

ХАРАКТЕРИСТИКА ФЛОКУЛ ГЛИНИСТО-СОЛЕВОГО ШЛАМА, ОБРАЗОВАННОГО ПОЛИАКРИЛАМИДОМ И ЕГО СОПОЛИМЕРАМИ

О.В. Рахимова, О.Р. Середкина, С.В. Лановецкий

Олеся Викторовна Рахимова, Ольга Рафисовна Середкина, Сергей Викторович Лановецкий *

Кафедра химической технологии и экологии, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский пр., 29, Пермь, Российская Федерация, 614990

E-mail: ovrakhimova@mail.ru, olga_g@bk.ru, lsv98@mail.ru*

В работе с использованием лазерного анализатора размера частиц Lasentec D600L системы FBRM изучены основные характеристики агрегатов, образующихся при флокуляции глинисто-солевого шлама с помощью полимеров на основе полиакриламида с различными типами заряда и молекулярными массами. Показано влияние природы полимера на размер образующихся флокул и их плотность. Установлено, что при использовании неионогенного полиакриламида и его анионных сополимеров образуются флокулы размером 500-600 мкм, а при флокуляции катионным реагентом размер флокул не превышает 300 мкм. Показано, что увеличение молекулярной массы катионного полимера не способствует росту размера агрегатов частиц глинистого шлама. Доказано, что при использовании неионогенного полиакриламида и его анионных сополимеров плотность флокул значительно уменьшается при увеличении их размера, что является важным свойством фрактальных агрегатов. С увеличением плотности заряда анионных полимеров плотность агрегатов глинисто-солевых частиц уменьшается, что обусловлено электростатическим отталкиванием между отрицательно заряженным полимером и отрицательно заряженной поверхностью шлама. Анализ кинетических кривых процесса флокуляции глинистого шлама показал, что в случае неионного и анионных полимеров происходит быстрое формирование флокул, а число первичных частиц в агрегате не превышает нескольких единиц. При использовании катионного полимера заполнение внутрифлокулярного объема первичными частицами происходит за счет вытеснения жидкой фазы, что способствует образованию плотных и компактных флокул. Полученные результаты могут быть использованы при выборе флокулянта с целью совершенствования процесса сгущения глинисто-солевого шлама в производстве калийных удобрений.

Ключевые слова: глинисто-солевой шлам, полиакриламид, флокуляция, размер и плотность флокул

CHARACTERISTICS OF FLOCCULES OF CLAY-SALT SLUDGE FORMED BY POLYACRYLAMIDE AND ITS COPOLYMERS

O.V. Rakhimova, O.R. Seredkina, S.V. Lanovetskiy

Olesya V. Rakhimova, Olga R. Seredkina, Sergey V. Lanovetskiy *

Department of Chemical Technology and Ecology, Perm National Research Polytechnic University, Komsomolsky ave., 29, Perm, 614990, Russia

E-mail: olga_g@bk.ru, ovrakhimova@mail.ru, lsv98@mail.ru*

The main characteristics of aggregates formed during the flocculation of clay-salt slurry using polyacrylamide-based polymers with various types of charge and molecular weights were studied using a laser analyzer of particle size Lasentec D600L of the FBRM system. The effect of the polymer type on the size of the floccules formed and their density was shown. It has been established that when using non-ionic polyacrylamide and its anionic copolymers floccules with a size of 500-600 μm are formed, and when flocculated with a cationic reagent, the floccules do not exceed 300 μm . It was shown that an increase in the molecular weight of the cationic polymer does not contribute to an increase in the size of the aggregates of the clay slurry particles. It has

been proven that with the use of non-ionic polyacrylamide and its anionic copolymers, the density of floccules significantly decreases with increasing their size, which is an important property of fractal aggregates. If the charge density of anionic polymers increases, the aggregates density decreases, due to electrostatic repulsion between the negatively charged polymer and the negatively charged surface of the sludge. Analysis of the kinetics of the clay sludge flocculation process showed that when using non-ionic and anionic polymers, fast flocculation occurs, and the number of primary particles in the aggregate does not exceed several units. When using a cationic polymer, the filling of the intrafloccular volume with primary particles occurs due to the displacement of the liquid phase, which contributes to the formation of dense and compact floccules. The results obtained can be used for the selection of flocculant in order to improve the process of thickening clay-salt sludge in the production of potash fertilizers.

