

КАЛОИДНАЯ ХИМИЯ
COLLOIDAL CHEMISTRY

УДК 541.18.183
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-3-273-279>

Поступила в редакцию 25.05.2022
Received 25.05.2022

**П. Д. Воробьев, Н. П. Крутько, Д. В. Чередниченко, Е. В. Воробьева,
С. В. Буча, Ю. В. Липай**

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

**АДСОРБЦИОННЫЕ И ФЛОКУЛИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА
МОДИФИЦИРОВАННОГО ПОЛИАКРИЛАМИДА
В ВОДНЫХ ДИСПЕРСИЯХ КАОЛИНА**

Аннотация. Синтезирован катионный флокулянт с полимерной матрицей амидного типа путем модификации полиакриламида по реакции Манниха. Использование модифицированного полимера приводит к увеличению адсорбции полимера на частицах твердой фазы в водной дисперсии каолина, росту скорости осаждения каолина в 1,2–1,4 раза и позволяет расширить концентрационную область дестабилизации дисперсии по сравнению с полиакриламидом.

Ключевые слова: полиакриламид, модификация, реакция Манниха, адсорбция, флокуляция, катионный полиэлектролит

Для цитирования. Адсорбционные и флокулирующие свойства модифицированного полиакриламида в водных дисперсиях каолина / П. Д. Воробьев [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2022. – Т. 58, № 3. – С. 273–279. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-3-273-279>

P. D. Vorobiev, N. P. Krutko, D. V. Cherednichenko, E. V. Vorobieva, S. V. Bucha, Yu. V. Lipai

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

**ADSORPTION AND FLOCCULATION PROPERTIES OF MODIFIED POLYACRYLAMIDE
IN WATER DISPERSIONS OF KAOLIN**

Abstract. A cationic flocculant with an amide-type polymer matrix was synthesized by modifying polyacrylamide according to the Mannich reaction. The use of a modified polymer leads to an increase in the adsorption of the polymer on solid phase particles in an aqueous dispersion of kaolin, an increase in the rate of kaolin sedimentation by a factor of 1.2–1.4, and makes it possible to expand the concentration range of dispersion destabilization compared to polyacrylamide.

Keywords: polyacrylamide, modification, Mannich reaction, adsorption, flocculation, cationic polyelectrolyte

For citation. Vorobiev P. D., Krutko N. P., Cherednichenko D. V., Vorobieva E. V., Bucha S. V., Lipai Yu. V. Adsorption and flocculation properties of modified polyacrylamide in water dispersions of kaolin. *Vesti Natsyyanal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya khimichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2022, vol. 58, no. 3, pp. 273–279 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-3-273-279>

Введение. Высокомолекулярные водорастворимые соединения – флокулянты широко используют для решения важных экологических проблем, связанных с очисткой природных и сточных вод от загрязнений. Применение флокулянтов в водоочистке позволяет увеличить скорость осветления суспензий, улучшить фильтрование и качество фильтрата, уменьшить содержание мелкодисперсной фазы, что повышает производительность осветлителей, фильтров и отстаивающих [1–3].

Для решения практических задач, связанных с флокуляцией, часто используют высокомолекулярные соединения с амидной полимерной матрицей – полиакриламид (ПАА) и сополимеры акриламида [4, 5]. В процессе очистки воды для флокуляции и осаждения минеральных дисперсных загрязнений, которые представлены в основном каолиновыми и монтмориллонитовыми частицами с размером до 100 мкм и отрицательным зарядом, используют катионные полиэлек-

тролиты, которые за счет электростатического взаимодействия хорошо адсорбируются на отрицательно заряженных поверхностях дисперсных частиц [4, 6].

Одним из способов получения катионного флокулянта с полимерной матрицей амидного варианта является модификация полиакриламида по реакции Манниха. В общем случае при обработке ПАА формальдегидом и вторичным амином в щелочной среде образуется аминометилированный полимер (основание Манниха), который переводят в солевую форму нейтрализацией кислотами или алкилирующими агентами (например, алкилгалогенидами, диметилсульфатом, эпигалогенгидрином). В результате получают поликатионит, пригодный для флокуляции отрицательно заряженных дисперсий¹ [7].

