

ВЛИЯНИЕ ТИПА ФЛОКУЛЯНТА НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФЛОКУЛ В ГЛИНИСТО-СОЛЕВЫХ СУСПЕНЗИЯХ

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

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

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

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

В статье представлены результаты исследований по влиянию типа флокулянта на прочностные характеристики флокул в глинисто-солевых суспензиях, полученные при помощи лазерного анализатора размера частиц Lasentec D600L системы FBRM. Определены коэффициенты прочности и восстановления агрегатов, образованных полиакриламидом и его анионными и катионными сополимерами. Увеличение скорости перемешивания при использовании различных типов полимеров приводит к разрушению образующихся агрегатов в сфлуктурированной суспензии. Для катионного флокулянта размер флокул снижается в пределах от 250 до 110 мкм, для анионного и неионогенного флокулянтов – от 500 до 250 мкм. Установлена зависимость прочности флокул от механизма адсорбции макромолекул на твердой поверхности. Уменьшение гидродинамического воздействия влечет частичное восстановление флокул. Показано, что восстановление флокул для всех исследуемых полимеров ограничено, что указывает на значительную необратимость процесса разрушения агрегатов. В случае использования катионного флокулянта способность к восстановлению агрегатов ниже в 2,5 раза по сравнению с анионным и неионогенным полимерами. Для неионогенного и анионного полимеров установлена зависимость коэффициентов прочности и восстановления флокул от расхода флокулянта. Расход катионного полимера не влияет на эти показатели. Рассмотрена динамика процессов образования флокул, их разрушения и рефлокуляции с применением различных флокулянтов. Установлено влияние типа заряда и расхода полимера на механизм взаимодействия частиц. Показана потенциальная возможность использования полученных результатов для совершенствования технологии производства хлорида калия на стадиях сгущения и обезвоживания глинисто-солевых шлам.

Ключевые слова: флокуляция, рефлокуляция, прочность флокул, глинисто-солевой шлам

INFLUENCE OF FLOCCULANT TYPE ON STRENGTH CHARACTERISTICS OF FLOCS IN CLAY-SALT SUSPENSIONS

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

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

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

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

The results of studies on the effect of the flocculant type on the strength characteristics of floccules in clay-salt suspensions, obtained using a laser analyzer of particle size Lasentec D600L FBRM systems were presented in the article. The coefficients of strength and reduction of aggregates formed by polyacrylamide and its anionic and cationic copolymers were determined. Increasing the speed of mixing by using of polymers various types leads to the destruction of the formed aggregates in the flocculated suspension. The size of flocs induced by a cationic flocculant is reduced from 250 to 110 μm , for anionic and non-ionic flocculants - from 500 to 250 μm . The dependence of floc strength on the macromolecules adsorption mechanism on a solid surface was established. The decrease in hydrodynamic effects entails the partial restoration of floccules. It was shown that the recovery of flocs for all studied polymers was limited, which indicates a significant irreversibility of the aggregates destruction process. When using cationic flocculant, the

ability to restore the aggregates is 2.5 times lower compared to anionic and non-ionic polymers. For nonionic and anionic polymers, the dependence of flocs coefficients of strength and recovery on the flocculant dosage was established. Dosage of cationic polymer does not affect these indicators. The dynamics of flocculation, destruction and reflocculation processes using various flocculants was considered. The influence of the charge type and polymer consumption on the mechanism of particles interaction was established. The potential possibility of using the obtained results to improve the technology of potassium chloride production at the stages of thickening and dehydrating clay-salt sludge was shown.

Key words: flocculation, reflocculation, floc strength, clay-salt sludge

Для цитирования:

Середкина О.Р., Рахимова О.В., Лановецкий С.В. Влияние типа флокулянта на прочностные характеристики флокул в глинисто-солевых суспензиях. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2020. Т. 63. Вып. 6. С. 30–36

For citation:

Seredkina O.R., Rakhimova O.V., Lanovetskiy S.V. Influence of flocculant type on strength characteristics of flocs in clay-salt suspensions. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* [Russ. J. Chem. & Chem. Tech.], 2020. V. 63. N 6. P. 30–36

ВВЕДЕНИЕ

В составе калийных руд присутствуют глинисто-карбонатные породы, что приводит к неизбежному образованию глинисто-солевых шламов в процессе производства хлористого калия. Обогащение сильвинитовых руд предусматривает сгущение и обезвоживание образующихся шламов. При этом основной задачей является эффективное разделение жидкой и твердой фаз.