Key words: clay-salt slurry, polyacrylamide, flocculation, floc density, floc size

Для цитирования:

Рахимова О.В., Середкина О.Р., Лановецкий С.В. Характеристика флокул глинисто-солевого шлама, образованного полиакриламидом и его сополимерами. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2020. Т. 63. Вып. 5. С. 19–25

For citation:

Rakhimova O.V., Seredkina O.R., Lanovetskiy S.V. Characteristics of floccules of clay-salt sludge formed by polyacrylamide and its copolymers. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* [Russ. J. Chem. & Chem. Tech.]. 2020. V. 63. N 5. P. 19–25

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вопросы влияния полимеров на устойчивость дисперсных систем вызывают особый интерес, что обусловлено их важностью не только в фундаментальных областях науки, но и в развитии эффективных технологий, основанных на использовании синтетических флокулянтов.

Оптимизация процесса флокуляции глинисто-солевого шлама при обогащении силвинитовых руд является важной практической задачей. От эффективности действия флокулянтов зависит не только качество готового продукта, но и потери полезного компонента с отходами.

Основную группу флокулянтов, применяемых на предприятиях калийной промышленности, составляют синтетические высокомолекулярные вещества, в первую очередь акриламидные полимеры и сополимеры [1]. С целью интенсификации процесса сгущения глинисто-солевого шлама предложено последовательное введение неионогенного флокулянта [2] или использование различных комбинаций катионного и анионного полимеров [3-7].

Несмотря на многочисленные исследования и широкое применение полимеров с целью повышения эффективности разделения дисперсных систем, процессы флокуляции глинистого шлама в концентрированных солевых растворах недостаточно изучены, а вопросы влияния типа флокулянта на характеристики образующихся флокул остаются открытыми и представляют, как теоретический, так и практический интерес.

С точки зрения интенсификации процесса осаждения дисперсной фазы наиболее важной характеристикой является размер флокул. Не менее важным параметром является их плотность, влияющая на эффективность фазового разделения глинисто-солевых дисперсий. Соотношение между размером и плотностью флокулы определяется ее структурой, то есть взаимным расположением в пространстве первичных частиц, образующих конечный агрегат.

В соответствии с фрактальной моделью количество частиц в одной флокуле (n), размер флокулы (D_f) и размер частиц (d_0) связаны между собой соотношением [8, 9]:

$$n = \left(\frac{D_f}{d_0} \right)^\Phi,$$

где Φ – фрактальная размерность.

Фрактальная размерность характеризует степень заполнения пространства в пределах объема, занятого агрегатом: чем больше значение Φ , тем более плотную структуру имеет флокула [10].

Важным свойством фрактальных агрегатов является то, что их плотность значительно уменьшается при увеличении размера [11].

В ряде исследований показано, что характеристики флокул зависят от механизма флокуляции [12-14]. В свою очередь, свойства полимера, такие как молекулярная масса, тип и плотность заряда, влияют на механизм агрегации [15]. Применительно к флокуляции глинистых дисперсий литературные данные существенно расходятся. Так, в ряде работ показано, что при использовании неионогенного полиакриламида (ПАА)

[4] или его анионных сополимеров [16, 17] размер флокул и скорость их осаждения значительно больше, чем при флокуляции катионным реагентом. Авторы [18] делают противоположный вывод – более крупные флокулы, напротив, образуются при добавлении в глинистые суспензии катионного полимера. Следует также отметить, что большинство исследований проводится на модельных системах, в которых в качестве дисперсной фазы используют каолин, бентонит, охру, карбонат кальция и др., а в качестве дисперсионной среды – воду. При флокуляции глинисто-солевого шлама приходится иметь дело со сложной многокомпонентной системой. Главными минералами нерастворимого остатка сильвинитовых руд являются калиевый полевой шпат, доломит, кальцит, магнетит, ангидрит, гипс и некоторые слоистые силикаты [1]. При этом флокуляция протекает в насыщенных солевых растворах, что не может не сказаться на свойствах полимеров.

Понимание влияния свойств полимера на характеристики флокулированного осадка позволит обосновать выбор флокулянта для конкретного использования.

Цель работы – определить основные характеристики агрегатов, образующихся при флокуляции глинисто-солевого шлама с использованием полимеров различной природы.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе использован ряд полиакриламидных соединений марки Праестол, предоставленных компанией ООО «ПРОМХИМСЕРВИС», г. Пермь (табл. 1): неионный (N) – (ПАА), анионные (A-1, A-2, A-3) – сополимеры акриламида (AA) с акрилатом натрия (АН) и катионный (C) – сополимер AA с N-акриламидопропил-N,N,N-триметиламмонийхлоридом (АПТМАХ).

