

ISSN 1561-8331 (Print)

ISSN 2524-2342 (Online)

УДК 661.8.092.82:678.745.842

<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2020-56-1-51-57>

Поступила в редакцию 19.11.2019

Received 19.11.2019

Е. В. Воробьева*Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь***РЕГУЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДИСПЕРСИИ КАОЛИНА В СОЛЕВОЙ СРЕДЕ АКРИЛАМИДНЫМИ СОПОЛИМЕРАМИ**

Аннотация. В результате исследования влияния акриламидных сополимеров на устойчивость солевой дисперсии каолина показано, что агрегация частиц твердой фазы и скорость осаждения флокул увеличивается при поочередном введении в дисперсию полимеров с различной адсорбционной активностью. Предельная адсорбция, адсорбционная емкость, константа адсорбции максимальны для вариантов поочередной адсорбции анионного полиэлектролита на подложке из катионного полиэлектролита. Высокая адсорбционная емкость и энергия взаимодействия полимеров с поверхностью и между собой приводит к улучшению флокуляции и увеличению скорости осаждения солевой дисперсии каолина в 1,3–1,5 раза.

Ключевые слова: акриламидные сополимеры, солевая дисперсия, адсорбция, устойчивость, каолин

Для цитирования. Воробьева, Е. В. Регулирование устойчивости дисперсии каолина в солевой среде акриламидными сополимерами / Е. В. Воробьева // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2020. – Т. 56, № 1. С. 51–57. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2020-56-1-51-57>

Elena V. Vorobieva*Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus***REGULATION OF THE STABILITY OF KAOLIN DISPERSION IN THE SALT MEDIA BY ACRYLAMIDE COPOLYMERS**

Abstract. As a result of the study of the effect of acrylamide copolymers on the stability of the kaolin salt dispersion, it was shown that the aggregation of solid phase particles and the deposition rate of flocs increases when polymers with different adsorption activity are alternately dosed to a disperse system. The adsorption limit, adsorption capacity and adsorption constant are at maximum for alternate adsorption of anionic polyelectrolyte on a cationic polyelectrolyte layer. High adsorption capacity and interaction energy of polymers with the surface and with each other leads to an improvement in flocculation and to the increase in the deposition rate of the kaolin-salt dispersion by 1.3–1.5 times.

Keywords: acrylamide copolymers, salt dispersion, adsorption, stability, kaolin

For citation. Vorobieva E. V. Regulation of the stability of kaolin dispersion in the salt media by acrylamide copolymers // *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2020, vol. 56, no. 1, pp. 51–57 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2020-56-1-51-57>

Введение. Изменение устойчивости микрогетерогенных систем, к которым относятся суспензии и эмульсии, можно добиться введением в систему различных коагулянтов и флокулянтов, например анионных или катионных полиэлектролитов, мицеллообразующих поверхностно-активных веществ [1, 2]. Значительный интерес к изучению флокулирующей способности полиэлектролитов вызван применением их для очистки природных и сточных вод, концентрирования дисперсий и обезвоживания осадков, улучшения фильтрационных свойств осадков и структуры почв, в горнорудной, нефтяной, пищевой и других отраслях промышленности [3, 4].

Эффективность флокулирующего действия полиэлектролитов зависит от химической природы, состава, молекулярной массы, концентрации флокулянтов, параметров частиц дисперсной фазы (в первую очередь поверхностных характеристик) и дисперсионной среды [4, 5]. В технологических процессах переработки калийных руд дисперсионной средой является высококонцентрированный (насыщенный) солевой раствор; в качестве флокулянтов при сгущении и обезвоживании глинисто-солевых дисперсий применяют акриламидные полимеры [6, 7]. Расширение возможности регулирования устойчивости дисперсных систем обнаружено при переходе от индивидуальных полимеров к бинарным системам [6, 8], что на практике осуществляется путем поочередного введения флокулянтов в дисперсию.

