Римма Михайловна Несмеянова – химия ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор (доцент), «Химия және химиялық технологиялар» кафедрасының профессоры, Павлодар қаласы, Торайгыров университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: nesmeyanova.r@tou.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5949-4023.

Софья Руслановна Масакбаева* – химия ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор (доцент), «Химия және химиялық технологиялар» кафедрасының профессоры, Павлодар қаласы, Торайгыров университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: sofyamassakbayeva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8668-472X.

Светлана Юрьевна Ковтарева – «Химия және химиялық технологиялар» кафедрасының аға оқытушысы, Павлодар қаласы, Торайгыров университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: kovtarsw@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3946-1344.

Олжас Ержанович Мукашев – «Химия және химиялық технологиялар» кафедрасының аға оқытушысы, Павлодар қаласы, Торайгыров университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: mukashev.o@teachers.tou.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8040-6515.

Information about the authors

Yaroslav Andriyenko – master's student of the department «Chemistry and Chemical Technology»; Toraigyrov University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan; e-mail: yaroslav.andrienko2002@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-6295-2170.

Rimma Nesmeyanova – candidate of Chemical Science, associate Professor, Professor of the Department «Chemistry and Chemical Technology», Toraigyrov University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan; e-mail: nesmeyanova.r@tou.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5949-4023.

Sofya Massakbayeva* – candidate of Chemical Science, associate Professor, Professor of the Department «Chemistry and Chemical Technology»; Toraigyrov University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan; e-mail: sofyamassakbayeva@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8668-472X.

Svetlana Kovtareva – senior teacher at the Department «Chemistry and Chemical Technology»; Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan; e-mail: kovtarsw@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3946-1344.

Olzhas Mukashev – senior teacher at the Department «Chemistry and Chemical Technology»; Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan; e-mail: mukashev.o@teachers.tou.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8040-6515.

Received 01.06.2026
Revised 08.09.2026
Accepted 09.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-90

CC BY 4.0
Check for updates

МРНТИ: 31.25.15

Ш.А. Муздыбаева[*], К.Б. Мусабеков[2], Н.К. Нокербекова[1], А.Ж. Женисова[1], Д.М-К Ибраимова[2]

[1]Международный инженерно-технологический университет,
050060, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 93 Г/5,
[2]Казахский Национальный университет имени аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71,
[*]e-mail: Sharbanu1958@mail.ru

ФЛОКУЛЯЦИЯ ГИДРОСУСПЕНЗИИ БЕНТОНИТОВОЙ ГЛИНЫ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ В ОЧИСТКЕ ШАХТНОЙ ВОДЫ ГОРНОРУДНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ, ПОЛИАКРИЛАМИДНЫМИ ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТАМИ

Аннотация: *Восточно-Казахстанская область обладает значительными запасами бентонитовых глин Таганского месторождения, которые характеризуются высокой сорбционной емкостью и способностью эффективно удалять ионы тяжёлых металлов из шахтных вод горнорудной промышленности до уровня предельно-допустимой концентрации рыбохозяйственного назначения.*

Однако применение бентонита сопровождается увеличением мутности очищаемой воды, что ограничивает его практическое использование в водоёмах. Для решения данной проблемы

©Ш.А. Муздыбаева, К.Б. Мусабеков, Н.К. Нокербекова, А.Ж. Женисова, Д.М-К Ибраимова, 2026

предложено использовать водорастворимые полиэлектролиты (ВРП) – производных полиакриламида катионного (Zetag-89) и анионного (Magnoflok-156) типов.

Установлено, что последовательное введение катионного и анионного ВРП приводит к формированию первичных, и в дальнейшем вторичных флокул, обладающих повышенной степенью компактизации, что обеспечивают ускоренную седиментацию, снижению мутности воды при сохранении высокой эффективности сорбции тяжёлых металлов.

Научная новизна работы заключается в разработке органоминеральных композиционных материалов нового поколения, основанных на сочетании природных минералов и синтетических полимеров. Такие материалы позволяют не только достичь глубокой очистки промышленных вод, но и минимизировать побочные эффекты, связанные с использованием природных сорбентов. Практическая значимость исследования состоит в возможности внедрения предложенной технологии для комплексной очистки шахтных вод горнорудной промышленности, что отвечает современным требованиям охраны окружающей среды по Международной Концепции устойчивого развития.

Ключевые слова: *бентонитовая глина, полиэлектролиты, флокуляция, шахтная вода, флокулирующая активность, приведенная вязкость, седиментация.*

Введение. Используемый в настоящее время традиционный метод очистки шахтной воды (ШВ) горнорудной промышленности, основанный на осаждении тяжелых металлов (ТМ) гидрооксидом железа, образующегося в момент нейтрализации (известкования), не всегда обеспечивает достижение норм предельно-допустимой концентрации рыбохозяйственного назначения ($ПДК_{р.-х.н.}$). В последнее время для извлечения ионов ТМ используют природные материалы – бентонитовые глины (БГ), которые обладают высокой сорбционной емкостью, селективностью катионного обмена.

Установлено, что использование термо-кислотноактивированной формы БГ 14-го горизонта Таганского месторождения Восточно-Казахстанской области (ВКО) позволяет удалить ионы ТМ Cu^{2+}, Pb^{2+}, Cd^{2+} и Zn^{2+} на 99,6; 94,7; 98,9 и 99,5% соответственно при установленных оптимальных условиях (pH 8,0-8,5; время контакта 15 мин; расход бентонита 6 г/дм³) [1-3]. Однако применение бентонита в очистке ШВ сопровождается повышением мутности, контролируемой по нормативам ПДК взвешенных веществ (0,25 мг/дм³ для высшей категории и 0,75 мг/дм³ для первой категории) [4]. Для ускорения седиментации гидросуспензии и снижения мутности целесообразно использовать водорастворимые полиэлектролиты (ВРП) и их композиции в качестве флокулянтов.

