscopy. *Moscow University Chemical Bulletin* 1992, 33, 570–574.
 21. *Othmer D.F., Tobias P.E.* Liquid-Liquid Extraction Data – The Line Correlation. *Industrial & Engineering Chemistry* 1942, 34, 693.
<https://doi.org/10.1021/IE50390A600>
 22. *Zakhodyaeva Y.A., Rudakov D.G., Solov'ev V.O., Voshkin A.A., Timoshenko A.V.* Liquid–Liquid Equilibrium of Aqueous Two-Phase System Composed of Poly(Ethylene Oxide) 1500 and Sodium Nitrate // *J. Chemical & Engineering Data* 2019, 64, 3, 1250–1255.
<https://doi.org/10.1021/acs.jced.8b01138>
 23. *Singh O., Tandon S.* Extraction of cadmium as chloride by high molecular weight amines and quaternary ammonium salt // *J. Inorganic and Nuclear Chemistry* 1975, 37, 609–612.
[https://doi.org/10.1016/0022-1902\(75\)80396-4](https://doi.org/10.1016/0022-1902(75)80396-4)