Несмотря на то что основные аспекты влияния акриламидных полимеров на флокуляцию глинистых частиц в солевых растворах исследованы и проанализированы, ряд важных в теоретическом и практическом плане вопросов остаются неясными и требуют дальнейших исследований. Это относится, в частности, к изучению адсорбции катионных и анионных сополимеров акриламида с различной плотностью заряда макромолекулярной цепи в условиях солевой среды и взаимодействия противоположно заряженных полиэлектролитов на поверхности частиц дисперсной фазы.

Изучению адсорбции полимеров на различных поверхностях посвящено большое количество работ [9–11], однако данные, объясняющие процессы, происходящие при взаимодействии полимеров с поверхностью глинистых частиц в солевых дисперсиях, весьма ограничены. Взаимодействие между адсорбатом и адсорбентом осуществляется за счет электростатических, водородных связей и сил Ван-дер-Ваальса, которые включают дисперсионные контакты между неполярными молекулами, диполь-дипольное и индукционное взаимодействие полярных групп. Возможность одновременного образования контактов различной природы между полимером и поверхностью показана во многих работах [10–12]. Обсуждается также вероятность адсорбции не в виде отдельных макромолекул, но их агрегатов, когда с поверхностью непосредственно контактирует лишь небольшая часть сегментов полимерной цепи, а остальные макромолекулы связаны с поверхностью через адсорбированные сегменты. В таком случае сложно определить, что можно отнести к адсорбционному слою.

В немногочисленных работах авторы рассматривают влияние солей на конформацию макромолекул в растворе и считают, что количество адсорбированного полимера возрастает по мере приближения к точке осаждения полимера из раствора. По мнению авторов, адсорбция из солевых растворов может возрасти также вследствие экранирования зарядов функциональных групп полиэлектролита и поверхности катионами соли [11, 13].

Адсорбция полимеров часто рассматривается как стадия процесса флокуляции или стабилизации дисперсии. Данные по адсорбции имеют принципиальное значение для объяснения влияния полимеров на устойчивость дисперсии, поскольку именно внешний адсорбционный полимерный слой отвечает за агрегацию частиц. В связи с этим с точки зрения возможности повышения эффективности флокуляции несомненный интерес представляет исследование адсорбции полимеров при их поочередном введении в дисперсию.

В настоящей работе приведены результаты исследования поочередной адсорбции из солевых растворов (хлорид калия) на каолине катионного, затем анионного сополимеров акриламида и оценка влияния полиэлектролитов на устойчивость солевых дисперсий каолина.

Экспериментальная часть. В работе использовали катионный сополимер акриламида с триметиламмоний этилакрилат хлоридом (К) и анионный сополимер акриламида с акриловой кислотой (А), содержащие 10 и 40 мол.% ионогенного компонента (A_{10} , K_{10} , K_{40}) с молекулярной массой (ММ) $1,1 \cdot 10^7$ D.

Солевую дисперсию глины готовили с использованием каолина марки 18616 (Германия). Содержание частиц размером менее 1μ – 32 %, $(1-2) \mu$ – 35 %, $(2-3) \mu$ – 28 %, плотность $2,8 \text{ г/см}^3$. Содержание каолина в суспензии – 40 г/л; суммарная концентрация полимеров – 0,12 мг/г твердой фазы.

Адсорбцию изучали на каолине из солевого раствора хлорида калия с концентрацией 0,075 М. Каолин 1,0 г приводили в контакт со 100 мл раствора, содержащего 0,3–10,0 мг/л полимера. Смесь интенсивно перемешивали в течение 4 ч и оставляли на 12 ч. Затем суспензию центрифугировали при 5000 об/мин в течение 30 мин. В растворе определяли концентрацию оставшегося полимера по содержанию органического углерода на анализаторе Shimadzu TOC-5050A. Диапазон измерения анализатора – 0,05–4000 мг/л, погрешность измерения – менее 0,01 мг/л.

При поочередной адсорбции раствор полимера вводили в систему двумя порциями: после добавления первой через 12 ч раствор сливали, осадок промывали водным раствором хлорида калия с концентрацией 0,075 М, затем заливали второй порцией раствора полимера. Аналогично описанному выше способу определяли концентрацию оставшегося в растворе полимера. В специальных экспериментах нами было установлено, что при промывании осадка солевым раствором десорбции полимера с поверхности не происходит. Среднюю молекулярную массу одного моля

(осн-моль) мономерных единиц полимера рассчитывали в соответствии с методикой [14]. По линеаризованным изотермам адсорбции определены адсорбционная емкость адсорбента E и константа адсорбции K . Рассчитанные параметры уравнения Ленгмюра использованы для построения теоретических изотерм адсорбции [14].

