

УДК 544.6.018

НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОФЛОТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ТРУДНОРАСТВОРИМЫХ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ (ОКСИДЫ, КАРБИДЫ, ГИДРОКСИДЫ) ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

© 2020 г. А. В. Колесников^{1,*}, академик РАН В. П. Мешалкин^{1,2},
Т. В. Давыдкова¹, В. А. Колесников¹

Поступило 07.07.2020 г.
После доработки 09.08.2020 г.
Принято к публикации 01.09.2020 г.

Установлено, что для систем H_2O-TiO_2 , $H_2O-Ti_3N_4$, H_2O-SiC , порошки углеродных материалов– H_2O и ряда других степень извлечения не превышает 10–20% за 30 мин флотации в электролитах $NaCl$ и Na_2SO_4 в широком диапазоне рН, что связано с малым размером дисперсной фазы и гидрофильными свойствами поверхности порошков. Введение в систему коагулянтов $FeCl_3$, $AlCl_3$ и композиций с поверхностно-активными веществами интенсифицирует процесс флотации и приводит к росту степени извлечения для отмеченных выше систем до 90–96%. Впервые рассчитаны константы скорости K электрофлотационных процессов для типовых зависимостей $\alpha = f(\tau)$. С учетом величин K и степени извлечения определены критерии эффективности электрофлотационных процессов по пяти основным группам. Результаты исследований важны при выборе технологии обезвреживания жидких техногенных отходов, содержащих соединения титана.

Ключевые слова: электрофлотационный процесс, неорганические соединения, оксид титана(IV), карбид кремния, нитрид титана, порошки углеродных материалов ОУ-А и ОУ-Б, композиции “коагулянт Fe, Al–ПАВ”, сточные воды

DOI: 10.31857/S2686953520050076

ВВЕДЕНИЕ

Электрофлотационный процесс (ЭФП) привлекает внимание исследователей и находит все большее применение в первую очередь для процессов водоочистки [1–3].

Теоретические исследования электрофлотационного процесса с целью описания кинетики извлечения, механизма взаимодействия частиц и пузырьков опубликованы в ряде обзоров и монографий российских и зарубежных специалистов [4–7]. В современных подходах авторы обращают внимание на коалесценцию и полидисперсность газовых пузырьков и дисперсной фазы, электростатическое взаимодействие пузырьков H_2 и O_2 с частицами малых размеров в процессах электрофлотационного извлечения (ЭФ).

Наиболее интересна в настоящее время модель, учитывающая многостадийность процесса флотации, возможность коагуляции и седиментации частиц, предложенная профессором Б.С. Ксенофонтовым [2] и актуальная с практической точки зрения [8–11].

Электрофлотационному процессу извлечения дисперсной фазы различной природы из водных растворов электролитов посвящен ряд статей [1, 5, 7, 9, 12], в том числе с растворимыми железными и алюминиевыми анодами [13, 14]. Положительное влияние поверхностно-активных веществ (ПАВ) на повышение эффективности электрофлотационного процесса извлечения гидроксидов меди, никеля и цинка представлено в работе [15]. Особенности электрофлотационного процесса извлечения порошков углеродных материалов опубликованы в статьях [16, 17].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ различных моделей формирования флотокомплексов в различных установках позво-

¹ Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Москва, Россия

² Институт общей и неорганической химии имени Н.С. Курнакова Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: artkoles@list.ru

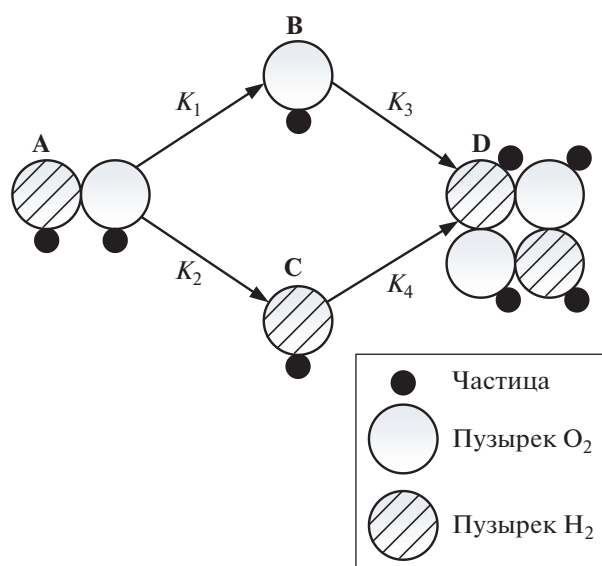


Рис. 1. Формирование флотокомплекса в электрофлотационном процессе. Обозначения: А – частицы и пузырек в исходном состоянии; В – флотокомплекс “частица–пузырек H₂”; С – флотокомплекс “частица–пузырек O₂”; D – частица в пенном слое.