Для интенсификации процесса агрегации глинисто-солевых дисперсий шламов применяют преимущественно неионогенный полиакриламид и его ионогенные сополимеры [1].

В зависимости от типа флокулянта, плотности его заряда и молекулярной массы адсорбция макромолекул на поверхности частиц дисперсной фазы и образование флокул осуществляется по определенному механизму [2-5]. Снижение устойчивости дисперсной системы за счет адсорбции молекул полимера на поверхности двух и более твердых частиц и связывание их в агрегаты со значительными размерами происходит по мостичному механизму [6]. Нейтрализационный механизм заключается в компенсации поверхностного заряда твердых частиц противоположно заряженными звеньями макромолекул флокулянта [7]. Изменение конформации последних на более вытянутую и плоскую приводит к образованию большого числа контактов между твердой поверхностью и макромолекулами полимера. Потеря агрегативной устойчивости суспензии по механизму «тропинки» (частный случай нейтрализационного механизма) сопровождается образованием довольно прочных агрегатов [8].

Характеристики образующихся флокул значительно зависят от различных факторов, в том

числе от интенсивности и продолжительности перемешивания [9-12]. Введение флокулянта в зону умеренной турбулизации при проведении процесса агрегации дисперсных систем обеспечивает равномерное распределение полимера в жидкой фазе и образование большого числа контактов между макромолекулами и дисперсными частицами. Перемешивание на последующих этапах процесса флокуляции приводит к десорбции сегментов макромолекул с поверхности твердой фазы.

Флотационное обогащение сильвинита осуществляется в механических флотомашинах, в которых система подвергается интенсивному гидродинамическому воздействию. В потоке режим разрушения флокул зависит от их размера и степени турбулентности. При интенсивном перемешивании с увеличением размеров флокул их дальнейший рост ограничивается приложенным сдвигом, так как эффективность столкновения агрегатов уменьшается, и они могут начать разрушаться под действием внешних сил.

Прочность флокул определяется количеством и характером межчастичных связей внутри агрегатов. В соответствии с литературными данными [13] электростатическое взаимодействие дает более прочные связи по сравнению с мостикообразованием. Кроме того, сила отталкивания между анионным полимером и отрицательными поверхностями частиц приводит к ослаблению структуры флокул, что делает их менее устойчивыми к разрушению.

После деструкции агрегатов при снижении скорости перемешивания может произойти их повторный рост, но в большинстве случаев процесс разрушения является необратимым.

Таким образом, понимание влияния свойств полимера на процессы флокуляции, деструкции и

рефлокуляции позволит осуществлять оптимальный выбор флокулянта для конкретного использования.

Цель работы – определить влияние типа флокулянта на прочностные характеристики агрегатов в глинисто-солевых суспензиях.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе использован ряд полиакриламидных соединений марки ПРАЕСТОЛ, предоставленных компанией ООО «ПРОМХИМСЕРВИС», г. Пермь (табл. 1): неионный (N) – полиакриламид (ПАА), анионный (A) – сополимер акриламида (АА) с акрилатом натрия (АН) и катионный (C) – сополимер АА 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, %		
			АА	АН	АПТМАХ
N	2500	14	100	-	-
A	2510	14	92	8	-
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 следующим образом. Введение флокулянта при скорости вращения мешалки 200 мин^{-1} с последующей фазой роста флокул в течение 2 мин, затем разрушение агрегатов при 500 мин^{-1} в течение 2 мин. После разрушения флокул скорость перемешивания снижали до 200 мин^{-1} с выдержкой в таком режиме в течение 2 мин.