Оценку устойчивости дисперсии каолина в солевой среде проводили сравнением данных по скорости осаждения. Определенное количество каолина заливали 250 мл насыщенного раствора КСl и оставляли на 4 ч для набухания, после добавления полимера перемешивали дисковой мешалкой с отверстиями путем ее вертикального перемещения в цилиндре. При поочередном введении в систему двух полимеров после каждого добавления полимера дисперсию перемешивали, измеряли время перемещения границы раздела фаз в цилиндре объемом 250 мл между двумя метками на расстоянии 100 мм одна от другой и рассчитывали скорость осаждения. Измерения времени осаждения проводили с повторностью не менее трех раз с точностью $\pm 0,5$ с.

Результаты исследований и их обсуждение. Изотермы адсорбции анионного полиэлектролита A_{10} из раствора хлорида калия на каолине с адсорбированным катионным полиэлектролитом (K_{10} , K_{40}) отличаются от изотерм его адсорбции на исходном каолине отсутствием линейного участка повышения адсорбции. Из рис. 1 видно, что экспериментальные и теоретические изотермы адсорбции почти совпадают. Таким образом, поочередная адсорбция двух сополимеров акриламида с разноименными зарядами мономерных звеньев описывается уравнением Ленгмюра во всем интервале концентраций полимеров. Теоретические изотермы адсорбции построены с использованием параметров адсорбционного уравнения, определенных по изотермам адсорбции в линейной форме (рис. 2).

На изотерме адсорбции катионного полиэлектролита K_{10} на каолине с адсорбированным A_{10} также отсутствует линейный участок увеличения адсорбции (рис. 3). Зависимость адсорбции от концентрации, которая построена с использованием параметров адсорбционного уравнения Ленгмюра, определенных по линеаризованной изотерме (рис. 4) и приведенных в таблице, совпадает с экспериментальными данными. Изотерма адсорбции K_{10} из солевых растворов на каолине с адсорбированным A_{10} описывается уравнением Ленгмюра во всем интервале концентраций полимера.

Сопоставление параметров адсорбционного уравнения (таблица) показывает, что при однократной адсорбции на каолине емкость

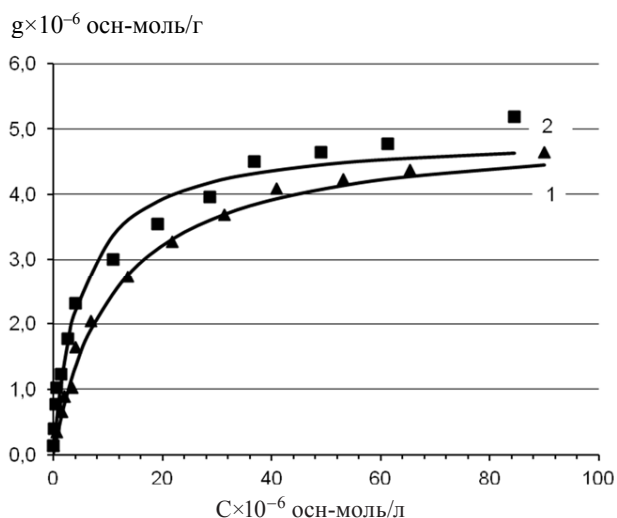


Рис. 1. Изотермы адсорбции анионного сополимера (A_{10}) на каолине с адсорбированным катионным сополимером акриламида: 1 – A_{10} (1 слой K_{10}); 2 – A_{10} (1 слой K_{40}). Обозначения: точки – экспериментальные данные; линии – теоретические изотермы адсорбции

Fig. 1. Adsorption isotherms of anionic copolymer (A_{10}) on kaolin with adsorbed cationic acrylamide copolymer: 1 – A_{10} (1 layer K_{10}); 2 – A_{10} (1 layer K_{40}). Designations: points – experimental data; lines – theoretical adsorption isotherms

