

ISSN 1561-8331 (Print)

ISSN 2524-2342 (Online)

УДК 661.8.092.82 : 678.745.842

<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-3-369-376>

Поступила в редакцию 11.06.2019

Received 11.06.2019

**Д. Н. Давлюд, П. Д. Воробьёв, Д. В. Чередниченко, Н. П. Крутько, Е. В. Лаевская,
Е. В. Воробьёва, С. В. Буча**

Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

ПОЛИАКРИЛАМИДНЫЕ ФЛОКУЛЯНТЫ В ПРОЦЕССАХ ФАЗОВОГО РАЗДЕЛЕНИЯ СОЛЕВЫХ ДИСПЕРСИЙ МИНЕРАЛЬНЫХ РУД

Аннотация. Описаны особенности флокуляции солевых (хлориды калия и натрия) дисперсий глины полиакриламидом, катионными и анионными сополимерами акриламида, включая влияние содержания флокулянта, концентрации твердой фазы в дисперсии, способа растворения полимеров в воде или солевом растворе на скорость осаждения и плотность флокул. Установлено, что наибольшей флокулирующей способностью по отношению к глинисто-солевой дисперсии обладает полиакриламид, наименьшей – катионные сополимеры. Показано, что в концентрированных дисперсиях глины флокуляция начинается при более низком содержании флокулянта и происходит в узком интервале концентраций полимера. Скорость осаждения глины в солевой дисперсии увеличивается на 15–20 % при введении флокулянта в две стадии, возрастает в 1,5 раза при поочередном введении катионного, затем анионного флокулянта. Отмечено, что растворы полимеров, приготовленные с использованием концентрированных солевых растворов хлоридов калия и натрия, обеспечивают более высокую эффективность флокуляции глины по сравнению с растворами полимеров, приготовленными на воде.

Ключевые слова: полиакриламид, сополимер, глина, флокуляция, скорость осаждения, плотность флокул

Для цитирования. Полиакриламидные флокулянты в процессах фазового разделения солевых дисперсий минеральных руд / Д. Н. Давлюд [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2019. – Т. 55, № 3. – С. 369–376. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-3-369-376>

D. N. Davlyud, D. V. Cherednichenko, P. D. Varabyou, N. P. Krutko, E. V. Layeuskaya, E. V. Vorobieva, S. V. Bucha

Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

POLYACRYLAMIDE FLOCCULANTS IN PHASE SEPARATION PROCESSES OF MINERAL ORE SALT DISPERSIONS

Abstract. The features of clay-saline (potassium and sodium chlorides) dispersions flocculation using polyacrylamide and its cationic and anionic copolymers are described, including the effect of flocculant concentration, solid concentration in dispersion, method of polymer dissolution in water or saline solution on the sedimentation rate and flocculation density. It is shown that polyacrylamide has the highest flocculating ability towards clay-saline dispersion, and cationic copolymers – the lowest effect. It is shown that in concentrated clay dispersions flocculation starts at lower flocculant dose rate and occurs in a narrow range of polymer concentrations. The sedimentation rate of clay in salt dispersion increases by 15–20 % with the introduction of flocculant in two stages, and by 50 % times – with consequent dosing of cationic and anionic flocculant. It is also stated that polymer solutions prepared using concentrated salt solutions of potassium and sodium chlorides provide a higher efficiency of clay flocculation in comparison with solutions of polymers prepared in water.

Keywords: polyacrylamide, copolymer, clay, flocculation, sediment density, sedimentation rate

For citation. Davlyud D. N., Cherednichenko D. V., Varabyou P. D., Krutko N. P., Layeuskaya E. V., Vorobieva E. V., Bucha S. V. Polyacrylamide flocculants in phase separation processes of mineral ore salt dispersions. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 369–376 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-3-369-376>

Введение. В процессе переработки калийных руд минералы и глинистые примеси в жидкой фазе образуют глинисто-солевые суспензии – полидисперсные коллоидные системы. Вследствие высокоразвитой удельной поверхности частиц глинистые примеси оказывают отрицательное влияние на стадии процесса обогащения калийных руд, их присутствие снижает селективность флотационного разделения компонентов руды [1, 2]. Выделение глинистых примесей из руды – одна из наиболее значимых технологических стадий, а эффективность процессов сгущения и обезвоживания глинистых дисперсий существенно влияет на экономику процесса

обогащения, поскольку частицы глины способны удерживать большое количество насыщенного солевого раствора, который выводится с глинисто-солевыми шламами из технологического процесса. Кроме того, глинисто-солевые шламы, как отход калийного производства, – главные источники засоления окружающей среды [3].

Флокуляция коллоидных частиц является основой фазового разделения дисперсий и используется в различных отраслях: для концентрирования и обезвоживания суспензий в рудно-углеобогащении, в процессах очистки питьевых и сточных вод от дисперсных примесей, для улучшения фильтрационных характеристик осадков и т. д. [4]. Флокулянты на основе полиакриламида и сополимеров акриламида находят широкое применение в современных технологиях обесшламливания на предприятиях калийной промышленности, где выделение глинистой дисперсной фазы осуществляется из насыщенного солевого раствора хлоридов калия и натрия [5].