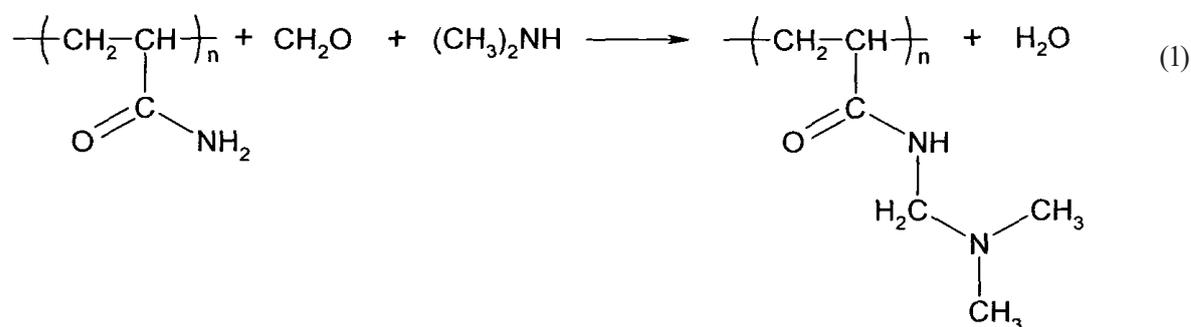
В ряде публикаций [8, 9] отмечено улучшение флокулирующей способности модифицированного ПАА по сравнению с исходным полимером и изучено влияние его химического состава на флокулирующую способность в отношении минеральных дисперсий. Показано, что разветвленные алкилзаместители (трибутиламин, третбутиламин) в структуре аминирующих реагентов уменьшают флокуляцию дисперсий, тогда как увеличение молекулярной массы и степени замещенности амидных группировок в модифицированном полимере улучшают его флокулирующее действие.

Основной проблемой использования модифицированного по реакции Манниха полиакриламида является его склонность к гелеобразованию с течением времени вследствие сшивания полимера. В связи с этим предпочтительно модификацию полимера проводить в производственных условиях с возможностью достаточно быстрого применения. Поскольку в классическом варианте реакция Манниха происходит, как правило, в кислотных условиях, при термообработке, с выделением воды, реализация процесса модификации полимера на практике является достаточно сложной задачей.

Использование заранее синтезированного реагента для модификации полимера, в частности диметиламинометанола и *N,N'*-бис(диметиламинометил) мочевины, снимает ограничения классического варианта реакции Манниха и позволяет проведение модификации в некислотных и безводных условиях при комнатной температуре. В литературе практически нет данных о свойствах полученных таким способом флокулянтов и их поведении в дисперсных системах.

Цель настоящей работы – исследование адсорбционных и флокулирующих свойств модифицированного по реакции Манниха полиакриламида в водных дисперсиях каолина.

Экспериментальная часть. Для получения водорастворимого катионного полимера модификацией полиакриламида по реакции Манниха (1) использовали ПАА с молекулярной массой $1,1 \cdot 10^7$ D (производство «Solenis»). Синтез проводили в два этапа: смешиванием растворов диметиламина и формальдегида получали диметиламинометанол и далее реакцией с мочевиной – *N,N'*-бис(диметиламинометил) мочевиной. На втором этапе синтеза данный продукт использовали для модификации полиакриламида.



Водные растворы диметиламина с концентрацией 60 мас.% и формальдегида 36 мас.% смешивали в эквимольных количествах при температуре 20–25 °С, перемешивали в течение 30 мин, затем добавляли раствор мочевины с концентрацией 50 мас.% при мольном соотношении мочевины : диметиламин = 1:2, перемешивали при той же температуре в течение 1–3 ч. Степень пре-

¹ Способ получения флокулянта: пат. 11166 Респ. Беларусь: № а20060717 / А. А. Панкин, С. Ф. Якубовский; заявитель Полоцк. гос. ун-т; заявл. 12.07.06; опубл. 30.10.08 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 1. – С. 17.