Известно, что эффективность флокулянтов зависит от природы, поверхностных характеристик дисперсной фазы, параметров полимерных флокулянтов [5]. В этой связи анализ математической модели, механизма кинетики флокуляции гидросуспензии БГ в присутствии ВРП, позволяет выбрать оптимальный режим осаждения взвешенных веществ (ВВ), сочетающий минимальный расход с максимальной интенсивностью водоочистки, что дает возможность оперативно использовать их для очистки производственных вод.

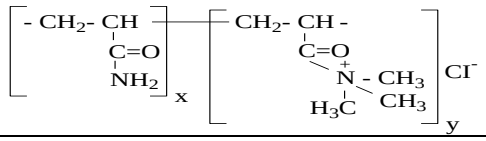
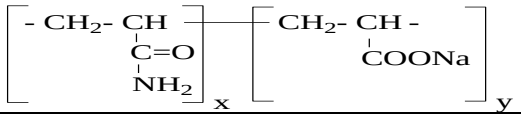
Материалы и методы исследования

Седиментационный анализ проведен по накоплению массы частиц дисперсной фазы с помощью торсионных весов (ВТ 500) по изменению массы частиц, оседающих на чашечку, помещенную в стеклянный цилиндр со суспензией исследуемого образца [6]. Вязкость растворов ВРП определяли на вискозиметре Уббелоде с висячим уровнем и временем истечения растворителя в пределах ~ 170-175 с. Эффективность флокуляции, под действием ВРП, оценивали по изменению приведённой вязкости системы по лабораторному практикуму [7]. В качестве флокулирующих агентов были испытаны ВРП катионного Zetag-89 и анионного Magnafloc-156 типов, характеристики которых представлены в таблице 1. Для модельной дисперсной системы использованы узкие фракции БГ 14-горизонта Таганского месторождения ВКО. Для устранения эффекта стесненного оседания, кинетику флокуляции проводили в режиме свободного падения.

Результаты и их обсуждение

Известно, что результативность применения ВРП зависит, прежде всего, от природы структурообразующего минерала, коллоидно-химических свойств частиц дисперсной фазы, используемой в качестве сорбирующего материала, а также параметров полимерных флокулянтов, вводимых для ускорения седиментации взвешенных веществ [8-10].

Таблица 1–Характеристика синтетических полиэлектролитов, использованных для флокуляции гидросуспензии бентонитовой глины

Полимер	Структурная формула	[η], дл/г
Zetag-89 (катионный		12
Magnaflok-156 (анионный)		13

Для выявления наиболее эффективного ВРП проанализированы три режима ввода их в гидросуспензию БГ: 1-режим, сначала Zetag-89 [К], затем Magnaflok-156 [А]; 2-режим, сначала Magnaflok-156 [А], затем Zetag-89 [К]; 3-режим, поликомплекс (предварительно смешивают Magnaflok-156 [А] и Zetag-89 [К]). Для описания влияния ВРП на седиментационную устойчивость системы был использован безразмерный параметр (γ-флокулирующий эффект) [6,7], который прямо пропорционален скорости седиментации дисперсной фазы в присутствии флокулянта и обратно пропорционален скорости седиментации в отсутствии флокулянта был рассчитан по формуле (1):

$$\gamma = \frac{\vartheta}{\vartheta_o} - 1 = \frac{\tau_{1/2(c=0)}}{\tau_{1/2(c)}} - 1, \qquad (1)$$

где, ϑ и ϑ_o – скорости седиментации в присутствии и отсутствии флокулянтов; $\tau_{1/2(c=0)}$ и $\tau_{1/2(c)}$ – время накопления половины массы осадка, соответственно, без добавок и в присутствии ВРП.

Для количественной оценки доли флокулирующего эффекта каждого из компонентов в бинарной смеси флокулянтов также рассчитаны флокулирующие активности компонентов. Известно [9, 14], что флокулирующую активность в расчете на единицу добавки характеризует величина λ, рассчитанной по формуле (2):

$$\lambda_i = \frac{\gamma}{c_i} = \left[\frac{\tau_{1/2(c=0)}}{\tau_{1/2(c)}} - 1\right]\frac{1}{c_i} \qquad (2)$$

где, $\tau_{1/2(c=0)}$ и $\tau_{1/2(c)}$ – время накопления половины (от максимальной) массы осадка, соответственно, без добавок и в присутствии ВРП, C_i – концентрация компонентов [А] и [К].

Полученные данные для трех режимов ввода компонентов при соотношении [А]/[К]=1 сведены в табл.2. Флокулирующий эффект−γ в различном режиме ввода компонентов для различных соотношений добавок А (режим1)/А режим 2 приведенные в табл.2 рассчитаны при сохранении постоянной суммарной концентрации ([А]+[К]=const). Необходимо отметить, что приведенная в табл.2 λ'_A − флокулирующая активность второго компонента в первом режиме ввода, когда компонент [К] является постоянной величиной; λ'_K − флокулирующая активность второго компонента во втором режиме ввода, когда компонент [А] является постоянной величиной, рассчитывается также по формуле (2) с учетом режима ввода. Согласно приведенным данным из табл. 2, прослеживается тенденция к увеличению флокулирующего эффекта−γ при первом режиме ввода, сначала [К], затем [А]. С повышением концентрации флокулянтов повышается γ, где максимальный эффект седиментации наблюдается в пределах 1,20-1,75·10^{-3} г/дм^3. Кроме того, из таблицы 2 видно, что при одновременном введении компонентов (поликомплекс) γ (флокулирующая активность) существенно ниже, чем при их последовательном введении. Сопоставление данных показывает, что последовательное введение катионного полиэлектролита Zetag-89, а затем анионного Magnofloc-156 приводит к образованию вторичных флокул, обладающих большей компактностью и размером по сравнению с первичными. Это подтверждает реализацию “мостичного” механизма флокуляции, при котором макромолекулы полимера связывают