Высокая концентрация соли в глинистой дисперсии приводит к сжатию двойного электрического слоя частиц, а также к изменению конформационного состояния макромолекул флокулянтов. Ионы электролита нейтрализуют поверхностный заряд ионогенных макромолекул и усиливают гидрофобные взаимодействия между неполярными фрагментами полимерной цепи. Флокуляция в таких системах происходит преимущественно посредством механизма мостикообразования [6, 7].

Флокулянты вводят в дисперсную систему обычно в виде разбавленных водных растворов. Для солевых дисперсий глины более целесообразно использовать солевые растворы флокулянтов. Для этого необходимо изучить процесс растворения полимеров в солевом растворе, состав которого соответствует составу дисперсионной среды, т. е. в концентрированном растворе хлоридов калия и натрия. В литературе несмотря на значительное количество публикаций по вопросам флокуляции полимерами [6–9], практически нет данных о растворении акриламидных полимеров в концентрированных растворах солей, влиянии состава растворителя на флокулирующую способность полимеров в отношении солевых дисперсий глины и поведении акриламидных (со)полимеров в солевых гетерогенных системах. Недостаток научных данных препятствует решению актуальных прикладных проблем и разработке новых технологий обогащения минеральных руд.

В работе приведены результаты исследований флокуляции солевых дисперсий глины полиакриламидом и сополимерами акриламида в зависимости от типа и концентрации флокулянта, состава растворителя полимеров и способа введения флокулянтов в дисперсию.

Экспериментальная часть. Для исследований в качестве флокулянтов использовали полиакриламид (ПА), анионные сополимеры акриламида с акрилатом натрия, содержащие 10 (AC₁₀), 20 (AC₂₀) и 40 (AC₄₀) % анионных групп с молекулярной массой (ММ) $14 \cdot 10^6$, катионный сополимер акриламида с метилхлоридом диметиламинопропилакриламида с ММ $6 \cdot 10^6$, содержащий 10 (KC₁₀), 20 (KC₂₀) и 40 (KC₄₀) % ионогенных групп (Solenis, США).

Растворение полимеров проводили в водных растворах хлоридов калия (KCl) и натрия (NaCl) с концентрацией 3,4 моль/л, а также в воде при одинаковых условиях (температура, время и скорость перемешивания). Для проведения экспериментов использовали свежеприготовленные растворы флокулянтов (концентрация 0,5 мас.%). Для приготовления глинисто-солевой дисперсии использовали модельные образцы глины ОАО «Беларуськалий», отмытые от солей и высушенные при 110 °С с характеристиками: содержание частиц менее 2 м – 62 %, (2–3) м – 32 %; плотность – 2,5 г/см³; удельная поверхность – 14,3 м²/г и каолин Sigma-Aldrich (марка 18616, Германия): содержание частиц размером менее 1 м – 32 %, (1–2) м – 35 %, (2–3) м – 28 %, плотность – 2,8 г/см³, удельная поверхность по низкотемпературной адсорбции азота – 15 м²/г. Глинисто-солевые дисперсии готовили на солевых растворах с концентрацией хлоридов натрия и калия 3,4 моль/л. После введения глины (каолина) в солевой раствор суспензию выдерживали в течение 24 ч.

Эксперименты по флокуляции проводили в мерных цилиндрах. В глинисто-солевою дисперсию вводили приготовленный раствор флокулянта. Концентрацию флокулянта в дисперсии рассчитывали по отношению к твердой фазе. После введения раствора флокулянта дисперсию десятикратно перемешивали дисковой мешалкой с отверстиями. Скорость осаждения определяли по времени изменения границы раздела между осветленной и концентрированной фазой дисперсии.

Вязкость растворов полимеров измеряли в стеклянном вискозиметре Оствальда–Пинкевича ($d = 1,5 \text{ мм}$) при $T = (25 \pm 0,2) \text{ }^\circ\text{C}$. По экспериментальным данным определяли характеристическую вязкость $[\eta]$, по формуле (1) – сегмент Куна (L_c). Параметр L_c рассчитывали для концентраций флокулянтов ниже концентрации кроссовера (C^*), т. е. для случая, когда макромолекулы в растворе движутся независимо друг от друга [10].

$$L_c = \frac{0,33\mu}{b\Phi\sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)} \cdot \frac{[\eta]}{V_k^{1/3}}, \quad (1)$$

где μ – молярная масса мономерного звена акриламидного полимера, кг/моль; $b = 1,54 \cdot 10^{-10}$ – длина связи C–C в основной цепи макромолекулы, м; $\varphi = 109^\circ$ – валентный угол между ковалентными связями основной цепи; V_k – объем макромолекулярного клубка, м^3 [11].