вращения реагентов в N,N'-бис(диметиламинометил) мочевины, определенную потенциометрическим титрованием соляной кислотой (1 М), составила 94,5 %.

Полиакриламид диспергировали в воде с добавлением N,N'-бис(диметиламинометил) мочевины (содержание в смеси ПАА 2,2 мас.%, модификатор 5,5 мас.%, вода – остальное) до растворения полимера и выдерживали в течение суток до завершения реакции. Степень превращения полимера в модифицированный полиакриламид (МПА) при указанных условиях синтеза, которую определяли потенциометрическим титрованием по общему содержанию аминов, составила 92 %.

Средняя молекулярная масса одного моля (осново-моль, осн-моль) мономерных единиц полимера, рассчитанная согласно [10], для ПАА составила 71; модифицированного полиакриламида (МПА) – 120.

Адсорбцию изучали в водной дисперсии, содержащей 1,0 г каолина (каталожный номер 18616, Мерс, Германия, плотность – 2,8 г/см³, удельная поверхность по низкотемпературной адсорбции азота – 15 м²/г) и 100 мл раствора с полимером (0,3–10,0 мг/л). Суспензию перемешивали в течение 4 ч и оставляли на 12 ч, затем центрифугировали при 5000 об/мин в течение 30 мин. В растворе по содержанию органического углерода определяли концентрацию оставшегося полимера. Параметры адсорбции (адсорбционную емкость адсорбента *E* и константу адсорбции *K*) находили используя линеаризованные изотермы адсорбции [10].

Вязкость растворов ПАА и МПА с концентрацией 0,07 моль/л измеряли в стеклянном вискозиметре Оствальда–Пинкевича при 20 ± 0,5 °С. Характеристическую вязкость $[\eta]$ определяли по графикам зависимости приведенной вязкости от концентрации раствора экстраполяцией к нулевой концентрации. Для подавления эффекта полиэлектролитного набухания использовали раствор хлорида калия (0,015–0,075 М). В этом случае концентрация компенсирующих противоионов в полимерной цепи не изменяется при разбавлении и зависимость приведенной вязкости от концентрации полимера носит линейный характер. Результаты вискозиметрических исследований использовали для расчета эффективного объема ($V_{эфф}$) макромолекул полимеров [11].

Для исследования флокуляции каолин оставляли на 4 ч в воде для набухания. Перед и после добавления раствора флокулянта суспензию перемешивали дисковой мешалкой с отверстиями путем ее вертикального перемещения в цилиндре объемом 250 мл между двумя метками на расстоянии 100 мм одна от другой, измеряли время перемещения границы раздела фаз с повторностью не менее трех раз с точностью ±0,5 с и рассчитывали скорость осаждения.

Методом дисперсионного анализа на фотометрическом седиментометре ФСХ-4 определяли среднеарифметический (средневзвешенный) диаметр d_n , среднеповерхностный диаметр d_s , Δ – разность плотностей твердой и жидкой фаз ($\rho_t - \rho_{ж}$) в условиях, когда отсутствует внешнее воздействие в виде перемешивания. В экспериментах флокулянты вводили в систему поочередно, равными порциями, по схеме двукратного дозирования. Концентрация дисперсной фазы – 20 г/л, полимера – 0,15 мг/г дисперсной фазы.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 представлены изотермы адсорбции ПАА и МПА из водных растворов на каолине. Адсорбция полимеров описывается изотермами «высокого сродства», которые характеризуются полным извлечением макромолекул из раствора при низких концентрациях и быстрым достижением адсорбционного насыщения (плато) – при высоких. Можно предположить, что в случае адсорбции МПА, имеющего заряд, противоположный заряду поверхности, доминирующим механизмом снижения устойчивости дисперсии и агрегирования частиц является компенсация поверх-