Таблица 1

Полиакриламидные соединения, используемые в работе

Table 1. Polyacrylamide compounds used in the work

Обозначение	Марка	Молекулярная масса, $M \cdot 10^{-6}$	Мольная доля звеньев, %		
			AA	АН	АПТМАХ
N	2500	14	100	-	-
A-1	2510	14	92	8	-
A-2	2540	14	72	28	-
A-3	2640	16	72	28	-
C	650BC	6	80	-	20

Растворы флокулянтов концентрацией 0,1 об. % готовили растворением соответствующих полимеров в воде.

Суспензию глинисто-солевого шлама получали путем смешения сильвинитовой руды (ПАО «Уралкалий») с водой. Содержание нерастворимого остатка (Н.О), определяемое гравиметрическим способом, составляло $3,35 \pm 0,2$ г/л; средний диаметр частиц суспензии – 70 ± 5 мкм; преимущественный размер – 40 мкм; массовая доля солей KCl и NaCl составила 25%. Флокуляцию полученной суспензии проводили при постоянной скорости перемешивания (200 мин^{-1}) в течение 5 мин. Оптимальный расход полимера определяли на основании минимального остаточного содержания фракции 0-20 мкм (γ_{0-20}). Для этого проводили серию испытаний с изменением дозы полимера с 0,15 до 1,8 г ПАА на 1 кг дисперсной фазы (г/кг).

Флокулирующую способность реагентов и характеристики образующихся агрегатов исследовали с помощью лазерного анализатора размера частиц Lasentec D600L системы FBRM®. Измерение отражения сфокусированного луча (FBRM) – стандартная технология, которая используется для анализа частиц в потоке. Очень точное распределение длины хорды (CLD), чувствительное к размеру и количеству частиц, передается в режиме реального времени, без необходимости отбора или подготовки проб.

Предполагая, что флокулы – сплошные объекты сферической формы, определяли диаметр D [4;3]– средний эквивалентный объемный диаметр. Также в процессе флокуляции отслеживали динамику изменения общего количества частиц в системе и распределение частиц по размерам.

Среднее число первичных частиц в агрегате (n) находили как отношение первоначального числа частиц в единице объема (N_0) к числу частиц в текущий момент времени (N_t):

$$n = \frac{N_0}{N_t}$$

Среднюю плотность флокул (ρ_f) рассчитывали по формуле:

$$\rho_f = \frac{m_f}{V_f} = \frac{m_{m.ф} + m_{ж.ф}}{V_f} = \frac{\left(\frac{V_0 \cdot n}{\rho_0}\right) + \left(\frac{V_f - V_0 \cdot n}{\rho_{ж.ф.}}\right)}{V_f}$$

где m_f – масса флокулы, кг; V_f – объем флокулы, определяемый исходя из ее диаметра, м^3 ; $m_{m.ф.}$ и $m_{ж.ф.}$ – масса твердой и жидкой фазы во флокуле, кг; V_0 – объем первичных частиц, м^3 ; ρ_0 и $\rho_{ж.ф.}$ – плотность первичных частиц и жидкой фазы соответственно, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Эффективную плотность флоккул ($\Delta\rho$) находили по разности между плотностью флоккул и плотностью жидкой фазы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлено влияние расхода (Q) различных типов полимеров на средний диаметр образующихся флоккул (D_f). При использовании неионогенного ПАА и его анионных сополимеров размер флоккул значительно больше, чем при флокуляции катионным реагентом. Однако для последнего полимера интервал концентраций, в котором происходит эффективная агрегация, значительно шире, то есть меньше вероятность стабилизации системы при незначительном отклонении от оптимальной дозы реагента [19-21].