Измерение размеров флокул проводили в разбавленных суспензиях с низким содержанием дисперсной фазы (0,5 мас.%), при концентрации флокулянта 0,2 % [8]. Авторы [12] предложили рассматривать оседание флокул как дискретных частиц и рассчитывать их плотность, используя модифицированное уравнение Стокса. Принимая во внимание сферичность флокул, равную 0,8, и то, что флокулы оседают в ламинарном режиме, эффективная плотность флокулы (г/см^3) была рассчитана по следующей формуле:

$$\rho = \frac{135\mu_w V_s}{4gd_f^2}, \quad (2)$$

где d_f – диаметр флокул, см; V_s – скорость оседания частиц, см/с; μ_w – динамическая вязкость среды $\text{Н} \cdot \text{с/м}^2$; g – ускорение свободного падения.

Результаты исследований и их обсуждение. Скорость осаждения глины, как видно из рис. 1, с увеличением концентрации полимера возрастает, достигает максимального значения и далее не меняется. Чем выше содержание твердой фазы в дисперсии, тем больше крутизна подъема кривой $V(C)$ и выше скорость агрегации. Наиболее низкая скорость осаждения наблюдается при введении катионного полиэлектролита, высокая – в случае ПА.

В некоторых работах исследователи указывают [6, 7], что зависимость скорости осаждения от концентрации флокулянта проходит через максимум, т. е. после достижения некоторой концентрации флокулянта система стабилизируется. Снижение скорости осаждения и стабилизацию дисперсии с увеличением количества полимера объясняют тем, что макромолекулы, адсорбированные на частицах дисперсной фазы, образуют плотный защитный слой, препятствующий

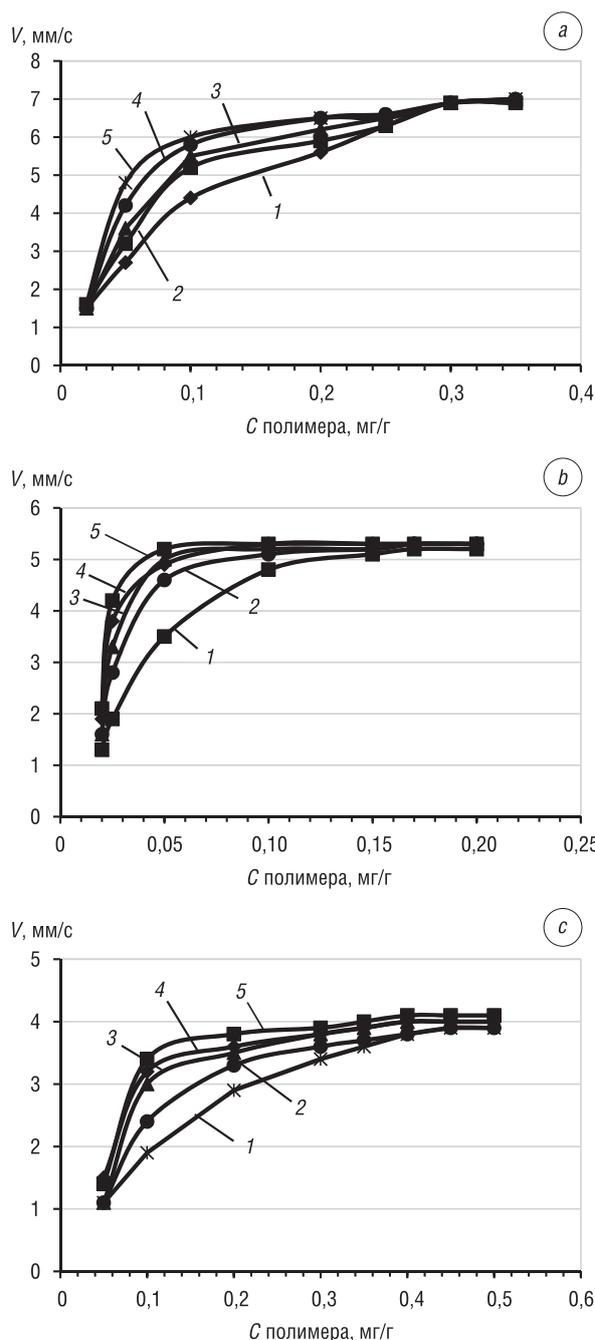


Рис. 1. Скорость осаждения глины в глинисто-солевой дисперсии при введении ПА (а), AC_{10} (б) и KC_{10} (в) в зависимости от ее концентрации, г/л: 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40; 5 – 50

Fig. 1. Sedimentation rate of clay in clay-saline dispersion using PA (a), AC_{10} (b) and CC_{10} (c) depending on its concentration, g/L: 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40; 5 – 50