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 распре-

деление 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 – средний эквивалентный объемный диаметр. Также в процессе флокуляции отслеживали динамику изменения содержания отдельных фракций в суспензии.

Влияние типа флокулянта на характеристики образующихся флокул определяли сравнением коэффициентов прочности (ϕ) и восстановления (λ), которые рассчитывались следующим образом [13-16]:

$$\phi = \frac{d_2}{d_1} \cdot 100,$$

$$\lambda = \frac{d_3 - d_2}{d_1 - d_2} \cdot 100,$$

где d_1 – средний размер флокул до разрушения, d_2 – средний размер флокул после разрушения, d_3 – средний размер флокул после восстановления.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлено изменение размеров агрегатов во времени в присутствии различных флокулянтов.

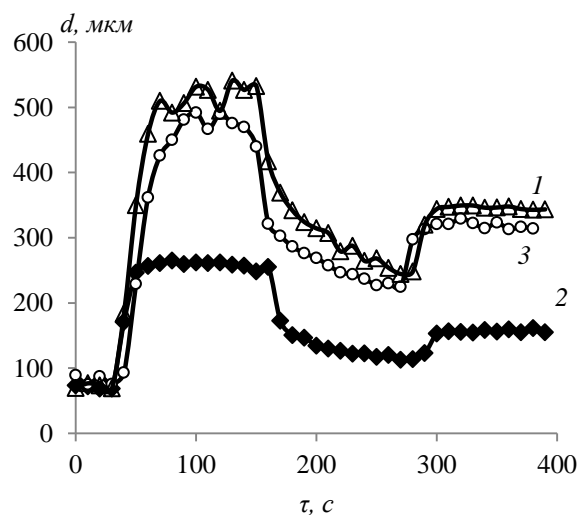


Рис. 1. Влияние длительности перемешивания на размер флокул в присутствии различных флокулянтов: 1 – N, 2 – C, 3 – A
Fig. 1. The effect of mixing time on the flocs size with various flocculants: 1 – N, 2 – C, 3 – A

Результаты показывают, что для всех флокулянтов после определенного индукционного периода, в течение которого осуществляется адсорбция макромолекул полимера на поверхности

твердой фазы, происходит значительный рост флокул. Для катионного флокулянта размер агрегатов, образованных за счет электростатического взаимодействия, практически в 2 раза ниже, чем для полимеров *A* и *N*. При увеличении скорости перемешивания до 500 мин⁻¹ происходит почти двукратное уменьшение размеров флокул. Дальнейшее снижение скорости перемешивания приводит к частичной рефлокуляции. Причем для флокулянта *C* степень регенерации флокул ниже.

В табл. 2 представлены результаты экспериментов при различных расходах флокулянтов.

Таблица 2

Коэффициенты прочности и восстановления флокул, образованных с использованием неионогенного ПАА и его катионного и анионного сополимеров
Table 2. Strength factor and recovery factor of flocs induced by non-ionic PAM and its cationic and anionic copolymers

Расход ПАА, г/кг Н.О.	<i>N</i>		<i>C</i>		<i>A</i>	
	ϕ	λ	ϕ	λ	ϕ	λ
0,15	36,9	22,6	41,0	20,6	47,8	38,9
0,30	43,3	25,5	42,8	24,4	47,7	29,7
0,45	50,4	31,3	46,3	27,4	50,5	34,3
0,60	58,6	29,8	46,8	27,3	57,2	9,6
0,75	59,9	20,8	44,8	29,6	-	-
0,90	72,2	7,2	44,4	27,6	64,9	-6,9

Значения коэффициента прочности указывает на возможность агрегата выдерживать поперечное усилие. У агрегированных систем с увеличением коэффициента восстановления улучшается способность к рефлокуляции после интенсивного гидродинамического воздействия.

Как видно из табл. 2, для катионного полимера коэффициенты прочности и восстановления практически не зависят от его расхода. Для анионного и неионогенного коэффициент прочности увеличивается с ростом расхода флокулянта, а способность к восстановлению снижается.