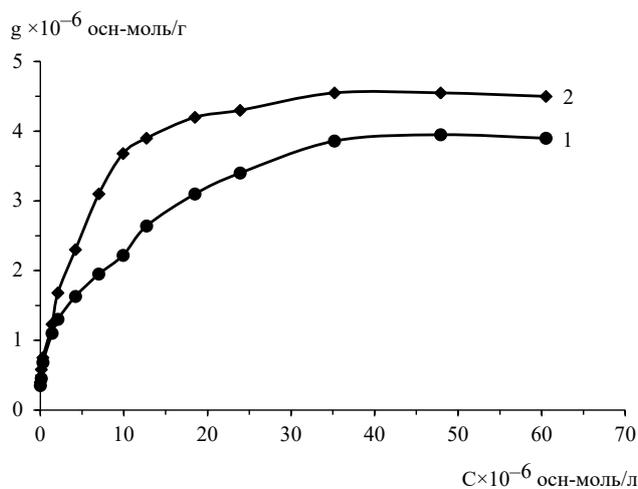


Рис. 1. Изотермы адсорбции на каолине из водных растворов ПАА (1) и МПА (2)

Fig. 1. Adsorption isotherms on kaolin from PAA (1) and MPA (2) aqueous solutions

ностного заряда, т. е. нейтрализационный механизм. В процессе адсорбции неионогенного ПАА адсорбированные макромолекулы размещаются на поверхности в виде непосредственно связанных с ней и обращенных в раствор сегментов полимерной цепи.

Как видно из рис. 1, максимальная адсорбция выше в случае с МПА по сравнению с ПАА. В области низких концентраций полимеров наблюдается более резкий подъем изотермы адсорбции для МПА по сравнению с неионогенным полимером. Параметры адсорбции полимеров из водных растворов на каолине, рассчитанные нами по линейаризованным изотермам адсорбции, – адсорбционная емкость и константа адсорбции – для модифицированного ПАА выше, чем для исходного полимера, что обусловлено большим числом контактов полимерной цепи с поверхностью.

На поверхности частиц дисперсной фазы формируется адсорбционный слой из макромолекул полимеров и флокулирующее действие полимеров в отношении частиц дисперсии зависит от структуры этого слоя. Учитывая, что макромолекулы не могут адсорбироваться на поверхности в полностью развернутом состоянии и прямое взаимодействие каждого мономерного звена с поверхностью невозможно, можно предположить, что в процессе адсорбции участвуют сегменты макромолекул, которые адсорбируются на небольшом количестве активных адсорбционных центров, расположенных, вероятно, на изломах пластинок частиц каолина. Адсорбционный полимерный слой условно может быть разделен на более плотный слой из непосредственно контактирующих с поверхностью полимерных звеньев и более рыхлый слой с постепенным уменьшением плотности звеньев полимерной цепи [12, 13]. Взаимодействие сегментов макромолекул, адсорбированных на разных частицах, и образование полимерных «мостиков» приводит к агрегации частиц и флокуляции дисперсии.

Скорость осаждения дисперсии каолина в системе с МПА выше в 1,2–1,4 раза по сравнению с ПАА в зависимости от концентрации флокулянта и дисперсной фазы (рис. 2). Зависимость скорости осаждения частиц от концентрации ПАА проходит через максимум и после достижения 0,3 мг/г уменьшается. Введение в систему МПА позволяет увеличить протяженность области дестабилизации дисперсии в зависимости от концентрации полимера.

Максимальная флокуляция частиц наступает при содержании полимера в дисперсии 0,15–0,35 мг/г твердой фазы, что в несколько раз меньше концентраций полимера, соответствующих максимальной адсорбции. Таким образом, флокуляция имеет место в условиях, далеких от полного насыщения поверхности, и начинается задолго до окончания формирования внешнего адсорбционного слоя на поверхности, особенно в дисперсиях с высокой концентрацией твердой фазы.

В дисперсии с более высоким содержанием твердой фазы флокуляция начинается при более низком содержании флокулянта (рис. 2). Можно предположить, что в разбавленных дисперсиях процессы формирования адсорбционных слоев и взаимодействие частиц через полимерные «мостики» происходят последовательно, а в концентрированных дисперсиях – одновременно.