несколько частиц одновременно. Таким образом, экспериментальные результаты согласуются с предложенным механизмом и объясняют повышение скорости седиментации при выбранном режиме [8-10]. Сравнительный анализ также демонстрирует соответствие современным зарубежным исследованиям, где показано, что полиакриламидные флокулянты существенно влияют на кинетику седиментации и структуру глинистых суспензий [11,12]. Эти работы подтверждают, что последовательное введение катионного и анионного полиэлектролитов обеспечивает формирование более компактных флокул и ускоряет процесс осаждения, что согласуется с нашими экспериментальными данными. Допускается нейтрализационный механизм нарушения устойчивости дисперсной системы, имеющих заряд противоположный по знаку заряду частиц, в присутствии сильно заряженных ВРП [13-15].

Таблица 2–Параметры флокуляции бентонитовой глины смесями анионного [А]-Magnafloc−156 и катионного [К]−Zetag-89 типов флокулянтов

$(C_A=C_K)\ 10^{-3}$, г/дм^3	Режим ввода компонентов [А] и [К]	γ	1-й режим		2-й режим		$\frac{\lambda'_A}{\lambda_A}$
			λ_K	λ'_A	λ_A	λ'_K	
0,6	1−[К] + [А]	0,45	0,21	0,24			0,63
	2−[А] + [К]	0,32			0,38	0,058	
	3−поликомплекс	0,27					
1,2	1−[К] + [А]	0,64	0,22	0,31			
	2−[А] + [К]	0,52			0,36	0,074	0,86
	3 -поликомплекс	0,47					
1,5	1−[К] + [А]	0,86	0,18	0,36	0,57	0,041	0,63
	2−[А] + [К]	0,75					
	3−поликомплекс	0,51					
1,75	1−[К] + [А]	1,04	0,29	0,23	0,39	0,047	0,59
	2− [А] + [К]	0,86					
	3−поликомплекс	0,79					
2,1	1−[К] + [А]	0,97	0,18	0,12			0.35
	2−[А] + [К]	0,88			0,34	0,060	
	3−поликомплекс	0,75					

Сопоставление флокулирующего эффекта (соотношение (λ'_i/λ_A) и (λ'_i/λ_K, где λ_i.−для i-го компонента «работающего» индивидуально и λ'_i − когда он является второй добавкой) композиции показывает, что флокулянты [А] и [К] выступают с функцией антагонистических добавок, так как их соотношение остается меньше единицы.

Таким образом, сравнение трёх режимов показало, что последовательное введение катионного, а затем анионного полиэлектролита ([К]+[А]) обеспечивает образование более компактных вторичных флокул и максимальный флокулирующий эффект. Обратный порядок ([А]+[К]) даёт менее выраженный результат, а одновременное введение компонентов (поликомплекс) демонстрирует наименьшую эффективность вследствие частичной блокировки активных центров при образовании интерполимерных комплексов.

Для проверки правильности этой гипотезы была проанализирована вязкость растворов [А] и [К], их смесей с различным соотношением компонентов. Экспериментальное значение приведенной вязкости определяли по формуле (3):

$$\eta_{\text{прив,экс}} = \left(\frac{\eta_{уд}}{C}\right)_{эксп} = \frac{\tau - \tau_o}{\tau_o \cdot C} \quad (3)$$

где, τ, τ_o – время истечения раствора и воды, с; С – концентрация раствора, г/дм^3.

Отношение приведенной вязкости компонентов к их концентраций, как теоретическое значение $(\eta_{уд}/c)_{теор}$ для бинарной смеси компонентов подсчитывали по формуле (4):

$$(\frac{\eta_{уд.}}{c})_{теор.} = (\frac{\eta_{уд.}}{c})_A \cdot \omega_A + (\frac{\eta_{уд.}}{c})_K \cdot (1-\omega_A), \quad (4)$$

где, $(\frac{\eta_{уд}}{c})_A$ и $(\frac{\eta_{уд}}{c})_K$ – приведенные вязкости компонентов [А] и [К], ω_A – массовая доля компонента [А] в смеси.

Количественной характеристикой взаимодействия между полимерами [А] и [К] служил параметр у, (формула 5):

$$y = \frac{(\frac{\eta_{уд}}{C})_{эксп}}{(\frac{\eta_{уд}}{C})_{теор}} = \frac{\eta_{прив,экс}}{\eta_{прив.теор.}} \quad (5)$$

Результаты изучения зависимости параметра у от состава бинарной смеси полиакриламидов [К] и [А] для различных валовых концентраций полимеров представлены на рисунке 1. Условие у=1 свидетельствует об отсутствии специфического взаимодействия между компонентами смеси, при у<1 среднеквадратичные размеры макромолекулярных клубков $(\bar{r})^{1/2}$ уменьшаются, при у>1 происходит увеличение $(\bar{r})^{1/2}$.

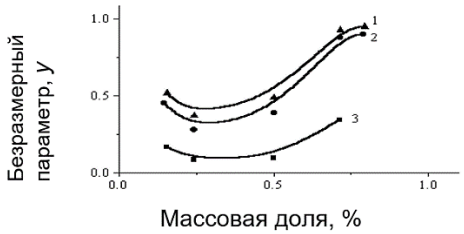


Рисунок 1 – Зависимость параметра у от состава бинарной смеси полиакриламидов [А] и [К] для различных валовых концентраций полимеров: 1-0,1 %; 2-0,005 %; 3-0,01%

Из рисунка 1 видно, что для всех составов [А] + [К] безразмерный параметр у <1, что свидетельствует об уменьшении эффективных размеров макромолекулярных клубков полимеров [А] и [К], чем при их одновременном введении в раствор.