лил определить факторы интенсификации и повышения эффективности процесса извлечения загрязнений. Степени извлечения гидрофильно-гидрофобных частиц для напорной флотации составили 50–70%, гидрофобных 90–95%. Электрофлотационный процесс обеспечивает более высокие степени извлечения гидрофильно-гидрофобных частиц (85–95%), гидрофобных – до 98% [18]. Нами было рассмотрено формирование флотокомплекса в электрофлотационном процессе и основные подходы к повышению эффективности извлечения дисперсной фазы различной природы из водных растворов и сточных вод.

На рис. 1 показано формирование флотокомплекса в условиях электрофлотационного процесса.

На практике для анализа кинетики электрофлотационного процесса часто используют уравнение

$$\alpha = 1 - e^{-K/\tau}, \quad (1)$$

где α – степень извлечения дисперсной фазы, %; τ – время, мин; K – константа скорости перехода дисперсной фазы в пенный продукт.

Величина K связана с многостадийностью процесса согласно следующей зависимости:

$$K = K_1 K_2 K_3 K_4, \quad (2)$$

где:

K_1 – вероятность образования флотокомплекса “частица–пузырек H₂”;

K_2 – вероятность образования флотокомплекса “частица–пузырек O₂”;

K_3 – всплытие флотокомплекса “частица–пузырек H₂”;

K_4 – всплытие флотокомплекса “частица–пузырек O₂”.

Константа скорости перехода дисперсной фазы в пенный продукт связана с газонасыщением (I_v), размером пузырьков ($D_{\text{пуз}}$), размером частиц ($D_{\text{част}}$), полидисперсностью частицы и пузырька (K_0) и может быть рассчитана по формуле:

$$K = \frac{EI_v D_{\text{част}} K_0}{D_{\text{пуз}} K_0}. \quad (3)$$

В то же время величина E – эффективность захвата комплекса “частица–пузырек” – трудно определяется экспериментально, так как зависит от большого количества факторов: гидрофобности поверхности, заряда дисперсной фазы, структуры осадка и природы дисперсной фазы, адсорбции ПАВ и т.д.

Анализ показывает, что вероятность столкновения мелких частиц размером меньше 10 мкм с пузырьками размером 40–60 мкм невелика и близка к нулю, степень извлечения составляет 1–5%.

Вероятности K_1 и K_2 , которые зависят от химических свойств поверхности, структуры поверхностных слоев, гидрофобности или гидрофильности поверхности, заряда поверхности и заряда пузырьков адсорбции анионов и катионов ПАВ, флокуляции частиц и пузырьков, гетерокоагуляции “частица–коагулянт”, краевого угла смачивания “пузырек–частица” и других факторов, фактически определяют эффективность процесса и степень извлечения.

Вероятности K_3 и K_4 имеют большие значения для мелких пузырьков, характерных для электрофлотации, в отличие от других флотационных процессов, в первую очередь, в присутствии ПАВ, которые стабилизируют пузырьки в ЭФ аппарате на уровне среднего размера 25–30 мкм.

Величина K имеет большие значения для гидрофобных частиц, которые эффективно флотируются в пенный продукт, степень извлечения достигает 90–95%.

Предложены основные подходы для повышения эффективности электрофлотационного процесса извлечения труднорастворимых соединений металлов и углеродных материалов, а именно:

- 1) гидрофобизация поверхности дисперсной фазы (H₂O ↔ ПАВ);
- 2) создание нового флотокомплекса:
 - дисперсная фаза–флокулянт, ПАВ;
 - дисперсная фаза–коагулянт (Fe, Al, Ti);

– дисперсная фаза–композиция (коагулянт–ПАВА), где композиция – это система коагулянт–ПАВ;

3) увеличение размера частиц (30–100 мкм) (флокулянт, рН, ζ -потенциал, концентрация, коагулянт);

4) изменение электрокинетического потенциала, $\zeta \rightarrow 0$ (рН, ПАВ, катионы – Ca^{2+} , Mg^{2+} , анионы – SO_4^{2-} , PO_4^{3-});

5) изменение природы и структуры дисперсной фазы (аморфная, рыхлая) (гидроксиды, фосфаты, сульфиды, карбонаты).