Скорость осаждения водной дисперсии каолина (содержание твердой фазы 40 г/л) увеличивается на 18–20 % при добавлении флокулянта в две стадии по сравнению с однократным его введением (рис. 3). Вероятно, режим последовательного введения флокулянта влияет на процесс образования адсорбционного слоя и его строение. Молекулы флокулянта не адсорбируются на поверхности, так как активные центры уже заняты молекулами ранее введенного полимера. При двукратном введении полимера внешние по отношению к поверхности адсорбционные слои более плотные по сравнению

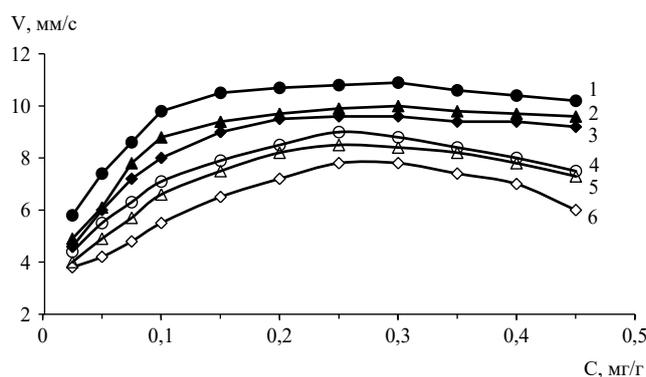


Рис. 2. Скорость осаждения водной дисперсии каолина в зависимости от концентрации флокулянта МПА (1–3) и ПАА (4–6). Концентрация твердой фазы, г/л: 1, 4 – 40; 2, 5 – 20; 3, 6 – 10

Fig. 2. Sedimentation rate of aqueous dispersion of kaolin as a function of the concentration of flocculant: MPA (1–3) and PAA (4–6). Solid phase concentration, g/L: 1, 4 – 40; 2, 5 – 20; 3, 6 – 10

с однократным введением, что способствует формированию более плотных флокул меньшего размера.

В системе с МПА разность плотностей твердой и жидкой фаз выше, а размер частиц дисперсной фазы меньше по сравнению с ПАА (табл. 1). Образование флокул меньшего размера, но большей плотности приводит к увеличению скорости осаждения дисперсии. При двукратном введении полимеров в водную дисперсию каолина разность плотностей твердой и жидкой фаз увеличивается, размер частиц уменьшается, скорость осаждения возрастает, однако в системе с неионогенным полимером эти эффекты менее заметны.

Наблюдаемые изменения плотности и размера флокул (табл. 1) обусловлены особенностями структуры адсорбционных слоев неионогенного ПАА и полиэлектролита МПА. В системе с ПАА преобладают диполь-дипольные взаимодействия молекул полимеров с поверхностью каолина и между собой. Это следует из того факта, что скорость осаждения и характеристики флокул имеют близкие величины при различных способах введения флокулянта в дисперсию. В случае модифицированного ПАА на поверхности частиц дисперсной фазы формируется слой из адсорбированных катионных полимерных цепей с большим числом контактов с поверхностью, в которых межмолекулярные взаимодействия играют существенную роль и доминирующим механизмом снижения устойчивости дисперсии и агрегирования частиц является нейтрализация (компенсация) поверхностного заряда.

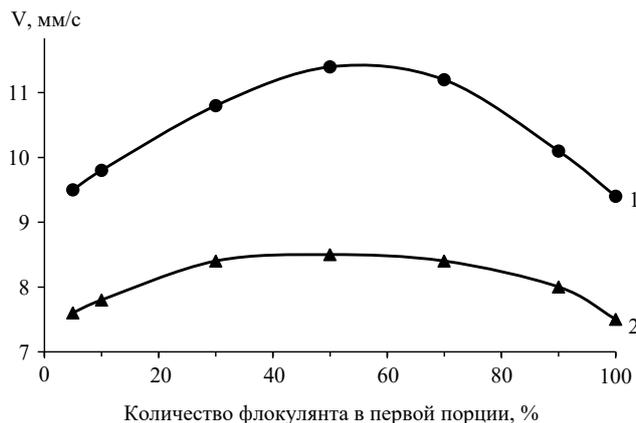


Рис. 3. Скорость осаждения водной дисперсии каолина при двукратном введении МПА (1) и ПАА (2), $C_{пол} = 0,15$ мг/г каолина