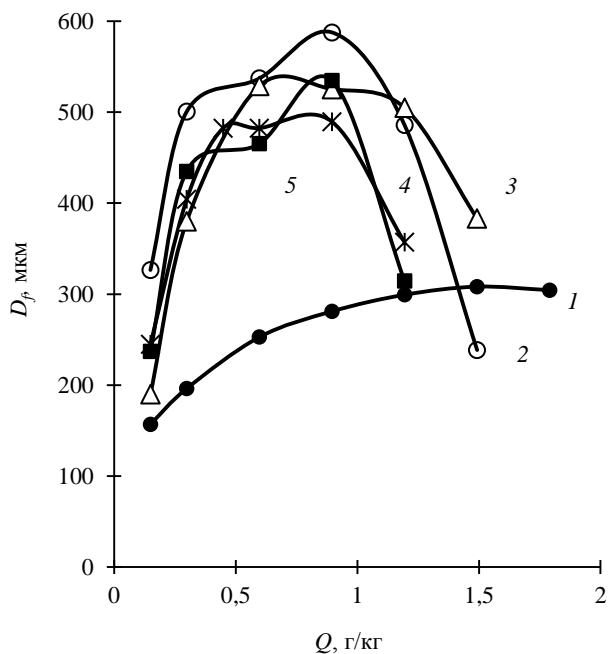


Рис. 1. Зависимость среднего размера флоккул от расхода флокулянта: 1 – С; 2 – N; 3 – А-1; 4 – А-2; 5 – А-3
 Fig 1. Medianflocs size as function of the flocculant dosage: 1 – С; 2 – N; 3 – А-1; 4 – А-2; 5 – А-3

В табл. 2 представлены показатели процесса флокуляции глинисто-солевой суспензии, полученные при оптимальном расходе реагента (Q_{opt}).

Анализ экспериментальных данных показал, что с увеличением молекулярной массы размер флоккул уменьшается. Ранее было показано [22], что степень сжатия макромолекул в солевой среде увеличивается с ростом плотности заряда и молекулярной массы при переходе от неионогенного ПАА к его анионным сополимерам. Изменение конформационного состояния макромолекул

объясняет тот факт, что в солевой среде максимальный размер флоккул достигается при использовании неионного полиакриламида.

Таблица 2

Основные показатели флокуляции глинистой суспензии при оптимальной дозе полимера

Table 2. Clay suspension flocculation main indicators at the optimum polymer dosage

Тип	γ_{0-20} , %	Q_{opt} , г/кг	D_f , мкм	$\Delta\rho$, кг/м ³
N	1,25	0,9	537,1	21,5
A-1	0,35	0,6	528,7	31,6
A-2	0,57	0,6	482,5	30,9
A-3	0,5	0,3	439,4	73,8
С	0,09	1,2	299,3	357,3

Образование более компактных и плотных флоккул при использовании катионного полимера можно объяснить с позиции электростатического взаимодействия положительно заряженных макромолекул с отрицательными группами поверхности глинистых частиц [18, 23]. Для катионного флокулянта зависимости плотности агрегатов от их размера не выявлено.

Для неионогенного ПАА и его анионных сополимеров плотность флоккул заметно уменьшается по мере увеличения их размера (рис. 2) примерно в соответствии с законом соотношения плотности и размера для фрактальных структур [11].

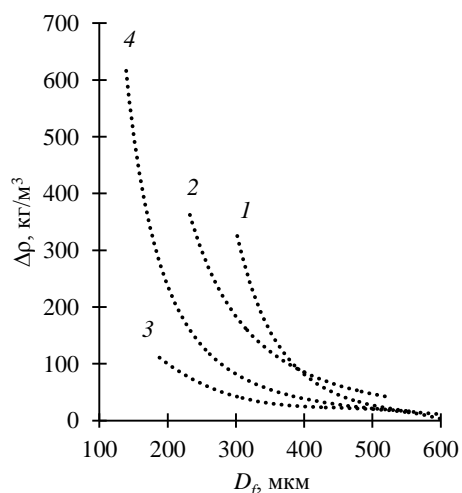


Рис.2. Зависимость плотности флоккул от их среднего размера: 1 – N; 2 – А-1; 3 – А-2; 4 – А-3

Fig. 2. Density of flocs as function of the median flocs size: 1 – N; 2 – А-1; 3 – А-2; 4 – А-3

В результате электростатического отталкивания между отрицательно заряженным полимером и отрицательно заряженной поверхностью шлама происходит удлинение петель и хвостов макромолекул полимера, что и способствует обра-

зованию больших хлопьев с рыхлой структурой. Действительно, как видно из рис. 2, наименьшей плотностью обладает анионный полимер с высоким содержанием ионогенных звеньев.

Анализ кривых изменения размера флокул и величины N_0/N_t в зависимости от времени позволил выявить особенности агрегации частиц в присутствии полимеров.