Способность флокул противодействовать сдвигу зависит от характера взаимодействия между частицами, числа межчастичных связей и их прочности [17, 18]. При увеличении расхода ПАА и его анионного сополимера число контактов между частицами и макромолекулами возрастает, что и способствует образованию более прочных флокул. Эти флокулянты связывают мелкие частицы главным образом посредством мостичного механизма [19]. Высокая турбулентность приводит к разрыву полимерных хвостов и петель и разрушению флокул за счет сокращения длины полимерных мостиков в результате адсорбции

сегментов макромолекул на поверхности уже занятых частиц, а также вследствие разрушения агрегатов с укороченными мостиками. Повышение прочности флокул при увеличении расхода реагента можно объяснить перегруппировкой остаточного полимера на поверхностях частиц после фрагментации.

В случае катионного флокулянта восстановление агрегатов происходит за счет электростатического взаимодействия, в результате полимер *C* обнаружил одинаковую способность к восстановлению флокул независимо от его расхода.

С целью обоснования механизма взаимодействия частиц исследована динамика изменения содержания различных фракций в процессе флокуляции, разрушения флокул и рефлокуляции (рис. 2-4).

При введении катионного флокулянта (рис. 2) происходит образование средних (100-300 мкм) и крупных (300-600 мкм) фракций за счет агрегации наиболее мелких частиц (0-100 мкм). При этом реагента оказывается недостаточно для полного связывания тонких шламов. При увеличении скорости перемешивания образовавшиеся флокулы разрушаются до первоначального состояния. При уменьшении гидродинамического воздействия происходит агрегация мелких частиц преимущественно до средних размеров. В конечном итоге образуется система с повышенным содержанием мелких фракций.

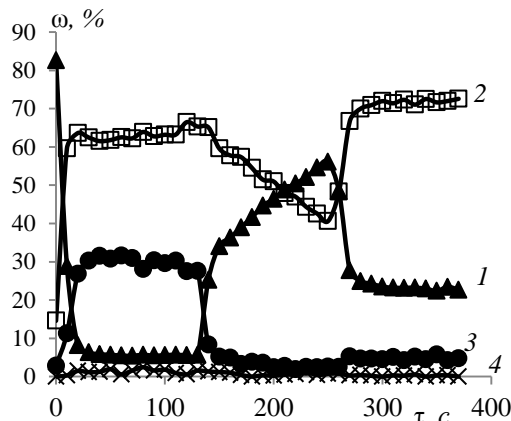


Рис. 2. Динамика изменения содержания фракций (ω , мас. %) при флокуляции катионным полимером (0,45 г/кг): 1 – 0-100 мкм, 2 – 100-300 мкм, 3 – 300-600 мкм, 4 – 600-1000 мкм
 Fig. 2. Dynamics of changes in the content of fractions (ω , mas. %) during flocculation with a cationic polymer (0.45 g/kg): 1 – 0-100 μm , 2 – 100-300 μm , 3 – 300-600 μm , 4 – 600-1000 μm

Так как эффект нейтрализации заряда имеет чисто физическую природу, то нет никаких причин, по которым разорванные связи не могут по-

вторно образоваться. В нашем случае полного восстановления не происходит, что может свидетельствовать о частичной деструкции макромолекул под действием внешних сил.

При увеличении расхода реагента динамика процесса практически не изменяется. По-видимому, после взаимной нейтрализации заряда макромолекул полимера и поверхности глинистых частиц дальнейшее их электростатическое взаимодействие становится невозможным, в результате параметры процесса остаются постоянными.

При обработке суспензии неионным флокулянтom образуются флокулы размером до 1000 мкм за счет агрегации сначала наиболее мелких, а затем средних частиц (рис. 3).