Fig. 3. Sedimentation rate of water dispersion of kaolin at consequent double dosing of MPA (1) and PAA (2), $C_{pol} = 0.15$ mg/g kaolin

Таблица 1. Характеристики флокул, образовавшихся в водной дисперсии каолина (концентрация твердой фазы 20 г/л) при добавлении полимеров

Table 1. Characteristics of floccules formed in an aqueous dispersion of kaolin (solid phase concentration 20 g/L) with the addition of polymers

Полимер	Характеристики флокул		
	среднеарифметический диаметр, d_n , м	среднеповерхностный диаметр, d_s , м	Δ – разность плотностей твердой и жидкой фаз ($\rho_t - \rho_{ж}$), г/см ³
МПА	$0,3 \times 10^{-4}$	$0,45 \times 10^{-4}$	1,25
ПАА	$0,4 \times 10^{-4}$	$0,6 \times 10^{-4}$	1,10
МПА+МПА	$0,2 \times 10^{-4}$	$0,3 \times 10^{-4}$	1,40
ПАА+ПАА	$0,35 \times 10^{-4}$	$0,5 \times 10^{-4}$	1,15

Из табл. 2, в которой представлены вискозиметрические характеристики растворов ПАА и МПА при концентрации хлорида калия 0,015–0,075 М, видно, что при низкой концентрации соли (0,015 М) приведенная вязкость растворов полимеров возрастает при переходе от неионогенного полимера (ПАА) к полиэлектролиту (МПА); при этом значения $[\eta]$ полимеров близки. В более концентрированном растворе соли (0,05; 0,075 М) характеристическая вязкость ПАА в 2,4 раза выше по сравнению с МПА. Эффективный объем макромолекул МПА в растворе уменьшается с увеличением концентрации соли от 0,015 М до 0,05 М. В растворе с концентрацией 0,015 М данный показатель выше для МПА, чем ПАА.

Адсорбционные и флокулирующие свойства модифицированного ПАА в водной дисперсии каолина определяются в основном двумя факторами: значительными размерами макромолекулярного клубка в водном растворе (эффективный объем макромолекул МПА в растворе КСl 0,015 М в 2,5 раза выше по сравнению с ПАА) и высокой адсорбционной способностью по отношению

Таблица 2. Вискозиметрические характеристики растворов ПАА и МПА (0,07 моль/л)

Table 2. Viscometric characteristics of PAA and MPA solutions (0.07 mol/L)

Полимер	Концентрация КС1, М	Приведенная вязкость $\eta_{пр}$, дл/г	Характеристическая вязкость $[\eta]$, дл/г	Эффективный объем $V_{эфф} \cdot 10^{16}$ макромолекул в растворе, $дм^3$
ПАА	0,015	10,1	7,0	0,45
	0,05	8,2	6,3	0,40
	0,075	8,2	6,3	0,40
МПА	0,015	30,0	7,3	0,99
	0,05	10,5	2,6	0,43
	0,075	9,9	2,7	0,40

к отрицательно заряженной поверхности частиц каолина. Процесс флокуляции дисперсии реализуется через следующие последовательные стадии: адсорбция полимеров из растворов на поверхности частиц дисперсной фазы; взаимодействие молекул полимера, адсорбированных на разных частицах; контакт частиц глины через слои полимерных клубков и образование флокул. Увеличение адсорбции МПА и эффективного объема макромолекул в водных растворах по сравнению с ПАА приводит к улучшению флокуляции дисперсии каолина МПА и образованию более плотных флокул меньшего размера.

