Технологии ликвидации источников химической опасности

УДК 628.349.087.4 DOI: 10.25514/CHS.2019.1.15007

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ДОБАВОК НА ЭЛЕКТРОФЛОТАЦИОННОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЧАСТИЦ АКТИВИРОВАННОГО УГЛЯ ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ

Т. В. Давыдкова*, В. А. Колесников, А. Д. Милютина, А. В. Колесников

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия,
*e-mail: tdavydkova@muctr.ru

Поступила в редакцию 11.04.2019 г.

Аннотация – Представлены результаты исследований извлечения методом электрофлотации частиц активированного угля марки ОУ-Б из водных растворов в присутствии различных веществ – поверхностно-активных веществ различной природы (катионного, анионного и неионогенного типов), коагулянтов – ионов трехвалентных (Al^{3+}, Fe^{3+}) и двухвалентных металлов (Co^{2+}, Ni^{2+}, Cu^{2+}, Zn^{2+}), а также фонового электролита (Na_2SO_4). Проведен сравнительный анализ влияния этих добавок на эффективность электрофлотационного извлечения частиц ОУ-Б, максимальная степень извлечения, полученная в данном исследовании, достигала 99%. Полученные данные могут внести вклад в разработку процессов очистки отходов и сточных вод гальванических производств методом электрофлотации.

Ключевые слова: активированные угли, электрофлотация, водоочистка, степень извлечения, сточные воды, поверхностно-активные вещества, коагулянты.

COMPARATIVE ANALYSIS OF INFLUENCE OF DIFFERENT ADDITIVES ON ELECTROFLOTATION EXTRACTION OF ACTIVATED COAL PARTICLES FROM AQUEOUS SOLUTIONS

T. V. Davydkova*, V. A. Kolesnikov, A. D. Milutina, and A. V. Kolesnikov

Dmitry Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia,
*e-mail: tdavydkova@muctr.ru

Received April 11, 2019

Abstract – The results are presented on studying electroflotation extraction of activated carbon (OU-B trademark) particles from aqueous solutions in the presence of various substances, i.e. surfactants of various nature (cationic, anionic and nonionic types), coagulants – trivalent metal ions (Al^{3+}, Fe^{3+}) and divalent metal ions (Co^{2+}, Ni^{2+}, Cu^{2+}, Zn^{2+}), and background electrolyte (Na_2SO_4). A comparative analysis has been carried out focusing on effect of these additives on efficiency of electroflotation extraction of OU-B particles, wherein the maximum degree of extraction reached 99%. The obtained data can contribute to the development of the process of purifying waste and wastewater of electroplating plants using electroflotation method.

Keywords: activated carbons, electroflotation, water treatment, recovery degree, wastewater, surfactants, coagulants.

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы очистки сточных вод гальванических производств

Промышленные предприятия в процессе эксплуатации создают отходы, находящиеся в жидком, твердом, пастообразном или газообразном состоянии и представляющие различную степень опасности и токсичности для окружающей природной среды и человека. Известно, что в 85–90% жидких отходов содержится 95% опасных компонентов [1].

Разнообразный ассортимент применяемых в промышленности гальванических покрытий промышленных предприятий предполагает использование большого количества технологических растворов. Образующиеся в производстве покрытий сточные воды содержат широкий перечень примесей, что не позволяет их четко систематизировать, исходя из источников образования и последующего использования очищенных сточных вод и осадков [2, 3]. От загрязнения компонентами технологических растворов страдают поверхностные водоемы. В них попадают сточные воды, образующиеся при промывке деталей, а также концентрированные жидкие отходы.

В технологических процессах гальванического производства вода загрязняется веществами различной природы – органическими (растворители, красители, поверхностно-активные вещества (ПАВ), масла, компоненты смазок и моющих составов); минеральными (кислоты, щелочи, соли (сульфаты, хлориды, нитриты, фосфаты, карбонаты и т.д.) тяжелых и цветных металлов (Cu, Sn, Pb, Bi, Cr, Ni, Cd и др.); комплексообразователями (на основе аммиака, винной, уксусной и других органических кислот), а также другими комплексными соединениями.

Все указанные выше загрязнители при превышении допустимых норм их содержания представляют опасность, как для окружающей среды, так и для здоровья человека, многие из них являются токсичными и ядовитыми [4–6].

Выбор оптимальных технологических схем очистки воды – достаточно сложная задача, что обусловлено огромным многообразием находящихся в воде примесей и высокими требованиями, предъявляемыми к качеству воды. Так, сточные воды, образующиеся в промывочных операциях, в основном содержат компоненты технологических растворов и электролитов, используемых для обработки металлов и сплавов. Однако при смешивании сточных вод в результате сильного разбавления растворов и изменения величины pH еще до осуществления процесса очистки могут происходить различные химические реакции между содержащимися в них растворенными веществами (образование труднорастворимых соединений и солей тяжелых металлов, разложение некоторых комплексных соединений и т.д.) [7].

Из литературы [1, 4, 8] известен ряд методов очистки разбавленных сточных вод от соединений тяжелых металлов, среди них наиболее часто используют осаждение труднорастворимых соединений. Для облегчения процесса осаждения применяется ряд приемов, позволяющих снизить остаточную концентрацию металлов в загрязненной воде.