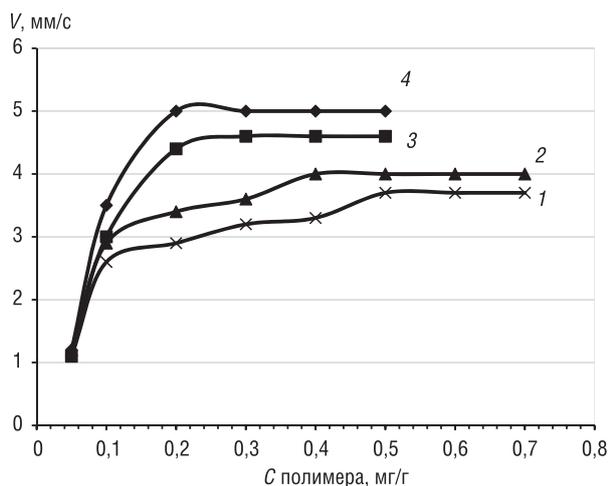


Рис. 2. Скорость осаждения глины в глинисто-солевой дисперсии (концентрация твердой фазы 40 г/л) при введении полиэлектролитов: 1 – KC_{40} , 2 – KC_{20} , 3 – AC_{40} , 4 – AC_{20}
 Fig. 2. Sedimentation rate of clay in clay-saline dispersion (concentration of the solid phase 40 g/L) using polyelectrolytes: 1 – CC_{40} , 2 – CC_{20} , 3 – AC_{40} , 4 – AC_{20}

на высокая скорость осаждения. Во втором случае (концентрация твердой фазы около 40 г/л) для эффективного отделения жидкости необходима, кроме агрегации дисперсной фазы, определенная структура осадка. Поскольку резкий рост скорости осаждения наблюдается в достаточно узком интервале изменения концентрации полимера, мы изучили поведение разбавленной и концентрированной дисперсии глины (10 и 40 г/л соответственно) в области низких концентраций полимера, чтобы найти область начала флокуляции. Скорость осаждения глины без добавок полимера очень низкая, при низких концентрациях полимера (0,01–0,02 мг/г глины) время осаждения составляет 80–90 с. Эксперименты по осаждению в этом интервале концентраций полимеров проводили не менее трех раз и усредняли результаты измерений, отличающиеся не более чем на 2 с.

Как видно из рис. 3, в дисперсии с содержанием твердой фазы 10 г/л при введении полимера в количестве около 0,01 мг/г время осаждения скачкообразно уменьшается на 20–40 с.

Максимальное изменение скорости осаждения наблюдается для ПА, для полиэлектролитов время осаждения уменьшается в 1,2–1,8 раза. В дисперсии с содержанием глины 40 г/л время

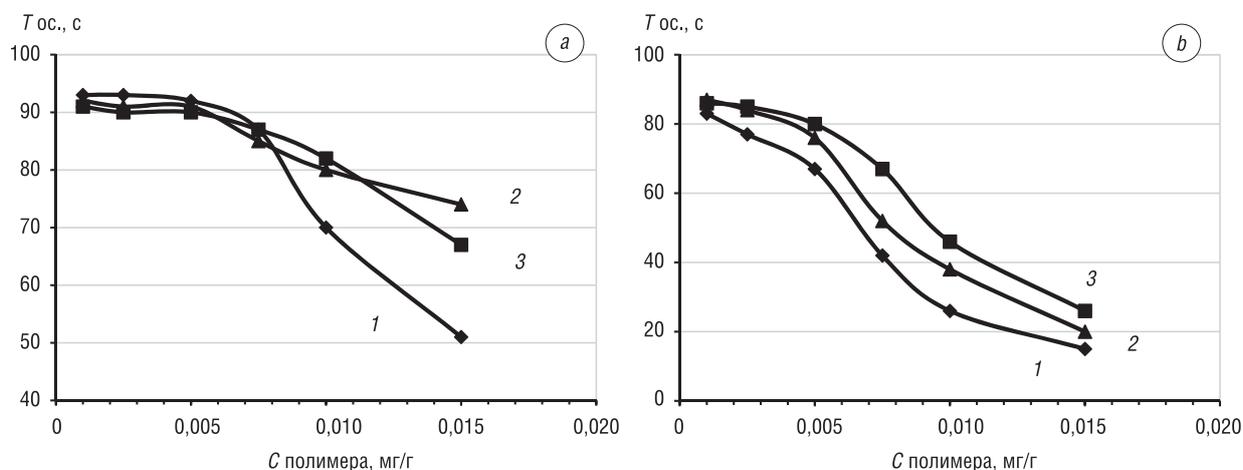


Рис. 3. Время осаждения глины в глинисто-солевой дисперсии с содержанием твердой фазы 10 г/л (a) и 40 г/л (b) при введении флокулянта: 1 – ПА, 2 – AC_{10} , 3 – KC_{10}

Fig. 3. Clay sedimentation time in clay-saline dispersion with a solid content of 10 g/L (a) and 40 g/L (b) using flocculant: 1 – ПА, 2 – AC_{10} , 3 – CC_{10}

агрегации частиц и образованию флокул [7]. В исследуемой системе скорость осаждения глинисто-солевой дисперсии не зависит от концентрации введенного полимера при его содержании выше 0,2 мг/г глины для анионных сополимеров акриламида и более 0,4 мг/г глины для КС (рис. 1).