Выводы. Синтезирован катионный флокулянт с полимерной матрицей амидного типа путем модификации полиакриламида по реакции Манниха. Обогащение полиакриламида функциональными группами катионного типа и изменение его молекулярной структуры приводит к увеличению адсорбции полимера на частицах твердой фазы и улучшению флокуляции. Использование модифицированного полимера позволяет увеличить скорость осаждения каолина в 1,2–1,4 раза и расширить концентрационную область дестабилизации дисперсии по сравнению с ПАА.

Список использованных источников

1. Качалова, Г. С. Использование современных коагулянтов и флокулянтов в процессе коагулирования сточных вод / Г. С. Качалова // *Международ. журн. прикл. и фундамент. исследований.* – 2018. – № 2. – С. 23–27.
2. Effects of various fillers on anionic polyacrylamide systems for treating kaolin suspensions / A. Ariffin [et al.] // *Colloids and Surfaces, A: Physicochemical and Engineering Aspects.* – 2014. – Vol. 441. – P. 306–311. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.09.021>
3. Xiao, H. Organo-modified cationic silica nanoparticles/anionic polymer as flocculants / H. Xiao, N. Cezar // *Journal of Colloid and Interface Science.* – 2003. – Vol. 267, N 2. – P. 343–351. [https://doi.org/10.1016/s0021-9797\(03\)00716-1](https://doi.org/10.1016/s0021-9797(03)00716-1)
4. Куренков, В. Ф. Применение полиакриламидных флокулянтов для водоочистки / В. Ф. Куренков, Н. Г. Hartan, Ф. И. Лобанов // *Химия и компьютерное моделирование.* Бутлеров. сообщ. – 2002. – № 11. – С. 31–40.
5. Гандурина, Л. В. Очистка сточных вод с применением синтетических флокулянтов / Л. В. Гандурина. – М.: ДАР/ВОДГЕО, 2007. – 198 с.
6. Rabiee, A. A survey on cationic polyelectrolytes and their applications: acrylamide derivatives / A. Rabiee, A. Ershad-Langroudi, M. E. Zeynali // *Reviews in Chemical Engineering.* – 2015. – Vol. 31, N 3. – P. 239–261. <https://doi.org/10.1515/revce-2014-0056>
7. Байбурдов, Т. А. Синтез, химические и физико-химические свойства полимеров акриламида: учеб. пособие / Т. А. Байбурдов, А. Б. Шиповская. – Саратов: Саратовский источник, 2019. – 94 с.
8. Тавризов, О. А. Получение водорастворимого катионного полимера полимераналогичным превращением полиакриламида по реакции Манниха / О. А. Тавризов, Ю. Вейцер, Ю. А. Клячко // *Журн. Всесоюз. хим. общ-ва.* – 1986. – Т. 31, № 1. – С. 110–112.
9. Исследование флокуляционных свойств полиэлектролитов, полученных полимераналогичным превращением полиакриламида / С. Ф. Якубовский [и др.] // *Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки.* – 2009. – № 9. – С. 134–139.
10. 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.
11. Практикум по высокомолекулярным соединениям / под ред. В. А. Кабанова. – М.: Химия, 1985. – 224 с.
12. Hesselink, F. Th. On the theory of polyelectrolyte adsorption: The effect on adsorption behavior of the electrostatic contribution to the adsorption free energy / F. Th. Hesselink // *Journal of Colloid and Interface Science.* – 1977. – Vol. 60, N 3. – P. 448–466. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(77\)90309-5](https://doi.org/10.1016/0021-9797(77)90309-5)
13. Tadros, T. Interaction forces between particles containing grafted or adsorbed polymer layers / T. Tadros // *Advances in Colloid and Interface Science.* – 2003. – Vol. 104, N 1–3. – P. 191–226. [https://doi.org/10.1016/s0001-8686\(03\)00042-3](https://doi.org/10.1016/s0001-8686(03)00042-3)