Известно [16-18], что комплексы между полимерами катионного и анионного типов являются сложными полимер-полимерными системами и одновременно осуществляются взаимодействий внутри-и межмолекулярном уровнях, где превалируют силы электростатического взаимодействия, ответственные за внутримолекулярные взаимодействия и за образование интерполимерных комплексов между разнородными парами комплементарных полиэлектролитов. Уменьшение $(\frac{\eta_{уд}}{c})_A$ при наличии в растворе [К] и $(\frac{\eta_{уд}}{c})_K$ при наличии [А] связано с электростатическими взаимодействиями разноименно заряженных макромолекул [А] и [К]. Наиболее сильно этот эффект выражен при соотношениях [К]/[А] ~ 0,4 (минимальные значения параметров у). Смещение минимума для кривых y=f(ω) в сторону компонента [А], вероятно, связано с образованием нестехиометрического интерполимерного комплекса из-за более высоких молекулярных масс анионного ПАА по сравнению с катионным полиакриламидом.

Для проверки этого предположения была изучена концентрационная зависимость приведенной вязкости водных растворов анионного и катионного ПАА и их смесей. Полученные данные представлены на рисунке 2.

Из рисунка 2 видно, что приведенная вязкость ПАА катионного типа (Zetag-89) и ПАА анионного типа (Magnafloc-156) в водном растворе с уменьшением концентрации полиэлектролитов возрастает, что связано с ростом электростатической свободной энергии поли-иона [19-21]. Кроме того, (рис. 2), при титровании катионного ПАА (Zetag-89) анионным ПАА (Magnafloc-156) наблюдается снижение приведенной вязкости $\eta_{пр}$ до 0,2 дл/г при

n= $\frac{[Magnaflok-156]}{[Zetag-89]}$ = 5, в обратном титровании наименьшее значение приведенной вязкости системы $\eta_{пр}$ до 0,2 дл/г наблюдается при значении n = $\frac{[Zetag-89]}{[Magnjflok-156]}$ = 3.

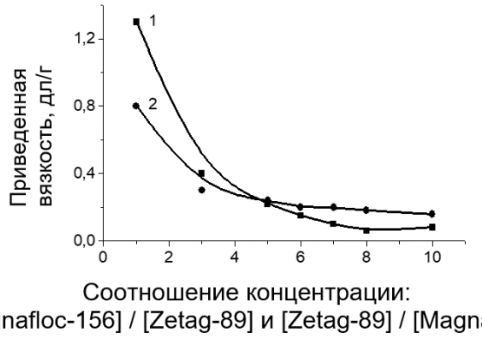
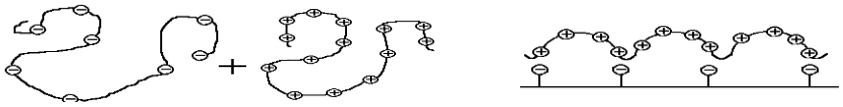
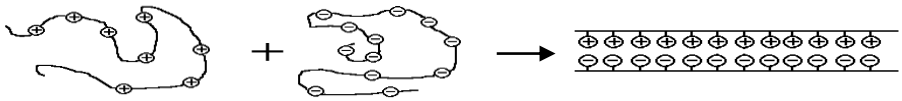


Рисунок 2 –Концентрационная зависимость приведенной вязкости растворов производных полиакриламида катионного и анионного типов, где 1 – Zetag-89 ($0{,}8\cdot10^{-3}$ г/дм^3), 2 – Magnafloc-156 ($0{,}5\cdot10^{-3}$ г/дм^3)

Такие сравнительно малые значения ηпр указывают на образование уплотненных (глобулярных) клубков макромолекул – формирование различных структур, образующих интерполимерные комплексы, где при взаимодействии полиэлектролитов с неодинаковой плотностью заряда, образуются нестехиометричные комплексы следующего строения:



При взаимодействии полиэлектролитов с равной плотностью заряда, по всей вероятности, образуются интерполимерные комплексы так называемого лестничного строения.



Из представленной схемы видно, что электростатическое связывание между противоположно заряженными функциональными группами полиакриламидов катионного и анионного типов должно приводить к изменению заряда вдоль полиэлектролитной цепочки полиакриламида, что не противоречит результатам представленных авторами [19-22].

Таким образом, изучение особенностей кинетики осаждения гидродисперсии БГ в присутствии ВРП различной природы и их смесей показывает, что флокулирующее их действие усиливается при введении в систему сначала катионного, затем анионного полиэлектролитов. ВРП, так как при малых концентрациях (когда макромолекулы находятся в развернутом состоянии) снижается седиментационная устойчивость гидродисперсии в результате адсорбции одной и той же макромолекулы на нескольких частицах с образованием флокул.

Выводы. Установлено, что композиции ВРП−производных полиакриламида−[К]. катионного (Zetag-89) и [А] анионного (Magnoflok−156) при последовательном введении компонентов оказывают лучшее флокулирующее действие, чем при их одновременном введении (поликомплекс) по следующим показателям: – кинетика флокуляции изученной по величине безразмерного параметра (γ) показывает, что образовавшиеся вторичные флокулы, которые были сформированы при взаимодействии гидросуспензий БГ вначале катионным ВРП (первичный флокул) и в дальнейшем анионным ВРП (вторичный флокул) превосходят по своему размеру первичных флокул и седиментируют с большей скоростью с образованием к«мостичного» механизма, а снижение безразмерного параметра (у) указывает на

образование интерполимерных комплексов, где происходит компактизация макромолекулярных участков между агрегируемыми частицами.