Значения максимальной скорости осаждения глины анионными и катионными сополимерами с разным количеством ионогенных групп близки (рис. 2), что можно объяснить практически одинаковыми размерами клубков макромолекул в солевых растворах, рассчитанными нами по данным вискозиметрии.

В условиях калийного производства флокуляция глины проводится на двух стадиях технологического процесса – при концентрировании (сгущение) и фазовом разделении (обезвоживание) глинисто-солевой суспензии. В первом случае (концентрация твердой фазы около 10 г/л) жидкая фаза не отделяется и важ-

осаждения уменьшается при более низкой концентрации полимера (менее 0,005 мг/г), максимально для ПА, менее всего – для катионного полиэлектролита. Уменьшение времени осаждения глины в несколько раз свидетельствует о взаимодействии молекул полимера, адсорбированных на поверхности частиц. Флокулирующая способность полимеров в солевой дисперсии глины убывает в следующем порядке: ПА → АС₁₀ → АС₂₀ → АС₄₀ → КС₁₀ → КС₂₀ → КС₄₀.

Эффективность флокуляции солевой дисперсии глины (содержание твердой фазы 40 г/л) возрастает в среднем на 20 % при поочередном добавлении флокулянта (в две стадии) по сравнению с однократным введением полимеров (рис. 4). По-видимому, режим последовательного введения флокулянта влияет на процесс образования адсорбционного слоя на поверхности частиц и его строение, приводит к формированию более плотного осадка глины по сравнению с однократным введением (таблица).

Флокуляция низкоконцентрированной дисперсии глины (содержание глины 10 г/л) при введении полимера в две стадии протекает аналогично процессу для дисперсии с более высоким содержанием твердой фазы (40 г/л): скорость осаждения возрастает в среднем на 15 % и практически не зависит от количества полимера, добавленного на первой и второй стадиях.

Скорость осаждения увеличивается при введении на первой стадии катионного, затем анионного полиэлектролитов с одинаковым содержанием ионогенных групп (10 %): экспериментальные данные для всех соотношений компонентов в такой смеси превышают аддитивные (рис. 5). Рассчитанное среднее отклонение значений скорости осаждения максимально для соотношения компонентов в смеси 1 : 1 и составляет 50 %.

Изменение последовательности введения полиэлектролитов (на первой стадии анионный, затем катионный полиэлектролит) ухудшает эффективность флокуляции: отклонение от аддитивных значений в таком варианте составляет 22,6 %. Поочередное введение полиакриламида, затем катионного или анионного сополимера акриламида практически не увеличивает скорость осаждения глины по сравнению с двукратным введением отдельных полимеров. Замена КС₁₀ в первом слое на полиэлектролит с большим содержанием катионных групп (КС₂₀ или КС₄₀) приводит

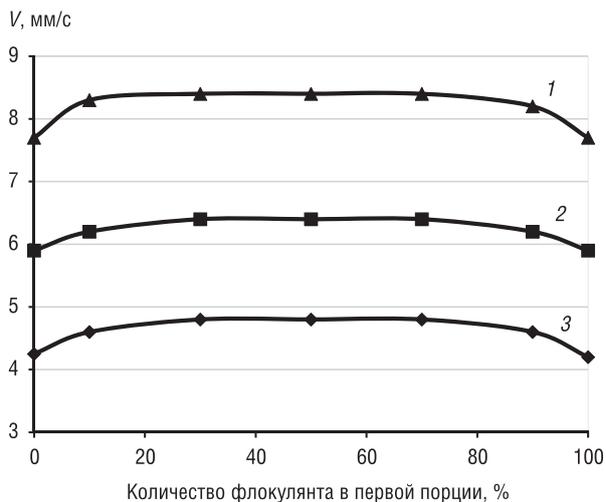


Рис. 4. Скорость осаждения глины в солевой дисперсии при последовательном введении флокулянтов ($C_{пол} = 0,12$ мг/г глины): 1 – ПА; 2 – АС₁₀; 3 – КС₁₀

Fig. 4. Clay sedimentation rate in salt dispersion using sequential dosing of flocculants ($C_{polymer} = 0.12$ mg/g clay): 1 – PA; 2 – АС₁₀; 3 – КС₁₀

Скорость осаждения и высота осадка глины при однократном и поочередном (двукратном, равными порциями) введении флокулянтов (концентрация полимера 0,12 мг/г)