В случае неионогенного флокулянта кинетическая кривая $N_0/N_t - f(\tau)$ характеризуется резким изменением относительного числа частиц в течение небольшого промежутка времени с выходом на плато (рис. 3, кр. 2). Это может быть обусловлено тем, что на твердой поверхности формируются достаточно толстые адсорбционные слои, препятствующие эффективному столкновению. При этом видно, что среднее число первичных частиц в агрегате, характеризуемое величиной N_0/N_t , не превышает нескольких единиц, т.е. образующиеся флокулы характеризуются низкой внутрифлокулярной концентрацией дисперсной фазы.

Аналогичные зависимости получены при изучении кинетики агрегации в случае анионных полиэлектролитов, что указывает на схожесть механизмов флокулообразования при действии неионогенного ПАА и его анионных сополимеров.

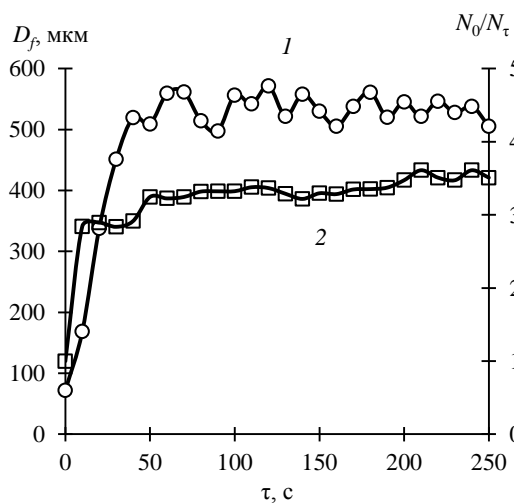


Рис. 3. Зависимость среднего размера флокул (1) и величины N_0/N_t (2) от времени флокуляции, вызванной неионогенным ПАА
Fig. 3. Median flocs size (1) and N_0/N_t (2) versus time for non-ionic PAM-induced flocculation

Характер зависимости $N_0/N_t - f(\tau)$ при использовании катионного флокулянта существенно отличается от рассмотренных выше кинетических кривых. В момент добавления реагента происходит резкое увеличение размера флокул, после чего их рост прекращается (рис. 4, кр. 1), но при этом процесс агрегации частиц продолжается в течение длительного времени (рис. 4, кр. 2). Среднее чис-

ло первичных частиц постепенно увеличивается, а так как при этом размер флокул не меняется, то можно предположить, что заполнение внутрифлокулярного объема первичными частицами происходит за счет вытеснения жидкой фазы. Это способствует образованию плотных флокул.

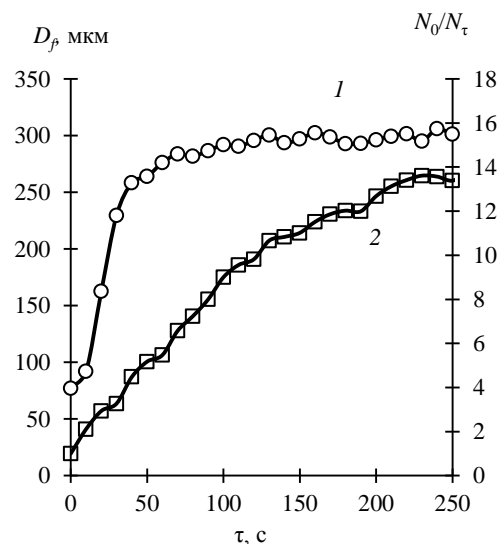


Рис. 4. Зависимость среднего размера флокул (1) и величины N_0/N_t (2) от времени флокуляции, вызванной катионным ПАА
Fig. 4. Median flocs size (1) and N_0/N_t (2) versus time for cationic PAM-induced flocculation

ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований установлено, что при использовании неионогенного ПАА и его анионных сополимеров размер флокул почти в два раза больше, чем при флокуляции катионным реагентом. Однако при использовании катионного флокулянта интервал концентраций, в котором происходит эффективная агрегация, значительно шире.

Показано, что для неионогенного ПАА и его анионных сополимеров плотность флокул заметно уменьшается по мере увеличения их размера примерно в соответствии с законом соотношения плотности и размера для фрактальных структур. Для катионного флокулянта зависимости плотности агрегатов от их размера не выявлено.

Образование плотных и компактных флокул при использовании катионного флокулянта обусловлено особенностями образования агрегатов – заполнение внутрифлокулярного объема первичными частицами происходит за счет вытеснения жидкой фазы.