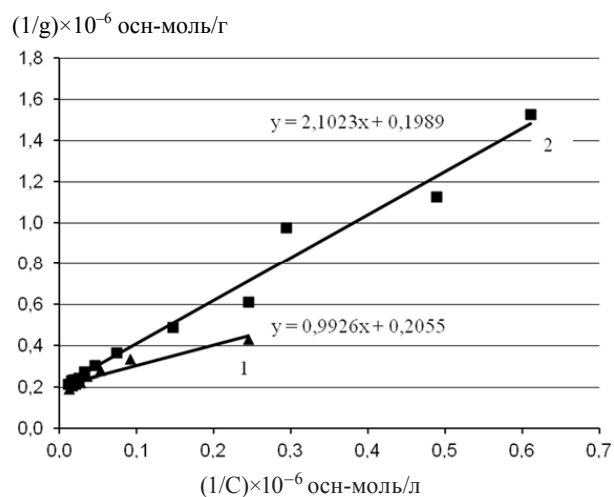


Рис. 2. Линеаризованные изотермы адсорбции анионного сополимера (A_{10}) на каолине с адсорбированным катионным сополимером акриламида: 1 – A_{10} (1 слой K_{40}); 2 – A_{10} (1 слой K_{10})

Fig. 2. Linearized adsorption isotherms of the anionic copolymer (A_{10}) on kaolin with an adsorbed cationic acrylamide copolymer: 1 – A_{10} (1 layer K_{40}); 2 – A_{10} (1 layer K_{10})

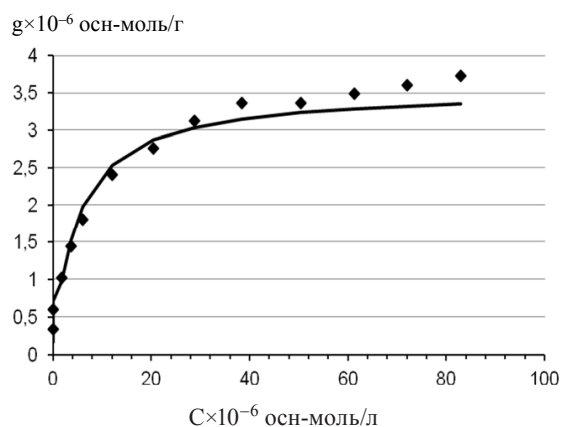


Рис. 3. Изотермы адсорбции катионного сополимера (K_{10}) из солевых растворов на каолине с адсорбированным анионным сополимером (A_{10}). Обозначения: точки – экспериментальные данные; линии – теоретические изотермы адсорбции

Fig. 3. Adsorption isotherms of the cationic copolymer (K_{10}) from saline solutions on kaolin with an adsorbed anionic copolymer (A_{10}). Designations: points – experimental data; lines – theoretical adsorption isotherms

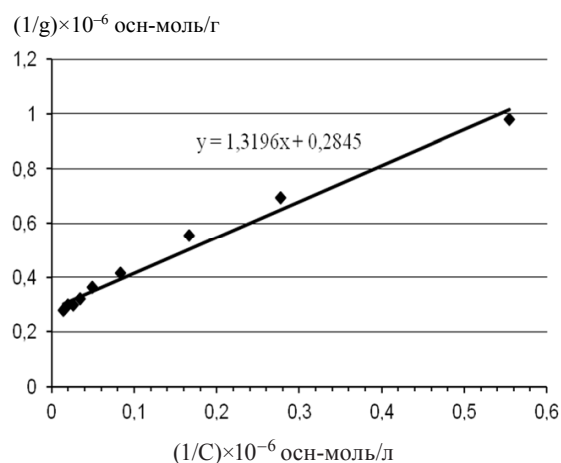


Рис. 4. Линеаризованная изотерма адсорбции катионного сополимера K_{10} на каолине с адсорбированным анионным сополимером A_{10}

Fig. 4. The linearized adsorption isotherm of the cationic copolymer K_{10} on kaolin with adsorbed anionic copolymer A_{10}

Адсорбционная емкость и максимальная адсорбция выше для вариантов адсорбции анионного полиэлектролита (A_{10}) на подложке из катионного полиэлектролита (K_{10} и K_{40}). Сравнение параметров этих двух систем между собой показывает, что при близких значениях адсорбционной емкости и адсорбции константа адсорбции для A_{10} на слое K_{10} выше, чем для A_{10} на слое K_{40} .