Таким образом, результаты проведённых исследований показали, что совместное флокулирующее действие полиэлектролитов катионного и анионного типов на бентонит, применённый для очистки шахтной воды от ионов тяжёлых металлов, усиливается при последовательном введении в систему сначала катионного, затем анионного полиэлектролита. В результате формируется глино-полимерная композиция, обеспечивающая достижение нормативов ПДКр.-х.н. по взвешенным веществам [4].

Представленные результаты исследований выполнены в рамках Программы целевого финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по теме ИРН BR24993113 «Создание композитов на основе дифильных водорастворимых полимеров полифункционального назначения» под научным руководством доктора химических наук, профессора, академика Мусабекова К.Б.

Список литературы

1. Effectiveness of use of nanostructure minerals – bentonite of taganskiy deposit for waste water clearing in metallurgy industry / Sh. Muzdybaeva et al // European Journal of Sustainable Development. – 2014. – № 3(3). – P.19-200.
2. Муздыбаева Ш.А. Исследование наноструктурных минералов – бентонитов, используемых в очистке шахтной воды от ионов Cu2+, Pb2+, Cd2+, Zn2+ / Ш.А. Муздыбаева, Г.Ж. Турсбекова, М.К. Жаманбаева // Вестник Нац. инженерной академии РК. – 2020. – № 4(78). – С. 114-122.
3. Application of bentonite clay as a protective barrier in the disposal of radioactive waste of nuclear industry of Kazakhstan / K.B. Musabekov et al // Известия НАН РК. Серия Химии и технологии. – 2023. – № 1(54). – P. 66-77.
4. Приказ Минсельхоза РФ от 13.06.2024. № 320 О внесении изменений в приказ Минсельхоза РФ от 13.12.2016. № 552 Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения (зарег Минюсте РФ 07.08.2024. № 79044).
5. Flocculation and dewatering of the Kaolin slurry treated by single- and dual-polymer flocculants / S. Xu et al // Chemosphere. – 2023. – Vol. 328. – Art. 138445.
6. Седиментационный анализ / Е.С. Аманжолова и др. – Алматы, 2002. – 28 с.
7. Савицкая Т.А. Коллоидная химия: Лабораторный практикум. В 2 ч. Дисперсные системы / Т.А. Савицкая, М.Б. Черепенников, М.П. Шевелева. – Минск, БГУ, 2012. – 200 с.
8. Effect of formation of hydrophilic and hydrophobic-hydrophilic associates on the nature of phase transitions in solutions of copolymers of N-vinylpyrrolidone with methylacrylate and the formation of their complexes with polyacrylic acid / R. Shaikhutdinov et al // Polymers. – 2024. – № 16(584). – P. 1-19.
9. Flocculation of Clay Suspensions by Anionic and Cationic Polyelectrolytes: A Systematic Analysis / A. Shakeel et al // Minerals. – 2020. – Vol. 10, № 11. – Art. 999.
10. Musabekov K.B. Flocculation of kaolin hydrosuspenzion water-soluble polymers and their associates / K.B. Musabekov, Sh.A. Muzdybaeva, Sh. Barany // Abstracts The 4th Asian Symposium on Advanced Materials-Chemistry, Physics & Biomedicine of Functional and Novel Materials, (ASAM-4). Taiwan, October 22-23. – 2013. – P.114.
11. Nonionic polyacrylamide-clay interaction: Insight from sedimentation experiments and viscosity / Y. Choe et al // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2025. – Vol. 13, Issue 5. – Article 118597. https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.118597.
12. Anionic Polyacrylamide Combined with Slag for Enhancing Flocculation–Preloading–Electro-Osmosis Consolidation of High-Water-Content Bentonite Slurry / K. Wang et al // Applied Sciences. – 2026. – Vol. 16, № 13. – Article 6748. https://doi.org/10.3390/app16136748.
13. Adsorption and aggregation of cationic amphiphilic polyelectrolytes on silica / Y. Samoshina et al // Langmuir. – 2005. – Vol. 21, № 7. – P. 2855-2864.
14. Тусупбаев Н.К. Новые композиционные флокулянты / Н.К. Тусупбаев, К.Б. Мусабеков // Химия и химическая технология. – 2001. – № 1. – С. 113-137.

15. El-Mossalamy. Adsorption of Polyvinylpyrrolidone over the Silica Surface: As Affected by Pretreatment of Adsorbent and Molar Mass of Polymer Adsorbate / L.M. Al-Harbi et al // International Journal of Polymer Science. – 2016. – Vol. 2016. – Article ID 2417292.
16. Flocculation of Clay Colloids Induced by Model Polyelectrolytes: Effects of Relative Charge Density and Size / Y. Sakhawoth et al // ChemPhysChem. – 2017. – Vol. 18. – P. 2756-2765.
17. Stabilization of melon cloudy juice with biopolymer agar / S. Tazhibayeva et al // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – № 4 (11). – P. 31-38.
18. Modified graft copolymers based on ethylene vinyl acetate as depressants for waxy crude oil and their effect on the rheological properties of oil / G. Mun et al // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – Vol. 213. – Art. 110298.
19. Surface modification of montmorillonite clay with organic molecules / K.B. Musabekov et al // Rasayan Journal of Chemistry. – 2021. – № 14(1). – P. 635-640.
20. Влияние концентрации дисперсной фазы на закономерности флокуляции латекса катионным полиэлектролитом / В.Н. Вережников и др. // Коллоидн. журн. – 2000. – Т. 62, № 1. – С. 26-30.
21. Feng L. Dynamics of Polyelectrolyte Adsorption and Colloidal Flocculation upon Mixing Studied Using Monodispersed Polystyrene Latex Particles / L. Feng, M.A. Cohen Stuart, Y. Adachi // Langmuir. – 2015. – Vol. 31. – P. 850-857.
22. Surface interaction between phyllosilicate particles and sustainable polymers in flotation and flocculation / N. Molaei et al // RSC Advances. – 2022. – Vol. 12. – P. 3708-3715.