Электрохимические методы очистки имеют ряд преимуществ перед химическими: простота технологической схемы и эксплуатации производственных установок; легкость автоматизации их работы; уменьшение производственных площадей, необходимых для размещения очистных сооружений; возможность обработки сточных вод без предварительного разбавления; отсутствие увеличения солесодержания стоков и уменьшение количества осадков при обработке [9].

В практике очистки сточных вод сложного состава для разделения взвешенных веществ, эмульсий ПАВ применяют осаждение, фильтрацию, электрофлотацию.

Электрофлотация – перспективный способ очистки сточных вод

Анализ литературы за последние 20 лет показывает, что флотация, электрофлотация, электрофлотокоагуляция ионов цветных, тяжелых и редкоземельных металлов в виде неорганических труднорастворимых соединений находят широкое практическое применение в процессах извлечения из водных растворов органических загрязнений, в частности нефтепродуктов, поверхностно-активных веществ, красителей [10–12]. При этом у каждой технологии есть свои области применения в зависимости от природы объекта, размера частиц и использованных реагентов, флокулянтов и коагулянтов и ПАВ. Например, электрофлотация является наиболее эффективным методом извлечения тонкодисперсных коллоидных систем гидроксидов металлов [13].

Электрофлотация представляет собой физико-химический метод разделения твердой и жидкой фаз, в ходе которого при пропускании через раствор электрического тока образуются газовые пузырьки. Всплывая в объеме жидкости, пузырьки газа взаимодействуют с частицами загрязнений, в результате чего происходит их взаимное слипание, обусловленное уменьшением поверхностной энергии флотируемой частицы и пузырька газа на границе раздела фаз «жидкость – газ». Метод перспективен для:

- очистки от ионов тяжелых металлов в виде гидроксидов, мелкодисперсных и взвешенных примесей;
- осветления стоков;
- очистки сточных вод от нефти, нефтепродуктов и ПАВ

путем перевода перечисленных компонентов в пенные продукты.
Он может быть также использован для электрофлотации минералов [13].

Электрофлотация эффективно работает с частицами размером 1–100 мкм, имеющими высокие заряды поверхности (ζ-потенциал ± 30 мВ). Классическая флотация применяется для частиц, размер которых значительно больше и, как правило, гидрофобных [11].

Изучалась возможность использования метода электрофлотации для снижения концентрации меди и никеля в сточных водах гальванического производства. Было проведено изучение влияния на эффективность метода таких параметров, как плотность тока, pH, концентрация тяжелых металлов, природа электродов. Оптимизация метода позволила снизить конечную

концентрацию меди и никеля до 1 мг/л, что соответствует стандартам Всемирной Организации Здравоохранения [14].

Было показано [15] влияние параметров электрофлотационного процесса на извлечение ПАВ (Tween 20), степень извлечения достигала 75% в присутствии ионов Fe^{2+}, Fe^{3+}. Концентрация ПАВ превышала критическую концентрацию мицеллообразования в 10 раз, что затрудняло осуществление электрофлотационного процесса за счет увеличения гидрофильности осадка.

Следует отметить большой вклад, внесенный в исследования электрофлотационной очистки нефтесодержащих промышленных сточных вод В.Д. Назаровым [16]. Получены высокие значения степени извлечения 90–95%. Предложены интересные конструкции электрофлотационных установок и способы интенсификации процессов электрофлотации [17, 18].

В последнее время для очистки сточных вод, которые присутствуют в водной среде в виде эмульсии, дисперсной фазы или в растворимой форме, используется электрофлотация с добавлением коагулянтов различной природы – гидроксидов алюминия, кремния, железа, титана, кальция и их комбинаций, а также сорбентов на основе высокодисперсных углеродных материалов, например, на основе активированных углей [19].

Активными (активированными) углями (АУ) называются углеродные адсорбенты с развитой пористой структурой, применяемые для решения технологических и экологических задач, в частности, очистки воды для питьевых целей, различных производственных сточных вод и загрязненных подземных вод. Благодаря таким характеристикам, как сильно развитая общая пористость, широкий диапазон пор и значительная удельная поглощающая поверхность, АУ эффективно используются для очистки жидких сред от широкого спектра примесей (начиная от мелких, соизмеримых с молекулами йода, и кончая молекулами жиров, масел, нефтепродуктов, хлорорганических соединений). При этом гидрофобность АУ обусловливает преимущественное поглощение органических загрязнений. Осветляющие активные угли, применяемые для адсорбции из жидкой фазы, наряду с высокими адсорбционными свойствами должны отвечать рыночным требованиям низкого (6–10 мас. %) содержания зольных компонентов, особенно водорастворимых.

Активированный уголь широко используется для очистки сточных вод в целлюлозно-бумажной, текстильной и нефтехимической промышленности, для очистки стоков портов, бензозаправочных станций, автомоек и пр. Кроме того, активированный уголь применяется на металлургических и горно-обогатительных комбинатах для очистки оборотной и технологической воды.

Для очистки сточных вод применяются как порошкообразные, так и дробленые (гранулированные) угли. Порошкообразный активированный уголь, как правило, используется в случае изменчивых показателей загрязнения сточных вод, где он добавляется в смеситель таком количестве, чтобы в любом случае достичь требуемой степени очистки (разделение суспензии происходит в отстойнике, либо коагуляторе). При сравнительно равномерном загрязнении сточных вод (как по уровню концентрации, так и по видам веществ) применяется адсорбер, содержащий неподвижный слоя гранулированного угля.