Уменьшение адсорбционной емкости и максимальной адсорбции при поочередной адсорбции (K_{10} на слое A_{10}) по сравнению с обратным порядком адсорбции полиэлектролитов (A_{10} на слое K_{10}) может быть связано с различием строения первичных адсорбционных слоев. Взаимодействие одних и тех же полимеров (K_{10} и A_{10}) во втором слое примерно одинаково, что подтверждается близкими значениями константы адсорбции K ($0,1-0,2$) $\times 10^6$. Однако первый адсорбционный слой, сформированный из молекул K_{10} , благодаря межмолекулярным взаимодействиям полиэлектролита с частицами более прочно связан с поверхностью. На такой модифицированной полимером поверхности формирование следующего слоя проходит также в соответствии с уравнением Ленгмюра [14, 15].

адсорбционного слоя E и константа адсорбции K для анионного полиэлектролита меньше по сравнению с катионным сополимером, что свидетельствует об отрицательном заряде поверхности каолина. Адсорбционная емкость A_{10} существенно возрастает на каолине с адсорбированным катионным полиэлектролитом.

Энергия адсорбции, характеризуемая константой уравнения K , практически одинакова для всех вариантов поочередной адсорбции и, по-видимому, сравнима по величине с энергией взаимодействия полимерных сегментов между собой. В связи с этим адсорбция анионного сополимера на поверхности каолина и процесс взаимодействия полимеров между собой в адсорбционном слое одинаково возможны, что приводит к хорошему согласованию экспериментальных данных с теоретическими, рассчитанными по уравнению адсорбции Ленгмюра. Вероятно, в обоих случаях взаимодействие полимеров с поверхностью слабое (энергия, приходящаяся на осново-моль полимера, маленькая), но контактов образуется много, поэтому изотерма адсорбции во всем интервале концентраций описывается уравнением Ленгмюра.

Величина максимальной адсорбции анионного сополимера при поочередной адсорбции близка к полученной при адсорбции K_{10} на каолине (таблица), что свидетельствует о взаимодействии одной молекулы анионного сополимера с одной молекулой катионного. В данном случае речь не может идти о стехиометрии на уровне катионных и анионных групп, так как адсорбционная емкость A_{10} на каолине с адсорбированным K_{10} и K_{40} имеет близкие значения (около 5×10^{-6} моль/г). В обоих случаях максимальная адсорбция A_{10} на поверхности, модифицированной катионным сополимером, примерно в 1,5 раза выше, чем на исходном каолине.

Параметры адсорбционного уравнения Ленгмюра при поочередной адсорбции катионного и анионного сополимеров акриламида на каолине из солевых растворов

Parameters of the Langmuir adsorption equation for the alternate adsorption of cationic and anionic acrylamide copolymers on kaolin from saline solutions

Параметры уравнения Ленгмюра и максимальная адсорбция	Адсорбция полиэлектролитов				
	A ₁₀			K ₁₀	
	каолин	предварительно адсорбирован		каолин	предварительно адсорбирован
		K ₁₀	K ₄₀		
E, осн-моль/г	2,2×10 ⁻⁶	5,0×10 ⁻⁶	4,9×10 ⁻⁶	3,7×10 ⁻⁶	3,5×10 ⁻⁶
K	0,2×10 ⁶	0,09×10 ⁶	0,2×10 ⁶	3,5×10 ⁶	0,2×10 ⁶
g _{max} , осн-моль/г	3,3×10 ⁻⁶	4,6×10 ⁻⁶	5,2×10 ⁻⁶	4,8×10 ⁻⁶	3,6×10 ⁻⁶