Лабораторные эксперименты в установках непроточного типа дают общую информацию о протекании процесса электрофлотационного извлечения, в первую очередь, о влиянии на степень извлечения таких факторов, как размер и заряд частиц, изменение рН, адсорбция ионов электролита, присутствие флокулянтов и ПАВ различной природы, природа коагулянта, концентрация дисперсной фазы и газонасыщение раствора электролитическими газами.

Проанализировано большое количество экспериментальных зависимостей кинетики процесса извлечения дисперсной фазы на лабораторной установке согласно методике исследования, опубликованной в работах [18–20]. На рис. 2 представлены зависимости $\alpha = f(\tau)$ для случаев, где флотация протекает с очень высокой (кривая 5) и с очень низкой (кривая 1) эффективностью.

На основании анализа уравнения (1) рассчитаны величины K . На основании анализа экспериментальных величин α_5 и α_{30} (степени извлечения через 5 и 30 мин в процессе электрофлотации) и расчетной величины K предложен подход к оценке эффективности протекания ЭФ процесса на лабораторной установке непроточного типа. Результаты анализа представлены в табл. 1.

Величина степени извлечения α_5 в течение 5 мин характеризует качественно формирование флотокомплекса “частица–пузырек” и способность всплытия на границу “раствор–воздух”.

Величина α_5 коррелирует с высокими значениями K . Величина α_{30} характеризует эффективность ЭФ процесса в целом, стабильность пенно-

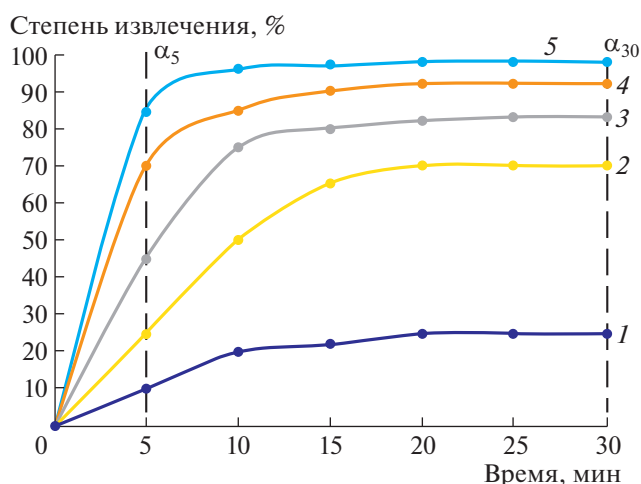


Рис. 2. Зависимость степени извлечения дисперсной фазы в электрофлотационном процессе от времени в различных системах: 1 – очень низкая; 2 – низкая; 3 – средняя; 4 – высокая; 5 – очень высокая.

го продукта, возможные процессы разрушения пены, приводящие к снижению величины α_{30} .

В зависимости от значения величин α_5 , α_{30} , и K предложено разделить исследуемые системы на 5 групп.

На основании лабораторных исследований для групп (4) и (5) можно рекомендовать опытно-промышленные и промышленные испытания; для групп (1) и (2), где значения α_5 , α_{30} , K имеют низкие значения, необходимы дополнительные исследования и поиск технологических приемов интенсификации и повышения эффективности электрофлотационного процесса.

Указанный подход удобен для тестирования реальных объектов, например, сточных вод промышленных предприятий. При поставке в лабораторию 10 л сточной воды удастся протестировать систему 8–10 раз в различных условиях с добавлением необходимых реагентов: флокулянтов, ПАВ, коагулянтов.