Sedimentation rate and height of clay sediment with single and alternate (double, equal portions) dosing of flocculants (polymer concentration 0.12 mg / g)

| Флокулянт | Скорость осаждения, мм/с | | Высота осадка, мм | |
|------------------|--------------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | Однократно | Последовательно | Однократно | Последовательно |
| ПА | 7,0 | 8,4 | 25 | 23 |
| КС ₁₀ | 4,0 | 4,9 | 27 | 25 |
| АС ₁₀ | 5,3 | 6,4 | 28 | 26 |

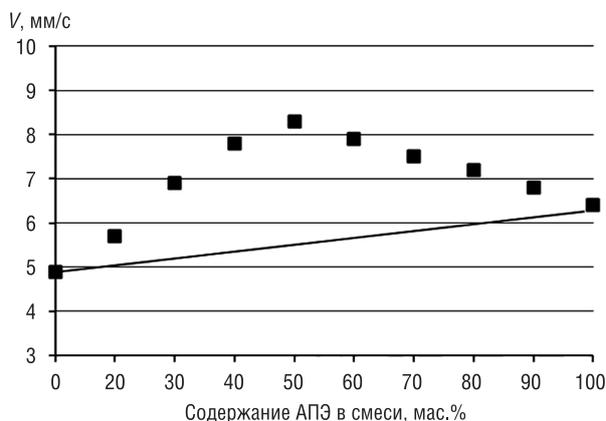


Рис. 5. Зависимость скорости осаждения глины при поочередном введении КС₁₀ и АС₁₀: точки – экспериментальные данные

Fig. 5. Clay sedimentation rate vs. dose of polymer using alternate dosing of КС₁₀ and АС₁₀: points show experimental data



Рис. 6. Изображение флокул каолина, полученных в системе с ПА (двукратное увеличение)

Fig. 6. Image of kaolin flocs obtained in system with PA (double magnification)

к уменьшению скорости осаждения. Синергетический эффект флокуляции сохраняется, так же как и в случае с подложкой из KC_{10} , но уменьшается с 50 до 37 и 30 % соответственно.

Флокуляция солевой дисперсии глины при прочих одинаковых условиях зависит от способа приготовления растворов флокулянтов. Растворы полимеров, приготовленные с использованием концентрированных солевых растворов хлоридов калия и натрия, состав которых соответствует составу жидкой фазы солевой дисперсии, обеспечивают более высокую эффективность флокуляции по сравнению с растворами полимеров, приготовленными на воде. Полученные результаты объясняются различием конформационного состояния макромолекул: при растворении полимеров в солевых растворах эффективный объем и гидродинамический радиус макромолекул больше, чем в воде, что способствует адсорбции макромолекул на частицах глины и улучшает флокуляцию [10].

Плотность образующихся в солевой дисперсии флокул влияет на скорость осаждения. На рис. 6 приведено изображение каолиновых флокул, которые были получены в глинисто-солевых дисперсиях с содержанием дисперсной фазы 0,5 мас.% (концентрация полимера 0,2 %). В дисперсиях хлорида натрия размер флокул (см) составил 0,26; 0,28; 0,32; в дисперсиях хлорида калия – 0,22; 0,24; 0,32 соответственно для ПА, AC_{20} и AC_{40} .

На рис. 7 приведены показатели плотности флокул в зависимости от длины сегмента Куна (L_c), который характеризует подвижность звеньев полимерной цепи. Полимеры с данным показателем менее 10 нм относятся к гибкоцепным [9]. Как следует из рис. 7, макромолекулы полимеров в растворах хлоридов натрия и калия можно отнести к гибкоцепным полимерам. Снижение гибкости полимерной цепи уменьшает количество контактов групп полимера с частицами каолина, что приводит к уменьшению плотности флокул.

Флокулирующая способность неионогенного полимера (ПА) в отношении солевой дисперсии глины выше по сравнению с анионными сополимерами. Плотность флокул выше в растворах хлорида калия, чем хлорида натрия, а также при флокуляции неионогенным флокулянтom и уменьшается с увеличением ионогенных групп в макромолекулах АС. Высокая концентрация