References

1. Effectiveness of use of nanostructure minerals – bentonite of taganskiy deposit for waste water clearing in metallurgy industry / Sh. Muzdybaeva et al // European Journal of Sustainable Development. – 2014. – № 3(3). – P.19-200. (in English).
2. Muzdybaeva Sh.A. Issledovanie nanostrukturnykh mineralov – bentonitov, ispol'zuemykh v ochistke shakhtnoi vody ot ionov Cu2+, Pb2+, Cd2+, Zn2+ / Sh.A. Muzdybaeva, G.Zh. Tursbekova, M.K. Zhamanbaeva // Vestnik Nats. inzhenernoi akademii RK. – 2020. – № 4(78). – S. 114-122. (in Russian).
3. Application of bentonite clay as a protective barrier in the disposal of radioactive waste of nuclear industry of Kazakhstan / K.B. Musabekov et al // Izvestiya NAN RK. Seriya Khimii i tekhnologii. – 2023. – № 1(54). – R. 66-77. (in English).
4. Prikaz Minsel'khoza RF ot 13.06.2024. № 320 O vnesenii izmenenii v prikaz Minsel'khoza RF ot 13.12.2016. № 552 Ob utverzhdenii normativov kachestva vody vodnykh ob"ektov rybokhozyaistvennogo znacheniya (zareg Minyuste RF 07.08.2024. № 79044). (in Russian).
5. Flocculation and dewatering of the Kaolin slurry treated by single- and dual-polymer flocculants / S. Xu et al // Chemosphere. – 2023. – Vol. 328. – Art. 138445. (in English).
6. Sedimentatsionnyi analiz / E.S. Amanzholova i dr. – Almaty, 2002. – 28 s. (in Russian).
7. Savitskaya T.A. Kolloidnaya khimiya: Laboratornyi praktikum. V 2 ch. Dispersnye sistemy / T.A. Savitskaya, M.B. Cherepennikov, M.P. Sheveleva. – Minsk, BGU, 2012. – 200 s. (in Russian).
8. Effect of formation of hydrophilic and hydrophobic-hydrophilic associates on the nature of phase transitions in solutions of copolymers of N-vinylpyrrolidone with methylacrylate and the formation of their complexes with polyacrylic acid / R. Shaikhutdinov et al // Polymers. – 2024. – № 16(584). – R. 1-19. (in English).
9. Flocculation of Clay Suspensions by Anionic and Cationic Polyelectrolytes: A Systematic Analysis / A. Shakeel et al // Minerals. – 2020. – Vol. 10, № 11. – Art. 999. (in English).
10. Musabekov K.B. Flocculation of kaolin hydrosuspenzion water-soluble polymers and their associates / K.B. Musabekov, Sh.A. Muzdybaeva, Sh. Barany // Abstracts The 4th Asian Symposium on Advanced Materials-Chemistry, Physics & Biomedicine of Functional and Novel Materials, (ASAM-4). Taiwan, October 22-23. – 2013. – P.114. (in English).
11. Nonionic polyacrylamide-clay interaction: Insight from sedimentation experiments and viscosity / Y. Choe et al // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2025. – Vol. 13, Issue 5. – Article 118597. https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.118597. (in English).
12. Anionic Polyacrylamide Combined with Slag for Enhancing Flocculation–Preloading–Electro-Osmosis Consolidation of High-Water-Content Bentonite Slurry / K. Wang et al // Applied Sciences. – 2026. – Vol. 16, № 13. – Article 6748. https://doi.org/10.3390/app16136748. (in English).

13. Adsorption and aggregation of cationic amphiphilic polyelectrolytes on silica / Y. Samoshina et al // Langmuir. – 2005. – Vol. 21, № 7. – P. 2855-2864. (in English).
14. Tusupbaev N.K. Novye kompozitsionnye flokulyanty / N.K. Tusupbaev, K.B. Musabekov // Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya. – 2001. – № 1. – S. 113-137. (in Russian).
15. El-Mossalamy. Adsorption of Polyvinylpyrrolidone over the Silica Surface: As Affected by Pretreatment of Adsorbent and Molar Mass of Polymer Adsorbate / L.M. Al-Harbi et al // International Journal of Polymer Science. – 2016. – Vol. 2016. – Article ID 2417292. (in English).
16. Flocculation of Clay Colloids Induced by Model Polyelectrolytes: Effects of Relative Charge Density and Size / Y. Sakhawoth et al // ChemPhysChem. – 2017. – Vol. 18. – P. 2756-2765. (in English).
17. Stabilization of melon cloudy juice with biopolymer agar / S. Tazhibayeva et al // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – № 4 (11). – R. 31-38. (in English).
18. Modified graft copolymers based on ethylene vinyl acetate as depressants for waxy crude oil and their effect on the rheological properties of oil / G. Mun et al // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – Vol. 213. – Art. 110298. (in English).
19. Surface modification of montmorillonite clay with organic molecules / K.B. Musabekov et al // Rasayan Journal of Chemistry. – 2021. – № 14(1). – R. 635-640. (in English).
20. Vliyanie kontsentratsii dispersnoi fazy na zakonomernosti flokulyatsii lateksa kationnym poliehlektrolitom / V.N. Verezhnikov i dr. // Kolloidn. zhurn. – 2000. – T. 62, № 1. – S. 26-30. (in Russian).
21. Feng L. Dynamics of Polyelectrolyte Adsorption and Colloidal Flocculation upon Mixing Studied Using Monodispersed Polystyrene Latex Particles / L. Feng, M.A. Cohen Stuart, Y. Adachi // Langmuir. – 2015. – Vol. 31. – P. 850-857. (in English).
22. Surface interaction between phyllosilicate particles and sustainable polymers in flotation and flocculation / N. Molaei et al // RSC Advances. – 2022. – Vol. 12. – P. 3708-3715. (in English).