Для рассмотренных вариантов поочередной адсорбции сополимеров акриламида константы адсорбции мало отличаются и находятся в интервале значений $(0,1-0,2) \times 10^{-6}$. Это свидетельствует о том, что при последовательной адсорбции полимеры во внешнем адсорбционном слое ассоциируют в основном за счет диполь-дипольных взаимодействий. Одна из причин этого – наличие солевого фона (KCl , $7,5 \times 10^{-2}$ моль/л), концентрация которого на несколько порядков выше концентрации ионизирующихся мономерных фрагментов полимеров $(0,4-1,4) \times 10^{-6}$ моль/л). В этих условиях заряд катионных групп полимера в основном компенсирован ионами Cl^- , а заряд анионных групп – ионами K^+ . Достаточно высокая концентрация низкомолекулярного электролита приводит также к блокировке ионообменных центров на поверхности каолина, сжатию диффузионного слоя у поверхности и уменьшению его заряда. Таким образом, прямое взаимодействие заряженных групп катионного сополимера с анионным блокируется электролитом, однако диполь-дипольные взаимодействия между ними возможны. Межионные взаимодействия также играют существенную роль, адсорбция увеличивается с ростом содержания катионных групп и уменьшается при увеличении количества анионных групп в анионном сополимере. С увеличением доли ионогенных мономеров константа адсорбции уменьшается как для катионных, так и для анионных полиэлектролитов, вероятно, из-за электростатического отталкивания одноименно заряженных звеньев полимерной цепи в адсорбционном слое.

На рис. 5 приведены зависимости скорости осаждения глины в солевой дисперсии при поочередном введении двух разных полимеров. Крайние точки кривых (100 % того или иного компонента) соответствуют скорости осаждения глины при введении одного и того же полимера двумя одинаковыми порциями. При поочередном введении катионного, затем анионного сополимеров экспериментальные данные для всех соотношений компонентов превышают аддитивные.

Показано, что изменение последовательности введения полиэлектролитов (на первой стадии анионный сополимер акриламида, затем катионный полиэлектролит) ухудшает эффективность флокуляции. Замена K_{10} в первом слое на K_{40} приводит к уменьшению скорости осаждения: синергетический эффект флокуляции сохраняется, так же как и в случае с подложкой из K_{10} , но уменьшается в 1,3 раза. Полученные данные можно объяснить следующим. Адсорбционный слой на поверхности глинистых частиц из молекул катионного полиэлектролита улучшает условия образования второго слоя из анионного сополимера. Активное взаимодействие молекул полимера с поверхностью и между собой, подтвержденное высокой константой адсорбции, улучшает флокуляцию глинисто-солевой дисперсии при использовании бинарной системы противоположно заряженных полиэлектролитов.

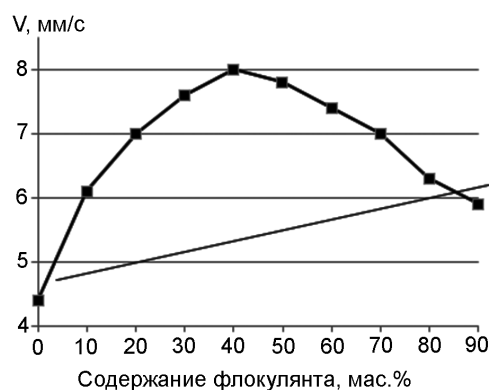


Рис. 5. Скорость осаждения каолина при поочередном введении K_{10} и A_{10}

Fig. 5. The deposition rate of kaolin with the alternate introduction of K_{10} and A_{10}

Выводы. Скорость образования и осаждения флокул из частиц каолина увеличивается при использовании акриламидных полимеров с различной адсорбционной активностью, причем первый из добавленных сополимеров акриламида должен адсорбироваться на поверхности глины лучше следующего, что характеризуется увеличением предельной адсорбции и адсорбционной емкости в 1,5 раза, константы адсорбции в 3,3 раза.

При использовании бинарной системы противоположно заряженных полиэлектролитов в последовательности катионный, затем анионный полиэлектролит, высокая адсорбционная емкость и энергия взаимодействия полимеров с поверхностью и между собой обеспечивают высокую адсорбцию полимеров и плотность адсорбционного слоя, что приводит к улучшению флокуляции и увеличению скорости осаждения солевой дисперсии каолина в 1,3–1,5 раза.