В электрофлотационном процессе, особенно для электрофлотации частиц малых размеров (до 10 мкм), формирование флотокомплекса связано с электростатическим притяжением частиц и пузырьков, имеющих за счет формирования двой-

Таблица 1. Базовые параметры электрофлотационного процесса

Параметр	Эффективность процесса				
	очень высокая	высокая	средняя	низкая	очень низкая
K	0.2–0.3	0.1–0.2	0.01–0.1	менее 1×10^{-2}	менее 1×10^{-3}
$\alpha_5, \%$	80–95	60–75	40–55	20–25	5–10
$\alpha_{30}, \%$	98	92	83	70	25

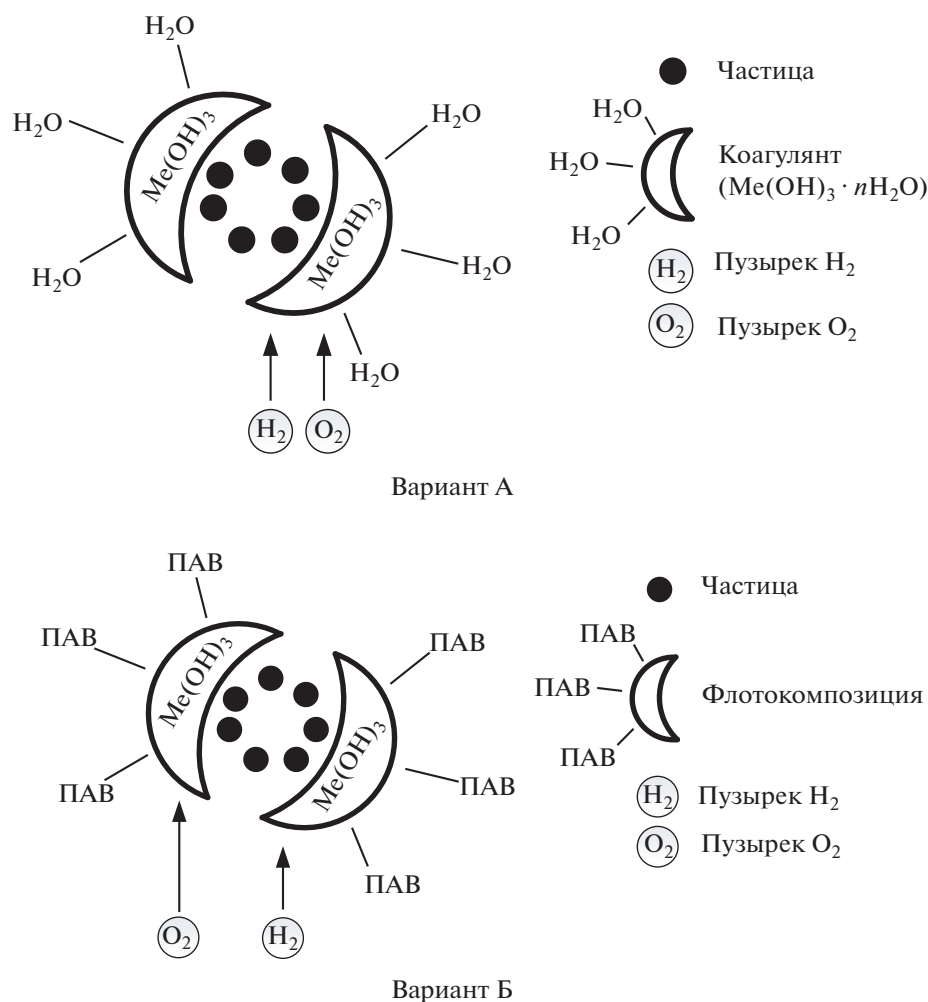


Рис. 3. Схема формирования флотокомплекса “частица–пузырек–коагулянт–ПАВ”. Вариант А – электрофлотация гидрофильных осадков, вариант Б – электрофлотация гидрофильно-гидрофобных осадков.

ного электрического слоя различные заряды поверхности.

Экспериментально установлено, что низкая эффективность электрофлотационного процесса наблюдается для частиц отрицательно заряженных, как правило, в растворах при $pH > 7$ в присутствии анионов (S^{2-} , PO_4^{3-} , CO_3^{2-} , $H_2PO_4^-$). Низкая эффективность в этом случае связана со сложностью формирования флотокомплекса “отрицательно заряженная частица–пузырьки H_2 –дисперсная фаза”. При $pH 9–10$ пузырьки O_2 в объеме раствора, вероятно всего, заряжены так же отрицательно.