Ш.А. Мұздыбаева[*], Қ.Б. Мұсабеков[2], Н.Қ. Нөкербекова[1], А.Ж. Жеңісова[1], Д.М-К Ибраимова[2]
[1*]Халықаралық инженерлік-технологиялық университеті,
050060, Қазахстан Республикасы, Алматы қ,әль-Фараби даңғылы, 93г/5,
[2]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазахстан Республикасы, Алматы қ,әль-Фараби даңғылы, 71
*e-mail: Sharbanu1958@mail.ru

ТАУ-КЕН ӨНЕРКӘСІБІНДЕГІ ШАХТА СУЛАРЫН ТАЗАРТУДА ҚОЛДАНЫЛАТЫН БЕНТОНИТ БАЛШЫҒЫ ГИДРОСУСПЕНЗИЯСЫНЫҢ ПОЛИАКРИЛАМИДТІ ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТТЕРМЕН ФЛОКУЛЯЦИЯСЫ

Шығыс Қазақстан облысы Таған кен орнындағы бентонит балшықтары жоғары сорбциялық сыйымдылыққа ие болғандықтан тау-кен өнеркәсібі шахта суларынан ауыр металл иондарын, балық шаруашылығы үшін белгіленген шекті рұқсат етілген концентрация (ШРК) деңгейіне дейін тазарта алады. Дегенмен, бентонитті қолдану тазартылған судың лайлылығын арттырып, практикалық қолданылуына кедергі келтіреді.

Бұл мәселені шешу үшін суда еритін полиэлектролиттер (СЕП) – катиондық (Zetag-89) және аниондық (Magnoflok-156) полиакриамид туындыларын қолдану ұсынылады. Нәтижесінде, катиондық және аниондық СЕП-ді кезекпен енгізу арқылы жоғары компактизацияланған бірінші және екінші реттік флокулалар түзіледі. Бұл судың лайлылығын төмендетіп, ауыр металл иондарын сорбциялау тиімділігін сақтай отырып, тұндыру үрдісін жылдамдатады. Зерттеудің ғылыми жаңалығы табиғи минералдар мен синтетикалық полимерлерді біріктіретін жаңа буын - органоминералды композициялық материалды өндірістік суларды ШРК дейін терең тазартуға мүмкіндік береді. Практикалық маңызы – ұсынылған технология тау-кен өнеркәсібі шахта суларын кешенді тазарту үшін қолдану мүмкіндігі, әрі қоршаған ортаны қорғаудың Халықаралық тұрақты даму концепциясына сәйкес келеді.

Түйін сөздер: *бентонит балшығы, полиэлектролиттер, флокуляция, шахталық су, флокуляциялық белсенділік, салыстырмалы тұтқырлық, тұндыру.*

Sh. Muzdybaeva[*], K. Musabekov[2], N. Nokerbekova[1], A. Zhenisova[1], D. Ibraimova[2]
[1]International University of Engineering and Technology,
050060, Republik Kazakhstan, Almaty; 93г/5 al-Farabi Avenue
[2] Al-Farabi Kazakh National University,
050040, Republik Kazakhstan, Almaty; 71 al-Farabi Avenue
*e-mail: sh.muzdybaeva@kazetu.kz

FLOCCULATION OF BENTONITE CLAY SUSPENSION USED IN MINE WATER TREATMENT OF THE MINING INDUSTRY BY POLYACRYLAMIDE POLYELECTROLYTES

East Kazakhstan region possesses significant reserves of bentonite clays from the Tagan deposit, which are characterized by high sorption capacity and the ability to effectively remove heavy metal ions from mine waters of the mining industry down to the permissible concentration level for fisheries. However, the use of bentonite increases the turbidity of treated water, which limits its practical application in water bodies.

To address this issue, water-soluble polyelectrolytes (WSP) – cationic (Zetag-89) and anionic (Magnoflok-156) derivatives of polyacrylamide – are proposed as flocculants. Sequential introduction of cationic and anionic WSP leads to the formation of primary and secondary flocs with enhanced compaction. This accelerates sedimentation and reduces turbidity while maintaining high efficiency of heavy metal sorption. The scientific novelty of the study lies in the development of next-generation organo-mineral composite materials that combine natural minerals and synthetic polymers. Such materials enable deep purification of industrial waters and minimize side effects associated with natural sorbents. The practical significance of the research consists in the possibility of implementing the proposed technology for comprehensive mine water treatment, which meets modern environmental protection requirements and supports sustainable development of the mining industry.

Key words: *bentonite clay, polyelectrolytes, flocculation, mine water, flocculating activity, reduced viscosity, sedimentation.*

Сведения об авторах

Шарбану Акказиновна Муздыбаева* − кандидат химических наук, ассй профессор кафедры «Биохимическая инженерия» Международного инженерно-технологического университета, Алматы, Казахстан; e-mail: Sharbanu1958@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4882-3845.

Куанышбек Битуович Мусабеков − доктор химических наук, академик Высшей школы РК**,** профессор кафедры «Аналитическая, коллоидная химия и технология редких элементов» Казахского Национального университета имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан; e-mail: musabekov40@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1114-1901.

Назым Кыдырхановна Нокербекова − PhD, асс.профессор кафедры «Биохимическая инженерия» Международного инженерно-технологического университета, Алматы, Казахстан; e-mail: nnazik@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5761-8993.

Акбота Женискызы Женисова − кандидат химических наук, директор департамента по академическим вопросам Международного инженерно-технологического университета, Алматы, Казахстан; e-mail: zhenisova_a@metu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5474-7328.