Активированный уголь поставляется в Россию более чем из 30 стран мира. В период 2004–2011 гг. крупнейшим поставщиком данной продукции выступал Китай, на долю которого в отдельные годы приходилось более трети всех поставок. К крупным азиатским поставщикам данной продукции относятся Индия, Шри-Ланка, Вьетнам, Малайзия. Также поставки активированного угля в Россию осуществляют Германия, Великобритания, Нидерланды, США [20].

Цены на активированные угли варьируют в широких пределах в зависимости от качественных характеристик угля. По данным за 2014 г. [20], стоимость активных углей марок БАУ, АГ-ОВ, Аквасорб-1 производства составляли 138, 155, 175 руб./кг, соответственно.

Использование порошкообразного активированного угля становится перспективным решением при выборе методов для удаления микрозагрязнителей из сточных вод очистных сооружений. Ключевым моментом в этой технологии является полное разделение загруженного порошкообразного активированного угля от сточных вод. Некоторые методы разделения, такие как седиментация, фильтрация, воздушная флотация, центрифугирование имеют низкую эффективность очистки или высокую стоимость. Известно, что эффективность извлечения зависит от загружаемой шихты, плотности тока и времени удерживания. При загрузке шихты 1 кг/м^3, плотности тока 100А/м^2 и времени удерживания 10 мин, дзета-потенциале, приблизительно равном 0, размер агрегата увеличивается до 100 мкм в диаметре [21, 22].

Перечисленные выше преимущества объясняют то внимание, которое уделяется разработке и совершенствованию электрофлотационного процесса с использованием активированных углей во многих странах мира, в том числе и в России.

Целью настоящей работы являлось исследование процесса электрофлотационного извлечения частиц активированного угля марки «ОУ-Б» в присутствии поверхностно-активных веществ катионной, анионной и неионогенной природы, установление сорбционной емкости угля по отношению к ионам цветных металлов, а также повышение эффективности их совместного электрофлотационного извлечения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объекта исследования был выбран активированный уголь марки «ОУ-Б» (ОАО «Сорбент», г. Пермь) (далее – ОУ-Б).

Активированный уголь марки ОУ-Б представляет собой тонкодисперсный порошок черного цвета. Технические характеристики активированного угля марки ОУ-Б и его пористой структуры приведены в таблицах 1 и 2, они соответствовали требованиям ГОСТ 4453-74.

Для проведения экспериментов по электрофлотационному извлечению и определению коллоидно-химических и поверхностных характеристик образцов готовились коллоидно-дисперсные системы ОУ-Б с концентрацией 100 мг/л в водных растворах, в присутствии поверхностно-активных веществ различной

природы, солей металлов ($ZnSO_4$, $NiSO_4$, $CuSO_4$, $CoSO_4$, $FeSO_4$, $Fe_2(SO_4)_3$) в качестве коагулянтов и фонового электролита – сульфата натрия.

Таблица 1. Технические характеристики активированного угля марки ОУ-Б

Адсорбционная активность по метиленовому голубому, мг/г, не менее	Адсорбционная активность по мелассе, %, не менее	Массовая доля золы, %, не более	Массовая доля влаги, %, не более	Массовая доля водорастворимой золы, %, не более	pH водной вытяжки	Массовая доля соединений железа в пересчете на Fe, %, не более
210	100	6	58	1	4–6	0,2

Таблица 2. Основные характеристики пористой структуры активированного угля ОУ-Б

Образец	$S_{уд}$, $м^2/г$	V_{Σ}, $см^3/г$	$V_{мезо}$, $см^3/г$	$V_{микро}$, $см^3/г$	$D_{ме}$, нм
ОУ-Б	825	0,654	0,293	0,408	4,0

В экспериментах использовали 3 типа ПАВ различной природы:

1. Анионный ПАВ – NaDDS (додецилсульфат натрия), $CH_3(CH_2)_{10}CH_2OSO_3Na$ – натриевая соль лаурилсерной кислоты, производитель «Panreac», Испания.
2. Катионный ПАВ – Катинол (алкилдиметил (2-гидроксиэтил) аммоний хлорид), водный раствор с массовой долей препарата 25–50% производства ООО НПО «НИИПАВ» г. Волгодонск, Российская Федерация.
3. Неионогенный ПАВ – «Triton® X-100» (ТХ-100, $C_{14}H_{22}O(C_2H_4O)_9$) имеющий в составе молекулы гидрофобный (4-трет-октилфенол) и гидрофильный фрагмент из остатков оксида этилена, содержащий 9–10 звеньев формулы -(O-CH_2-CH_2)- производства компании SIGMA-ALDRICH®, США.

Лабораторные исследования сорбции ионов металлов проводили в динамическом режиме с помощью иономера И-160 МИ и магнитной мешалки с якорем. Методика сорбционных экспериментов состояла в контактировании навески активированного угля с водными растворами металлов ($C(Me^{n+})$ = 10-100 мг/л) при pH 4,0 в течение 30 мин. После фильтрования угля определяли остаточную концентрацию металлов в растворе по стандартизированной методике на атомно-абсорбционном спектрометре КВАНТ-АФА.