Низкие степени извлечения 10–15% определены для электрофлотационного процесса извлечения порошков TiO_2 , SiC , углеродных материалов марок ОУ-А, ОУ-Б (Россия) в первую очередь из-за малых размеров и высоких отрицательных ζ -потенциалов. Величина электрокинетического потенциала (ζ , мВ), измеренная эксперименталь-

но, дает необходимую информацию об объектах флотации.

Как показали исследования, эффективность ЭФ процесса значительно увеличивается в присутствии ПАВ в растворе, т.к. ПАВ оказывают влияние вследствие адсорбции на поверхности дисперсной фазы и способствуют формированию на поверхности гидрофильных осадков (гидроксиды металлов) гидрофобно-гидрофильных частиц. Наиболее сильное влияние оказывает анионный ПАВ на ЭФ процесс извлечения коагулянтов $Fe(OH)_3$, $Al(OH)_3$, $Al(OH)_2Cl$, что было использовано для интенсификации ЭФ процесса извлечения порошков TiO_2 , SiC , Ti_3N_4 , древесных порошкообразных активированных углей марок ОУ-А и ОУ-Б (Россия).

Схема формирования флотокомплекса “частица–пузырек–коагулянт–ПАВ” представлена на рис. 3.

Таблица 2. Объекты с высокой эффективностью электрофлотационного процесса извлечения дисперсной фазы ($\alpha_{30} = 93\text{--}98\%$)^a

Объект	Технологический прием	α_5	α_{30}
TiO ₂	Fe ³⁺	32	74
	Al ³⁺	24	64
	Fe + ПАВа*	85	96 (98)
	Al + ПАВа	80	90–95
Ti ₃ N ₄	Fe ³⁺	70	85
	Al ³⁺	74	90
	Fe + ПАВа	78	93
	Al + ПАВа	85	93–98
TiC	Fe ³⁺	75	82
	Al ³⁺	40	45
	Fe + ПАВа	88	95
	Al + ПАВа	90	98
ОУ-А	Fe–NaCl	31	96
	Fe–ПАВа (NaCl)	92	96
ОУ-Б	Fe–Na ₂ SO ₄	75	98
	Al–Na ₂ SO ₄	70	97
	Fe + ПАВк (Na ₂ SO ₄)**	71	98
	Al + ПАВа (NaCl)	81	90
Al(OH) _{3-x} · (SO ₄) _x	+ ПАВа (NaDDS***, NaDBS****)	75	93–95
Cr(OH) _{3-x} · (SO ₄) _x	+ ПАВа (NaDDS, NaDBS)	68	90–93

Примечание: ^a условия эксперимента – *c* (взвешенных веществ) ≤ 100 мг/л, *c* (Na₂SO₄) = 1 г/л, *c* (коагулянт) = 5–10 мг/л, *c* (ПАВ) = 5–10 мг/л, объемная плотность тока $J_v = 0.2\text{--}0.4$ А/л, pH 7 ± 0.5.

* ПАВа – анионный ПАВ, ** ПАВк – катионный ПАВ дидецилдиметиламмоний хлорид, *** NaDDS – додецилсульфат натрия, **** NaDBS – додецилбензолсульфонат натрия.

Экспериментально доказана высокая эффективность электрофлотации по варианту Б вследствие адсорбции ПАВ на гидроксидах железа и алюминия [21].

В табл. 2 представлены экспериментальные данные по ЭФ извлечению различных порошков оксидов, нитридов и карбидов титана, а также порошков активированных углей марок ОУ-А, ОУ-Б, гидроксидов хрома и алюминия. Степень извлечения указанных объектов без ПАВ и коагулянтов не превышает 10–15%.

Высокие степени извлечения наблюдаются в присутствии флокулирующей композиции “коагулянт–гидроксид железа, алюминия–ПАВ”. Положительное влияние анионного ПАВ (ПАВа) отмечается и при электрофлотации гидроксидных осадков Fe(OH)₃, Cr(OH)₃, Al(OH)₃, Cu(OH)₂, Zn(OH)₂, Ni(OH)₂.