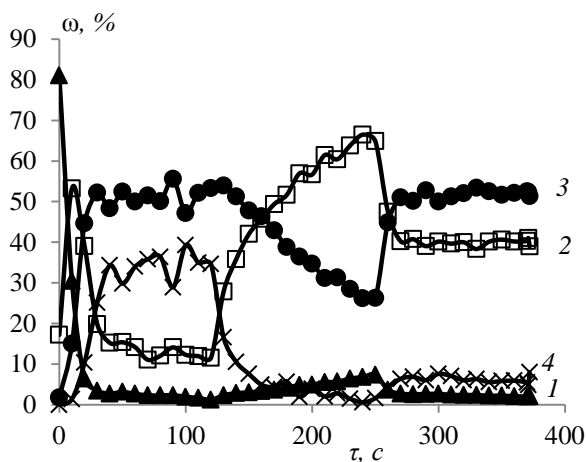


Рис. 3. Динамика изменения содержания фракций (ω , мас. %) при флокуляции неионогенным полимером (0,45 г/кг): 1 – 0-100 мкм, 2 – 100-300 мкм, 3 – 300-600 мкм, 4 – 600-1000 мкм

Fig. 3. Dynamics of changes in the content of fractions (ω , mas. %) during flocculation with a non-ionic polymer (0.45 g/kg): 1 – 0-100 μm , 2 – 100-300 μm , 3 – 300-600 μm , 4 – 600-1000 μm

При увеличении сдвига крупные (300-600 мкм) и наиболее крупные (600-1000 мкм) агрегаты разрушаются до средних размеров. Образование первичных частиц в этом случае незначительно, что объясняется возникновением прочных адсорбционных связей в результате мостичной флокуляции. При снижении турбулентности рефлокуляция происходит за счет агрегации средних частиц в крупные. Это приводит к образованию системы с достаточно крупными флокулами и низким содержанием тонких шламов.

Исследования показали, что для анионного полимера динамика процесса аналогична, что может свидетельствовать о схожести механизмов флокуляции.

При увеличении расхода полимера (анионного и неионогенного) наблюдаются следующие изменения (рис. 4).

Избыток флокулянта приводит к стабилизации суспензии [20-22]. При интенсификации перемешивания наблюдается разрушение только наиболее крупных флокул, которые не распадаются до первоначальных частиц. При этом флокулы размером 300-600 мкм оказываются достаточно прочными, и их разрушения не происходит. Также видно, что под влиянием гидродинамического воздействия снизилось содержание мелких частиц за счет перераспределения флокулянта.

При увеличении расхода полимера доля свободной поверхности твердых частиц сокращается, что препятствует их дальнейшему взаимодействию. Это объясняет снижение коэффициента восстановления.

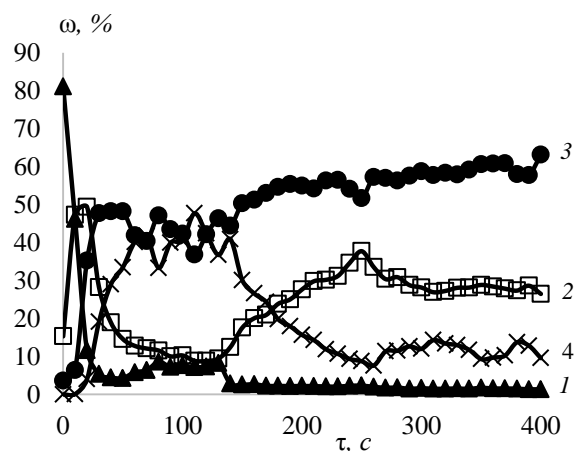


Рис. 4. Динамика изменения содержания фракций (ω , мас. %) при флокуляции неионогенным полимером (0,90 г/кг): 1 – 0-100 мкм, 2 – 100-300 мкм, 3 – 300-600 мкм, 4 – 600-1000 мкм

Fig. 4. Dynamics of changes in the content of fractions (ω , mas. %) during flocculation with a non-ionic polymer (0.90g/kg): 1 – 0-100 μm , 2 – 100-300 μm , 3 – 300-600 μm , 4 – 600-1000 μm

ВЫВОДЫ

В работе показаны особенности образования, разрушения и повторного восстановления агрегатов при использовании различных типов полимеров на основе полиакриламида при флокуляции глинисто-солевого шлама. Установлено, что разрушение агрегатов зависит от их прочности, которая определяется характером взаимодействия между частицами и полимером, а также средним числом связей на частицу.