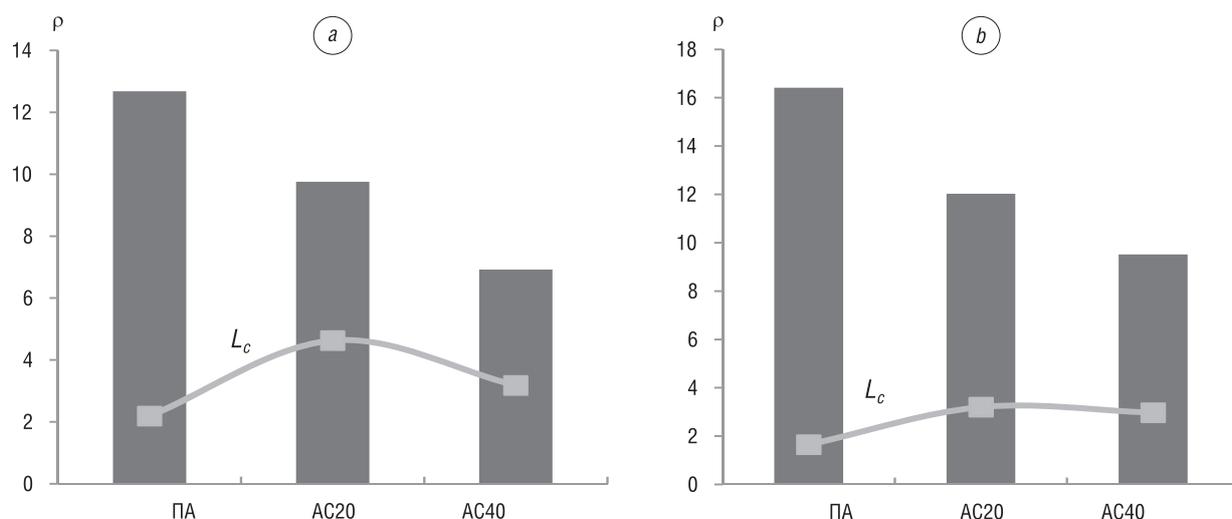


Рис. 7. Плотность флокул (ρ , $g/cm^3 \cdot 10^3$) в зависимости от показателя гибкости полимера (L_c , нм). Дисперсионная среда и растворитель для полимеров (3,4 моль/л): *a* – хлорид натрия; *b* – хлорид калия

Fig. 7. The density of flocs (ρ , $g/cm^3 \cdot 10^3$) depending on the index of flexibility of the polymer (L_c , nm). Dispersion medium and solvent for polymers (3.4 mol/L): *a* – sodium chloride; *b* – potassium chloride

соли в дисперсии приводит к экранированию поверхностных зарядов макромолекул сополимеров. Вероятно, в случае AC_{40} электростатическое отталкивание между карбоксилатными группами и каолином больше по сравнению с AC_{20} , макромолекулы более развернуты и лучше взаимодействуют с частицами каолина, что подтверждается увеличением размеров флокул. При увеличении размеров флокул и уменьшении их плотности скорость осаждения уменьшается, что приводит к снижению флокулирующей способности.

Заклучение. Таким образом, флокулирующее действие полиакриламидных (со)полимеров в солевой дисперсии глины зависит от типа флокулянта, количества полимера; содержания глины в дисперсии (в более концентрированных дисперсиях глины флокуляция начинается при более низком содержании флокулянта и происходит в узком интервале концентраций полимера). Скорость осаждения увеличивается на 15–20 % при добавлении одного и того же флокулянта в две стадии и в 1,5 раза при поочередном введении разнозарядных (катионного, затем анионного) полиэлектролитов. Плотность флокул выше в растворах хлорида калия, чем хлорида натрия, а также при флокуляции неионогенным флокулянтом и уменьшается с увеличением ионогенных групп в макромолекулах сополимеров. Полученные результаты использованы для обоснования концентрации, точек ввода и режимов дозирования флокулянтов в процессах сгущения и обезвоживания глинисто-солевых дисперсий на ОАО «Беларуськалий».

Список использованных источников

1. Печковский, В. В. Технология калийных удобрений / В. В. Печковский, Х. М. Александрович, Г. Ф. Пинаев ; под ред. В. В. Печковского. – Минск : Вышэйш. школа, 1968. – 264 с.
2. Технология флотационного обогащения калийных руд / Н. Н. Тетерина [и др.] ; под ред. Н. Н. Тетериной. – Пермь : Соликам. типогр., 2002. – 484 с.
3. Чумаков, Л. С. Охрана природы / Л. С. Чумаков. – Минск : Совр. шк., 2003. – 300 с.
4. Wei-ying, L. Concerning methods of coagulation and flocculation in water-treatment / L. Wei-ying // *Ind. Water and Wastewater*. – 2001. – Vol. 32, № 2. – P. 37–39.
5. Куренков, В. Ф. Полиакриламидные флокулянты / В. Ф. Куренков // *Соросов. образоват. журн.* – 1997. – № 7. – С. 57–63.
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, № 5. – С. 552–556.
7. Кинетика и механизм флокуляции суспензий бентонита и каолина полиэлектролитами и прочность образующихся флокул / Ш. Барань [и др.] // *Коллоид. журн.* – 2009. – Т. 71, № 3. – С. 291–298.
8. Влияние анионных и катионных флокулянтов Праестолов на флокуляцию суспензий каолина / В. Ф. Куренков [и др.] // *ЖПХ*. – 1999. – Т. 72, № 11. – С. 1892–1896.
9. Баран, А. А. Флокуляция суспензий каолина катионными полиэлектролитами / А. А. Баран, Д. Грегори // *Коллоид. журн.* – 1996. – Т. 58, № 1. – С. 13–18.
10. Реологические свойства и концентрационные переходы в водно-солевых растворах полиакриламида и анионных (со)полимеров акриламида / Д. Н. Давлюд [и др.] // *Докл. Нац. акад. наук Беларуси*. – 2017. – Т. 61, № 4. – С. 69–76.
11. Манжай, В. Н. Новые возможности турбореометрического метода исследования разбавленных растворов полимеров / В. Н. Манжай, Н. Л. Климова // *Известия Томского политехнического университета*. – 2006. – Т. 309, № 6. – С. 85–87.
12. Tambo, N. Physical Aspects of Flocculation Process II. Contact Flocculation / N. Tambo, Y. Watanabe // *Water Research*. – 1979. – Vol. 13, N. 5. – P. 441–448. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(79\)90036-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(79)90036-8)