Исследования, проведенные с другими объектами, в частности, с оксидами металлов, сульфидами и фосфатами Cu, Ni, Zn, при добавлении композиции Me(OH)₃–ПАВ в соотношении кон-

центраций 100 : (5–10), показали высокие значения степени извлечения. Композиция “коагулянт Al(OH)₂Cl–ПАВа–флокулянт Superfloc” показала высокую эффективность при извлечении взвешенных веществ, снижая их концентрацию с 1500 мг/л до 100–150 мг/л из фильтратов полигонов твердых бытовых отходов.

Таким образом, проведенные исследования показали, что электрофлотационный процесс извлечения дисперсной фазы из водных растворов можно интенсифицировать и повысить степень извлечения за счет добавления ПАВ, коагулянтов (Fe³⁺, Al³⁺) и композиций “коагулянт–ПАВ”.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования выявлен ряд несомненных преимуществ электрофлотационного метода, основными из которых являются:

- короткое время процесса (5–10 мин) и высокая степень извлечения (до 99%), небольшие

энергозатраты (0.5 кВт ч/м^3) при обработке исследуемых растворов;

- возможность одновременного извлечения примесей, имеющих различный фазово-дисперсный состав с размером частиц от 10 до 100 мкм;

- образование мелкодисперсных газовых пузырьков, обладающих высокой адгезионной способностью к извлекаемым гидрофильным, гидрофобным и гидрофильно-гидрофобным примесям, и их эффективное извлечение;

- благоприятное влияние электрического поля на изменение физико-химических свойств извлекаемой дисперсной системы, интенсифицирующее процесс флокуляции;

- возможность извлечения дисперсной фазы, эмульсии и ПАВ одновременно.

Отмеченные достоинства важны при очистке сточных вод сложного состава.

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

БЛАГОДАРНОСТЬ

Экспериментальные результаты, представленные в таблицах и на рисунках, получены авторами в Российском химико-технологическом университете им. Д.И. Менделеева.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке РХТУ им. Д.И. Менделеева (проект № 3-2020-004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесников В.А., Ильин В.И., Бродский В.А., Колесников А.В. Электрофлотация в процессах водоочистки и извлечения ценных компонентов из жидких техногенных отходов. Обзор. Ч. 1 // Теоретические основы химической технологии. 2017. Т. 51. № 4. С. 361–375.
2. Ксенофонтов Б.С., Антонова Е.С., Бондаренко, Капитонова С.Н., Юрьева О.А. Моделирование очистки сточных вод электрофлотацией // Экология пром. производства. 2015. Т. 89. № 1. С. 36.
3. Kolesnikov V.A., Brodsky V.A., Perfilova A.V., Kolesnikov A.V. Electroflotation extraction of sparingly soluble compounds of non-ferrous and rare-earth metals from liquid technological waste // Pur. Appl. Chem. 2017. V. 89. № 10. P. 1535–1541. <https://doi.org/10.1515/pac-2016-1113>
4. Kolesnikov A.V., Milyutina A.D., Desyatov A.V., Kolesnikov V.A. Electroflotation recovery of highly dispersed carbon materials from aqueous solutions of electrolyte // Sep. Purif. Technol. 2019. V. 209. P. 73–78. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.07.014>
5. Chen G. Hung Y.T. Electrochemical Wastewater Treatment Processes / Wang L.K., Hung Y.T., Shammas N.K., eds. Advanced Physicochemical Treatment Technologies. Handbook of Environmental Engineering, V. 5. Totowa, NJ: Humana Press Inc.; 2007. P. 57–106.
6. Шуленина З.М., Багров В.В., Десятов А.В. Вода техногенная. Проблемы, технологии, ресурсная ценность / Монография. М.: Издательство МГТУ им. Н. Баумана, 2015. 401 с.
7. Matis K.A., Peleka E.N. // Sep. Sci. Technol. 2010. V. 45. № 16. P. 2465.
8. Sillanpää M., Shestakova M. Electrochemical water treatment methods: fundamentals, methods and full scale applications / 1st ed.; Butterworth-Heinemann: 2017. V. 1. P. 310.
9. Sarkar S.K., Machniewski P.M., Evans G.M. Modelling and measurement of bubble formation and growth in electroflotation processes // Chemical and Process Engineering – Inzynieria Chemiczna i Procesowa. 2013. V. 34. № 3. P. 327–336.
10. Binqun J., Jin L. The mathematical model of bubble size based on the bubble nucleation theory in the process of air-flotation // Res. J. Chem. Environ. 2011. V. 15. № 1. P. 59.
11. Chen X., Chen G. Electroflotation Electrochemistry for the Environment. New York, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer; 2010. 263 p.
12. Matis K.A. Flotation as a separation process / in: Lehr J.H., Keeley J., eds., Water Encyclopedia. V. 1. Wiley & Sons. 2015. P. 684–688.
13. Martínez-Huitle C.A., Rodrigo M.A., Scialdone O. Electrochemical water and wastewater treatment. Oxford: Butterworth-Heinemann, an imprint of Elsevier, 2018. P. 556.
14. Ксенофонтов Б.С. Очистка сточных вод: кинетика флотации и флотокомбайны. ИД “Форум”, ИНФРА-М. 2020. 256 с.
15. Козодаев А.С., Таранов Р.А., Ксенофонтов Б.С., Воропаева А.А., Виноградов М.С., Петрова Е.В., Иванов М.В. Флотокомбайны – перспективная техника для очистки сточных вод // Научное обозрение. 2015. № 24. С. 128–138.
16. Attour, A., Touati, M., Tlili, M., Ben Amor M., Lapique F., Leclerc J.-P. Influence of operating parameters on phosphate removal from water by electrocoagulation using aluminum electrodes // Sep. Purif. Technol. 2014. V. 123. P. 124–129.
17. Garcia-Segura S.G., Eiband M.M.S.G., de Melo J.V., Martínez-Huitle C.A. Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies // J. Electroanal. Chem. 2017. V. 801. P. 267–299.
18. Мешалкин В.П., Колесников А.В., Савельев Д.С. Колесников В.А., Белозерский А.Ю., Меньшова И.И., Масляникова Д.В., Сычева О.В. Анализ физико-химической эффективности электрофлотационного процесса извлечения продуктов гидролиза четыреххлористого титана из техногенных стоков // ДАН. 2019. Т. 486. № 6. С. 680–684. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524866680-684>