При изменении расхода катионного полимера прочностные характеристики флокул и их способность к рефлокуляции остаются практически постоянными. Для анионного и неионогенного флокулянтов с увеличением их расхода агрегаты менее подвержены разрушению при гидродинамическом воздействии, но при этом их повторный рост ограничен.

Исследование динамики образования агрегатов позволило выявить отличие в механизмах роста флокул при использовании различных полимеров. В случае катионного флокулянта агрегат растет за счет присоединения к нему отдельных первичных частиц. Причем полного восстановления разрушившихся флокул не происходит в результате разрыва макромолекул полимера. При использовании анионного и неионогенного флокулянтов агрегат образуется за счет объединения

флокул, которые в свою очередь являются результатом взаимодействия первичных частиц. При этом агрегаты средних размеров являются более устойчивыми, и прочность их растет с увеличением дозы реагента.

Полученные зависимости могут быть использованы при выборе флокулянта с целью интенсификации процесса обезвоживания и разделения глинисто-солевой дисперсии.

ЛИТЕРАТУРА

REFERENCES

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. **Кошевар В.Д.** Органо-минеральные дисперсии. Регулирование их свойств и применение. Минск: Белорус. наука. 2008. 312 с.
3. **Moruzzi R.B., Oliveira A.L., Conceição F.T., Gregory J., Campos 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.
4. **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.
5. **Кривенко И.В., Наместников В.В., Мухутдинова Г.М., Хацринов А.И.** О возможности использования производных полиакриламида в процессах водоподготовки и водоотведения производств нитратов целлюлозы. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2008. Т. 51. Вып. 2. С. 110-114.
6. **Hogg R.** Bridging flocculation by polymers. *Kona Powder Part. J.* 2012. V. 30. P. 3-14. DOI:10.14356/kona.2013005.
7. **Fellows C.M., Doherty W.O.S.** Insights into Bridging Flocculation. *Macromol. Symp.* 2006. V. 231. P. 1-10. DOI: 10.1002/masy.200590012.
8. **Барань Ш., Месарош Р., Козакова И., Шкварла И.** Кинетика и механизм флокуляции суспензии бентонита и каолина полиэлектролитами и прочность образующихся флокул. *Коллоид. журнал.* 2009. Т. 71. № 3. С. 291-298.
9. **Binahmed S., Ayoub G., Al-Hindi M., Azizi F.** The effect of fast mixing conditions on the coagulation–flocculation process of highly turbid suspensions using liquid bittern coagulant. *Des. Water Treat.* 2015. V. 53. N 12. P. 3388-3396. DOI: 10.1080/19443994.2014.933043.
10. **Saritha V., Srinivas N., Srikanth Vuppala N. V.** Analysis and optimization of coagulation and flocculation process. *Appl. Water Sci.* 2017. V. 7. I. 1. P. 451-460. DOI: 10.1007/s13201-014-0262-y.
11. **Tajuddin H. A., Abdullah L.C., Idris A., Choong T.S.Y.** Effluent quality of anaerobic palm oil mill effluent (pome) wastewater using organic coagulant. *Int. J. Sci. Res.* 2015. V. 4. N 5. P. 667-677.