Полученные зависимости могут быть использованы при выборе флокулянта при сгущении глинисто-солевого шлама в условиях калийных обогатительных фабрик.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кириченко Л.Н., Сабиров Р.Х., Сквирский Л.Я., Тетерина Н.Н.** Технология флотационного обогащения калийных руд. Пермь: ОГУП «Соликамская типография». 2002. 484 с.
2. **Воробьев П.Д., Крутько Н.П., Воробьев Д.Н., Хартан Х.Г., Кириенко В.М., Варава М.М.** Флокуляция глинистых шламов в солевых растворах. *Обогащение руд*. 2004. № 5. С. 16-19.
3. **Воробьев П.Д., Крутько Н.П., Воробьев Д.Н., Хартан Х.Г., Кириенко В.М., Варава М.М.** Повышение эффективности флокуляции глинистых шламов путем комбинированного введения флокулянтов. *Обогащение руд*. 2005. № 2. С. 11-14.
4. **Воробьева Е.В., Чередниченко Д.В., Воробьев П.Д., Крутько Н.П.** Разделение солевых дисперсий глины полиакриламидными сополимерами. *Изв. Нац. Акад. Наук Беларуси. Сер. хим. наук*. 2012. № 2. С. 34-39.
5. **Воробьев П.Д., Крутько Н.П., Воробьева Е.В., Стрнадова Н.** Последовательная адсорбция полиакриламидных соединений из растворов электролитов на поверхности частиц каолиновой глины. *Коллоид. журн.* 2008. Т. 70. № 2. С. 171-174. DOI: 10.1007/s10595-008-2005-y.
6. **Воробьев П.Д., Крутько Н.П., Воробьева Е.В., Чередниченко Д.В., Басалыга И.И.** Особенности формирования полиэлектролитных комплексов на основе полиакриламидных соединений в процессе флокуляции глинисто-солевых дисперсий. *Коллоид. журн.* 2007. Т. 69. № 5. С. 592-596. DOI: 10.1134/S1061933X07050031.
7. **Игнатова М.С., Дрябина С.С., Навроцкий А.В., Новаков И.А.** Противоположно заряженные полиэлектролиты в процессах флокуляции водной дисперсии каолина. *Изв. ВолгГТУ*. 2014. № 7 (134). С. 126-133.
8. **Ролдугин В.И.** Фрактальные структуры в дисперсных системах. *Усп. химии*. 2003. Т. 72. № 10. С. 931-959. DOI: 10.1070/RC2003v072n10ABEH000805.
9. **Аманбаев Т.Р.** Расчет параметров фрактальных агрегатов, образующихся в бидисперсной суспензии. *Теор. основы хим. технологии*. 2018. Т. 52. № 5. С. 583-590. DOI: 10.1134/S0040357118040012.
10. **Bushell G.** Forward light scattering to characterize structure of flocs composed of large particles. *Chem. Eng. J.* 2005. V. 111. N 2-3. P. 145-149. DOI: 10.1016/j.cej.2005.02.021.
11. **Adachi Y., Kobayashi A., Kobayashi M.** Structure of colloidal flocs in relation to the dynamic properties of unstable suspension. *Int. J. Polym. Sci.* 2012. P. 1-14. DOI: 10.1155/2012/574878.
12. **Khelifa A., HillP.S.** Models for effective density and settling velocity of flocs. *J. Hydraulic Res.* 2006. V. 44. N 3. P. 390-401. DOI: 10.1080/00221686.2006.9521690.
13. **Moruzzia R. B., Oliveiraa A. L., Conceiçoa F. T., Gregoryb J., Camposb L.C.** Fractal dimension of large aggregates under different flocculation conditions. *Sci. Total Environ.* 2017. V. 609. N 31. P. 807-814. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.194.
14. **Li T., Zhu Z., Wang D., Yao Ch., Tang H.** The strength and fractal dimension characteristics of alum-kaolin flocs. *Int. J. Miner. Process.* 2007. V. 82. N 1. P. 23-29. DOI: 10.1016/j.minpro.2006.09.012.