Величину адсорбции Г ионов металла на угле в расчете на мг/г определяли по формуле: $\Gamma = \frac{(C_{исх} - C_{кон}) * V_{эл}}{m}$, где $C_{исх}$ и $C_{кон}$ – начальная и конечная концентрация ионов металла, г/л; $V_{эл}$ – объем электролита, л; m – масса активированного угля, г.

Эксперименты по электрофлотационному извлечению проводили на непроточной лабораторной установке по методике, подробно описанной в

литературе [21, 22]. Корректировку pH осуществляли растворами NaOH и H_2SO_4.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На первом этапе исследований были проведены эксперименты по определению сорбционной емкости активированного угля марки ОУ-Б по отношению к ионам металлов (Fe^{2+}, Co^{2+}, Ni^{2+}, Cu^{2+}, Zn^{2+}, Fe^{3+}) из водных растворов. Полученные результаты представлены на рис. 1.

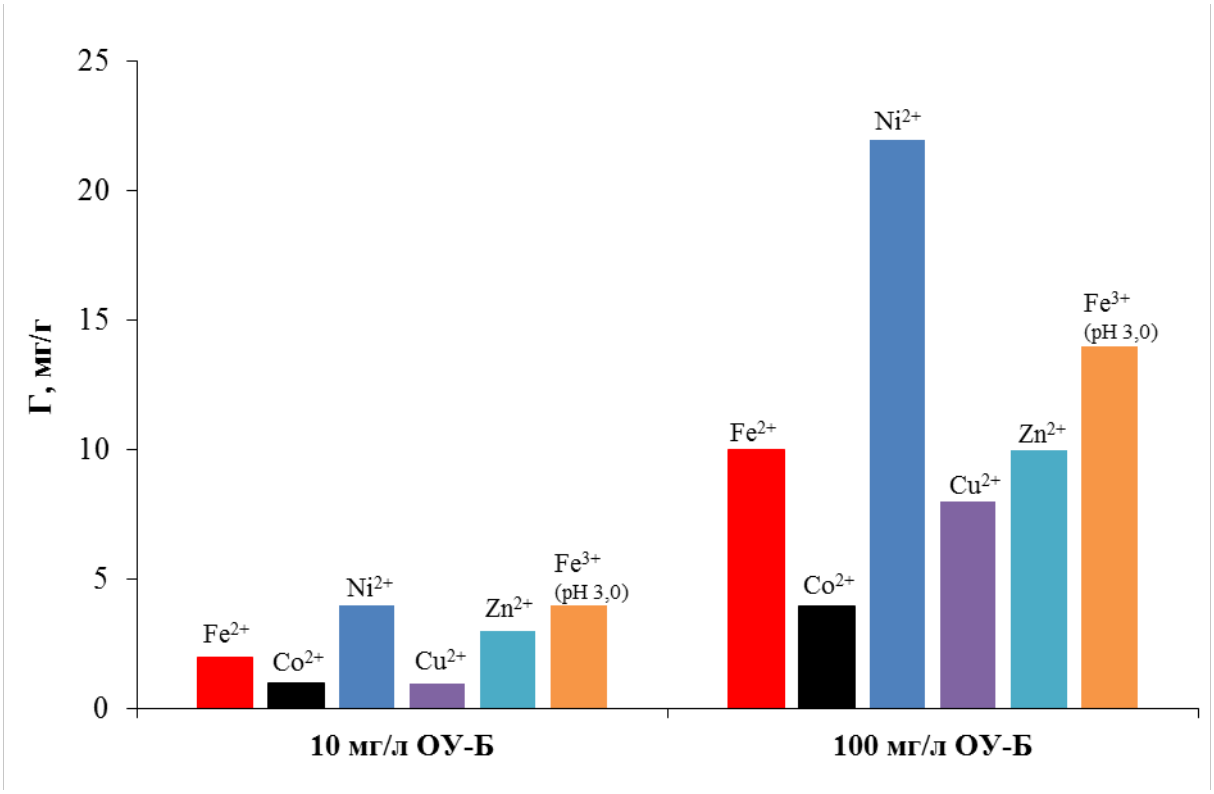

Рис. 1. Влияние начальной концентрации ионов металлов на их сорбционное извлечение из водных растворов на частицах угля марки ОУ-Б. Условия эксперимента: pH = 4,0; τ = 30 мин.

Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что при низкой концентрации (10 мг/л) ионов цветных металлов процесс их сорбции на дисперсной фазе активированного угля марки ОУ-Б протекает недостаточно эффективно – величина сорбции не превышает 5 мг/г для всех исследуемых металлов, особенно эти значения низки для ионов Co^{2+} и Cu^{2+} – 2 мг/г. При увеличении концентрации угля в 10 раз (до 100 мг/л) эффективность сорбции заметно возрастает, и составляет для ионов Ni^{2+} (22 мг/г), Fe^{3+} (14 мг/г), Fe^{2+} (12 мг/г), Cu^{2+} (8 мг/г) Zn^{2+} (10 мг/г), Co^{2+} (4 мг/г).

На следующем этапе исследования было изучено влияние гидродинамического радиуса частиц сорбента (R, нм) и электрокинетического потенциала ζ, мВ на эффективность электрофлотационного извлечения частиц угля (табл. 3) в присутствии ПАВ различной природы и без ПАВ.