Список использованных источников

1. Мягченков, В. А. Сополимеры акриламида с функцией флокулянтов / В. А. Мягченков, В. Е. Проскурина. – Казань : Казан. гос. техн. ун-т, 2011. – 294 с.
2. Проскурина, В. Е. Кинетика флокуляции суспензии диоксида титана в водно-солевых средах в присутствии катионных ПАВ / В. Е. Проскурина, С. В. Чичканов, В. А. Мягченков // Химия и хим. технология воды. – 2008. – Т. 29, № 1. – С. 205–219.
3. Bolto, B. Organic polyelectrolytes in water treatment / B. Bolto, J. Gregory // Water research. – 2007. – Vol. 41. – P. 2301–2324. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.03.012>
4. Куренков, В. Ф. Полиакриламидные флокулянты / В. Ф. Куренков // Соросов. образоват. журн. – 1997. – № 7. – С. 57–63.
5. Мягченков, В. А. Кинетические аспекты седиментации дисперсных систем в присутствии полиакриламидных флокулянтов / В. А. Мягченков, В. Е. Проскурина, Г. В. Булидорова // Химия и хим. технология воды. – 2001. – Т. 23, № 5. – С. 453–492.
6. Особенности формирования полиэлектролитных комплексов на основе полиакриламидных соединений в процессе флокуляции глинисто-солевых дисперсий / П. Д. Воробьев [и др.] // Коллоид. журн. – 2007. – Т. 69, № 4. – С. 1–5.
7. Влияние низкомолекулярных солей на коллоидно-химические свойства и флокулирующую способность полиакриламида и его сополимеров / П. Д. Воробьев [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2007. – № 3. – С. 10–14.
8. Малышева, Ж. Н. Многокомпонентные флокулирующие системы на основе катионных полиэлектролитов / Ж. Н. Малышева // Журн. прикл. химии. – 2009. – Т. 82, № 11. – С. 1881–1886.
9. Layer-by-layer assembly of poly(vinyl alcohol) and hydrophobic polymers based on their physical adsorption on surfaces / V. T. Serizava [et al.] // Langmuir. – 2002. – Vol. 18. – P. 8381–8385. <https://doi.org/10.1021/la0204491>
10. Guyomard, V. A. Buildup of multilayers based on amphiphilic polyelectrolytes / V. A. Guyomard, G. Muller, V. K. Glinel // Macromolecules. – 2005. – Vol. 38. – P. 5737–5742. <https://doi.org/10.1021/ma050867n>
11. Поверхностно-активные вещества и полимеры в водных растворах / К. Холмберг [и др.]. – М : БИНОМ, 2007. – 528 с.
12. Osterberg, M. The Effect of a Cationic Polyelectrolyte on the Forces between Two Cellulose Surfaces and between One Cellulose and One Mineral Surface / M. Osterberg // J. Colloid and Interface Sci. – 2000. – № 2. – P. 620–627. <https://doi.org/10.1006/jcis.2000.7054>
13. Wagberg, L. Adsorption of bilayers and multilayers of cationic and anionic co-polymers of acrylamide on silicon oxide / L. Wagberg, G. Pettersson, S. Notley // J. Colloid and Interface Science. – 2004. – Vol. 274. – P. 480–488. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2003.11.054>
14. Воробьева, Е. В. Адсорбция полиакриламида и его ионогенных сополимеров на каолине из солевых растворов / Е. В. Воробьева, В. С. Солдатов // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2012. – Т. 56, № 1. – С. 93–98.
15. Soldatov, V. S. Interionic Interactions in Carboxylic Acid Cation Exchangers on the Base of Polyacrylic Acid. Ab Initio Calculations / V. S. Soldatov, V. M. Zelenkovskii // Solvent Extraction and Ion Exchange. – 2011. – Vol. 29, № 3. – P. 458–487. <https://doi.org/10.1080/07366299.2011.573450>