REFERENCES

1. **Kirichenko L.N., Sabirov R.Kh., Skvirskii L.Ia., Teterina N.N.** Potash ore flotation technology. Perm: OGUP «Solikamsk Printing House». 2002. 484 p. (in Russian).
2. **Vorobev P.D., Krutko N.P., Vorobev D.N., Khartan Kh.G., Kirienko V.M., Varava M.M.** Flocculation of clayey slurries in salt solutions. *Obogash. Rud.* 2004. N 5. P. 16-19 (in Russian).
3. **Vorobev P.D., Krutko N.P., Vorobev D.N., Khartan Kh.G., Kirienko V.M., Varava M.M.** Increase in clayey slimes flocculation efficiency through combined dosing of flocculating agents. *Obogashch. Rud.* 2005. N 2. P. 11-14 (in Russian).
4. **Vorobeva E.V., Cherednichenko D.V., Vorobev P.D., Krutko N.P.** Separation of clay saline dispersions by polyacrylamide co-polymers. *Izv. Nats. Acad. Nauk Belarusi, Ser. Khim.* 2012. N 2. P. 34-39 (in Russian).
5. **Vorobev P.D., Krutko N.P., Vorobeva E.V., Strnadova N.** Successive adsorption of polyacrylamide compounds from electrolyte solutions on the surface of kaolinitic clay particles. *Kolloid Zhurn.* 2008. V. 70. N 2. P. 171-174 (in Russian). DOI: 10.1007/s10595-008-2005-y.
6. **Vorobev P.D., Krutko N.P., Vorobeva E.V., Cherednichenko D.V., Basalyga I.I.** Peculiarities of the formation of polyacrylamide compound-based polyelectrolyte complexes in the course of the flocculation of clay-salt dispersions. *Kolloid Zhurn.* 2007. V. 69. N 5. P. 592-596 (in Russian). DOI: 10.1134/S1061933X07050031.
7. **Ignatova M.S., Driabina S.S., Navrotskii A.V., Novakov I.A.** Oppositely charged polyelectrolytes in process of flocculation of dispersion of kaolin. *Izv. VSTU.* 2014. N 7 (134). P. 126-133 (in Russian).
8. **Roldugin V.I.** Fractal structures in disperse systems. *Usp. Khim.* 2003. V. 72. N 10. P. 931-959 (in Russian). DOI: 10.1070/RC2003v072n10ABEH000805.
9. **Amanbayev T.R.** Calculation of parameters of fractal aggregates formed in a bidisperse suspension. *Teor. Osn. Khim. Tekhnol.* 2018. V. 52. N 5. P. 583-590 (in Russian). DOI: 10.1134/S0040357118040012.
10. **Bushell G.** Forward light scattering to characterize structure of flocs composed of large particles. *Chem. Eng. J.* 2005. V. 111. N 2-3. P. 145-149. DOI: 10.1016/j.cej.2005.02.021.
11. **Adachi Y., Kobayashi A., Kobayashi M.** Structure of colloidal flocs in relation to the dynamic properties of unstable suspension. *Int. J. Polym. Sci.* 2012. P. 1-14. DOI: 10.1155/2012/574878.
12. **Khelifa A., HillP.S.** Models for effective density and settling velocity of flocs. *J. Hydraulic Res.* 2006. V. 44. N 3. P. 390-401. DOI: 10.1080/00221686.2006.9521690.
13. **Moruzzia R. B., Oliveiraa A. L., Conceiçoa F. T., Gregoryb J., Camposb L.C.** Fractal dimension of large aggregates under different flocculation conditions. *Sci. Total Environ.* 2017. V. 609. N 31. P. 807-814. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.194.
14. **Li T., Zhu Z., Wang D., Yao Ch., Tang H.** The strength and fractal dimension characteristics of alum-kaolin flocs. *Int. J. Miner. Process.* 2007. V. 82. N 1. P. 23-29. DOI: 10.1016/j.minpro.2006.09.012.