Таблица 3. Влияние природы ПАВ на степень извлечения, электрокинетический потенциал и средний гидродинамический радиус частиц ОУ-Б в водных растворах методом электрофлотации

Суспензии	аПАВ	кПАВ	нПАВ	Без ПАВ
α, %	2	52	4	2
ζ, мВ	-23	-6	-13	-18
R, мкм	7	37	5	2

Условия эксперимента: С(ОУ-Б) = 100 мг/л; С(ПАВ) = 100 мг/л; С(Na_2SO_4) = 0,5 г/л; pH = 7,0; τ = 30 мин., Jv = 0,2 А/л.

Установлено, что средний гидродинамический радиус частиц угля ОУ-Б варьируется в диапазоне 810–890 нм. При этом видна закономерность, что чем меньше размер частицы сорбента, тем больше отрицательное значение электрокинетического потенциала. Выявлено, что процесс электрофлотации протекает эффективнее при более положительном значении электрокинетического потенциала и большем размере частиц. Отмечено, что максимальная степень извлечения угля, равная 52%, достигается в водном растворе с катионным ПАВ марки Катинол.

В таблице 4 представлены экспериментальные результаты влияния концентрации фонового электролита на процесс электрофлотационного извлечения активного угля ОУ-Б в присутствии ПАВ различной природы. В качестве фонового электролита был выбран сульфат натрия, концентрацию которого варьировали в диапазоне 50–500 мг/л.

Таблица 4. Влияние концентрации фонового электролита Na_2SO_4 на степень извлечения частиц ОУ-Б из водного раствора в присутствии ПАВ различной природы

τ, мин	Степень извлечения ОУ-Б *α*, %					
	NaDDS		Катинол		ТХ-100	
	Na_2SO_4					
	50 мг/л	500 мг/л	50 мг/л	500 мг/л	50 мг/л	500 мг/л
5	1	2	2	25	3	2
10	2	2	2	50	3	2
20	2	2	3	50	4	2
30	3	2	3	52	4	3

Условия эксперимента: С(ОУ-Б) = 100 мг/л; С(ПАВ) = 100 мг/л; i_v = 0,2 А/л; pH 7,0.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что вне зависимости от природы ПАВ частицы ОУ-Б не извлекаются при добавлении 50 мг/л Na_2SO_4, по-видимому, из-за отсутствия необходимого газонасыщения в процессе электрофлотации. При добавлении 500 мг/л частицы ОУ-Б также не

извлекаются из растворов, содержащих NaDDS и Triton® X-100. Однако в присутствии катионного ПАВ степень извлечения частиц ОУ-Б достигла 52%. Необходимо также отметить, что пена, образующаяся в процессе электрофлотации с катионным ПАВ, неустойчива, что негативно сказывается на процессе очистки, из-за неустойчивости образующегося на поверхности флотокомплекса.

Далее было изучено влияние добавления коагулянтов – гидроксидов металлов на электрофлотационное извлечение частиц сорбента. Отметим, что ионы цветных металлов зачастую уже присутствуют в сточных водах промышленных предприятий, поэтому дополнительное их введение требуется не всегда. В табл. 5 показано влияние природы ионов трехвалентных металлов – железа(III) и алюминия(III) на процесс электрофлотационного извлечения ОУ-Б из водных растворов в присутствии различных типов ПАВ.

Таблица 5. Влияние природы ПАВ на кинетику электрофлотационного извлечения частиц ОУ-Б в присутствии ионов трехвалентных металлов

$Me(OH)_3$ (Me – металл)	Время ЭФ, мин.	Степень извлечения ОУ-Б α, %		
		NaDDS	Катинол	ТХ-100
*Без $Me(OH)_3$	5	1	9	2
	10	1	50	4
	20	2	52	4
	30	2	52	4
Al(III)	5	22	14	21
	10	25	43	27
	20	35	59	68
	30	36	81	86
Fe(III)	5	15	71	58
	10	18	98	77
	20	19	98	92
	30	20	98	97

Условия эксперимента: $C(Me^{3+})$ = 10 мг/л; C(ОУ-Б) = 100 мг/л; C(ПАВ) = 100 мг/л; $C(Na_2SO_4)$ = 50 мг/л (* - 500 мг/л); i_v = 0,2 А/л; pH = 7,0.

Результаты эксперимента показали, что извлечение частиц угля марки ОУ-Б в присутствии NaDDS без добавления коагулянтов недостаточно эффективно. Введение в качестве коагулянтов ионов трехвалентных металлов (Al^{3+}; Fe^{3+}) в растворы катионного (Катинол) и неионогенного (ТХ-100) ПАВ улучшает эффективность процесса до 81–98%. Кроме того, присутствие ионов железа(III) интенсифицирует процесс – степень извлечения α = 98% после 10 мин электрофлотации в присутствии Катинола.

В табл. 6 показано влияние природы ионов двухвалентных металлов на процесс электрофлотационного извлечения ОУ-Б из водных растворов в присутствии ПАВ различной природы, сорбционная емкость по отношению к которым была установлена на первом этапе исследования.