Дана Мыкты-Кереевна Ибраимова − кандидат химических наук, старший преподаватель, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан; e-mail: dana_kereevna@kaznu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1761-9745.

Авторлар туралы мәліметтер

Шарбану Акказиновна Мұздыбаева* − химия ғылымдарының кандидаты, Халықаралық инженерлік-технологиялық университеті «Биохимиялық инженерия» кафедрасының қауым. профессоры, Алматы, Қазақстан; e-mail: Sharbanu1958@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4882-3845.

Куанышбек Битуович Мұсабеков −химия ғылымдарының докторы, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті «Аналитикалық, коллоидтық химия және сирек элементтер технологиясы» кафедрасының профессоры, Алматы, Қазақстан; e-mail: musabekov40@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1114-1901.

Назым Кыдырхановна Нөкербекова − PhD, Халықаралық инженерлік-технологиялық университеті «Биохимиялық инженерия» кафедрасының қауым. проф., Алматы, Қазақстан; e-mail: nnazik@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5761-8993.

Ақбота Жеңісқызы Жеңісова − химия ғылымдарының кандидаты, Халықаралық инженерлік-технологиялық университеті Академиялық мәселелер жөніндегі департаменттың директоры, Алматы, Қазақстан; e-mail: zhenisova_a@metu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5474-7328.

Дана Мыкты-Кереевна Ибраимова − химия ғылымдарының кандидаты, аға оқытушы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті; Алматы, Қазақстан; e-mail: dana_kereevna@kaznu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1761-9745.

Information about the author

Sharbanu Muzdydayeva* − Candidate of chemical sciences, Ass.Professor Department of "Biochemical Engineering" International Engineering and Technological University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: Sharbanu1958@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4882-3845.

Kuanyshbek Musabekov − doctors of chemical sciences, Professor Department of Analytical, Colloid Chemistry and Technology of Rare Elements Al-Farabi Kazakh National University. Almaty, Kazakhstan; e-mail: musabekov40@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1114-1901.

Nazym Nokerbekova − PhD, Ass. Professor Department of «Biochemical Engineering» International Engineering and Technological University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: nnazik@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5761-8993.

Akbota Zhenisova − Candidate of chemical sciences, Director of the Department of Academic AffairsInternational Engineering Technological University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: zhenisova_a@metu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5474-7328.

Dana Mykty-Kereevna Ibraimova − Candidate of chemical sciences, Senior Lecturer, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: dana_kereevna@kaznu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1761-9745.

Поступила в редакцию 23.06.2026
Поступила после доработки 27.08.2026
Принята к публикации 01.09.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-91

CC BY 4.0
Check for updates

ҒТАХР: 31.21.27

Р.А. Турманов*, Б.Г. Алимхан, Р.У. Жаппарбергенов, Н.Ә. Тоғызбаева, Н.О. Аппазов
Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті,
120014, Қазақстан Республикасы, Қызылорда, Айтеке би көшесі, 29 А
*e-mail: rakowrakha@gmail.com

4*H*-1,2,4-ОКСАДИАЗИН-5(6*H*)-ОН ЖАҢА ТУЫНДЫЛАРЫНЫҢ СИНТЕЗІ

Аңдатпа: *Бұл жұмыста медицина және фармацевтика саласында қолдануға кең әлеуеті бар гетероциклді қосылыстардың маңызды түрі болып табылатын 4H-1,2,4-оксадиазин-5(6H)-онның жаңа туындыларын синтездеудің жетілдірілген әдісі ұсынылған. Синтез N'-гидрокси-4-метилбензимид және N'-гидрокси-5-метилтиофен-2-карбоксимидидтің карбон қышқылдарының метил және этил галоген туындыларымен әрекеттесуіне негізделген. Зерттеу барысында диметиосульфоксид ерітіндісіндегі натрий трет-бутилатын бөлме температурасында қолдану 76%-ға дейінгі шығыммен мақсатты өнімдердің түзілуі кезіндегі тиімді цикл түзілуді қамтамасыз ететіні анықталды. Бастапқы амидоксимдердің ароматты немесе гетероциклді фрагментіндегі орынбасарлардың әсері реакцияның жүруіне айтарлықтай әсер етпейтіндігі анықталды, бұл ұсынылған тәсілдің жан-жақтылығын көрсетеді. Барлық синтезделген қосылыстар ядролық магниттік резонанс және жоғары дәлдіктегі масс-спектрометр сияқты заманауи талдау әдістерімен сипатталды, бұл олардың құрылымы мен тазалығын толық растады. Әзірленген әдіс улы реагенттерді немесе метал катализаторларын пайдалануды қажет етпейтіндіктен, жұмсақ жағдайларымен, реакцияны жүргізудің қарапайымдылығымен және экологиялық тазалығымен сипатталады. Алынған оксадиазин туындылары жоғары биологиялық қасиеті бойынша, бактерияға қарсы, ісікке қарсы және нейропроткеторлық қасиеттері бар перспективалы фармакофорлар ретінде ерекше қызығушылық тудырады. Жүргізілген бағытталған синтез нәтижелері құрылымды түрлендіру және жаңа гетероциклді жүйелердің биологиялық белсенділігін зерттеу бағытындағы ғылыми жұмыстарды әрі қарай дамытуға негіз болады.*

Түйін сөдер: *4H-1,2,4-оксадиазин-5(6H)-он, амидоксимдер, циклдену, гетероциклді қосылыстар, реакцияны оңтайландыру, спектроскопиялық сипаттама.*

©Р.А. Турманов, Б.Г. Алимхан, Р.У. Жаппарбергенов, Н.Ә. Тоғызбаева, Н.О. Аппазов