15. **Бутрим С.М., Бильдюкевич Т.Д., Бутрим Н.С., Юрکشтович Т.Л., Капуцкий Ф.Н.** Получение новых флокулянтов на основе высокозамещенных катионных крахмалов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2018. Т. 61. Вып. 1. С. 89-95. DOI: 10.6060/tcct.20186101.5538.
15. **Butrim S.M., Bildyukevich T.D., Butrim N.S., Yurkshstovich T.L., Kaputskiy F.N.** Obtaining new flocculants based on high-substituted cationic starches. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2018. V. 61. N 1. P. 89-95 (in Russian). DOI: 10.6060/tcct.20186101.5538.
16. **Nasser M., James A.E.** The effect of polyacrylamide charge density and molecular weight on the flocculation and sedimentation behaviour of kaolinite suspensions. *Sep. Purif. Technol.* 2006. V. 52. N 2. P. 241-252. DOI: 10.1016/j.seppur.2006.04.005.
16. **Nasser M., James A.E.** The effect of polyacrylamide charge density and molecular weight on the flocculation and sedimentation behaviour of kaolinite suspensions. *Sep. Purif. Technol.* 2006. V. 52. N 2. P. 241-252. DOI: 10.1016/j.seppur.2006.04.005.
17. **Eudoxie G., Hitlal S.E.** Efficiency of polyacrylamide polymers in settling aggregate mining tail water. *West Indian J. Eng.* 2012. V. 35. N 1. P. 60-65.
17. **Eudoxie G., Hitlal S.E.** Efficiency of polyacrylamide polymers in settling aggregate mining tail water. *West Indian J. Eng.* 2012. V. 35. N 1. P. 60-65.
18. **Zhu Z., Li T., Lu J., Wang D., Yao Ch.** Characterization of kaolin flocs formed by polyacrylamide as flocculation aids. *Int. J. Miner. Process.* 2009. V. 91. N 3-4. P. 94-99. DOI: 10.1016/j.minpro.2009.01.003.
18. **Zhu Z., Li T., Lu J., Wang D., Yao Ch.** Characterization of kaolin flocs formed by polyacrylamide as flocculation aids. *Int. J. Miner. Process.* 2009. V. 91. N 3-4. P. 94-99. DOI: 10.1016/j.minpro.2009.01.003.
19. **Середкина О.Р., Рахимова О.В., Лановецкий С.В.** Исследование эффективности действия флокулянтов, используемых для осаждения глинисто-солевого шлама. Сб. тр. 69 всеросс. науч.-техн. конф. с между. уч. Сборник материалов конференции. Электронное издание. Ярославль: Ярослав. гос. тех. ун-т. 2016. С. 145-148.
19. **Seredkina O.R., Rakhimova O.V., Lanovetskiy S.V.** The research into the efficiency of flocculants used for clay-salt slurry precipitation. Collection of papers 69 All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation. Yaroslavl State Technical University. 2016. P. 145-148 (in Russian).
20. **Середкина О.Р., Рахимова О.В., Лановецкий С.В.** Исследование флокулирующей способности полиакриламида, приготовленного на водно-солевых растворах. *Совр. наукоемк. технол.* 2016. № 5-2. С. 291-295.
20. **Seredkina O.R., Rakhimova O.V., Lanovetskiy S.V.** Study of the flocculating ability of polyacrylamide prepared on water-salt solutions. *Sovr. Naukoemk. Tekhnol.* 2016. N 5-2. P 291-295 (in Russian).
21. **Seredkina O.R., Rakhimova O.V., Lanovetskiy S.V.** The research into the influence of sylvinitic ore fractional composition on clay slime flocculation efficiency. Abstracts of XX Mendeleev Congress on general and applied chemistry. Ural Branch of the RAS. 2016. V. 3. P. 218.
21. **Seredkina O.R., Rakhimova O.V., Lanovetskiy S.V.** The research into the influence of sylvinitic ore fractional composition on clay slime flocculation efficiency. Abstracts of XX Mendeleev Congress on General and Applied chemistry. Ural Branch of the RAS. 2016. V. 3. P. 218.
22. **Середкина О.Р., Рахимова О.В.** Особенности поведения (со)полимеров акриламида в концентрированных солевых растворах. *Вестн. технол. у-та*. 2018. Т. 21. № 6. С. 64-67.
22. **Seredkina O.R., Rakhimova O.V.** Behavior patterns of acrylamide copolymers in concentrated salt solutions. *Vestn. Tekhnol. Un-ta*. 2018. V. 21. N 6. P. 64-67 (in Russian).
23. **Барань Ш., Месарош Р., Козакова И., Шкварла И.** Кинетика и механизм флокуляции суспензий бентонита и каолина полиэлектролитами и прочность образующихся флокул. *Коллоид. журн.* 2009. Т. 71. № 3. С. 291-298. DOI: 10.1134/S1061933X09030016.
23. **Baran Sh., Meszarosh R., Kozakova I., Shkvarla I.** Kinetics and mechanism of flocculation of bentonite and kaolin suspensions with polyelectrolytes and the strength of floccs. *Kolloid. Zhurn.* 2009. V. 71. N 3. P. 291-298 (in Russian). DOI: 10.1134/S1061933X09030016.

Поступила в редакцию 11.06.2019
Принята к опубликованию 05.03.2020

Received 11.06.2019
Accepted 05.03.2020