Таблица 6. Влияние природы ПАВ на кинетику электрофлотационного извлечения частиц ОУ-Б в присутствии ионов двухвалентных металлов

$Me(OH)_2$	Время ЭФ, мин.	Степень извлечения ОУ-Б α, %		
		NaDDS	Катинол	ТХ-100
*Без $Me(OH)_2$	5	1	9	2
	10	1	50	4
	20	2	52	4
	30	2	52	4
Co(II)	5	10	1	56
	10	20	2	84
	20	25	2	95
	30	28	2	96
Ni(II)	5	2	6	8
	10	3	7	20
	20	3	13	34
	30	3	15	37
Cu(II)	5	6	58	46
	10	7	89	61
	20	8	99	85
	30	9	99	98
Zn(II)	5	29	72	58
	10	30	89	93
	20	30	97	99
	30	30	97	99

Условия эксперимента: $C(Me^{2+})$ = 10 мг/л; C(ОУ-Б) = 100 мг/л; C(ПАВ) = 100 мг/л; $C(Na_2SO_4)$ = 50 мг/л (* - 500 мг/л); i_v = 0,2 А/л; pH = 7,0.

Данные табл. 6 также показали неэффективное извлечение частиц ОУ-Б в присутствии ПАВ анионного типа – NaDDS. Кроме того, присутствие ионов кобальта(II) или никеля(II) тормозят процесс электрофлотации в водных растворах катионного ПАВ. Однако в присутствии неионогенного ПАВ ТХ-100 и ионов кобальта(II) степень извлечения частиц достигает 95–96% после 20 мин процесса электрофлотации. Такое же действие на эффективность и интенсивность процесса оказывают добавки ионов Cu^{2+}; Zn^{2+} в водных

растворах Катинола и ТХ-100. Степень извлечения в их присутствии достигает величины 90–99% через 10 мин процесса электрофлотации.

На рисунке 2 представлена обобщенная диаграмма по влиянию природы гидроксидов металлов на эффективность электрофлотационного извлечения частиц ОУ-Б в присутствии ПАВ различной природы.

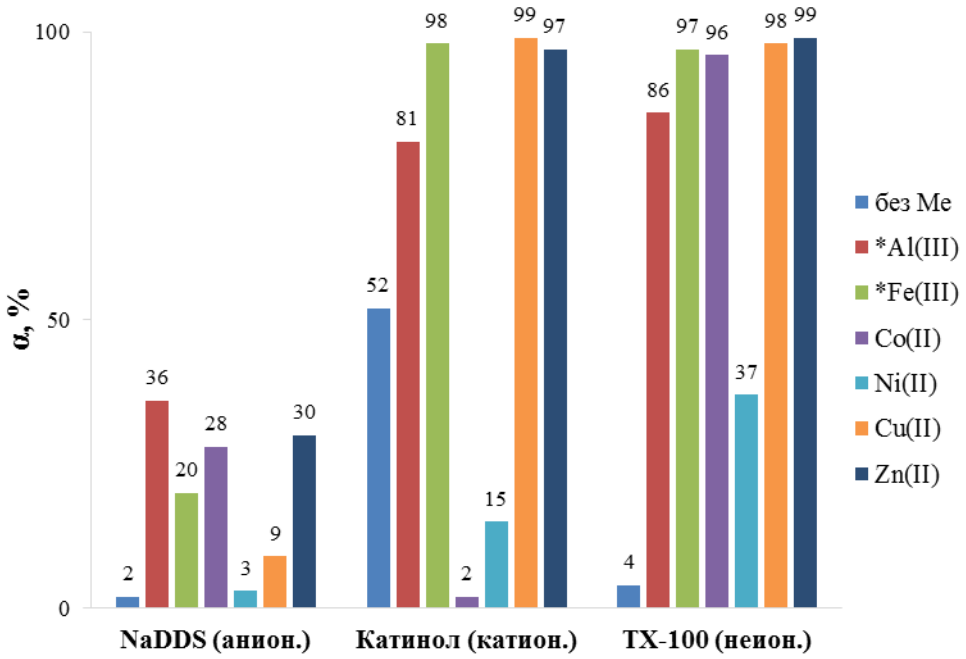

Рис. 2. Влияние природы гидроксидов металлов на степень извлечения частиц ОУ-Б электрофлотацией из водного раствора в присутствии различных типов ПАВ. Условия эксперимента: $C(Me^{n+})$ = 10 мг/л; C(ОУ-Б) = 100 мг/л; C(ПАВ) = 100 мг/л; $C(Na_2SO_4)$ = 50 мг/л; J_v = 0,2 А/л; pH = 9,5 (* pH 7,0); τ = 30 мин.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные экспериментальные данные показали, что процесс электрофлотации частиц активированного угля марки ОУ-Б из водных растворов протекает эффективнее при малом размере частиц, и высоком значении электрокинетического потенциала. При начальной концентрации 100 мг/л ионы металлов Ni^{2+}, Fe^{3+}, Fe^{2+} и Zn^{2+} эффективно извлекаются активированным углем. На эффективность электрофлотационного извлечения угля в присутствии ПАВ различной природы и без него оказывают влияние величины гидродинамического радиуса (R, нм) и электрокинетического потенциала ζ, мВ.