References

1. Myaghenkov V. A., Proskurina V. E. *Copolymers of acrylamide with the function of flocculants*. Kazan, Kazan St. tech. university, 2011. 294 p. (in Russian).
2. Proskurina V. E., Chichkanov S. V., Myaghenkov V. A. Kinetics of titanium dioxide suspension flocculation in aqueous salt media in the presence of cationic surfactants. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 2008, vol. 30, no. 2, pp. 112–120. <https://doi.org/10.3103/s1063455x08020082>
3. Bolto B., Gregory J. Organic polyelectrolytes in water treatment. *Water research*, 2007, vol. 41, pp. 2301–2324. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.03.012>
4. Kurenkov V. F. Polyacrylamide flocculants. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal* [Soros Educational Journal], 1997, no. 7, pp. 57–63 (in Russian).

5. Myaghenkov V. A., Proskurina V. E., Bulidorova G. V. Kinetic aspects of sedimentation of disperse systems in the presence of polyacrylamide flocculants. *Khimiya i tekhnologiya vody = Journal of Water Chemistry and Technology*, 2001, vol. 23, no. 5, pp. 453–492 (in Russian).
6. Vorob'ev P. D., Krut'ko N. P., Vorob'eva E. V., Cherednichenko D. V. Peculiarities of the formation of polyacrylamide compound-based polyelectrolyte complexes in the course of the flocculation of clay-salt dispersions. *Colloid Journal*, 2007, vol. 69, no. 5, pp. 552–556. <https://doi.org/10.1134/s1061933x07050031>
7. Vorob'ev P. D., Vorob'eva E. V., Krut'ko N. P., Shestak I. V. The effect of low molecular weight salts on the colloidal chemical properties and flocculating ability of polyacrylamide and its copolymers. *Vestsi Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2007, no. 3, pp. 10–14 (in Russian).
8. Malysheva J. N. Multicomponent flocculating systems based on cationic polyelectrolytes. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2009, vol. 82, no. 11, pp. 2027–2033. <https://doi.org/10.1134/s1070427209110238>
9. Serizava V. T., Kamimura N. S., Kawanishi N., Akashi V. M. Layer-by-layer assembly of poly(vinyl alcohol) and hydrophobic polymers based on their physical adsorption on surfaces. *Langmuir*, 2002, vol. 18, pp. 8381–8385. <https://doi.org/10.1021/la0204491>
10. Guyomard V. A., Muller G., Glinel V. K. Buildup of multilayers based on amphiphilic polyelectrolytes. *Macromolecules*, 2005, vol. 38, pp. 5737–5742. <https://doi.org/10.1021/ma050867n>
11. Holmberg K., Jönsson B., Kronberg B., Lindman B. *Surfactants and polymers in aqueous solutions*. Moscow, BINOM Publ., 2007. 528 p. (in Russian).
12. Osterberg M. The Effect of a Cationic Polyelectrolyte on the Forces between Two Cellulose Surfaces and between One Cellulose and One Mineral Surface. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2000, no. 2, pp. 620–627. <https://doi.org/10.1006/jcis.2000.7054>
13. Wagberg L., Pettersson G., Notley S. Adsorption of bilayers and multilayers of cationic and anionic co-polymers of acrylamide on silicon oxide. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, vol. 274, no. 2, pp. 480–488. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2003.11.054>
14. Vorob'eva E. V., Soldatov V. S. Adsorption of polyacrylamide and its ionic copolymers on kaolin from saline solutions. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2012, vol. 56, no. 1, pp. 93–98 (in Russian).
15. Soldatov V. S., Zelenkovskii V. M. Interionic Interactions in Carboxylic Acid Cation Exchangers on the Base of Polyacrylic Acid. Ab Initio Calculations. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 2011, vol. 29, no. № 3, pp. 458–487. <https://doi.org/10.1080/07366299.2011.573450>

Информация об авторе

Воробьева Елена Викторовна – д-р хим. наук, доцент, зав. лаб. Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: evorobieva@igic.bas-net.by

Information about the author

Elena V. Vorobieva – D. Sc. (Chemistry), Associate Professor, Head of the Laboratory. Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: evorobieva@igic.bas-net.by