12. **Park S.-M., Heo T.-Y., Park J.-G., Jun H.-B.** Effects of hydrodynamics and coagulant doses on particle aggregation during a rapid mixing. *Environ. Eng. Res.* 2016. V. 21. N 4. P. 365-372. DOI: 10.4491/eer.2016.046.
13. **Zhu Z., Li T., Lu J., Wang D., Yao C.** Characterization of kaolin flocs formed by polyacrylamide as flocculation aids. *Int. J. Miner. Process.* 2009. V. 91. P. 94-99. DOI: 10.1016/j.minpro.2009.01.003.
1. **Kirichenko L.N., Sabirov R.Kh., Skvytsky L.Ya., Teterina N.N.** Technology of flotation enrichment of potashe ore. Perm: OGUP «Solikamsk Printing House». 2002. 484 p. (in Russian).
2. **Koshevar V.D.** Organo-mineral dispersions. Regulation of their properties and application. Minsk: Belorus. nauka. 2008. 312 p. (in Russian).
3. **Moruzzi R.B., Oliveira A.L., Conceição F.T., Gregory J., Campos 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.
4. **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.
5. **Krivenko I.V., Namestnikov V.V., Mukhutdinova G.M., Khatsrinov A.I.** On possibility of polyacrylamide derivatives application for water treatment and overflow processes of nitrate cellulose plants. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2008. V. 51. N 2. C. 110-114 (in Russian).
6. **Hogg R.** Bridging flocculation by polymers. *Kona Powder Part. J.* 2012. V. 30. P. 3-14. DOI:10.14356/kona.2013005.
7. **Fellows C.M., Doherty W.O.S.** Insights into Bridging Flocculation. *Macromol. Symp.* 2006. V. 231. P. 1-10. DOI: 10.1002/masy.200590012.
8. **Barany S., Meszaros R., Kozakova I., Shkvarla I.** Kinetics and mechanism of flocculation of bentonite and kaolin suspensions with polyelectrolytes and the strength of flocs. *Kolloid. Zhurn.* 2009. V. 71. N 3. P. 291-298 (in Russian). DOI: 10.1134/S1061933X09030016.
9. **Binahmed S., Ayoub G., Al-Hindi M., Azizi F.** The effect of fast mixing conditions on the coagulation–flocculation process of highly turbid suspensions using liquid bittern coagulant. *Des. Water Treat.* 2015. V. 53. N 12. P. 3388-3396. DOI: 10.1080/19443994.2014.933043.
10. **Saritha V., Srinivas N., Srikanth Vuppala N. V.** Analysis and optimization of coagulation and flocculation process. *Appl. Water Sci.* 2017. V. 7. I. 1. P. 451-460. DOI: 10.1007/s13201-014-0262-y.
11. **Tajuddin H. A., Abdullah L.C., Idris A., Choong T.S.Y.** Effluent quality of anaerobic palm oil mill effluent (pome) wastewater using organic coagulant. *Int. J. Sci. Res.* 2015. V. 4. N 5. P. 667-677.
12. **Park S.-M., Heo T.-Y., Park J.-G., Jun H.-B.** Effects of hydrodynamics and coagulant doses on particle aggregation during a rapid mixing. *Environ. Eng. Res.* 2016. V. 21. N 4. P. 365-372. DOI: 10.4491/eer.2016.046.
13. **Zhu Z., Li T., Lu J., Wang D., Yao C.** Characterization of kaolin flocs formed by polyacrylamide as flocculation aids. *Int. J. Miner. Process.* 2009. V. 91. P. 94-99. DOI: 10.1016/j.minpro.2009.01.003.