Из-за отсутствия необходимого газонасыщения в процессе электрофлотации частицы угля не извлекаются при добавлении фонового электролита Na_2SO_4 (50 мг/л) вне зависимости от природы ПАВ. Также частицы угля марки ОУ-Б не извлекаются из растворов, содержащих NaDDS и Triton® X-100 при добавлении 500 мг/л Na_2SO_4.

В присутствии анионного ПАВ – NaDDS извлечение частиц ОУ-Б протекает недостаточно эффективно, в то время как в присутствии катионного ПАВ степень извлечения частиц ОУ-Б достигает 52%.

В присутствии неионогенного ПАВ частицы угля наиболее эффективно извлекаются из растворов, содержащих ионы Fe^{3+}, Cu^{2+}, Zn^{2+}, Co^{2+} (α = 96–99%). Введение ионов Al^{3+} также повышают эффективность процесса электрофлотации, однако степень извлечения частиц ОУ-Б достигает значения 86% через 30 мин электрофлотации.

Максимальная степень извлечения частиц ОУ-Б достигается в присутствии таких ионов, как Al^{3+} и Zn^{2+}, при этом она равна α = 30–35% после 30 мин процесса электрофлотации. Присутствие частиц кобальта(II) или никеля(II) тормозит процесс электрофлотации. Наличие коагулянтов в растворе (Al^{3+}; Fe^{3+}) улучшает эффективность процесса до 81–98%. Кроме того, присутствие ионов железа(III) интенсифицирует процесс до достижения α = 98% после 10 мин электрофлотации. Такое же действие на эффективность и интенсивность процесса оказывают добавки ионов Cu^{2+}; Zn^{2+}. Степень извлечения частиц ОУ-Б в их присутствии достигает величины 90–99% через 10 мин процесса электрофлотации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, сравнение результатов электрофлотационного извлечения частиц активированного угля марки ОУ-Б из водных растворов позволяет заключить, что наиболее эффективно частицы извлекаются из растворов ПАВ катионного и неионогенного типа. Ионы никеля(II) не сильно влияют на процесс вне зависимости от природы ПАВ. Наличие ионов кобальта(II) в растворе значительно улучшает процесс электрофлотации в присутствии неионогенного ПАВ марки Triton® X-100, тогда как в присутствии NaDDS и Катинола они практически не извлекаются. Наибольшая эффективность процесса извлечения частиц ОУ-Б достигается в присутствии ионов Al^{3+}, Fe^{3+}, Cu^{2+}, Zn^{2+} (α = 82–99%).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Соглашения о предоставлении субсидии №14.574.21.0169 от 26 сентября 2017 г., уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI57417X0169.

ACKNOWLEDGEMENT

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in the framework of the Subsidy Grant Agreement No. 14.574.21.0169 of September 26, 2017, a unique identifier of project RFMEFI57417X0169.

Список литературы:

1. *Лурье Ю. Ю., Рыбникова А. И.* Химический анализ производственных сточных вод. М.: Химия, 1974. 336 с.
2. *Гарбер М.И.* Экономика и технология гальванического производства. М.: Химия, 1986. 170 с.

3. *Ягодин Г.А., Третьякова Л.Г.* Химическая технология и охрана окружающей среды. М.: Знание, 1984. 64 с.
4. *Виноградов С.С.* Экологически безопасное гальваническое производство. М.: ПИП «Глобус», 1998. 302 с.
5. *Алферов Л.А., Нечаев А.П.* Замкнутые системы водного хозяйства промышленных предприятий, комплексов и районов. М.: Стройиздат, 1984. 272 с.
6. *Ласкорин Б.Н., Громов Б.В., Цыганков А.П., Сенин В.Н.* Проблемы развития безотходных производств. М.: Строиздат, 1981. 207 с.
7. *Гребенюк В.Д., Соболевская Т.Т., Махно А.Г.* // Химия и технология воды. 1989. Т. 11. № 5. С. 407.
8. *Shishlannikov L.A., Alzhanov F.V.* // Desalination, 1986. V. 58. No. 1. P. 77. DOI: 10.1016/0011-9164(86)85014-7.
9. *Апельцина Е.П.* Электрохимические методы в технологии очистки природных и сточных вод. Обзор. М.: Изд. ЦИНИС Госстрой СССР, 1971. 49 с.
10. *Колесников В.А., Ильин В.И., Бродский В.А., Колесников А.В.* // Теорет. основы хим. технологии. 2017. Т. 51. № 4. С. 361. DOI: 10.7868/S0040357117040054.
11. *Шухенина З.М., Багров В.В., Десятов А.В. и др.* Вода техногенная: проблемы, технология, ресурсная ценность. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 401 с.
12. *Колесников В.А., Ильин В.И., Капустин Ю.И.* Электрофлотационная технология очистки сточных вод промышленных предприятий. М.: Химия, 2007. 304 с.
13. *Колесников В.А., Колесников А.В., Ильин В.И.* // Теоретические основы химической технологии. 2019. Т. 53. № 2. С. 205. DOI: 10.1134/S0040357119010093.
14. *Khelifa A., Moulay S., Naceur A.W.* // Desalination. 2005. V. 181. No. 1-3. P. 27. DOI: https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.01.011.
15. *Овчаренко А.Г., Старыгин В.С.* // Водоочистка. 2013. № 7. С. 14.
16. *Назаров В.Д., Назаров М.В., Хабибуллина М.Р.* // Приволж. науч. журнал. 2013. № 2. С. 108.
17. *Райзер Ю.С., Назаров М.В.* // Башк. хим. журнал. 2010. Т. 17. № 2. С. 142.
18. *Назаров В.Д., Назаров М.В.* // Защита окруж. среды в нефтегаз. комплексе. 2009. № 2. С. 49.
19. *Колесников В.А., Капустин Ю.И., Матвеева Е.В.* // Тез. докл. на 17 Менделеевском съезде по общей и прикл. химии. Казань, 2003. Т. 3. С. 204.
20. Обзор рынка активированного угля в СНГ. 7 издание. М.: Исследовательская группа ИНФОМАЙН, 2015. 177 с.
21. *Мешалкин В.П., Колесников В.А., Десятов А.В. и др.* // Доклады Академии Наук. 2017. Т. 476. № 2. С. 166. DOI: 10.7868/S0869565217260103.
22. *Колесников А.В., Милютина А.Д., Воробьева О.И., Колесников В.А.* // Химическая промышленность сегодня. 2016. № 5. С. 33.