References

1. Kachalova G. S. Use of modern coagulants and flocculants in the process of waste water coagulation. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy = International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2018, no. 2, pp. 23–27 (in Russian).
2. Ariffin E. A., Musa M. S., Othman M. B. H., Razali M., Yunus F. Effects of various fillers on anionic polyacrylamide systems for treating kaolin suspensions. *Colloids and Surfaces, A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2014, vol. 441, pp. 306–311. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.09.021>
3. Xiao H., Cezar N. Organo-modified cationic silica nanoparticles/anionic polymer as flocculants. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2003, vol. 267, no. 2, pp. 343–351. [https://doi.org/10.1016/s0021-9797\(03\)00716-1](https://doi.org/10.1016/s0021-9797(03)00716-1)
4. Kurenkov V. F., Hartan H. G., Lobanov F. I. Application of polyacrylamide flocculants for water treatment. *Khimiya i komp'yuternoe modelirovanie. Butlerov. Soobshch = Chemistry and Computational Simulation. Butlerov Communications*, 2002, no. 11, pp. 31–40 (in Russian).
5. Gandurina L. V. *Wastewater treatment using synthetic flocculants*. Moscow, DAR/VODGEO Publ., 2007. 198 p. (in Russian).
6. Rabiee A., Ershad-Langroudi A., Zeynali M. E. A survey on cationic polyelectrolytes and their applications: acrylamide derivatives. *Reviews in Chemical Engineering*, 2015, vol. 31, no. 3, pp. 239–261. <https://doi.org/10.1515/revce-2014-0056>
7. Baiburudov T. A., Shipovskaya A. B. *Synthesis, chemical and physicochemical properties of acrylamide polymers*. Saratov, Saratovskii istochnik Publ., 2019. 94 p. (in Russian).
8. Tavrizov O. A., Weitzer Yu., Klyachko Yu. A. Obtaining a water-soluble cationic polymer by polymeranalogical transformation of polyacrylamide by the Mannich reaction. *Zhurnal Vsesoyuznogo khimicheskogo obshchestva im. D. I. Mendeleeva [Journal of the All-Union Chemical Society]*, 1986, vol. 31, no. 1, pp. 110–112 (in Russian).
9. Yakubovsky S. F., Molotok E. V., Linnik V. N., Pankin A. A. Investigation of flocculation properties of polyelectrolytes obtained by polymeranalogical transformation of polyacrylamide. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C. Fundamental'nye nauki = Vestnik of Polotsk State University. Part C. Fundamental Sciences*, 2009, no. 9, pp. 134–139 (in Russian).
10. Vorobieva E. V., Soldatov V. S. Adsorption of polyacrylamide and its ionogen copolymers on kaolin from salt 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).
11. Kabanov V. A. (ed.). *Workshop on macromolecular compounds*. Moscow, Khimiya Publ., 1985. 224 p. (in Russian).
12. Hesselink F. Th., Hesselink F. Th. On the theory of polyelectrolyte adsorption: The effect on adsorption behavior of the electrostatic contribution to the adsorption free energy. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1977, vol. 60, no. 3, pp. 448–466. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(77\)90309-5](https://doi.org/10.1016/0021-9797(77)90309-5)
13. Tadros T. Interaction forces between particles containing grafted or adsorbed polymer layers. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2003, vol. 104, no. 1–3, pp. 191–226. [https://doi.org/10.1016/s0001-8686\(03\)00042-3](https://doi.org/10.1016/s0001-8686(03)00042-3)

Информация об авторах

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

Крутько Николай Павлович – академик НАН Беларуси, 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

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

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

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

Липай Юлия Владимировна – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: yuliya.M@tut.by

Information about the authors

Vorobiev Pavel D. – 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: pdvc@tut.by

Krutko Nikolay P. – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, 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

Cherednichenko Denis V. – 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

Vorobieva Elena V. – D. Sc. (Chemistry), Professor, Head of the Laboratory. 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: evorobieva@igic.bas-net.by

Bucha Sviatlana V. – 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: bucha1003@gmail.com

Lipai Yuliya V. – Ph. D. (Chemistry), Senior 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: yuliya.M@tut.by