19. Мешалкин В.П., Колесников В.А., Десятов А.В., Милютин А.Д., Колесников А.В. Физико-химическая эффективность процесса электрофлотации высокодисперсного углеродного наноматериала из водных растворов с поверхностно-активными веществами // ДАН. 2017. Т. 476. № 2. С. 166–169. <https://doi.org/10.7868/S0869565217260103>
20. Мешалкин В.П., Колесников А.В., Милютин А.Д., Десятов А.В., Колесников В.А. Экспериментальные исследования межфазных явлений на инновационных углеродных наноматериалах в водных растворах электролитов // ДАН. 2017. Т. 474. № 5. С. 585–588. <https://doi.org/10.7868/S0869565217050139>

SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL BASICS OF INCREASING RESOURCE EFFICIENCY OF ELECTROFLOTATION PROCESSES OF EXTRACTION OF DIFFICULTY INSOLIDATED INORGANIC COMPOUNDS (OXIDES, CARBIDES, HYDROXIDES) FROM AQUEOUS SOLUTIONS

A. V. Kolesnikov^{a,#}, Academician of the RAS V. P. Meshalkin^{a,b}, T. V. Davydkova^a, and V. A. Kolesnikov^a

^a D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

^b Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

[#]E-mail: artkoles@list.ru

It was found that for the systems H₂O–TiO₂, H₂O–Ti₃N₄, H₂O–SiC, powders of carbon materials–H₂O and a number of others, the degree of recovery does not exceed 10–20% for 30 min of flotation in NaCl and Na₂SO₄ electrolytes in a wide pH range, which is associated with small size of the dispersed phase and hydrophilic properties of the powder surface. The introduction of coagulants FeCl₃, AlCl₃ and compositions with surfactants into the system intensifies the flotation process and leads to an increase in the degree of recovery for the above systems up to 90–96%. For the first time, the rate constants *K* of electroflotation processes were calculated for typical dependences $\alpha = f(\tau)$. Taking into account the values of *K* and the degree of recovery, criteria for the efficiency of electroflotation processes were determined for five main groups. The research results are important when choosing a technology for the neutralization of liquid industrial waste containing titanium compounds.

Keywords: Electroflotation process, inorganic compounds, titanium(IV) oxide, nitrogen carbide, titanium nitride, powdered carbon materials OU-A and OU-B, compositions “coagulant Fe, Al–surfactant”, wastewater