References:

1. *Lurier Yu.Yu., Rybnikova A.I.* Chemical analysis of industrial wastewater. M.: Khimiya, 1974. 336 p. [in Russian].
2. *Garber M.I.* Economics and technology of galvanic production. M.: Khimiya, 1986. 170 p. [in Russian].
3. *Yagodin G.A., Tretyakova L.G.* Chemical Technology and environmental protection. M.: Znanie, 1984. 64 p. [in Russian].
4. *Vinogradov S.S.* Environmentally safe galvanic production. M.: PIP Globus, 1998. 302 p. [in Russian].
5. *Alferov L.A., Nechaev A.P.* Closed systems of water management of industrial enterprises, complexes and regions. M.: Stroiizdat, 1984. 272 p. [in Russian].

6. *Laskorin B.N., Gromov B.V., Tsygankov A.P., Senin V.N.* Problems of development of non-waste productions. M.: Stroizdat, 1981. 207 p. [in Russian].
7. *Grebenyuk V.D., Sobolevskaya T.T., Makhno A.D.* // Khimiya i tekhnologiya vody [Chemistry and water technology]. 1989. V. 11. No. 5. P. 407 [in Russian].
8. *Shishlannikov L.A., Alzhanov F.V.* // Desalination. 1986. V. 58. No. 1. P. 77. DOI: 10.1016/0011-9164(86)85014-7.
9. *Apelt'syna E.P.* Electrochemical methods in the technology of purification of natural and sewage water. Review. M.: Izd. TsYNIS Gosstroy USSR, 1971. 49 p. [in Russian].
10. *Kolesnikov V.A., Il'in V.I., Brodskiy V.A., Kolesnikov A.V.* // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2017. V. 51. No. 4. P. 369. DOI: 10.1134/S0040579517040200.
11. *Shukhenina Z.M., Bagrov V.V., Desyatov A.V. et al.* Technogenic water: problems, technology, resource value. M.: MGTU im. Baumana, 2015. 401 p. [in Russian].
12. *Kolesnikov V.A., Il'in V.I., Kapustin Yu.I.* Electroflotation technology of sewage treatment in industrial enterprises. M.: Khimiya, 2007. 304 p. [in Russian].
13. *Kolesnikov V.A., Kolesnikov A.V., Il'in V.I.* // Teoreticheskie osnovy khimicheskoj tekhnologii [Theoretical foundations of chemical engineering]. 2019. V. 53. No. 2. P. 205 [in Russian]. DOI: 10.1134/S0040357119010093.
14. *Khelifa A., Moulay S., Naceur A.W.* // Desalination. 2005. V. 181. No. 1-3. P. 27. DOI: https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.01.011.
15. *Ovcharenko A.G., Starygin V.S.* // Vodoochistka [Water purification]. 2013. No. 7. P. 14 [in Russian].
16. *Nazarov V.D., Nazarov M.V., Khabibullina M.R.* // Privolzh. nauch. zhurnal [Privolzhskii scientific journal]. 2013. No. 2. P. 108 [in Russian].
17. *Raizer Yu.S., Nazarov M.V.* // Bashkirskii khim. zhurnal [Bashkirskii chemical journal]. 2010. V. 17. No. 2. P. 142 [in Russian].
18. *Nazarov V.D., Nazarov M.V.* // Zashchita okruzh. sredy v neftegaz. komplekse [Protection of environment in oil and gas complex]. 2009. No. 2. P. 49 [in Russian].
19. *Kolesnikov V.A., Kapistin Yu. I., Matveeva E.V.* // Proceedings of 17th Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry. Kazan, 2003. V. 3. P. 204 [in Russian].
20. Review of Activated carbon market in the CIS. 7th edition. M.: INFOMAIN, 2015. 177 p. [in Russian].
21. *Meshalkin V.P., Kolesnikov V.A., Desyatov A.V. et al.* // Doklady Chemistry. 2017. V. 476. No. 1. P. 219. DOI: 10.1134/S001250081709004X.
22. *Kolesnikov A.V., Milyutina A.D., Vorobyova O.I., Kolesnikov V.A.* // Khimicheskaya promyshlennost' segodnya [Chemical industry today]. 2016. No. 5. P. 33 [in Russian].