References

1. Pechkovskii V. V., Aleksandrovich H. M., Pinaev G. F. *Potassium Fertilizer Technology*. Minsk, Vysheishaya shkola Publ., 1968, 264 p. (in Russian).
2. Kirichenko L. N., Sabirov R. H., Skvirskii L. Ya., Teterina N. N. *Potash ore concentration flotation technology*. Perm, Solikamsk Print., 2002. 484 p. (in Russian).
3. Chumakov L. S. *Nature Preservation*. Minsk, Sovremennaya shkola Publ., 2003. 300 p. (in Russian).
4. Wei-ying L. Concerning methods of coagulation and flocculation in water-treatment. *Ind. Water and Wastewater*, 2001, vol. 32, no. 2. pp. 37–39.
5. Kurenkov V. F. Polyacrylamide flocculants. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal = Soros Educational Journal*, 1997, no. 7. pp. 57–63 (in Russian).
6. Vorob'ev P. D., Krut'ko N. P., Vorob'eva 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. *Colloid Journal*, 2007, vol. 69, no 5, pp. 552–556. <https://doi.org/10.1134/s1061933x07050031>

7. Baran' Sh., Mesarosh R., Kozakova I., Shkvarla I. Kinetics and mechanism of flocculation of suspensions of bentonite and kaolin by polyelectrolytes and the strength of the floccules formed. *Colloid Journal*, 2009, vol. 71, no. 3, pp. 285–292. <https://doi.org/10.1134/s1061933x09030016>

8. Kurenkov V. F., Snigirev S. V., Len'ko O. A., Churikov F. I. The influence of anionic and cationic Flocculants Praestols on the flocculation of kaolin suspensions. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 1999, vol. 72, no. 11, pp. 1892–1896 (in Russian).

9. Baran A. A., Gregori D. Flocculation of kaolin suspensions with cationic polyelectrolytes. *Colloid Journal*, 1996, vol. 58, no. 1, pp. 13–18 (in Russian).

10. Davlyud D. N., Vorobieva E. V., Layeuskaya E. V., Krutko N. P., Vorobiev P. D., Cherednichenko D. V. Rheological properties and concentration cross-overs of polyacrylamide and anionic (co)polymers of acrilamide in aqueous-salt solutions. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2017, vol. 61, no. 4, pp. 69–76 (in Russian)

11. Manzhay V. N., Klimova N. L. New features of the turbo method for studying dilute polymer solutions. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2006, vol. 309, no. 6, pp. 85–87 (in Russian).

12. Tambo N., Watanabe Y. Physical Aspects of Flocculation Process II. Contact Flocculation. *Water Research*, 1979, vol. 13, no. 5, pp. 441–448. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(79\)90036-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(79)90036-8)

Информация об авторах

Давлюд Дарья Николаевна – науч. сотрудник, Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: davlud.d@tut.by

Воробьев Павел Дмитриевич – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник, Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). e-mail: pdvc@tut.by

Чередниченко Денис Викторович – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник, Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). e-mail: cherednichenko_dv@tut.by

Крутько Николай Павлович – академик, д-р хим. наук, профессор, ген. директор ГНПО «Химические продукты и технологии» (ул. Сурганова 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). e-mail: krutko@igic.bas-net.by

Лаевская Елена Васильевна – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). e-mail: layeuskaya@gmail.com

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

Буча Светлана Васильевна – мл. науч. сотрудник, Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). e-mail: bucha1003@gmail.com

Information about the authors

Daria N. Davlyud – Researcher, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: davlud.d@tut.by

Pavel D. Vorobiev – Ph. D. (Chemistry), Leading Researcher, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pdvc@tut.by

Denis V. Cherednichenko – Ph. D. (Chemistry), Leading Researcher, Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: cherednichenko_dv@tut.by

Nikolay P. Krutko – Academician, D. Sc. (Chemistry), Professor, Director General of the State Research and Production Association “Chemical Products and Technologies» (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: krutko@igic.bas-net.by

Elena V. Layeuskaya – Ph. D. (Engineering), Senior Researcher, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: layeuskaya@gmail.com

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

Sviatlana V. Bucha – Junior researcher, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bucha1003@gmail.com