14. **Yukselen M.A., Gregori J.** The effect of rapid mixing on the break-up and re-formation of flocs. *Chem. Technol. Biotechnol.* 2004. V. 79. P. 782-788. DOI: 10.1002/jctb.1056.
15. **Jarvis P., Jefferson B., Gregory J., Parsons S.A.** A review of floc strength and breakage. *Water Res.* 2005. V. 39. P. 3121-3137. DOI: 10.1016/j.watres.2005.05.022.
16. **Solomentseva I., Barany S., Gregory J.** The effect of mixing on stability and break-up of aggregates formed from aluminum sulfate hydrolysis products. *Colloids Surf. A.* 2007. V. 298. N 1-2. P. 34-41. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2006.12.016.
17. **Гольберг Г.Ю.** Физико-химические проблемы флокуляции тонкодисперсных продуктов обогащения углей. *Горн. информ.-аналит. бюлл.* 2006. № 1. С. 346-348.
18. **Месарош Р., Барань Ш., Соломенцева И.** Влияние гидродинамических условий на кинетику флокуляции суспензий бентонита катионными полиэлектролитами и прочность образующихся флокул. *Коллоид. журнал.* 2010. Т. 72. № 3. С. 400-408. DOI: 10.1134/S1061933X10030154.
19. **Шкоп А.А., Цейтлин М.А., Шестопалов А.В., Райко В.Ф.** Исследование прочности флокуляционных структур полидисперсных угольных суспензий. *Вост.-Европ. Журн. передов. технол.* 2017. Т. 1. № 10 (85). С. 20-26. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.91031.
20. **Середкина О.Р., Рахимова О.В., Лановецкий С.В.** Исследование эффективности действия флокулянтов, используемых для осаждения глинисто-солевого шлама. Сб. тр. 69 всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Ярославль: Ярослав. гос. техн. ун-т. 2016. С. 145-148.
21. **Середкина О.Р., Рахимова О.В., Лановецкий С.В.** Исследование флокулирующей способности полиакриламида, приготовленного на водно-солевых растворах. *Современ. наукоемк. технол.* 2016. № 5-2. С. 291-295.
22. **Seredkina O.R., Rakhimova O.V., Lanovetskiy S.V.** The research into the influence of sylvinitic ore fractional composition on clay slime flocculation efficiency. Abstr. of XX Mendeleev Congress on general and applied chemistry. Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 2016. V. 3. P. 218.
14. **Yukselen M.A., Gregori J.** The effect of rapid mixing on the break-up and re-formation of flocs. *Chem. Technol. Biotechnol.* 2004. V. 79. P. 782-788. DOI: 10.1002/jctb.1056.
15. **Jarvis P., Jefferson B., Gregory J., Parsons S.A.** A review of floc strength and breakage. *Water Res.* 2005. V. 39. P. 3121-3137. DOI: 10.1016/j.watres.2005.05.022.
16. **Solomentseva I., Barany S., Gregory J.** The effect of mixing on stability and break-up of aggregates formed from aluminum sulfate hydrolysis products. *Colloids Surf. A.* 2007. V. 298. N 1-2. P. 34-41. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2006.12.016.
17. **Golberg G.Yu.** Physico-chemical problems of flocculation of fine products of coal enrichment. *Gorno Inform. Anal. Bull.* 2006. N 1. P. 346-348 (in Russian).
18. **Meszaros R., Barany S., Solomentseva I.** Effect of hydrodynamic conditions on the kinetics of bentonite suspension flocculation by cationic polyelectrolytes and the strength of formed flocs. *Colloid J.* 2010. V. 72. N 3. P. 409-416. DOI: 10.1134/S1061933X10030154.
19. **Shkop A.A., Tseitlin M.A., Shestopalov A.V., Raiko V.F.** Investigation of the strength of flocculation structures of polydisperse coal suspensions. *Vostochno Evrop. Zhurn. Peredov. Tekhnol.* 2017. V. 1. N 10 (85). P. 20-26 (in Russian). DOI: 10.15587/1729-4061.2017.91031.
20. **Seredkina O.R., Rakhimova O.V., Lanovetskiy S.V.** The research of the efficiency of flocculants used for clay-saltslurry precipitation. Coll. of papers 69 All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation. Yaroslavl': Yaroslavl. Gos. Tekhn. Univ. 2016. P. 145-148 (in Russian).
21. **Seredkina O.R., Rakhimova O.V., Lanovetskiy S.V.** The research of flocculation ability of polyacrylamide, prepared with aqueous-salt solution. *Sovrem.Naukoem. Nekhnol.* 2016. N 5-2. P. 291-295 (in Russian).
22. **Seredkina O.R., Rakhimova O.V., Lanovetskiy S.V.** The research into the influence of sylvinitic ore fractional composition on clay slime flocculation efficiency. Abstr. of XX Mendeleev Congress on general and applied chemistry. Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 2016. V. 3. P. 218.

Поступила в редакцию 11.06.2019
Принята к опубликованию 20.04.2020

Received 11.06.2019
Accepted 20.04.2020